



Les études géologiques dans les projets de barrages

Bernard Couturier

► To cite this version:

Bernard Couturier. Les études géologiques dans les projets de barrages. Géologie appliquée. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1987. Français. NNT : . tel-00785561

HAL Id: tel-00785561

<https://theses.hal.science/tel-00785561>

Submitted on 6 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GEOLOGIE GRENOBLE UJF



D

050 030855 7

BERNARD COUTURIER

**LES ÉTUDES GÉOLOGIQUES
DANS LES PROJETS DE BARRAGES**

1987

Bernard COUTURIER

DOCTEUR D'ÉTAT ÈS SCIENCES

UNIVERSITE DE GRENOBLE II
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

LES ÉTUDES GÉOLOGIQUES DANS LES PROJETS DE BARRAGES

12 DEC. 1988

Publié avec le concours de
la Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône - Languedoc (Nîmes)
la Société d'études géotechniques et géophysiques (Paris)
L'Institut de recherches interdisciplinaires de géologie et de mécanique (Grenoble)

NNB 100 89394

1987

*A Sophie,
Laurent et Jérôme,*

*pour toutes ces heures
que nous aurions pu passer ensemble.*

AVANT – PROPOS

C'est à mon père, le docteur Paul COUTURIER, et à mon oncle, le docteur Marcel COUTURIER, que je dois mon goût pour les sciences naturelles et la géologie en particulier, disciplines pour lesquelles ils étaient tous deux passionnés. Je tiens ici à honorer leur mémoire.

Après mes études de géologie générale à l'Université de Grenoble, Monsieur le Professeur R. BARBIER, membre de l'Académie des sciences, m'a initié à la géologie appliquée et a su, par l'exposé des nombreux exemples qu'il a vécus à travers le monde, développer mon intérêt pour la géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Je le remercie bien sincèrement d'avoir guidé le choix de ma carrière et accepté de présider ce Jury.

Grâce à son intervention, je suis entré en 1974 à la Compagnie nationale d'aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc (C.N.A.R.B.R.L.) à Nîmes, au sein de la section géologie dirigée par G. CHEYLAN. Nous eûmes alors, jusqu'en 1983, une collaboration étroite et je pus bénéficier de sa grande expérience des barrages et de ses conseils avisés d'une façon quasi quotidienne. Le travail présenté dans ces pages lui doit beaucoup. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude pour m'avoir appris mon métier et pour les relations de sympathie qui en ont résulté.

Pendant tout ce temps, j'avais gardé des contacts très amicaux avec Monsieur le Professeur P. ANTOINE, lui aussi rompu aux problèmes de géologie du Génie civil. A la suite de fréquentes discussions sur ce sujet, il m'a conforté dans l'idée de mettre noir sur blanc l'expérience vécue à la C.N.A.R.B.R.L. et de montrer les applications que l'on pouvait en tirer. Il m'a alors guidé dans cette voie en me demandant de m'appuyer sur les nombreux exemples que j'avais traités. Je le remercie pour le soutien qu'il m'a apporté et pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée pendant ces années.

J'assure également de toute ma reconnaissance Monsieur le Professeur P. BROQUET pour avoir accepté la charge de rapporteur extérieur de cette thèse et s'être aussi spontanément intéressé à mon sujet, malgré ses multiples occupations.

Je ne saurais oublier mes amis géologues et compagnons de terrain qui ont participé à de nombreux levés et au dépouillement des données brutes de travaux de sondage et d'injection, Messieurs H. PANNUZZI et P. BRUNEL, ainsi que J.-M. BAROUSSE et F. FEVRIER, qui ont eu le grand mérite d'avoir mis au net l'ensemble de mes minutes. Je dois à Mesdames J. DELPOUX et A. FAIVRE la dactylographie du texte définitif.

A ma tante, Madame Andrée COUTURIER, lauréate de l'Académie des sciences, qui a assuré la première et fastidieuse frappe de cette étude, et pour ses recommandations en matière de rédaction, je dis toute mon affection.

Enfin, je remercie la direction de la C.N.A.R.B.R.L. pour avoir autorisé la publication de mes travaux.

INTRODUCTION

Ce mémoire représente la synthèse d'une activité professionnelle consacrée pendant treize ans à la géologie appliquée aux barrages et aux aménagements hydrauliques, au sein de la Compagnie nationale d'aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc, à Nîmes.

Pendant cette période, nous avons pu étudier, à des degrés de précision divers, dans toute la moitié Sud de la France et au Maroc, plus de 200 aménagements. Petit à petit, nous avons affiné notre méthode pour aboutir à des études de plus en plus structurées permettant d'aborder les nombreux problèmes que peuvent poser les barrages.

Notre présentation ne fait pas appel à la recherche fondamentale telle qu'elle est conçue dans un laboratoire universitaire. Il s'agit plutôt d'une expérience vécue, expérience rare aujourd'hui, puisque fort peu de géologues peuvent consacrer tout leur temps aux études, à la construction et à l'exploitation de ce genre d'aménagements.

Nous avons donc voulu faire le point sur une géologie de tous les jours et sur la façon de la conduire dans un bureau d'étude. Pour étayer notre propos, nous avons pris un certain nombre d'exemples traités personnellement à l'exclusion de tous autres.

Ainsi nous citerons dans ce mémoire 36 cas de grands barrages et 135 cas de barrages de faible hauteur, de façon plus ou moins détaillée ; le nombre d'exemples traités complètement s'élevant à 11.

Cette étude, précisons-le, n'a pas un caractère exhaustif et ne prétend pas aborder tous les aspects de la géologie de barrages, pour lesquels nous renvoyons le lecteur aux ouvrages spécialisés. Il ne s'agit que d'observations et remarques collectées par un géologue praticien qui présente ici la méthodologie qu'il a employée et ses applications.

Notre objectif n'était pas de montrer des études très pointues. En effet, ces dernières n'entrent que rarement (tout au moins en ce qui concerne la géologie) dans le cadre et les attributions d'une société d'aménagement comme la nôtre, et ne sont en fait motivées que par des situations exceptionnelles. Dans l'un des cas décrits, nous verrons cependant qu'un constructeur de barrages peut se retrouver confronté à des problèmes peu communs et nécessitant des solutions quasi immédiates.

A l'aide des exemples traités, nous avons surtout essayé de mettre en évidence le fait que la géologie courante demeure le moyen d'investigation le plus intéressant économiquement car elle est le support indispensable pour ajuster au mieux les interventions ultérieures plus lourdes et en tirer un meilleur profit.

Nous verrons aussi que la bonne compréhension du milieu naturel permet, à l'extrême, de conserver ou de rejeter d'emblée certains sites simplement au vu des conclusions de la seule géologie de terrain.

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

CHAPITRE I

DEFINITION DES ETUDES PRESENTÉES

12 DEC. 1988

Ce chapitre de présentation va permettre de situer les exemples d'études décrits dans les pages suivantes et qui étayent notre démarche, ainsi que de définir la nature des études réalisées et leur déroulement chronologique dans l'élaboration des projets. De ce fait, nous examinerons successivement :

- le cadre géographique des études,
- le cadre géologique,
- la nature des études,
- les phases d'études.

I - CADRE GEOGRAPHIQUE

A - VARIETES GEOGRAPHIQUES

Excepté un exemple pris au Maroc dans la plaine du Gharb, tous les autres ont été choisis dans la moitié sud de la France.

La figure 1 rassemble les exemples traités en détail (à l'exclusion de ceux simplement cités et qui n'ont pas fait l'objet d'un développement important) dans les départements suivants :

- Lot-et-Garonne
- Corrèze
- Ariège
- Aude
- Pyrénées-Orientales
- Hérault
- Gard
- Drôme
- Alpes-Maritimes.

Il y a donc une grande variété de situations puisque nous toucherons :

- la Guyenne et ses paysages vallonnés, avec le site de Cocumont ;
- le coeur du Massif central, où se loge le petit collinaire de la Martinie ;
- le versant nord de la chaîne du Plantaurel et son cadre de collines arrondies, qui entourent la cuvette de Montbel ;
- les paysages encore plus adoucis du Lauragais et de la Piège, avec le site de la Palanqué ;
- l'austère Montagne Noire, au climat humide, rigoureux, et le barrage de Laprade ;

Fig.1. - Plan de situation des exemples cités



- 1 - Barrage de Cocumont
- 2 - Barrage de la Martinie
- 3 - Barrage de Montbel
- 4 - Barrage de la Palanqué
- 5 - Barrage de Laprade
- 6 - Barrage d'Ansignan
- 7 - Barrage des Olivettes
- 8 - Barrage du Salagou
- 9 - Barrage de Vailhauquès
- 10 - Barrage de St-Jean de Cuculles
- 11 - Barrage de la Borie
- 12 - Barrage du Pas des Ondes
- 13 - Barrage de Cipières

- les zones plus escarpées des Fenouillèdes, qui font sentir la proximité des Pyrénées, où est enclavé le site d'Ansignan ;
- les contreforts sud-est de la Montagne Noire, plus arides et plus secs, dominant le Languedoc, où sont implantés les barrages des Olivettes et du Salagou ;
- l'arrière-pays montpelliérain et ses paysages de garrigues, où il est difficile d'inscrire des ouvrages tels que les petits collinaires de Vailhauquès ou de Saint-Jean-de-Cuculles ;
- le pays cévenol, au Sud du mont Lozère, cadre de l'aménagement de la Borie.

B - VARIETE DES BESOINS

Les ouvrages étudiés ont des vocations multiples, telles que l'irrigation, les réserves d'eau potable, l'écrêtement des crues, le tourisme et les loisirs.

Les difficultés croissent lorsque les maîtres d'ouvrages veulent faire jouer des rôles multiples aux retenues, ceci surtout quand elles sont de faible hauteur. Les fonctions irrigation-tourisme sont les plus incompatibles, et il est nécessaire de trouver des compromis comme, par exemple, pour des ouvrages d'une taille suffisante, la réalisation en queue de retenue d'une petite digue créant un plan d'eau à cote fixe.

Dans les cas favorables, équiper le site d'une microcentrale pour la production d'électricité est également demandé.

De ce fait, le géologue se trouve rapidement confronté à des variétés de situations qui l'obligent à composer pour satisfaire aux souhaits de chacun, et ce sur des espaces où sa marge de manoeuvre est assez réduite et où les contraintes foncières sont très présentes.

II - CADRE GEOLOGIQUE

Nous avons eu la chance, au cours de ces années, de pouvoir nous intéresser à des projets situés dans des contextes géologiques différents, aussi bien d'un point de vue lithologique, structural qu'hydrogéologique.

A - ENSEMBLES LITHOLOGIQUES RENCONTRES

Cinq grand ensembles peuvent être distingués :

- les séries molassiques du Tertiaire du Lauragais et de la Guyenne : ici, le paysage géologique est monotone puisque l'on ne retrouve que grès, conglomérats, sables, marnes, parfois recoupés par des niveaux calcaires le plus souvent lacustres ;
- les reliefs à dominante calcaire et marnes tels que les étages jurassiques et crétacés au Nord de Montpellier, la partie orientale de l'arc de Castellane regroupant tout le Secondaire avec calcaires, marnes et marno-calcaires, ou le domaine sub-alpin des Baronnies occidentales ;
- les dépôts pélitiques rougeâtres caractéristiques du Permien moyen de la région de Lodève ;
- les vieux massifs hercyniens et leurs importantes séries métamorphiques composées de schistes, micaschistes et gneiss de la Montagne Noire ou des Cévennes ;
- enfin, les vieux socles granitiques et leur cortège de roches éruptives, également hercyniens, du massif de l'Agly et encore de la Montagne Noire.

B - CADRES STRUCTURAUX

Ils sont également très différents et offrent des contrastes saisissants tels que :

- les grandes séries détritiques, où règne la sédimentation continentale, faite de chenaux entrecroisés ou de lentilles, du bassin aquitain au sens large ;
- les pays à tectonique de couverture plissée, faillée, voire chevauchante, liée aux phases alpines (massifs du Cheiron et de l'Audoubert dans les Alpes-Maritimes), ou grands plis synclinaux et anticlinaux conséquence d'une tectonique active ante-sénonienne (Baronnies occidentales de la Drôme) ;
- les vieux granites inégalement usés chimiquement, et mécaniquement parcourus de "coins d'altération pénétrante" (Montagne Noire) ou bien une tectonique de "blocs" délimités par de grands accidents cassants (massif de l'Agly) ;
- les séries métamorphiques schisteuses, replissées, déformées (Cévennes) contrastant avec les empilements d'unités tectoniques chevauchantes, affectées postérieurement à leur mise en place par des mouvements tardi-hercyniens (SE de la Montagne Noire) et créant des "chaos" de roches diverses juxtaposées.

C - CONTEXTES HYDROGEOLOGIQUES

On peut en différencier trois grandes catégories :

- les formations à petits aquifères localisés, multiples, dont les potentialités sont très variables, tels ceux rencontrés dans les terrains molassiques du Sud-Ouest ;

- les grands aquifères de type karstique développés dans les séries jurassiques et crétacées nord-montpelliéraines (Hérault) ou du massif du Cheiron (Alpes-Maritimes) ;
- les massifs anciens peu aquifères tels que Montagne Noire, Cévennes, Agly.

C'est ce panachage dans les paysages géologiques qui nous a fait choisir, parmi d'autres, les exemples développés ci-après.

III - NATURE DES ETUDES

Le travail que nous avons été amené à réaliser touche essentiellement à la géologie régionale, à la géologie locale (celle de l'aménagement), à tous les types de reconnaissances qui y sont associés et à l'exécution des projets étudiés.

A - GEOLOGIE REGIONALE

En France, sauf en de rares points, la géologie régionale est connue et de nombreux travaux (cartes à échelles diverses, mémoires, guides, etc.) permettent une approche plus ou moins aisée de la région considérée. Bien souvent, il est nécessaire de consulter de grandes quantités de données et c'est ce travail, qu'au préalable, le géologue est obligé de mener pour n'en retirer que l'essentiel, ou pour mettre en évidence les lacunes, donc les points à compléter.

B - GEOLOGIE DE L'AMENAGEMENT

C'est la géologie à l'échelle de l'ouvrage étudié. Dans ce qui suit, nous ne nous intéresserons qu'à des barrages (sites et cuvettes) que nous avons classés selon les deux catégories administratives françaises, choisies par le comité technique permanent des barrages : ceux dont la hauteur dépasse 20 m au-dessus des fondations, qualifiés de grands barrages, et ceux de hauteur inférieure souvent qualifiés de collinaires (*).

Font également partie des études géologiques, celles des différents ouvrages annexes (évacuateurs de crues, voiles d'étanchéité et de drainage, galeries, etc.). Ceci représente une grosse part du travail spécifiquement géologique puisqu'il s'agit d'études de terrain au sens large.

(*) Le Comité international des grands barrages (fédération de tous les organismes nationaux) a fixé cette hauteur à 15 m.

C - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Ils découlent des observations faites lors des études de géologie générale et font totalement partie du domaine du géologue. C'est la phase d'examen et de vérification des hypothèses de terrain ; elle nécessite une bonne maîtrise des diverses techniques pour pouvoir faire un choix judicieux parmi celles que l'on peut appliquer, car elles sont onéreuses et lourdes à mettre en oeuvre.

D - EXECUTION DES PROJETS

Une fois l'ouvrage en cours de réalisation, le géologue interviendra encore sur des points précis ou pour pallier des problèmes nouveaux apparus pendant les travaux.

IV - PHASES D'ETUDES GEOLOGIQUES

Ce mémoire va donc regrouper et préciser ce que l'on peut attendre de la géologie dans les différentes phases d'études des barrages et résumées chronologiquement ainsi :

- la géologie préliminaire (Chapitre II)
- la géologie de l'avant-projet (Chapitre III)
- la géologie pendant et après les travaux (Chapitre IV).

Nous nous livrerons ensuite à quelques réflexions concernant les moyens d'étude ; ce sera l'objet du Chapitre V.

CHAPITRE II

GEOLOGIE PRELIMINAIRE

Dans ce chapitre, seront développées les études de base à savoir la recherche des sites et les premiers jugements que peut porter le géologue : inventaire des sites, diagnostic géologique pour les barrages de faible hauteur, étude géologique préliminaire que l'on consacre aux grands barrages. Chaque type sera illustré par des exemples appropriés.

I - INVENTAIRE DES SITES

Qu'ils soient grands ou petits, le géologue peut intervenir de deux façons sur des sites de barrage :

- soit immédiatement sur des sites préalablement identifiés par le client,
- soit ultérieurement sur des sites dont on lui a confié la recherche.

L'inventaire de la région considérée se fera à partir des documents cartographiques existants sous toutes leurs formes (carte topographique, carte géologique) et, si l'on en dispose, des photographies aériennes.

A - CARTES GEOLOGIQUES

Elles peuvent être d'échelles différentes. Il est bien évident qu'en France le document régional le plus intéressant est le 1/50000, sur lequel on a maintenant l'habitude de bien distinguer les divers ensembles litho-stratigraphiques et, partiellement, les terrains de couverture. A défaut, on utilisera l'ancienne carte au 1/80000 qui présente le gros désavantage (en dehors de son imprécision) d'être surtout stratigraphique, c'est-à-dire de regrouper sous un même figuré des formations de même âge géologique mais de nature lithologique différente. Elles seront donc plus difficilement utilisables. Dans certains pays étrangers, où la cartographie géologique est beaucoup moins systématique, il faudra se contenter parfois de documents peu précis (1/100000, 1/500000), et une approche cartographique sera quelquefois impossible.

Pour des ouvrages à vocation de stockage, ces cartes permettront de faire a priori un zonage géologique lequel mettra en évidence :

- des zones favorables
- des zones défavorables
- des zones douteuses.

1 - Zones favorables

Elles seront représentées par le regroupement des terrains qui sont de par leur nature imperméables à l'échelle d'une retenue, à savoir : argiles, marnes, marno-calcaires, schistes, pélites, micaschistes, gneiss, granites, etc.

Pour ces deux dernières catégories, on suppose que l'on a affaire à la roche saine, non altérée sur de très grandes épaisseurs, comme cela peut être le cas en Afrique ou en Amérique du Sud.

2 - Zones défavorables

Ce sont les terrains perméables non étanches naturellement : calcaires karstiques, dolomies, grès mal consolidés (sable), roches volcaniques (coulées), terrains gypseux ou salifères (solubles localement), terrains broyés (grands accidents).

Des zones peuvent également être défavorables non pas à cause de la lithologie, mais du fait de la présence de mouvements gravitaires de versants, anciens ou récents : écroulements, glissements de terrain, coulées boueuses, effondrements (suffosion) ou bien de terrains compressibles (tourbe, argile plastique).

3 - Zones douteuses

Cette catégorie regroupe les secteurs où la seule lecture des cartes ne permet pas de faire un tri immédiat (présence, par exemple, d'une petite combe marneuse dans une série de calcaires perméables). On ne peut donc pas les éliminer a priori.

Ces zones constitueront en somme une "réserve" après l'examen de détail des zones favorables ou bien dans le cas de besoins locaux impératifs.

Il est bien évident que pour des ouvrages écrêteurs de crues, les zones lithologiquement défavorables ou douteuses peuvent devenir favorables. Au contraire, les grands mouvements gravitaires semblent une condition géologique rédhibitoire, qu'il s'agisse de stockage ou d'écrêtement.

4 - Conclusion

L'examen des cartes géologiques permet donc à moindre coût (travail de bureau) d'orienter l'inventaire et de s'affranchir rapidement des zones défavorables. Mais il faudra cependant se garder d'être trop catégorique.

Il est certain que l'on aura tout intérêt à étayer la lecture de ces documents par une recherche bibliographique qui pourra apporter parfois de bonnes informations et compléter la simple notice de la carte.

B - MOYENS TOPOGRAPHIQUES

Le zonage géologique sera schématiquement reporté sur les cartes topographiques régulières au 1/25000 ou 1/50000 que l'on utilise habituellement pour la recherche des sites de grands barrages mais aussi de barrages collinaires suffisamment importants.

Signalons dès maintenant que ces échelles ne sont pas adaptées à la recherche de trop petits sites (quelques dizaines de milliers de m³ stockés, digue de quelques mètres de hauteur). On touche en fait ici les limites de l'inventaire de bureau.

Il faudra donc savoir que, dans ce cas-là, seule une recherche sur le terrain basée sur le parcours à pied de la région considérée permettra de trouver des sites qui seront souvent très nombreux.

C'est d'ailleurs surtout pour ces petits sites que la pré-identification par l'intéressé sera profitable, car elle sélectionnera des sites privilégiés pour lui, laissant immédiatement de côté les sites sans intérêt.

Pour mémoire, notons enfin que dans certains cas la toponymie peut attirer l'attention sur des faits caractéristiques (présence de sel, de cavités, d'écroulements, de sources, ou de matériaux particuliers). Ceci peut être de la plus grande importance quand les documents géologiques font défaut.

C - PHOTOGRAPHIES AERIENNES

De nombreuses régions peuvent être couvertes par des prises de vues aériennes dont l'échelle est très variable (1/30000, 1/20000,

1/14500, etc.), certains vols ayant pu être effectués pour des études ponctuelles (1/5000, 1/2500).

Leur examen sera très profitable, en particulier pour les toutes petites retenues, en orientant la recherche qu'il y aura lieu d'effectuer sur le terrain.

Lorsque la cartographie est inexistante ou non adaptée, la photo aérienne reste le seul support pratique, de mise en oeuvre aisée et d'un coût relativement bas.

D - CLASSEMENT DES SITES

Excepté pour les très petits ouvrages, le projeteur pourra, à partir des données topographiques, estimer grossièrement un volume d'eau stockée et un volume de digue pour chaque site.

Le quotient de ces deux chiffres V_s/V_d lui permettra alors de faire un classement très sommaire des différents sites répertoriés, lequel n'aura bien sûr qu'une valeur relative. Nous en reparlerons plus loin à propos du diagnostic géologique ou des études préliminaires.

II - DIAGNOSTIC GEOLOGIQUE

Nous réservons ce niveau d'étude pour des barrages de faible hauteur, inférieurs à 20 m, c'est-à-dire les ouvrages souvent qualifiés de collinaires. Leur retenue est également de faible importance, de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de m³. Ce niveau d'étude correspond à l'étude préliminaire que l'on peut faire pour un grand barrage et que nous décrirons par la suite, mais tout le schéma restera très proche de celui-ci.

De ce fait, le diagnostic géologique comprendra une étude de terrain aboutissant à des conclusions plus ou moins complètes sur la valeur du site et sur la poursuite de l'étude.

A - ETUDE DE TERRAIN

Le plus souvent, il s'agira d'une prestation courte qui ne devrait pas dépasser une à deux journées de terrain.

Deux cas peuvent se présenter :

- l'étude de surface est possible et permet d'obtenir des informations pour porter un jugement suffisamment étayé,
- les conditions d'affleurement sont très mauvaises, et des travaux de reconnaissance sont d'emblée nécessaires pour donner un avis.

1 - Etude de surface permettant de renseigner une coupe géologique

Cela nécessite un environnement avec des affleurements suffisants, une végétation plus ou moins clairsemée et des terrains de couverture peu développés.

Ce sont les conditions souvent retrouvées sur le pourtour de la Méditerranée ou dans les régions montagneuses assez élevées, soit la plupart des zones où l'érosion est importante.

Cette étude de surface comprendra :

- l'examen des conditions géologiques du site et de la cuvette,
- l'examen des disponibilités en matériaux,
- un programme de travaux de reconnaissance,
- une conclusion sur la valeur du site.

Ces différentes rubriques figureront sur une fiche type (B. COUTURIER, 1985) que l'on renseignera au mieux. Ce canevas sera le même pour toutes les études ultérieures, dans lesquelles il apparaîtra de plus en plus subdivisé.

Examinons maintenant le contenu des différents paragraphes.

a) Lithologie et structure (site et cuvette)

Sous cette rubrique sont décrites sommairement les diverses formations géologiques présentes au droit de l'ouvrage envisagé et dans la cuvette de retenue : nature, altération, fracturation, disposition structurale. On insistera ici sur la distinction entre terrains de couverture et substratum. En particulier, les épaisseurs apparentes de certaines formations seront notées ou estimées chaque fois que les conditions d'observation le permettront. L'étude de la cuvette pourra également déborder sur un examen rapide de la nature de son bassin versant qui renseignera ainsi sur son érodabilité donc sur les risques d'envasement qui sont souvent très contraignants pour de petites retenues.

b) Valeur de la fondation

Ce paragraphe indiquera si les terrains présents au droit du site sont susceptibles de servir d'assise pour un ouvrage, généralement de type digue souple (terre ou enrochement).

Des précisions seront parfois données sur les niveaux qu'il sera nécessaire de décaper ou de traverser pour trouver une fondation convenable et éviter des risques de tassements (argile plastique par exemple) ou de dissolution (gypse).

c) Stabilité des appuis (site) et des versants (cuvette)

Les indices d'instabilité naturelle (glissements, écroulements, solifluxion) anciens ou récents seront répertoriés. Ils pourront conduire à l'élimination de certains sites sur ces simples critères.

De plus, on tiendra compte des risques que peut créer la réalisation d'un ouvrage sur des terrains "sensibles" au battement d'un plan d'eau par exemple.

Rappelons en effet que le prélèvement de matériaux en pied de versant marneux ou tapissé d'une forte épaisseur de terrains de recouvrement risque de le déstabiliser et de créer des mouvements gravitaires plus ou moins importants. A signaler la nécessité de ne pas terrasser de talus raides dans les zones de déblais et de laisser, après extraction des matériaux, une topographie dont les pentes soient les plus proches possibles de l'état initial.

d) Étanchéité (site et cuvette)

Lorsque le substratum est reconnu perméable sur de fortes épaisseurs (roches karstiques, roches brisantes très décomprimées et fracturées, roches solubles, roches poreuses, niveaux faillés drainants, etc.), le site sera généralement condamné si l'on veut faire du stockage. En effet, les moyens qu'il serait nécessaire d'employer pour en assurer artificiellement l'étanchéité ne seraient pas en rapport avec les ouvrages envisagés.

Si le substratum est étanche (marnes, schistes, etc.), les terrains meubles le recouvrant sont souvent perméables (alluvions plus ou moins grossières, éboulis). Ils devront être recoupés par une clef parafouille pénétrant suffisamment le bed-rock afin d'éviter les infiltrations sous la digue.

Cela suppose que l'épaisseur des alluvions n'est pas trop importante au droit de l'ouvrage (5 à 6 m au plus).

Ce dernier critère peut conduire à éliminer de nombreux sites pour lesquels on ne peut s'affranchir raisonnablement de l'épaisseur de la couverture perméable.

De plus, on relèvera la plupart des informations hydro-géologiques : situation des sources, fuites, pertes, résurgences sur le cours d'eau que l'on envisage de barrer.

On vérifiera si possible l'existence d'une nappe dans le substratum, éventuellement sa position et si des échanges avec le futur plan d'eau peuvent se produire.

e) Matériaux

Ils seront classés en deux grandes catégories :

- enrochements, agrégats,
- sols fins.

Une description sommaire en sera établie et l'on précisera les zones les plus favorables pour les prospecter.

Pour les sols fins en particulier, ils seront à rechercher en priorité dans l'emprise de la cuvette (alluvions) ou sur les alentours immédiats de cette dernière (colluvions, éluvions de versants).

Le nom attribué à une formation (argile sableuse par exemple) n'a pas une valeur géotechnique et ne devra pas être pris comme tel.

Quant aux formations rocheuses, le nom donné aux terrains rencontrés sera celui utilisé classiquement en pétrographie pour les grandes catégories de roches, sans bien entendu entrer dans des détails qui ne pourraient être appréciés que par des analyses microscopiques ou chimiques.

f) Programme de travaux de reconnaissance

Excepté dans des cas très favorables, le diagnostic de surface comportera certaines réserves sur la faisabilité de l'ouvrage. Ces réserves

devront pouvoir être levées au moyen d'un programme de travaux de reconnaissance adapté, qui fera partie de l'étude ultérieure (avant-projet).

Le plus souvent, il sera fait appel aux techniques suivantes :

- réalisation de tranchées creusées à la pelle hydraulique ou de puits creusés à la main,
- exécution si nécessaire de profils géophysiques,
- réalisation de sondages avec essais d'eau,
- prospection systématique des matériaux disponibles.

g) Coupes géologiques

Les informations recueillies sur le terrain pourront être synthétisées sur des coupes géologiques schématiques, faites à main levée (voir figures 2 et 4 des exemples traités).

Des croquis en plan pourront parfois illustrer certaines dispositions géologiques ou topographiques particulièrement complexes.

2 - Etude de surface ne permettant pas de renseigner une coupe géologique

Ce cas peut être assez fréquent dans les zones à fort couvert végétal ou dans les zones à morphologie douce, peu escarpée, où les agents de l'érosion ont un rôle peu actif. Généralement, les terrains de couverture sont importants et empâtent le substratum sur plusieurs mètres d'épaisseur.

Dans un tel contexte, la visite du géologue sera brève. Il définira un programme de travaux de reconnaissance sommaire pour confirmer l'idée qu'il a du contexte géologique local.

La plupart du temps, il se contentera de faire exécuter des tranchées, continues ou non, sur le site et dans la cuvette (matériaux), afin d'observer la disposition et l'importance des terrains de couverture ainsi que la nature exacte du substratum.

Les observations faites dans ces fouilles permettent de dresser des coupes de terrain et de conclure sur la valeur du site. Elles remplacent de façon plus ou moins complète l'étude de surface.

Après quoi le géologue propose si nécessaire des travaux de reconnaissance complémentaires tels que nous les avons définis précédemment.

B - CONCLUSION SUR LA VALEUR DU SITE

Pour chacun des sites étudiés (après étude de surface ou après quelques travaux sommaires), un diagnostic géologique sera établi précisant l'intérêt de la poursuite de l'étude. Généralement, on retrouvera les catégories de sites suivantes :

- sites à géologie favorable, avec parfois quelques inconnues qui devront être levées par les reconnaissances proposées ;
- sites à géologie et/ou topographie peu favorables, lorsqu'il y a un trop grand nombre de réserves ou de risques géologiques. Ce sont des sites qui apparaissent assez médiocres sur le plan géologique ou inadaptés à un ouvrage de type collinaire ;
- sites à géologie défavorable, qui doivent être abandonnés.

Ce diagnostic géologique se concrétise souvent sans recourir à la cartographie traditionnelle. En effet, il nous est apparu que, pour ces petits ouvrages, les fonds topographiques du commerce sont parfois insuffisants. Aussi cette étude préliminaire se contente-t-elle de poser les problèmes du site considéré. Si une cartographie géologique apparaît nécessaire, elle sera envisagée seulement aux stades ultérieurs sur des plans plus détaillés. Cette façon de procéder permet également une plus grande mobilité dans l'étude : il vaut mieux "juger" plusieurs sites ou rechercher des sites de rechange dans un périmètre relativement réduit, que faire le levé de surface d'un seul emplacement dans un temps donné. Ce faisant, on augmente les chances de trouver un site intéressant.

C - EXEMPLES D'ETUDES

Les exemples choisis l'ont été parmi 129 barrages collinaires étudiés dans le Sud et le Sud-Ouest de la France, et 80 ouvrages répertoriés sur le territoire marocain.

Nous avons pris trois exemples, à savoir :

- un site défavorable,
- un site favorable,
- un site peu favorable.

Pour chaque cas, nous produirons deux documents : une fiche de diagnostic géologique et une coupe géologique schématique.

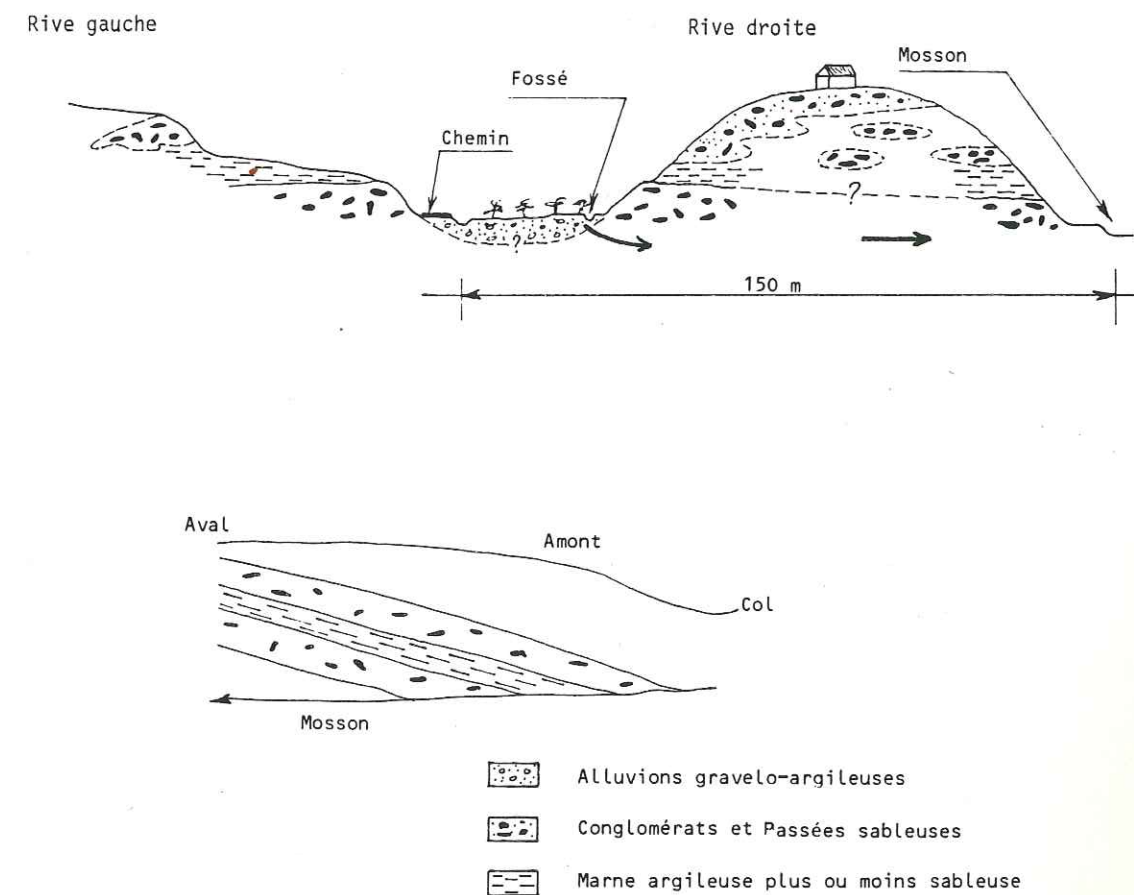
SITE DU STADE DE VAILHAUQUES (HERAULT)

Il se trouve dans la vallée du Lez à 14 kilomètres au Nord-Ouest de Montpellier.

Le seul examen de surface a permis de conclure sur la mauvaise qualité de l'emplacement.

AFFAIRE		Collinaires Vallée du LEZ (Hérault) Commune de VAILHAUQUES		
NOM DU SITE		Site du stade sur le ruisseau de la Plaine		N°
LOCALISATION	CARTES	Topo.: PIGNAN 1/25 000		Géol.: MONTPELLIER 1/50 000
	COORDONNÉES	X: 711,62	Y: 3 152,65	Z: 100 NGF
GÉOLOGIE DU SITE	LITHOLOGIE STRUCTURE	Alternance de niveaux conglomératiques plus ou moins indurés avec des niveaux sableux ou marno-argileux.		
	VALEUR DE LA FONDATION	Acceptable pour une digue		
	STABILITÉ DES APPUIS	Acceptable		
	ÉTANCHÉITÉ (Hydrogéologie)	Mauvaise car présence de niveaux conglomératiques en pied de versant. En RD ces niveaux rejoignent la Mosson avec risques de fuite vers cette vallée.		
GÉOLOGIE DE LA CUVETTE	LITHOLOGIE STRUCTURE	Idem site, semble cependant plus argileux		
	STABILITÉ DES VERSANTS	Bonne		
	ÉTANCHÉITÉ (Hydrogéologie)	Acceptable		
MATÉRIAUX	ENROCHEMENTS AGREGATS	Néant		
	SOLS FINS	Alluvions argilo-caillouteuses de la cuvette à prospector		
TRAVAUX DE RECONNAISSANCE				
CONCLUSIONS ET REMARQUES		Site défavorable au niveau de l'étroit topographique car gros risques de fuites vers la vallée de la Mosson. Examiner un emplacement plus amont.		

Fig. 2. - Coupe géologique schématique



SITE DE L'OUED CHABET EL ANATRA (MAROC)

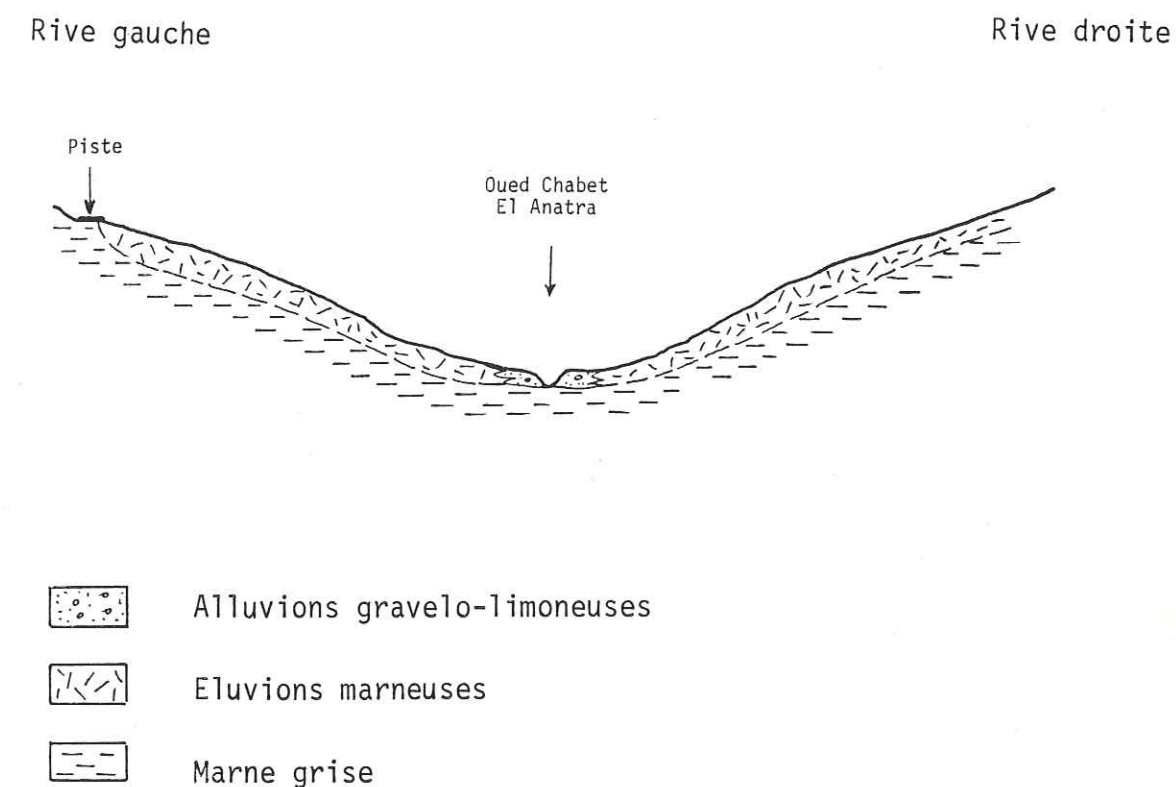
Dans le périmètre du Gharb, il est à 10 km au Sud-Est de la localité de Sidi Kacem.

Les bonnes conditions d'observation ont permis de conclure rapidement sur la faisabilité de l'aménagement.

Une réserve subsiste sur la valeur des matériaux fins.

AFFAIRE		COLLINAIRES GHARB (MAROC)		
NOM DU SITE		OUED CHABET EL ANATRA		N°
LOCALISATION	CARTES	Topo.: SIDI KACEM 1/50.000		Géol.: PETITJEAN 1/100.000
	COORDONNÉES	X:	Y:	Z:
GÉOLOGIE DU SITE	LITHOLOGIE STRUCTURE	Le site est 50 m à l'amont du thalweg rive droite Eluvions marneuses sur marnes grises Alluvions gravelo-limoneuses en thalweg (1 à 2 m) Structure sub-horizontale		
	VALEUR DE LA FONDATION	Bonne		
	STABILITÉ DES APPUIS	Bonne		
	ÉTANCHÉITÉ (Hydrogéologie)	Bonne dans les marnes saines		
GÉOLOGIE DE LA CUVETTE	LITHOLOGIE STRUCTURE	Eluvions marneuses et marnes		
	STABILITÉ DES VERSANTS	Bonne à condition de ne pas déstabiliser (talus raides) Le pied des versants en prélevant des matériaux		
	ÉTANCHÉITÉ (Hydrogéologie)	Bonne		
MATÉRIAUX	ENROCHEMENTS AGREGATS	Néant		
	SOLS FINS	Eluvions marneuses en cuvette et sur les versants (faible épaisseur)		
TRAVAUX DE RECONNAISSANCE		Rec. géotech. des matériaux sur une grande surface. Localisation des zones d'emprunts et estimation de la qualité et des quantités disponibles		
CONCLUSIONS ET REMARQUES		Site favorable si matériaux suffisants. L'ouvrage devra s'ancrer dans les marnes saines.		

Fig. 3. - Coupe géologique schématique



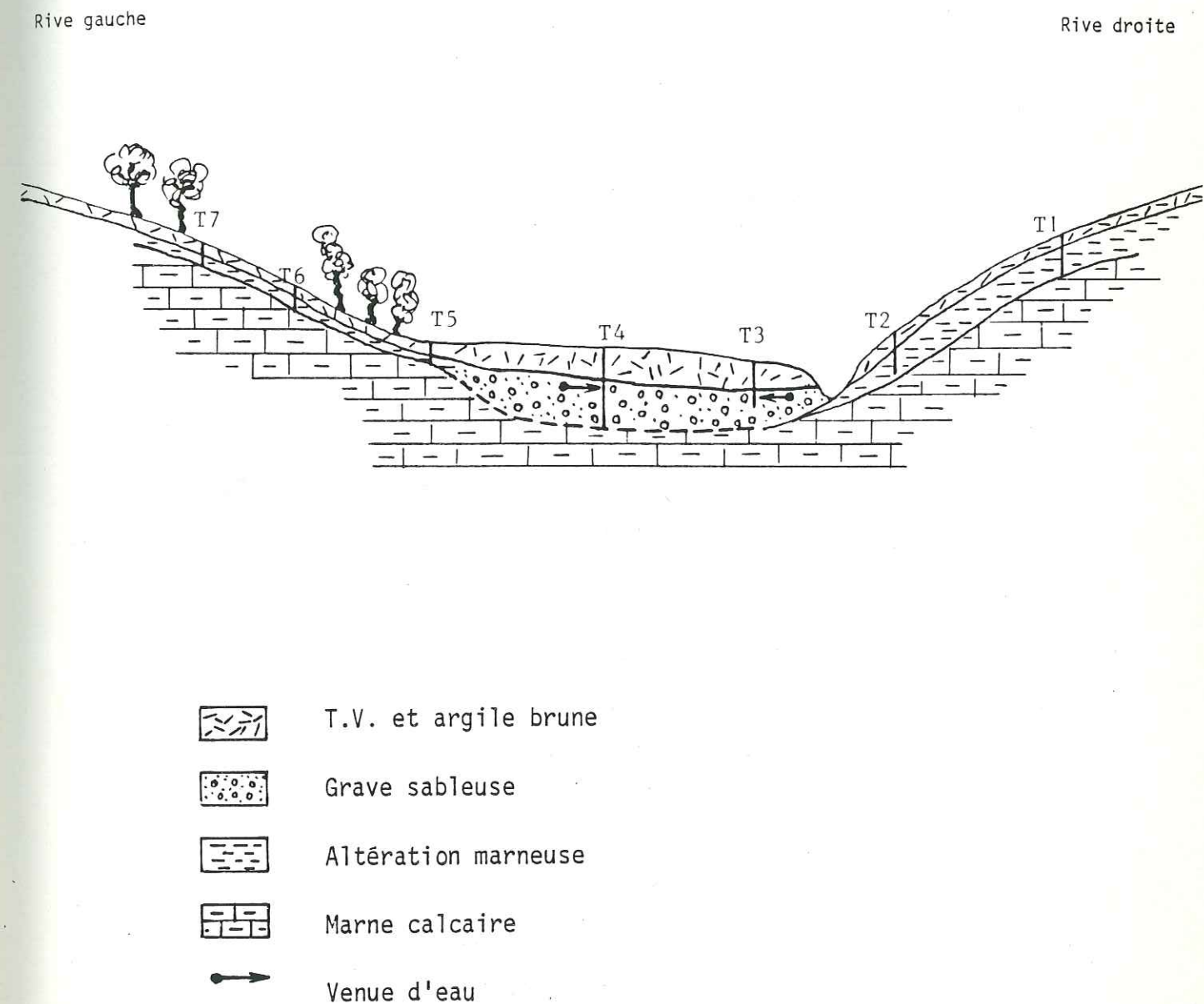
SITE DE LA PALANQUE (AUDE)

Sur la commune de Pech-Luna, à 15 km au Sud-Ouest de Castelnaudary.

Une simple visite n'aurait pas permis de faire un diagnostic à cause de l'inexistence d'affleurements. Des tranchées à la pelle hydraulique furent d'emblée indispensables pour dresser une coupe géologique.

AFFAIRE		COLLINAIRES DEPARTEMENT DE L'AUDE		
NOM DU SITE		LA PALANQUE, COMMUNE DE PECH-LUNA		N°
LOCALISATION	CARTES	Topo.: 2245 OUEST 1/25.000		Géol.: CASTELNAUDARY 1/50.000
	COORDONNÉES	X:	Y:	Z:
GÉOLOGIE DU SITE	LITHOLOGIE STRUCTURE	Colluvions argileuses et alluvions argileuses puis gravelo-sableuses en thalweg, surmontant un substratum marneux assez calcaire.		
	VALEUR DE LA FONDATION	Bonne dans les marnes calcaires et sur les graves		
	STABILITÉ DES APPUIS	Acceptable		
	ÉTANCHÉITÉ (Hydrogéologie)	Passable dans les marnes calcaires. Nulle en thalweg jusqu'à 5,5 m de profondeur. Nappe dans les graves		
GÉOLOGIE DE LA CUVETTE	LITHOLOGIE STRUCTURE	Idem site		
	STABILITÉ DES VERSANTS	Acceptable		
	ÉTANCHÉITÉ (Hydrogéologie)	Suffisante pour un petit ouvrage		
MATÉRIAUX	ENROCHEMENTS AGREGATS	Néant		
	SOLS FINS	Peu de matériaux compactables. Tout venant sablo-graveleux		
TRAVAUX DE RECONNAISSANCE		Sondages pour tester la perméabilité du substratum		
CONCLUSIONS ET REMARQUES		Site peu favorable car nécessité de descendre une clef d'ancrage sous la nappe à plus de 6,5 m de profondeur. Peu de matériaux de qualité.		

Fig. 4. - Coupe géologique schématique



SITE DE LA PALANQUE

Coupes géologiques des tranchées

T1	0-1,0 1,0-2,7 > 2,7	T.V. et argile jaunâtre (éluvions) Marne altérée puis non altérée grise très compacte Marne calcaire dure beige grise
T2	0-0,6 0,6-2,7 2,7-3,0	T.V. et argile de pente Marne gris beige assez compacte Marne calcaire gris beige compacte et dure
T3	0-2,5 2,5-3,5 > 3,5	Argile brune avec racines Grave sableuse (eau à 2,5 m) Marne dure (bloc ?)
T4	0-2,3 2,3-5,0 5,0-5,5 > 5,5	Argile brune et racines Grave sablo-argileuse (eau à 2,3 m) Sable fin et vase Marne calcaire très dure
T5	0-1,0 1,0-2,1 2,1-2,4	Argile brune et marne altérée Marne gris beige compacte Marne calcaire dure
T6	0-0,9 0,9-2,2 > 2,2	Argile de pente jaunâtre Marne gris beige Marne calcaire très indurée
T7	0-1,3 1,3-1,8 1,8-1,9	Argile de pente Marne gris beige Marne calcaire très indurée

III - ETUDE GEOLOGIQUE PRELIMINAIRE

Ce type d'étude concerne les grands barrages (hauteur supérieure à 20 mètres). Il complète l'inventaire et se caractérise par une géologie de terrain plus approfondie et la définition d'un programme de travaux de reconnaissance, le but de l'étude étant de définir les problèmes posés par un site.

A - ETUDE DE TERRAIN1 - Support topographique

Cette étude consistera à renseigner géologiquement les documents topographiques du commerce, à savoir 1/25000 ou, à défaut, 1/50000 édités par l'Institut géographique national.

On effectuera des agrandissements au 1/10000 ou 1/5000 de ces cartes, qui permettront alors de faire des reports géologiques avec une précision suffisante compte tenu du but de l'étude.

2 - Rubriques d'étude

Ce sont les mêmes que pour un petit barrage et nous ne les redétaillerons pas (cf. II.A.1.). L'étude sur le terrain s'étalant sur cinq à dix jours, chaque partie sera par contre plus étoffée. En particulier, les différenciations lithologiques seront un peu plus poussées, ainsi que l'analyse de la fracturation et de la structure générale du site.

La cartographie se fera suffisamment au large, si les besoins s'en font sentir, et l'on évitera impérativement de s'en tenir à la cote de la retenue, comme on le voit souvent. Il faudra obligatoirement réinsérer le travail dans son contexte régional et ne pas hésiter à aller chercher assez loin certaines informations.

3 - Les travaux de "renseignement"

Ils s'effectueront, comme pour les petits barrages, dans les zones où le couvert végétal est tel qu'aucune observation n'est possible pour avancer un diagnostic. Là encore, les tranchées à la pelle hydraulique, mises bout à bout ou discontinues, permettront d'ausculter tout ou certaines parties d'un versant.

Si l'accès d'une pelle n'est pas possible, trois sondages seront nécessaires, un sur chaque appui et un en thalweg.

Cependant, pour des raisons économiques, on essayera autant que possible de s'en tenir à l'étude géologique de surface seule, dont la légèreté, la rapidité et la facilité de mise en oeuvre permettront le plus souvent, si l'on utilise un géologue rompu à ce type de travaux, de résoudre la plupart des problèmes et des inconnues existant sur le site. De la sorte, le programme de travaux de reconnaissance qui fera l'objet des études ultérieures d'avant-projet sera facilement défini.

B - PROGRAMME DE TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Il sera bâti pour répondre aux questions posées par l'étude de surface, et c'est ce que nous appellerons les "travaux spécifiques", ou bien pour ausculter un site de façon traditionnelle, et c'est ce que nous appellerons les "travaux de routine".

Les principales techniques proposées seront : tranchées, géophysique, forages, sondages, prospection géotechnique des matériaux. Nous en parlerons aux stades d'études ultérieurs.

C - CONCLUSION SUR LA VALEUR DU SITE

L'étude géologique de terrain devra permettre de préciser la qualité du site, d'envisager déjà un type d'ouvrage adapté et surtout, dans un premier temps, de voir s'il n'existe pas de conditions géologiques rédhibitoires. C'est en somme un temps de pré-faisabilité.

Ce type d'étude devra donc permettre d'éliminer d'emblée un certain nombre de sites sur des caractéristiques géologiques très défavorables. Il est bien évident que, pour de grands barrages, où la technique et les moyens financiers permettent de dominer certains "défauts", le déchet sera moins important que pour les petits ouvrages.

Les sites conservés (favorables ou douteux) feront l'objet des travaux proposés qui constitueront l'étude d'avant-projet sommaire ou de faisabilité.

D - EXEMPLES D'ETUDES

Les exemples fournis ont été pris parmi 39 études de sites que nous avons réalisées dans la moitié Sud de la France et en particulier dans un inventaire de barrages dont nous étions en partie chargés pour l'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

Cette fois encore nous avons retenu :

- un site défavorable,
- un site favorable,
- un site douteux.

BARRAGE DE CIPIERES (ALPES-MARITIMES)

1 - INTRODUCTION

Le site du barrage se trouve à une quinzaine de kilomètres au nord de Grasse, sur la rivière le Loup, que domine le village de Cipières (fig. 5).

Un ouvrage de 50 m de hauteur environ retiendrait à la cote 580 un volume de 8,6 Hm³ (fig. 6).

L'étude géologique présentée ici a été effectuée sur un agrandissement au 1/5000 de la carte topographique au 1/25000 Roquesteron n° 5-6 éditée par l'Institut géographique national.

2 - CADRE GEOLOGIQUE

L'aménagement étudié se situe dans la partie orientale de l'arc de Castellane, qui s'étend jusqu'au Var, à une vingtaine de kilomètres à l'Est de la vallée du Loup (fig. 7).

On rencontre des terrains sédimentaires regroupant des niveaux du Trias, du Jurassique et du Crétacé.

Vers le Nord, la retenue est dominée par le massif du Cheiron et au Sud, par le Gros Pouch qui est le segment nord de l'unité de l'Audibergue.

Ces deux unités, chevauchantes vers le Sud, sont bien représentatives du style tectonique régional, c'est-à-dire plissements de couverture et chevauchements assez limités puisqu'ils n'ont jamais donné de véritables nappes. Ces plissements ont une orientation générale WSW-ENE.

Entre l'unité de l'Audibergue, et le massif du Cheiron, existerait un synclinal de Néocomien (Synclinal de Gréolières), emprunté par le Loup et dont le flanc nord serait chevauché par les Barres du Cheiron. Au droit du Bau de Saint-Jean (unité de la Madeleine), "le Loup décrit un coude et, d'un cours WSW-ENE, passe à une direction NNW-SSE. L'érosion régressive qui s'exerçait au sein des massifs karstifiés (unités de l'Audibergue et de la Madeleine) en est la cause et le Loup suit, dans ses gorges, une sorte de fossé tectonique formant un drain naturel " (G. GOUVERNET, G. GUIEU et C. ROUSSET, 1971).

La tectonique de ce secteur est liée à la 2e phase alpine, située vers la limite Miocène-Pliocène.

Fig. 5. - Plan de situation

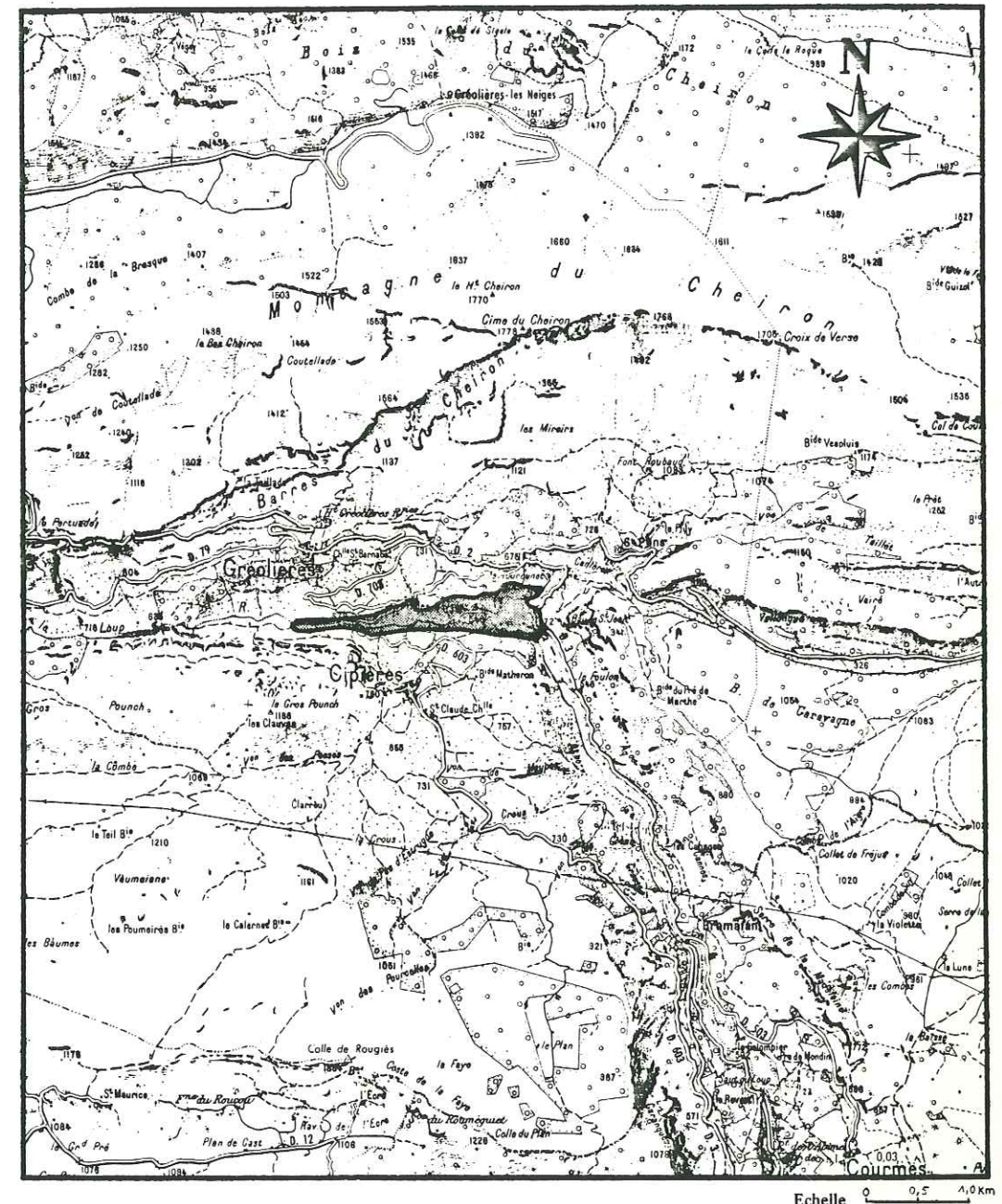


Fig. 6. - Courbes hauteurs-volumes/surfaces

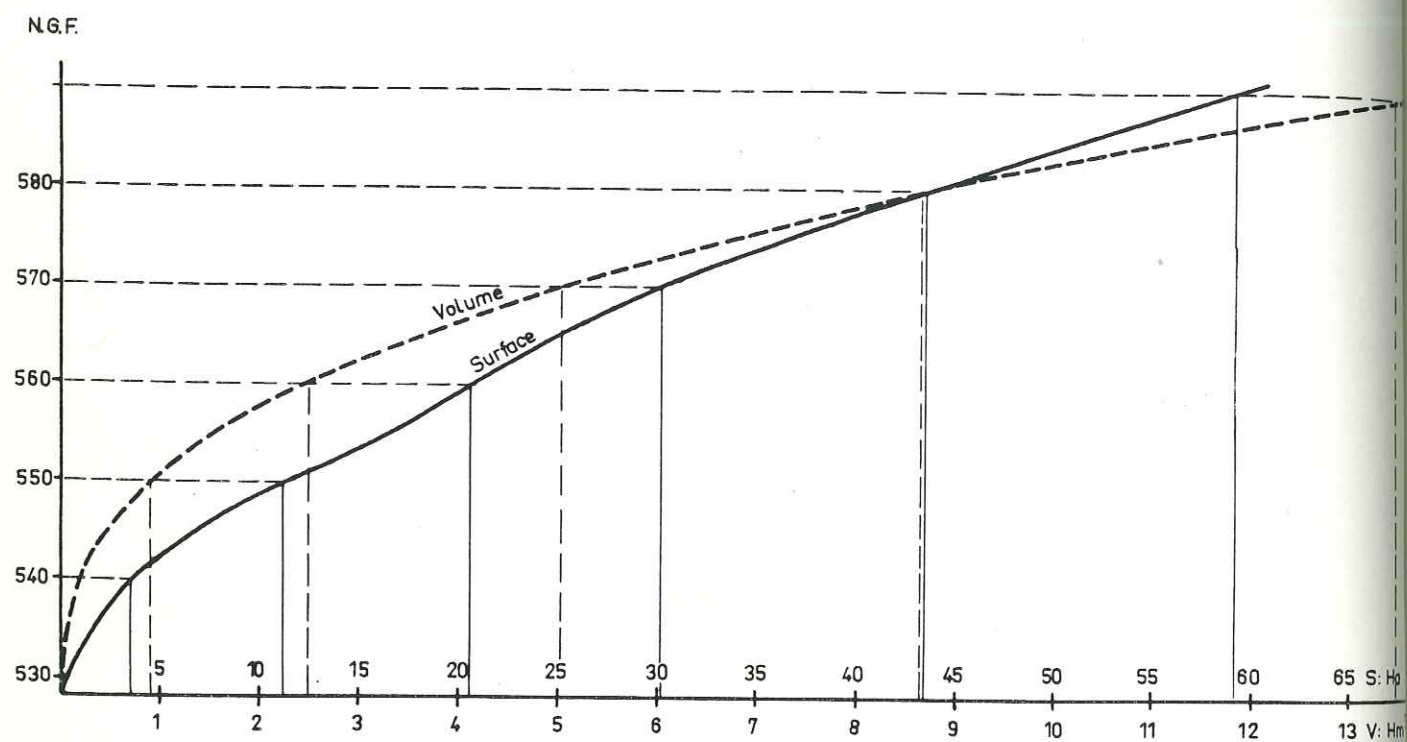
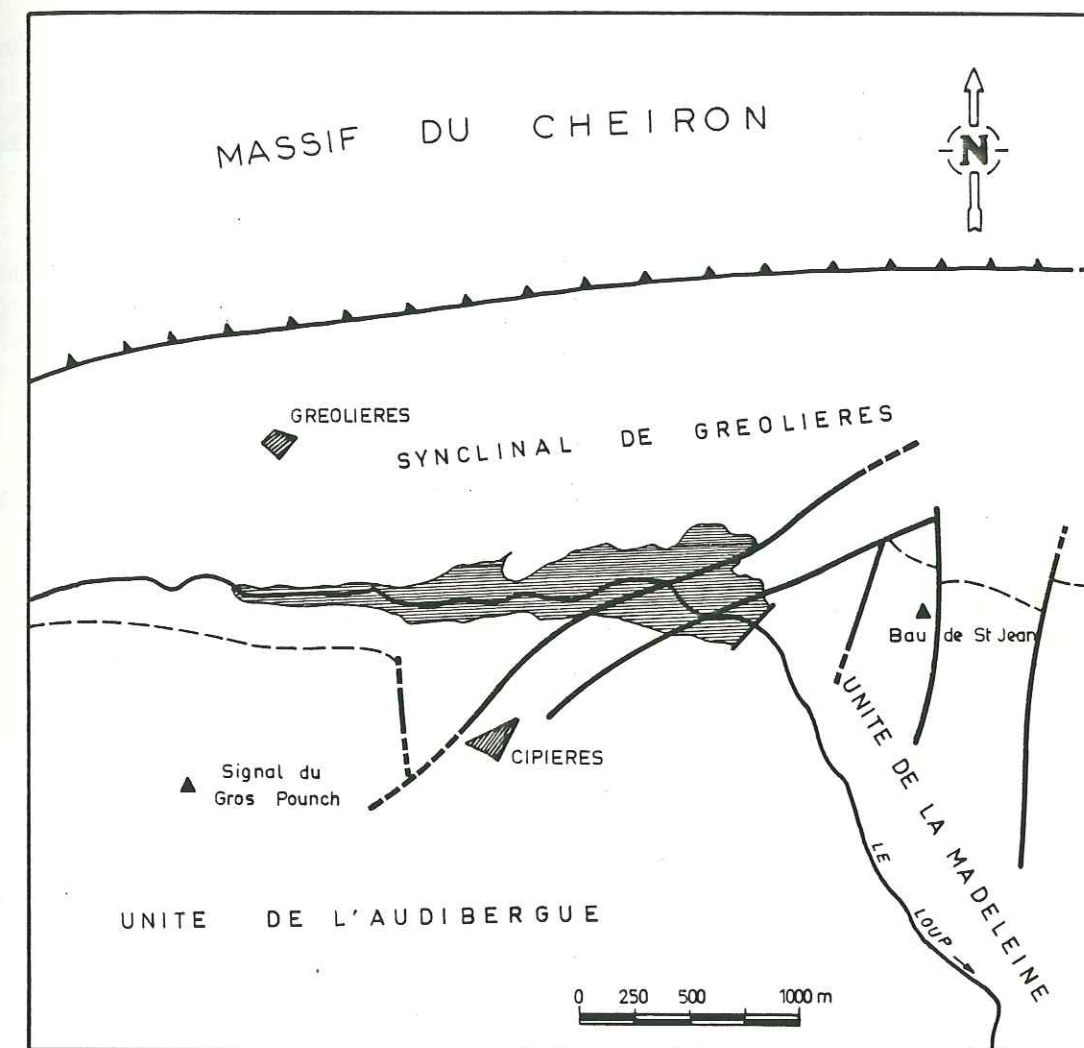


Fig. 7. - Esquisse structurale régionale



- LEGENDE -

- Chevauchement
- Faille

3 - CUVETTE DE RETENUE

3.1 - LITHOLOGIE

3.1.1 - Substratum

La plus grande partie de la cuvette s'étend sur des niveaux de marno-calcaires et de marnes du Crétacé (du Valanginien au Cénomanién). Les affleurements réduits ne permettent pas de faire des distinctions précises, si bien que les étages ont été regroupés sous un même figuré (fig. 8).

Les marno-calcaires sont constitués d'alternances plus ou moins régulières de bancs calcaires marneux jaunâtres dont l'épaisseur peut atteindre 60 à 80 cm, avec des marnes feuilletées, gris jaunâtre, pouvant être parcourues de niveaux de miches calcaires de taille variable ; vers le sommet, les bancs calcaires sont prépondérants.

Cette formation repose sur des marnes grisâtres qui, elles aussi, peuvent être parcourues par de petits niveaux calcaires marneux.

Dans sa partie aval, la cuvette recoupe des calcaires du Jurassique supérieur, qui dessinent une forte cuesta dans la topographie.

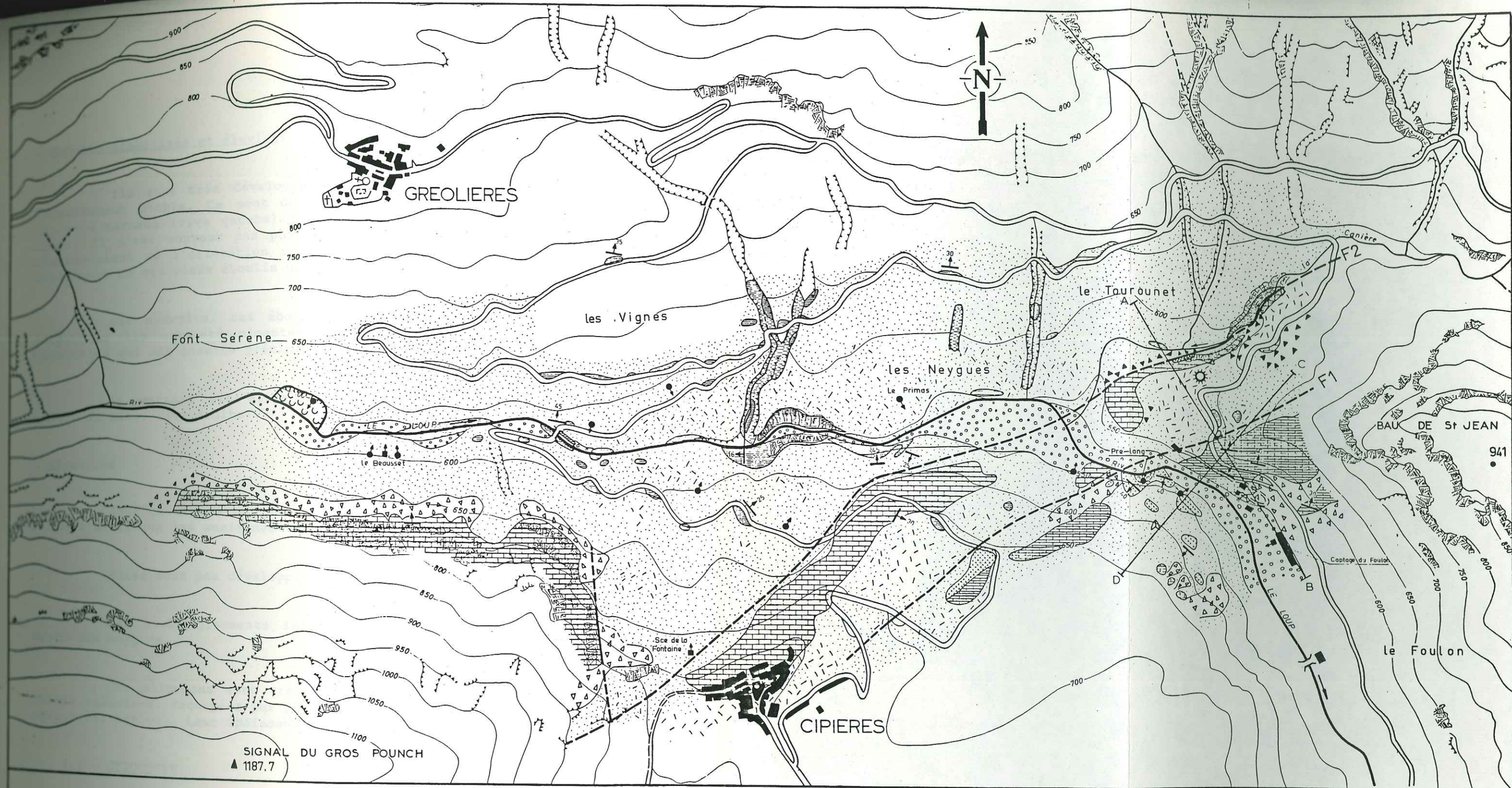
Ce sont des calcaires gris blanchâtre, assez massifs, par endroits très disloqués et formant à leur pied un chaos de blocs (Sud du Tourounet).

3.1.2 - Terrains de couverture

On a distingué des éboulis vifs, des éboulis stabilisés, des éluvions et des alluvions.

- Eboulis vifs

Ils garnissent le bas des pentes sous les falaises calcaires (versant nord du Signal du Gros Pouch) qui les alimentent régulièrement.



Eboulis vifs



Glissement de terrain



Chaos ou blocs isolés



Eboulis stabilisés



Eluvions



Alluvions



Marno-calcaires et marnes (Crétacé)
1) affleurant 2) subaffleurant



Calcaires (Jurassique supérieur)



Calcaires et dolomies (Lias - Dogger)



Gypse et Marnes (Trias)



Faille 1: observée 2: supposée



Brèche de faille



Pendage



Source



Source captée



Doline



Zone d'arrachement



Gypse



Coupe géologique sur axe barrage

Fig. 8. - Carte géologique

- Eboulis stabilisés et éluvions

Ils sont très développés et constituent la majeure partie du recouvrement meuble. Ce sont des blocs de calcaire (rive droite) ou de calcaire marneux (rive gauche) emballés dans une matrice argilo-terreuse beige. Il n'est souvent pas possible de les distinguer des éluvions qui résulteraient de l'altération sur place du substratum ou de la tranche supérieure de ces vieux éboulis qui peut être légèrement remaniée.

Par endroits, ces éboulis forment une véritable brèche, très dure, car ils ont été cimentés par des circulations d'eau riche en carbonates qui ont ensuite précipité.

Le versant est alors "encroûté", mais de façon très inégale (amont du site, rive droite).

- Alluvions

Sous ce figuré ont été regroupées les alluvions récentes de la rivière ainsi que les anciennes terrasses.

Elles sont peu développées dans la partie Ouest de la retenue.

Les seuls gisements importants n'apparaissent qu'à l'aval, au droit des Neygues.

Ces alluvions sont très hétérogènes, avec des accumulations de galets calcaires, recoupées par place de niveaux à granulométrie plus fine (graviers, sables). Leur épaisseur n'est pas connue.

3.2 - STRUCTURE

Le Loup a érodé le flanc sud du synclinal de Gréolières. Son cours se développe dans les assises calcaréo-marneuses du Crétacé (Cénomaniens - Vraconien) dont les couches ont une direction générale N 100° E avec un pendage moyen de 40° vers le Nord.

Deux accidents majeurs traversent la retenue :

- le premier (F 1) est situé à l'amont immédiat du site et nous en reparlerons plus en détail en 4 ;

- le second (F 2) met en contact direct les formations du Jurassique supérieur avec celles du Crétacé supérieur.

De direction approximative Est-Nord-Est - Ouest-Sud-Ouest, ils semblent sub-verticaux.

Une brèche de faille cimentée et des niveaux très disloqués dans les calcaires jurassiques témoignent de la présence de la faille F 2, au Sud de Tourounet, le long du torrent de Canière.

Le compartiment placé entre les 2 accidents a un pendage grossièrement Sud-Est.

3.3 - HYDROGEOLOGIE

De nombreuses sources émergent sur les versants ou au-dessus de la retenue.

La plupart d'entre elles apparaissent dans les éboulis qui recouvrent le substratum calcaréo-marneux.

Ce dernier joue un rôle de plancher étanche et collecte les eaux infiltrées dans la couverture d'éboulis : source captée du Beausset (3 l/s), source le Primas (près de Neygues). La source de la Fontaine résulte du contact anormal (F 2) entre les calcaires jurassiques et les marnes calcaires du Crétacé (CORROY, 1952). Elle a un débit de 4 l/s mais tarit à l'étiage (S.R.A.E., 1977).

Les éboulis, du fait de leur extension et de leur épaisseur importante (6 m à l'Est de Tourounet), maintiennent une "nappe de versant" sur les deux flancs de la vallée du Loup.

Ils peuvent d'ailleurs "prendre en charge des eaux dont l'émergence vraie se situe plus haut, au niveau du contact anormal" du massif karstique du Cheiron (fig. 7), comme au ravin de la Bouisse (hors de l'épure), en amont de la retenue. Ce ravin, creusé dans des calcaires karstiques qui chevauchent le synclinal de Gréolières, est généralement sec, sa résurgence se situe en fait 600 m à l'Est, dans le ravin suivant, sous une couverture d'éboulis, et permet un captage pour l'alimentation en eau de Cipières.

3.4 - ETANCHEITE DE LA RETENUE

Toute la zone constituée de marno-calcaires est étanche.

Il n'en est pas de même pour la partie aval de la retenue, entre les failles F 1 et F 2.

En effet, ces niveaux sont constitués d'un calcaire très fracturé, réputé dans la région pour la présence de dolines et d'avens (montagne de Cheiron, Bau de Saint-Jean).

Une doline a d'ailleurs été observée en rive gauche du torrent de Canière, près du contact avec des marno-calcaires. Elle témoigne des phénomènes de dissolution affectant ces calcaires.

D'autre part, cette formation est pentée vers le Sud-Est (fig. 9) et vient en contact par faille avec les terrains constituant le site qui, nous le verrons, sont également perméables. Il y a donc des risques d'infiltration et de fuites vers l'aval par l'intermédiaire de ces niveaux. De ce fait, on ne peut pas garantir l'étanchéité de la cuvette.

3.5 - STABILITE DES VERSANTS DE LA RETENUE

Nous avons observé, en queue de retenue rive gauche (Font Sérène), un glissement de terrain dans les marno-calcaires du Crétacé, se développant sur une centaine de mètres de large et une vingtaine de mètres de haut.

Cette rupture semble dépendre de trois facteurs :

- affouillement du pied du versant par le Loup ;
- basculement des bancs qui à l'origine sont pentés de 35° environ dans le versant ;
- présence d'une source sous les éboulis émergeant au niveau de la zone d'arrachement.

Le volume de matériaux glissés est évidemment réduit (de l'ordre de 30000 m³) mais l'on peut supposer qu'avec la présence d'un plan d'eau ce phénomène puisse se déclencher ailleurs dans la retenue puisque les conditions géologiques (lithologie, structure, éboulis, sources) sont pratiquement les mêmes sur la quasi-totalité de la cuvette.

Néanmoins, une instabilité de ce type reste très "épidermique" (tranche altérée des marno-calcaires et éboulis), et il est bien difficile de préciser quel serait le volume mobilisable de cette façon risquant de fluer dans la retenue.

Signalons, d'autre part, 5 km en amont de la queue du plan d'eau (après la Coulette, hors de l'épure) un important éboulement consolidé qui a affecté tout le versant (dans des terrains identiques) et a repoussé vers le Nord le cours du Loup. La partie sommitale de cet écroulement se situe 150 m environ au-dessus du cours de la rivière. Dans ce cas-là, la masse mise en mouvement est considérable et son volume peut être estimé à 10 millions de m³.

Compte tenu de ces différentes observations, on peut avancer que les versants de la retenue ne présentent pas toutes les garanties souhaitables de stabilité.

4 - ETUDE GEOLOGIQUE DU SITE

4.1 - TOPOGRAPHIE

L'étroitesse topographique s'inscrit au droit du Bau de Saint-Jean.

A cet endroit, l'orientation du cours du Loup quitte la direction EW et devient NNW-SSE.

A la cote 590, la largeur de la vallée est de 225 m.

A l'aval, la vallée s'élargit nettement.

4.2 - TERRAINS DE RECOUVREMENT

En rive gauche, ils sont pratiquement inexistantes et le substratum apparaît sur la totalité de l'appui.

En rive droite, des éboulis stabilisés (parfois des brèches de pente) empâtent le versant où l'on observe çà et là quelques affleurements de la roche en place.

Les deux versants sont très raides.

4.3 - NATURE DE LA ROCHE EN PLACE

D'une rive à l'autre, la nature de la roche est totalement différente (fig. 9 et 10).

En effet, la rive gauche est constituée de terrains calcaires du Lias alors que la rive droite montre des niveaux gypsifères du Trias.

4.3.1 - Versant rive gauche

Sur toute sa hauteur, l'appui ne montre que des calcaires compacts, gris en pâte, gris beige en cassure, dont l'épaisseur des bancs varie du décimètre au mètre. Certains niveaux semblent plus "dolomitiques". L'ensemble du Lias a été bloqué sous un même figuré.

4.3.2 - Versant rive droite

On observe des arrachements dans les amas de gypse ou marnes gypseuses du Trias (Keuper). En montant vers Cipières, cette formation passe à des cargneules.

Ces dépôts sont de couleurs très variables : gris, rouge, blanc, beige, etc. Le gypse forme la majeure partie de la roche et lui confère un aspect scintillant au soleil.

Au-dessus de la cote 590, on retrouve les formations calcaréo-dolomitiques du Trias qui bordent le replat de Cipières.

4.4 - STRUCTURE DE LA ROCHE EN PLACE

4.4.1 - Ces terrains semblent dessiner une demi-voûte anticlinale, dont le cœur est occupé par du gypse.

En rive gauche, les calcaires plongent de 30 à 40° dans le versant vers le Nord-Est ; en rive droite, les marnes gypseuses s'enfouissent également dans la pente.

La direction des couches est parallèle à la vallée, c'est-à-dire aux alentours de N 120° E.

Fig. 9. - Coupe géologique amont-aval du site
(Rive Gauche)

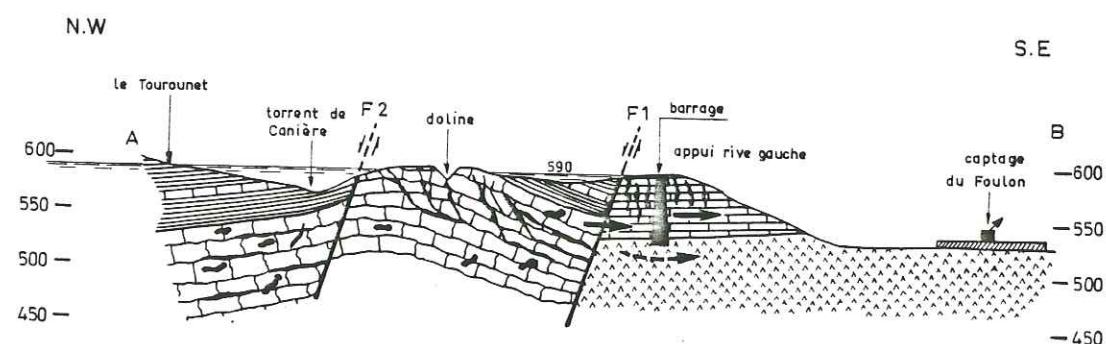
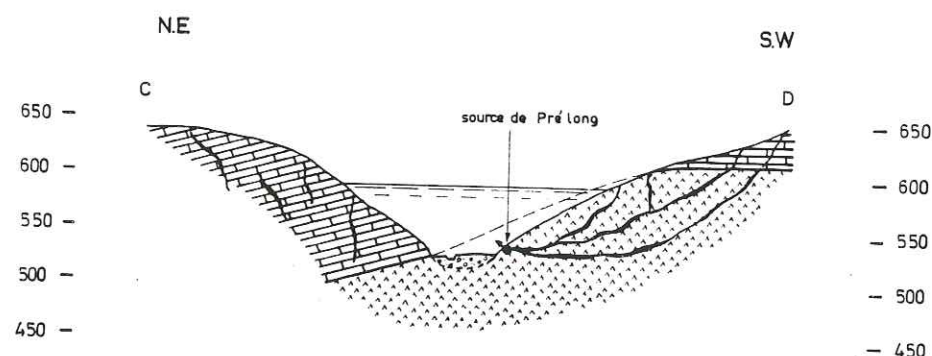
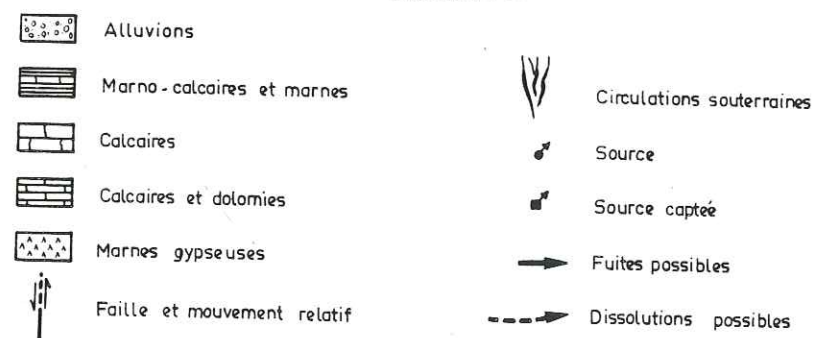


Fig. 10. - Coupe géologique sur l'axe du site



- LEGENDE -



4.4.2 - Une quarantaine de mètres à l'amont du site, en rive gauche, la faille F 1 met en contact les marno-calcaires du Crétacé inférieur avec les calcaires et dolomies du Lias.

Cet accident s'observe très bien au bord de la route : il est matérialisé par un arrêt brutal des bancs calcaires et la présence d'une zone très broyée et déformée.

En rive droite, du fait de l'orientation N 60° E, le contact Trias-Crétacé recule vers l'amont et se retrouve à 200 m de l'axe de l'ouvrage, masqué par des éboulis ; la roche est très fracturée.

4.5 - ETAT DE LA ROCHE EN PLACE

- En rive gauche, les calcaires du Lias sont peu altérés, mais la fracturation y est très développée, ce qui explique l'importance des éboulis vifs qui tapissent le versant 200 m à l'aval du site.
- En rive droite, on observe sur les affleurements du Trias des traces de dissolution très nettes dans les marnes gypseuses.

4.6 - HYDROGEOLOGIE

4.6.1 - Rive droite

Deux sources importantes jaillissent au pied des gypses du Keuper (sources de Pré Long).

La plus amont, a un débit moyen de 6 l/s et est très séléniteuse. Elle a provoqué l'éboulement d'une masse de Trias et la création d'une niche d'arrachement dans le substratum.

La plus aval, se trouve sur l'axe de l'ouvrage. Son débit doit être plus important et nous l'avons estimé à 10 l/s environ (avril 1977).

Ceci prouve l'existence de circulations souterraines dans ces terrains et surtout leur sensibilité à la dissolution par les eaux (des boyaux de dissolution sont visibles sur l'affleurement qui est à l'aval du site entre les cotes 570 et 590).

4.6.2 - Rive gauche

Deux cent cinquante mètres à l'aval de l'axe, sur la terrasse du Loup, a été entrepris dès 1901 un important captage qui sert à l'alimentation en eau de la ville de Grasse.

Une série de sources souligne sur une centaine de mètres le contact des éboulis de pente et de la terrasse. Les travaux de captage ont montré que l'on touchait ici les marnes gypseuses, dont la "perméabilité relative" est plus faible que celle des calcaires du Lias. Elles jouent le rôle de "faux plancher étanche" (le captage présente çà et là des pertes irrégulières, CORROY, 1952) à cause de phénomènes de dissolution qui doivent se produire dans les niveaux gypseux.

L'origine des eaux est à rechercher dans le massif du Bau de Saint-Jean et le plateau de Caravagne (hors de l'épure) où l'on note de très nombreux indices karstiques.

Cette source a un débit moyen compris entre 300 et 600 l/s. Une crue de 1425 l/s a été jaugée le 3 février 1977 par le S.R.A.E. d'Aix-en-Provence. Le débit d'étiage est estimé à 50 l/s environ.

4.7 - ETANCHEITE DU SITE

Que ce soit en rive droite ou en rive gauche, le site de Cipières n'est pas étanche (fig. 10).

Tout ce qui a été dit à propos de l'hydrogéologie de la cuvette ou du site le prouve (dissolutions, karst, sources) et les circulations amont-aval du site sont certaines (vers la source du Foulon en particulier).

D'autre part, il ne semble pas possible de réaliser un organe d'étanchéité efficace pour lutter contre ces infiltrations car il n'y a pas de niveaux étanches, ni en fondation ni dans les versants (sous le gypse du Keuper il y a, en principe, des dolomies cargneulisées très perméables du Muschelkalk).

4.8 - STABILITE DES APPUIS ET VALEUR DE LA FONDATION

La rive gauche pourrait fournir un appui mécaniquement acceptable.

Il n'en est pas de même pour la rive droite, où l'on observe des arrachements et des effondrements dans le gypse, dus à l'émergence des sources de Pré Long.

D'autre part, la dissolution du gypse permet la formation de cavités souterraines pouvant à long terme s'effondrer et provoquer des glissements ou des tassements. GOUNON, MENEROUD et REY (1973) ont montré, dans divers points du département, que l'instabilité des marnes à gypse du Keuper provenait en grande partie des conditions hydrogéologiques : ces marnes renferment des niveaux aquifères en charge liés à des circulations dans les dolomies sous-jacentes (J.P. FLOTTE, 1975).

En conséquence, l'appui rive droite, ainsi que la fondation qui devrait toucher ce gypse, ne peuvent pas offrir des garanties de stabilité suffisantes pour que l'on puisse envisager la réalisation d'un ouvrage sur ce site.

5 - CONCLUSION

Le site de Cipières sur le Loup présente des conditions géologiques et hydrogéologiques très défavorables pour la réalisation d'un ouvrage :

- la cuvette n'est pas étanche et ses versants montrent quelques signes d'instabilité ;
- le site lui-même n'est pas étanche et il ne semble pas possible d'envisager un étanchement artificiel, du fait de l'inexistence de niveaux susceptibles de jouer le rôle de plancher imperméable pour y arrêter un voile. On risquerait également de contaminer par les eaux de la retenue le captage du Foulon qui alimente Grasse.

De plus, dans l'appui rive droite et en fondation, des phénomènes de dissolution dans les gypses peuvent créer des effondrements remettant en question la stabilité de l'ouvrage, la présence de la retenue ne pouvant qu'activer ce processus.

Aussi, il ne nous semble pas opportun de proposer des travaux de reconnaissance sur ce site. Si l'on envisage de déplacer l'axe vers l'aval, les problèmes ne sont pas résolus car les conditions géologiques sont identiques sur au moins 5 kilomètres.

D'autre part, on ne peut pas envisager de noyer le captage du Foulon.

En amont, la vallée se resserre et il n'y a plus de cuvette offrant une retenue importante.

En conséquence, l'aménagement de Cipières sur le Loup doit être abandonné, trop de facteurs étant défavorables à sa réalisation.

BARRAGE D'ANSIGNAN (PYRENEES-ORIENTALES)

1 - INTRODUCTION

Le barrage d'Ansignan se situe sur la Desix, affluent de rive droite de l'Agly, dans lequel elle se jette, à l'aval du village d'Ansignan. La vallée pourrait être barrée quelques centaines de mètres en aval du confluent de la Desix avec la Matassa, affluent de rive gauche (fig. 11).

Cette étude a été réalisée sur un fond topographique au 1/10000 de l'Institut Géographique National.

Le barrage envisagé retiendrait à la cote 300 un volume de 38 Hm³. L'ouvrage aurait environ 80 m de hauteur (fig. 12).

2 - GEOLOGIE REGIONALE

On se trouve dans la partie ouest du massif hercynien de l'Agly et de sa bordure mésozoïque dans des terrains essentiellement métamorphiques (fig. 13).

Le degré de métamorphisme est d'ailleurs très variable puisque la gamme de formations rencontrées s'étend des gneiss très métamorphiques du massif de l'Agly aux terrains sédimentaires de son enveloppe, qui n'ont connu qu'un faible flux de chaleur.

La structure est conditionnée par de grands accidents N 100° - 130° E qui permettent de délimiter un certain nombre d'unités ou "blocs" tel le bloc d'Ansignan-Trilla, le bloc de Palmade ou le synclinal de la forêt de Boucheville.

3 - LA CUVETTE DE RETENUE

3.1 - MORPHOLOGIE

Au niveau de la ferme des Albas, la cuvette se divise en deux branches :

- l'une grossièrement WNW-ESE dans la vallée de la Matassa,
- l'autre SW-NE dans la vallée de la Desix.

Fig. 11. - Plan de situation

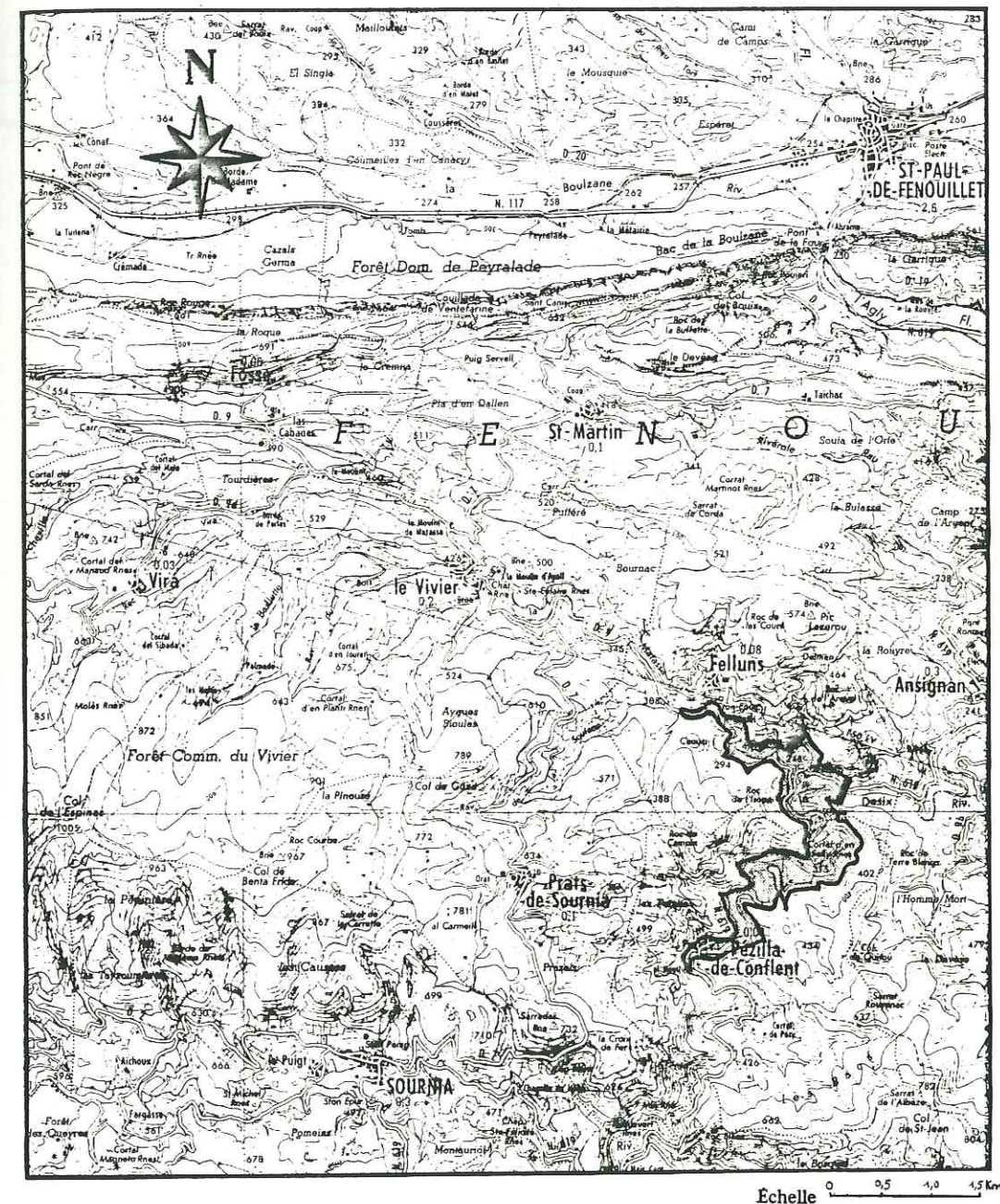


Fig. 12. - Courbes hauteurs-volumes/surfaces

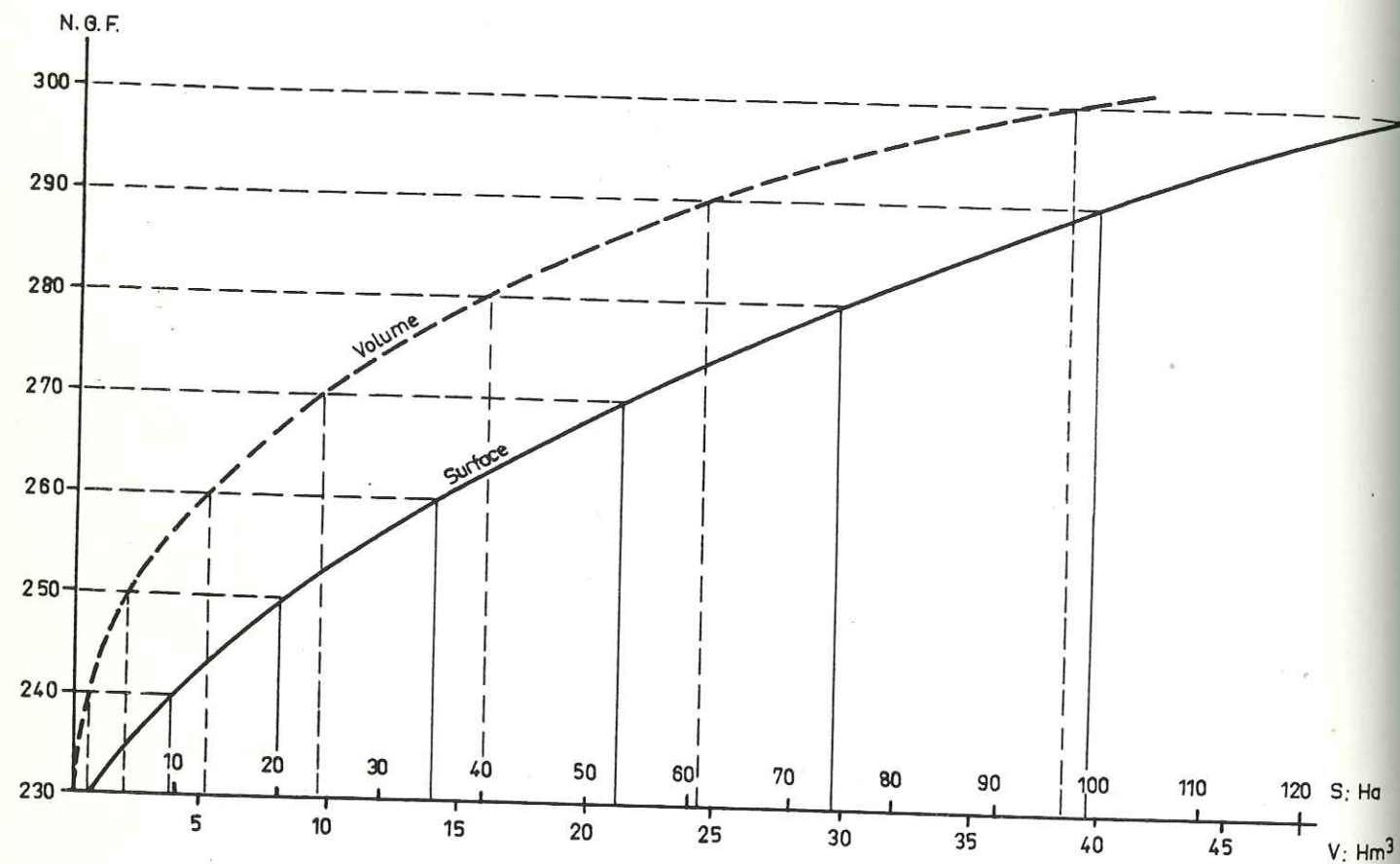
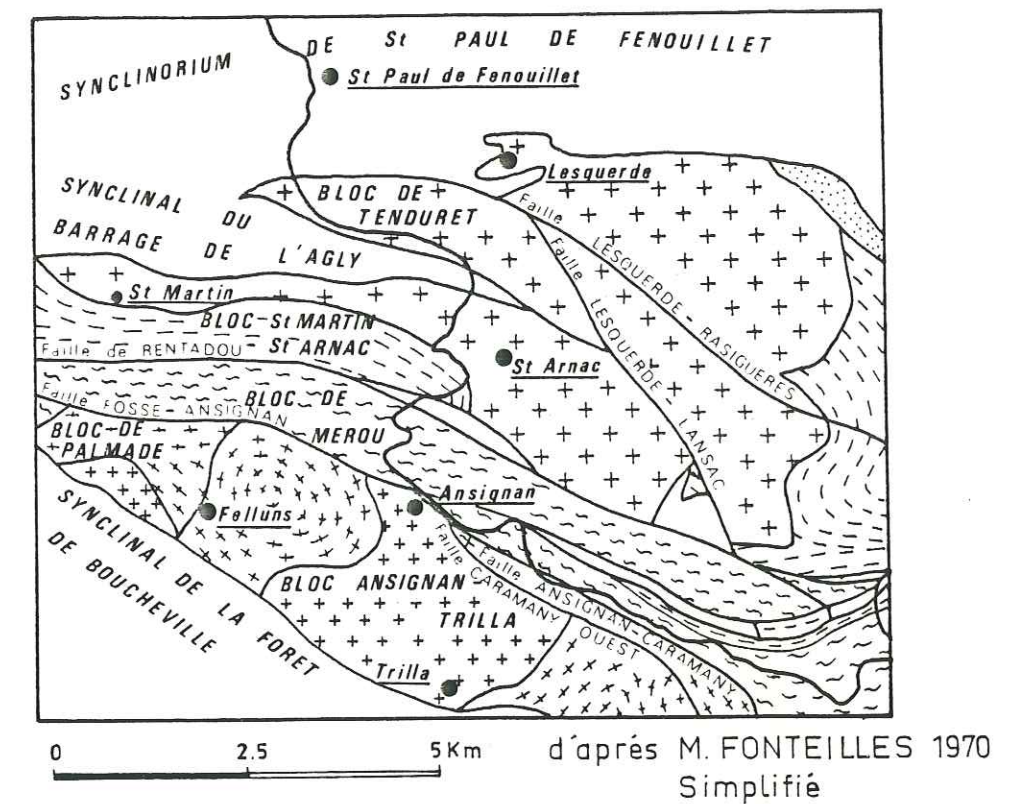


Fig. 13. - Schéma structural de la partie ouest du massif hercynien de l'Agly



-  Mézozoïque
 -  Silurien et Dévonien
 -  Cambrien (?) et Ordovicien
 -  Gneiss de Bélesta
 -  Gneiss de Caramany
 -  Granite de St Arnac
 -  Granite d'Ansignan
- } PRECAMBRIEN

Dans la première, la plus encaissée, la retenue se termine au pied du village de Felluns ; dans la seconde, elle atteint Pézilla-de-Conflens.

La Desix, comme la Matassa, dessine de nombreux méandres.

3.2 - LITHOLOGIE DES DIFFERENTS TERRAINS

3.2.1 - Substratum (fig. 14)

3.2.1.1 - Marnes métamorphiques

Ce sont des formations primitivement sédimentaires de l'Albien qui ont subi une légère cuisson et qui se présentent sous un faciès très particulier.

La roche dure a une patine très sombre, gris sale avec de rares reflets marron, et est uniformément grise en cassure avec quelques filonets blanchâtres de calcite. Le débit est plus ou moins schisteux. Même dans les affleurements très compacts, on retrouve le fin litage caractéristique des séries marneuses et calcaréo-marneuses.

3.2.1.2 - Calcaires marmorisés

Ce sont des calcaires cristallins d'aspect identique aux terrains précédents à l'affleurement, mais dont la cassure révèle une blancheur éclatante due au reflet des nombreuses facettes des cristaux de calcite.

3.2.1.3 - Gneiss de Caramany

La roche est rubanée, litée, assez claire (quartz, orthose) et l'on distingue parfois de nombreux grenats (pyrope). Les lits sombres sont constitués par des pyroxènes (hypersthène).

3.2.1.4 - Granite d'Ansignan

Il s'agit d'une granodiorite porphyroïde (orthose), sombre en cassure, à biotite hypersthène et grenat. La patine de cette roche est généralement rousse.

LEGENDE

-  Alluvions grossières
-  Alluvions fines
-  Eboulement
-  Eboulis stabilisés
-  Produits d'altération du substratum
-  Zone broyée ou altérée
-  Marnes métamorphiques et calcaires marneux
-  Calcaires marmorisés
-  Gneiss de Caramany
-  Granite d'Ansignan 1 quartz 2 passée dioritique
-  Alternance granite - granodiorite
-  Faille 1 observée 2 supposée
-  Contour géologique 1 observé 2 suppose
-  Source
-  1. Pendage 2. Pendage vertical
-  A/B Zone de site

0 100 500 m

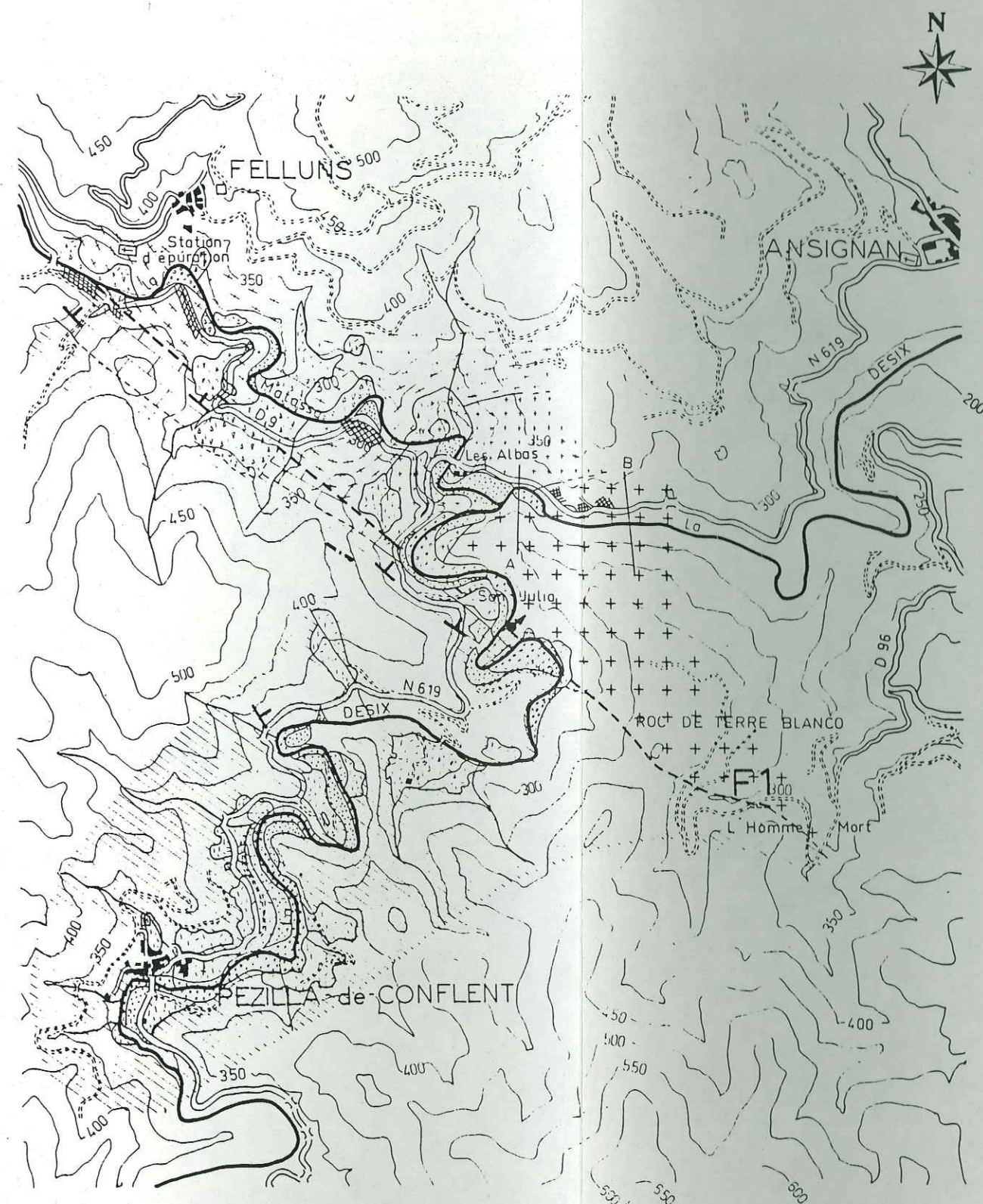


Fig. 14. - Carte géologique

3.2.1.5 - Alternance granite-granodiorite

C'est une variété de bordure du granite d'Ansignan (M. FONTEILLES, 1970) avec des alternances de passées de granite porphyroïde orienté et des niveaux de gneiss clairs à grenats, qui ont une épaisseur métrique. Aucune discontinuité n'existe entre les deux types de roche.

3.2.2 - Terrains de couverture

- En fond de vallée, on rencontre essentiellement des alluvions grossières ou fines qu'il est parfois difficile de différencier lorsque le recouvrement végétal est important.
- Sur les versants, les produits d'altération du substratum sont plus ou moins développés. Ils sont la plupart du temps mélangés à des éboulis aujourd'hui stabilisés. Ils se raccordent insensiblement aux alluvions des rivières, au bas des pentes.

3.3 - STRUCTURE

Sur l'ensemble de l'aménagement, on différencie deux secteurs bien distincts :

- un secteur nord-est constitué par le socle hercynien cristallophyllien ;
- un secteur sud-ouest essentiellement formé des terrains crétacés.

Ces deux secteurs sont séparés par un grand accident (faille F 1 de Trilla-Belesta) orienté N 130° E, souligné par un niveau broyé, mylonitique, argileux, blanc - verdâtre (coloration due à la chlorite).

Le secteur nord-est offre les terrains granitiques et gneissiques du bloc d'Ansignan-Trilla. Une enveloppe granite-granodiorite ceinture le granite au Nord-Ouest sur plus de 100 m de large. Sa direction passe progressivement de Nord-Sud à Est-Ouest. Les gneiss de Caramany se moulent sur cette structure.

Dans le secteur sud-ouest, l'ancienne stratification des marnes apparaît très régulièrement orientée entre N 120° - 140° E avec un pendage fort vers le Nord-Est (60 à 80°).

3.4 - STABILITE DES VERSANTS

Elle semble bonne d'une manière générale. Dans la vallée de la Matassa cependant signalons que le plan d'eau baignera la partie inférieure d'un gros éboulement, aujourd'hui stabilisé, sous la station d'épuration du village de Felluns. Cet éboulement est constitué par de très gros blocs de gneiss, emballés dans une matrice argilo-sableuse.

L'action de l'eau risque de créer quelques tassements, par départ des particules fines.

3.5 - ETANCHEITE DE LA CUVETTE

- Les terrains du socle hercynien peuvent être considérés comme étanches à l'échelle d'une retenue.
- Les marnes et calcaires marneux métamorphiques sont à cette échelle étanches car aucune perte, ni résurgence n'ont été observées sur la Desix et les torrents affluents. Ces phénomènes auraient pu apparaître dans des niveaux anciennement plus calcaires qui auraient ainsi gardé leur perméabilité originelle. La Desix étant la vallée la plus profonde creusée dans l'Albien, cela confirme l'étanchéité de cette formation.
- Par contre, la bande de calcaires marmorisés entre les terrains cristallins et l'Albien a été étudiée dans le détail. Elle montre, en effet, des phénomènes karstiques développés en particulier sur l'affleurement situé en rive droite de la Desix au Sud de San Julia. Une source sort de ce pointement rocheux au niveau du cours de l'Agly.

La structure indique que ces calcaires se biseautent en rive droite vers le Sud-Est où ils disparaissent (Roc de Terre Blanco). L'affleurement dessiné près de l'Homme Mort est lenticulaire et sa puissance est inférieure au mètre. Plus au Sud-Est, il n'existe pas d'affleurements et il faut aller à l'Est de Trilla (hors de l'épure) pour les retrouver.

Les marbres sont par contre très développés vers le Nord-Ouest, dans la vallée de la Matassa (150 m de puissance) mais n'ont aucun point bas hors du bassin de celle-ci.

La source signalée plus haut n'est due qu'à un court-circuitage du méandre très aigu de la Desix par ses propres eaux qui empruntent les boyaux karstiques développés dans les marbres à cet endroit.

Aussi, on peut donc dire que cette formation n'est pas un vecteur de fuite possible pour les eaux de la retenue.

4 - GEOLOGIE DU SITE

4.1 - TOPOGRAPHIE

Cinquante mètres environ à l'aval du confluent de la Desix et de la Matassa, un resserrement de la vallée apparaît et se prolonge environ sur 400 mètres vers l'aval (entre A et B). Plusieurs sites peuvent y être distingués mais aucun ne présente des conditions, aussi bien topographiques que géologiques, supérieures aux autres. Aussi, à ce stade de l'étude, nous prendrons en considération toute la zone située entre A et B et nous examinerons ses caractéristiques géologiques (fig. 14).

4.2 - LITHOLOGIE

Cette zone de sites se trouve dans les granites d'Ansignan ou sur l'alternance granite-granodiorite de bordure. Nous avons vu en 3.2.1.4 qu'il s'agissait d'un granite porphyroïde, à patine rousse, plus ou moins altéré.

D'après nos observations, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- la partie très à l'amont de la zone de site (A) est constituée en rive gauche par l'alternance granite-granodiorite orienté. Cette formation n'apparaît pas en rive droite du fait de la courbure qu'elle dessine. Elle constitue cependant une roche moins altérée que le granite d'Ansignan s.str.

En thalweg (rive droite), des alluvions grossières sont apparentes.

- le granite d'Ansignan s.str. vers l'aval, est plus altéré sur les versants que sa variété de bordure, mais cette altération n'est pas régulière et certains points durs peuvent être distingués : entre A et B au niveau d'une passée dioritique moins altérée, ou vers B éperon en rive gauche dans la topographie. Entre ces points particuliers, le granite est très altéré par endroits. Certaines passées véritablement pourries peuvent être encadrées par de la roche plus saine, l'altération semblant se développer verticalement et sur un ou deux mètres de longueur (en bord de route).

Ces phénomènes d'altération sont vraisemblablement liés à des différences dans la composition minéralogique de la roche. C'est un point qu'il faudra éclaircir ultérieurement.

4.3 - FRACTURATION - STRUCTURE

De nombreux plans de fracture ont été observés dans les granites le long de la N 619. Dès maintenant, nous en distinguerons deux types :

- Plans avec stries de friction qui témoignent d'un mouvement le long de ce plan
- Plans de fracture simples.

4.3.1 - Plans avec stries de friction

Entre A et B, des plans généralement N 100° - 110° E verticaux ou avec un fort plongement vers le Sud, de l'ordre de 80° à 85° sont fréquents. La disposition des stries, leur orientation et leur forme laissent supposer que dans la plupart des cas, c'est le compartiment Nord qui est descendu (ou le compartiment Sud qui est monté). On aurait ainsi une série de petites failles qui témoignent de phénomènes de compression au sein du massif granitique.

4.3.2 - Plans de fracture simples

Trois grandes familles de fractures semblent s'individualiser :

- des plans N 170° E ou N 20° E plongeant de 60 à 80° vers l'Ouest ;
- des plans N 20° - 60° E plongeant de 70° vers le Sud-Est (avec parfois un remplissage pegmatitique) ;
- des plans N 105° E ou N 135° E plongeant de 15° à 45° vers le Nord-Est qui semblent correspondre à la foliation dans des passées légèrement gneissiques.

4.4 - VALEUR DES APPUIS

En rive gauche, le long de la route, le granite est décomprimé et quelques blocs apparaissent assez instables.

D'autre part, le nombre des passées altérées introduit une hétérogénéité dans l'ensemble du massif. Il existe certainement une bonne emprise pour le barrage, mais à ce stade de l'étude, il est difficile de trouver la meilleure zone de fondation. Il est donc nécessaire de chiffrer

l'importance du développement en profondeur de la tranche altérée et de la zone décomprimée de surface pour choisir le site qui offre les meilleures garanties de stabilité (topographie précise et géologie détaillée). Sauf près de A, les alluvions sont inexistantes en thalweg où la roche apparaît très saine.

4.5 - ETANCHEITE DU SITE

Dans de tels terrains, les problèmes d'étanchéité au droit du site doivent pouvoir être résolus de façon classique.

Quelques fuites peuvent se produire dans la tranche décomprimée des granites, mais elles pourront être bloquées par un simple voile d'injection sous l'ouvrage. Ce voile sera peut-être poursuivi au large, s'il s'avérait que les passées altérées permettent, compte tenu de leur état en profondeur et de leur orientation, un cheminement des eaux vers l'aval avec contournement immédiat des appuis.

4.6 - CONCLUSION SUR LA VALEUR DE LA ZONE DU SITE

Il semble, après cette reconnaissance, que la qualité de la roche diminue vers l'aval (en rive gauche) par augmentation de l'altération. Mais l'importante végétation n'a pas permis de voir si cela se confirmait sur la rive droite.

5 - MATERIAUX UTILISABLES

Les granites et granodiorites de la variété de bordure du granite d'Ansignan devraient fournir les matériaux pour la confection des agrégats pour béton ou les enrochements car ce niveau est plus sain que les granites d'Ansignan s.str.

6 - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Contrairement à l'exemple précédent, l'étude de surface vient de montrer que ce site ne posait pas de problèmes délicats. Les seules inconnues subsistant sont en fait le choix du meilleur axe dans la zone du site et l'épaisseur de la tranche altérée et perméable du substratum. Aussi nous proposerons des reconnaissances en deux temps.

Premier temps

- levé topographique au 1/500 de la zone des sites jusqu'à la cote 320 sur 500 m le long de la vallée, en débordant de 50 m à l'amont de A et à l'aval de B ;
- renseignement géologique de ce plan ;
- réalisation de profils sismique-réfraction afin de connaître les zones les moins décomprimées.

Ces travaux permettront de définir un emplacement de site optimal.

Deuxième temps

Exécution de 5 sondages de reconnaissance avec essais Lugeon sur l'axe choisi en vue de préciser :

- l'épaisseur de la tranche altérée, fracturée et décomprimée des granites (choix du niveau de fondation et du type d'ouvrage) ;
- la perméabilité des différents horizons rencontrés (dimensionnement du voile d'injection) et, par là même, le comportement hydromécanique du terrain (phénomènes de débouillage, colmatage ou d'élasticité observables à partir des essais d'eau).

7 - CONCLUSION

Au terme de cette étude géologique de surface préliminaire, nous pouvons avancer que la cuvette d'Ansignan peut être considérée étanche à l'échelle d'une retenue et que la stabilité de ses versants semble assurée.

Dans la zone des sites A-B, il n'y a pas de conditions géologiques s'opposant à la construction d'un barrage.

Le programme minimal de travaux de reconnaissance proposé permettra de définir le meilleur site et, en fonction des résultats obtenus, le type d'ouvrage qui s'inscrira le mieux dans un tel contexte.

BARRAGE DU PAS DES ONDES (DROME)

1 - INTRODUCTION

Le site du Pas des Ondes se trouve dans le département de la Drôme, à environ 3 km au Sud-Ouest de la localité de La Motte-Chalancon (fig. 15).

A l'étroit topographique, un ouvrage haut de 20 à 25 m fermerait une cuvette de l'ordre de 5,4 Hm³ à 8,5 Hm³ (fig. 16), le plan d'eau ne pouvant dépasser la cote 530-535, à cause de la présence d'un glissement de terrain à l'amont de la retenue.

L'étude ci-après a été faite sur un agrandissement au 1/5000 des cartes topographiques au 1/25000 Nyons n° 3 - 4 et Dieulefit n° 7 - 8.

2 - GEOLOGIE REGIONALE

Cette région appartient au domaine subalpin des Baronnies occidentales. Les terrains, tous d'origine sédimentaire, sont d'âge mésozoïque et plus précisément du Jurassique supérieur (Malm) et du Crétacé inférieur.

On peut individualiser trois grands types de formations :

- les séries calcaires qui forment la plupart des falaises et lignes de crêtes dans le paysage (d'après les cartes géologiques Nyons et Dieulefit au 1/50000) ;
- les séries marneuses à topographie plus molle où l'érosion crée des ravinements importants ;
- les séries calcaréo-marneuses, plus dures que les précédentes, et donnant parfois de petites cuestas à la limite des dépressions marneuses.

Pendant le Crétacé supérieur, cette région a été le siège d'une tectonique active. Les mouvements qui ont eu lieu au cours du Sénonien sont la cause principale des grands plis synclinaux ou anticlinaux qui en dessinent les traits dominants.

3 - LES TERRAINS RENCONTRES

Deux grandes catégories s'individualisent (fig. 17) :

- les terrains meubles ou de couverture,
- le substratum rocheux.

Fig. 15. - Plan de situation

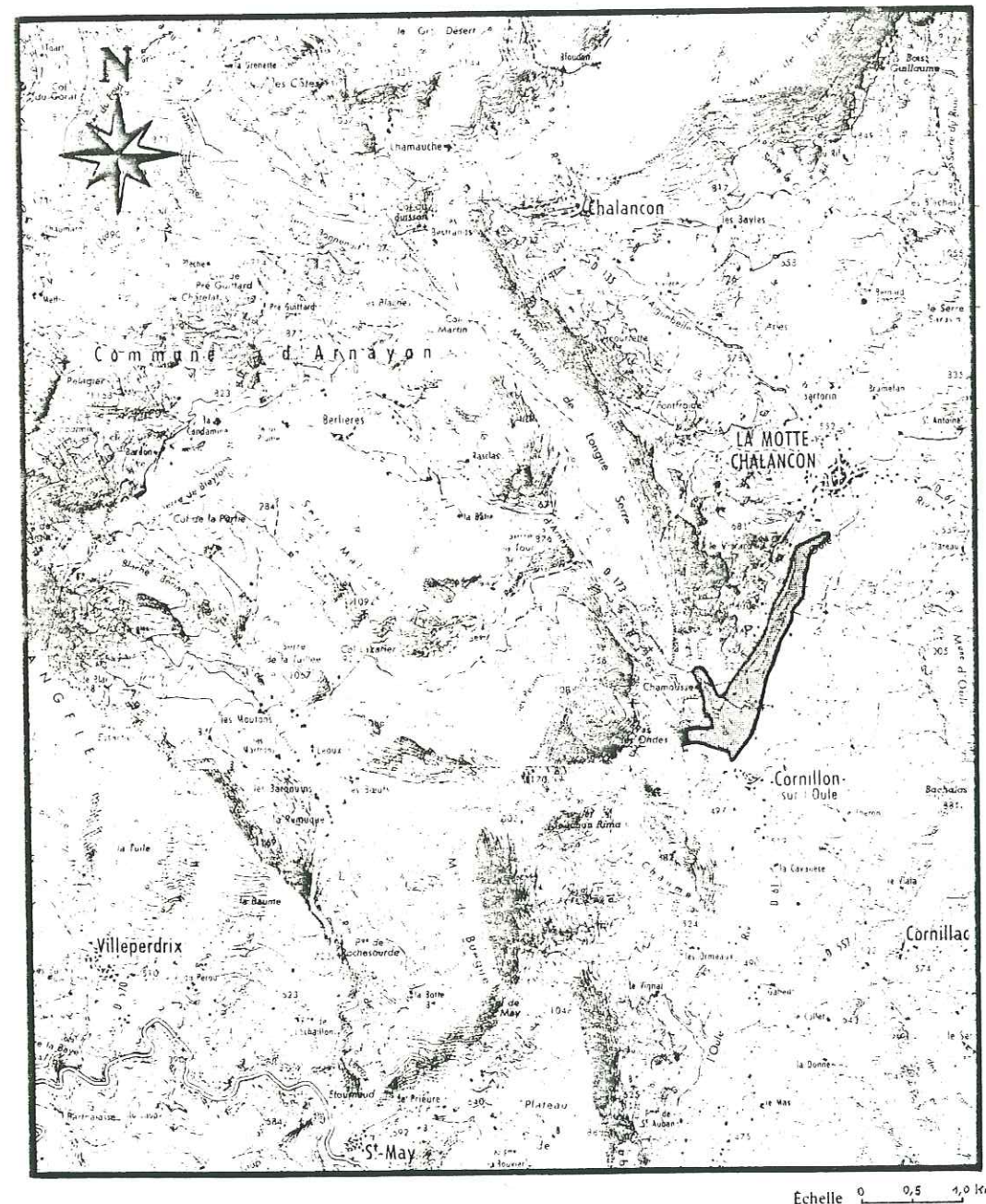
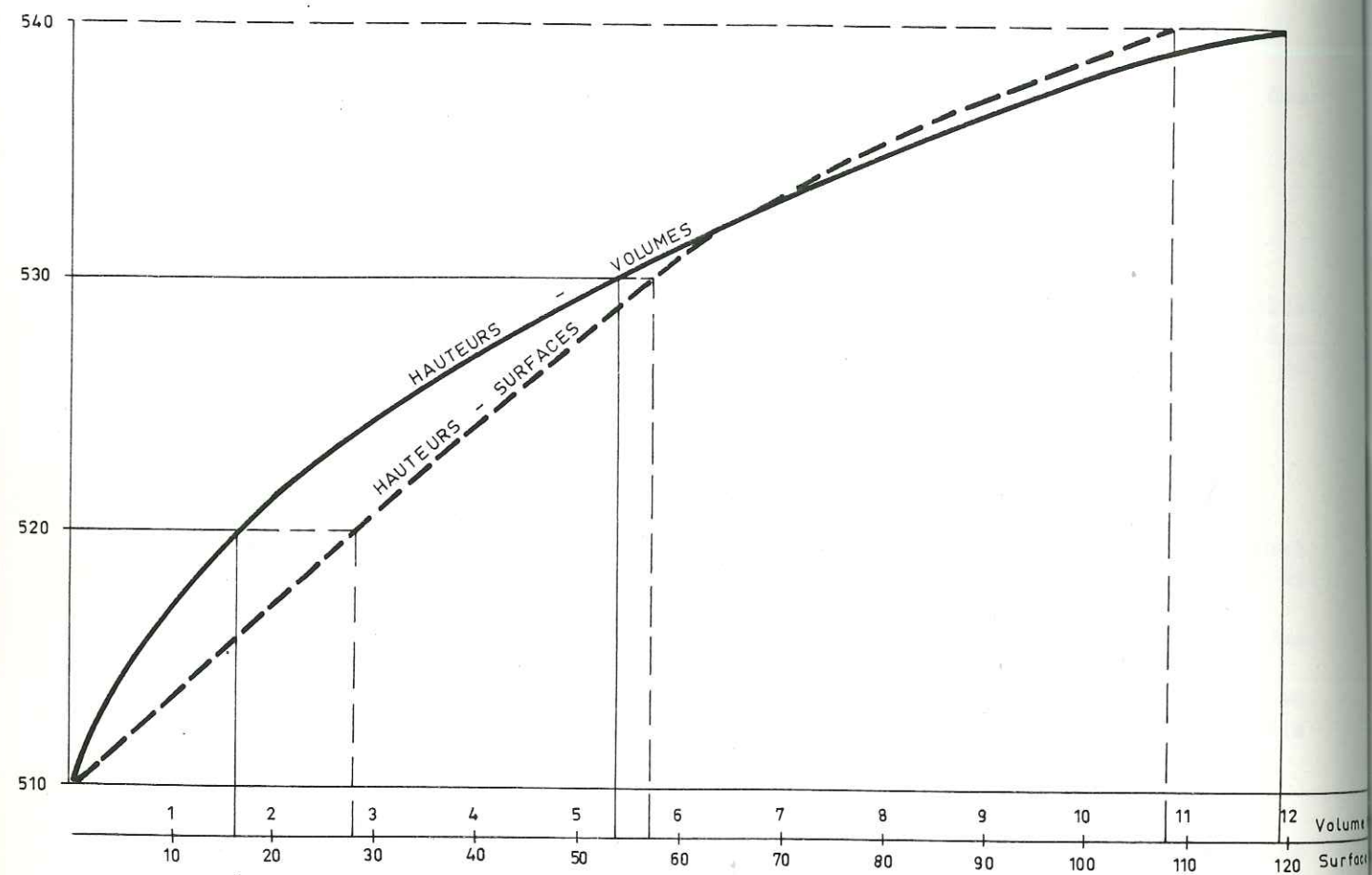


Fig. 16. - Courbes hauteurs-volumes/surfaces



LEGENDE

-  Cone de déjection
-  Alluvions modernes
-  Basse terrasse
-  Haute terrasse
-  Eboulis et altération
-  Glissement de terrain (coulée)
-  Eroulement
-  Tuf
-  Marno-calcaire (VALANGINIEN)
-  Calcaire en petits bancs (BERRIASIEN et TITHONIQUE supérieur)
-  Calcaire massif (TITHONIQUE)
-  Calcaire et marne (SEQUANIEN-RAURACIEN)
-  Marne et calcaire marneux (ARGOVIEN)
-  Marne (OXFORDIEN et CALLOVIEN supérieur)
-  Marnes et plaquettes (CALLOVIEN moyen et inférieur)
-  Faille
-  Pendage
-  Source ou suintement
-  Source captée
-  Contour géologique
-  Coupe
-  Zone de sites
-  Niche d'arrachement

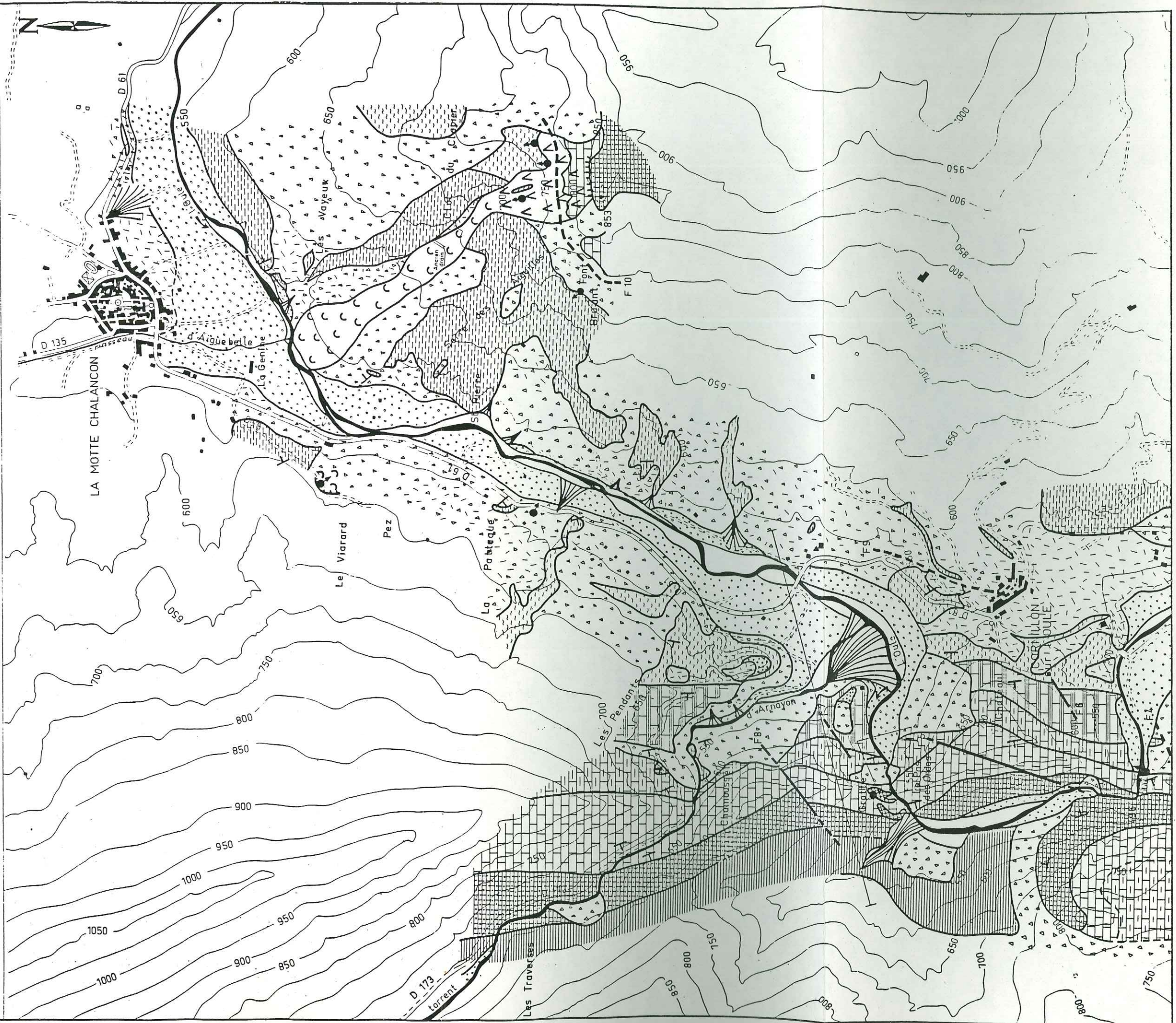


Fig. 17. - Carte géologique

3.1 - TERRAINS MEUBLES

- Cônes de déjection

Dans tous les cas, ils ont une morphologie très plate. Le plus important est celui du ruisseau d'Arnayon formé de blocs calcaires légèrement émoussés pris dans une matrice argileuse brun - noirâtre.

- Alluvions modernes

Assez développées le long du cours de l'Oule, elles offrent des galets calcaires avec çà et là des plages plus limoneuses ou sableuses.

- Basses terrasses

Elles s'étalent dans le lit moyen de la rivière dont la largeur maximale atteint 400 m au pied de La Motte-Chalancon, avec une valeur moyenne de 150 m. Elles sont situées environ 1,5 m au-dessus des alluvions modernes. Leur composition en est voisine, si ce n'est que la partie fine est plus importante.

- Hautes terrasses

Deux affleurements de matériaux alluvionnaires anciens ont été localisés près du confluent du ruisseau d'Arnayon et de l'Oule. De gros galets calcaires sont emballés dans une matrice argileuse brune, cette formation ayant une épaisseur d'environ 3 m. Leur altitude relative est d'environ + 35 m par rapport au niveau de l'Oule.

- Eboulis et altération

Ils tapissent la plus grande partie des versants de la cuvette. La plupart du temps, ils forment un ensemble où il n'est guère possible de séparer éboulis et altération. En effet, les falaises calcaires qui dominent la vallée alimentent en blocs calcaires le bas des pentes, les blocs se mélangeant à la tranche du substratum le plus souvent marneux (Callovien) qui a perdu un peu de sa cohésion.

Aussi cette formation sera soit à tendance très calcaire (brèche de pente), lorsque le substratum est à dominante calcaire (les Pendants - Chamousset), soit plus argileuse (la Pattaque, Pez), si le bed-rock est à dominante marneuse.

- Glissements de terrain

Deux glissements récents (les Vayeux, le Viarard) et un glissement ancien (Sud de Saint-Pierre) ont été répertoriés. Nous parlerons plus loin en détail du type et du mode de mise en place de ces glissements qui sont assez différents puisqu'ils peuvent affecter la tranche superficielle altérée des marnes avec arrachement d'ensemble du versant, ou bien se déplacer sous forme de véritable coulée boueuse.

- Ecroulements

Ils affectent localement la falaise tithonique (point 853) ou les niveaux moins calcaires du Séquano - Rauracien ou de l'Argovien (les Pendants). Lors de notre étude, la D 173 a d'ailleurs été coupée par des chutes de blocs à l'endroit où elle franchit les terrains du Rauracien.

Nous verrons, à propos de la cuvette et de ses versants, que ces écroulements rocheux peuvent faciliter ou provoquer le glissement de terrains situés au-dessous.

3.2 - SUBSTRATUM ROCHEUX

En descendant chronologiquement l'échelle des temps géologiques, nous avons individualisé 7 formations.

3.2.1 - Valanginien

Cet étage est formé de marno-calcaires dans sa partie inférieure (les Traverses), qui deviennent plus marneux par la suite.

On a ainsi des alternances de calcaires marneux beige jaunâtre en patine, et de marnes grises, l'épaisseur des bancs étant de l'ordre de 0,2 à 0,4 m.

L'ensemble de la formation a une puissance d'environ 150 m.

3.2.2 - Berriasien et Tithonique supérieur

Sous les niveaux précédents, apparaît une série de calcaires clairs, en petits bancs, très durs, avec parfois de très minces interlits marneux et des niveaux de calcaires bréchiques.

Dans leur partie inférieure, il est très difficile de les distinguer du Tithonique supérieur sous-jacent, la limite entre les deux formations étant en fait assez théorique.

L'épaisseur de ces niveaux est de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Ils constituent les terrains les plus occidentaux de la cluse du Pas des Ondes.

3.2.3 - Tithonique (Portlandien - Kimméridgien supérieur)

Il forme plusieurs grosses corniches de calcaires en gros bancs massifs, séparés par des niveaux plus lités et moins durs.

Ces calcaires sublithographiques blancs, beiges, ou gris en cassure, montrent parfois des passées de pseudo-conglomérats intra-formationnels, ou bréchiques.

Quelques avens témoignent de la karstification de cet étage qui, avec une épaisseur d'une centaine de mètres, constitue "l'échine" topographique majeure.

3.2.4 - Kimméridgien inférieur (Séquanien - Rauracien)

Toute la formation est faite d'alternances assez régulières de bancs de calcaires francs, grisâtres, de 0,5 à 0,7 m de puissance et de niveaux marneux dont l'épaisseur peut varier.

Aussi dans les 2/3 supérieurs, les bancs marneux sont plus développés et constituent la "vire" séquanienne à laquelle fait suite une série plus calcaire à bancs marneux réduits qui forme dans le paysage la petite corniche rauracienne.

Ces deux sous-étages ont une épaisseur totale d'environ 150 m.

Quelques plissements peuvent rompre la monotonie de l'ensemble.

3.2.5 - Argovien (et base du Rauracien)

Ce sont des alternances de bancs de calcaires marneux bruns en cassure et à patine jaunâtre avec des marnes sombres très esquilleuses,

voire schisteuses, plus ou moins indurées. Par endroits des passées "plus calcaires" s'individualisent et sont séparées par de véritables couloirs marneux très étroits d'environ 1 m de large (rive droite de l'Oule en amont du Pas des Ondes).

L'épaisseur de la série se situe aux alentours de 250 m.

3.2.6 - Oxfordien et Callovien supérieur

Cette importante formation constitue la partie supérieure des "terres noires". Ces marnes gris-bleuté sont épaisses de 500 m et leur monotonie n'est rompue que par la présence de rares niveaux de nodules calcaréo-gréseux, jaunâtres.

Les eaux de ruissellement les entaillent profondément si elles ne sont pas protégées par une couverture végétale importante ; elles constituent alors autant de zones stériles (Est des Pendants, la Pattaque).

3.2.7 - Callovien moyen et inférieur

Par rapport au Callovien supérieur, ces marnes sont plus sombres, de couleur marron - gris sale, plus esquilleuses, peut-être plus indurées. La partie supérieure de ce sous-étage montre un faciès particulier avec la présence de plaquettes calcaréo-gréseuses brunâtres à jaunâtres, épaisses de 1 à 2 cm.

Ici encore, sans protection végétale, le ruissellement sculpte rapidement ces terrains en formant les classiques paysages de "bad lands" (Serre des Aiguilles).

Cette série augmente l'épaisseur des terres noires d'environ 300 mètres.

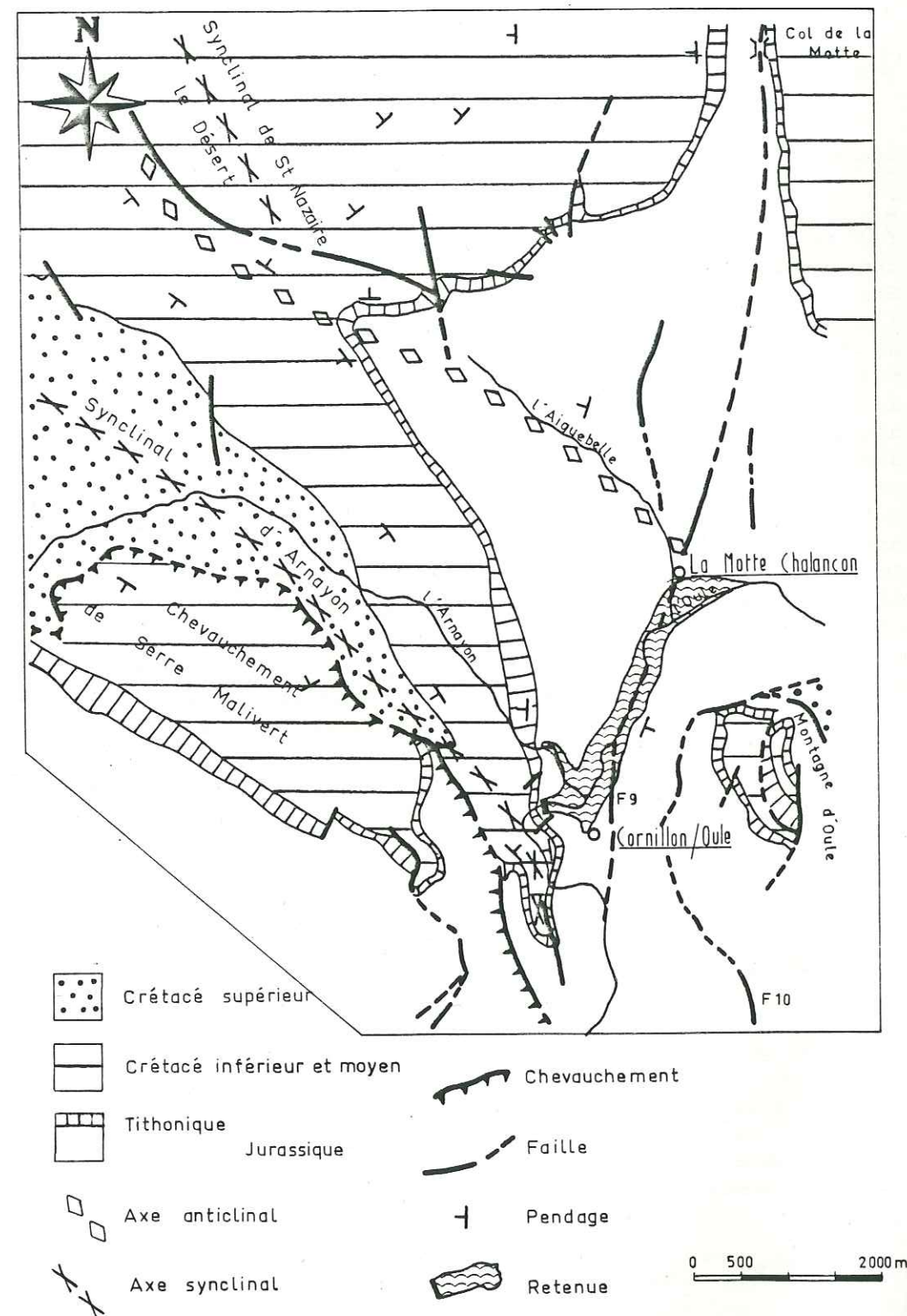
4 - STRUCTURE GENERALE

La tectonique de cette région est très complexe (fig. 18).

La vallée de l'Oule, entre le village de Cornillon et La Motte-Chalancon puis plus au Nord-Ouest la vallée du ruisseau d'Aiguebelle sont creusées dans les terrains du Jurassique.

La structure générale montre de grands plis orientés grossièrement NW-SE :

Fig. 18. - Schéma structural



- le synclinal de Saint-Nazaire-le-Désert dont l'axe, de direction NNW-SSE, est interrompu vers le Sud par un accident ;
- le synclinal d'Arnayon NW-SE, à coeur de Crétacé supérieur, et dont l'orientation s'incurve progressivement pour devenir Nord-Sud ;
- l'anticlinal du ruisseau d'Aiguebelle séparant les 2 synclinaux précédents.

Outre cette structure relativement simple, on observe encore :

- à l'Ouest du Pas des Ondes, le chevauchement de Serre Malivert qui recouvre le flanc Sud - Ouest du synclinal d'Arnayon, chevauchement consécutif à des mouvements lors de la phase pyrénéo-provençale. Son extrémité Sud-Est, à coeur de Berriasien, est recoupée par l'Oule au Sud du Pas des Ondes (point 496) ;
- au Nord-Est de Cornillon, se développe la structure complexe de la montagne d'Oule, formant un petit synclinal, Nord-Sud très faillé, de Crétacé inférieur en contact avec des marnes par la faille F 10* ;
- notons enfin un important accident régional, de direction Nord-Sud passant par le col de la Motte à 6 km au Nord de La Motte-Chalancon et dont la faille F 9 peut être la prolongation vers le Sud. Les grands accidents, qu'il est difficile de mettre en évidence dans les marnes, se poursuivent très au Nord. "Ils affectent le socle, comme le montrent les études géophysiques régionales. Ce sont des décrochements dextres avec déplacement relatif vers le Sud du compartiment oriental et surélévation relative du compartiment occidental". Ils sont liés à la 1re phase alpine post-Oligocène ;
- d'autres petits accidents affectent localement la barre tithonique et les séries qui l'encadrent (fig. 17). Nous en avons répertorié quatre. Leur direction générale est N 50° E pour F6, F7 et F8 et N 20° E pour F5. Ce sont des petits décrochements dextres, dont le rejet horizontal varie entre 10 et 40 m.

5 - ETUDE PRATIQUE DU SITE

5.1 - LITHOLOGIE

Le site topographique est au Pas des Ondes, au point où la vallée franchit la barre tithonique. On rencontre, de l'aval vers l'amont : les calcaires berriasiens épais de 50 m, les calcaires massifs du Tithonique, atteignant 100 m de puissance sous lesquels apparaît la série du Séquanien - Rauracien, constituée d'alternances de barres calcaires et de bancs marneux variables dans leurs proportions.

5.2 - STRUCTURE - FRACTURATION

La zone du site se trouve sur le flanc Nord-Est du synclinal d'Arnayon.

* La numérotation des failles va de F5 à F10.

On a donc une structure monoclinale (fig. 19), fortement pentée de 55° vers le Sud-Ouest, c'est-à-dire vers l'aval.

La direction des couches est N 160° - 170° E, la rivière les recoupant à peu près perpendiculairement.

Quelques petites ondulations apparaissent dans l'Argovien en rive droite s'accroissant vers la cote 590 avec l'apparition d'un petit accident (F 7) décalant d'une vingtaine de mètres le contact Rauracien - Argovien.

En rive gauche, un gros banc de la base du Tithonique semble arrêté net par une fracture subverticale N 100° E.

Cette fracturation N 100° - 110° E est la plus fréquente.

5.3 - FONDATION DE L'OUVRAGE - VALEUR DES APPUIS

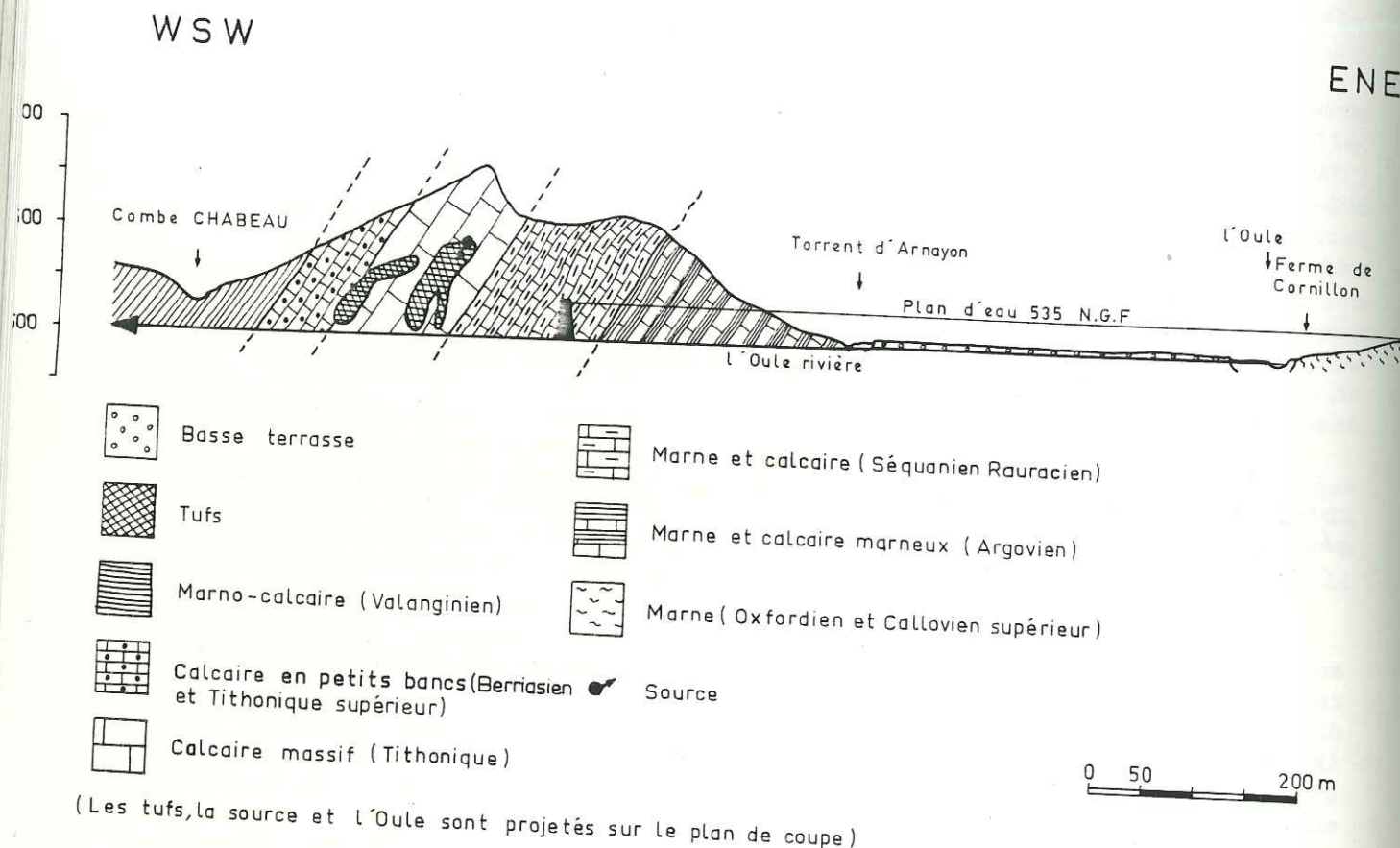
En thalweg, l'épaisseur des alluvions n'est pas connue.

Elle peut être importante, compte tenu de la morphologie très raide des versants. Il sera nécessaire de les décaper pour un ouvrage en béton.

En versant, toujours pour un ouvrage en béton, nous préférons ancrer le barrage à l'amont des calcaires tithoniques. En effet, la résurgence de la grotte du Pas des Ondes a formé de très importants dépôts de tufs qui masquent le rocher sur une grande surface. Ces matériaux sont instables et interdisent tout appui en rive droite sur les calcaires pour un ouvrage en béton, à moins de "purger" la falaise ce qui serait très onéreux. De plus les fractures N 100° E qui coupent cette barre risquent de créer une certaine instabilité des appuis et surtout, pour un ouvrage au droit de la barre tithonique, les risques de chutes de blocs pouvant détériorer le barrage doivent être pris en compte. En effet, le Tithonique forme une corniche qui est très surplombante par endroits par rapport au Séquanien sous-jacent, ce qui augmente d'autant les risques de voir de gros blocs se détacher de la paroi.

En plaçant l'ouvrage une centaine de mètres à l'amont, dans les calcaires et marnes du Kimméridgien inférieur, on aura des appuis satisfaisants soit pour un ouvrage en béton du type barrage à contreforts ou barrage-poids, soit pour un barrage en enrochements (on se tiendra à l'amont des éboulis qui masquent le Séquanien sur les deux rives et qui proviennent pour la plupart du Tithonique).

Fig. 19. - Coupe géologique en rive droite de l'Oule



5.4 - ETANCHEITE DU SITE

5.4.1 - Problèmes posés par les calcaires tithoniques

Des différents types de terrains qui affleurent sur le site, les calcaires tithoniques-berriasiens sont les plus perméables (fig. 20).

En effet, ils présentent de très nombreux indices karstiques comme en témoigne l'importante résurgence qui en sort en rive droite, aux environs de la cote 590. L'origine de ces eaux n'est pas connue avec certitude. Néanmoins, on peut avancer l'hypothèse qu'il s'agit d'une perte du ruisseau d'Arnayon, lorsque ce dernier franchit ces calcaires au pied des rochers de la Buisse (indices karstiques entre les cotes 590 et 620). En période d'étiage, lorsque le ruisseau est clair, l'eau de la résurgence du Pas des Ondes est également claire. Par contre, avec les eaux boueuses de l'Arnayon en crue (27 février 1978), l'eau ressort à la grotte avec un léger trouble.

Une simple coloration pourrait préciser ce point.

En rive gauche, le Tithonique se développe vers le Sud et se trouve recoupé 800 m à l'aval du site par le méandre que décrit l'Oule. Il y a donc là un très gros risque de fuite si les eaux de la retenue sont en contact avec cette formation (site B1) :

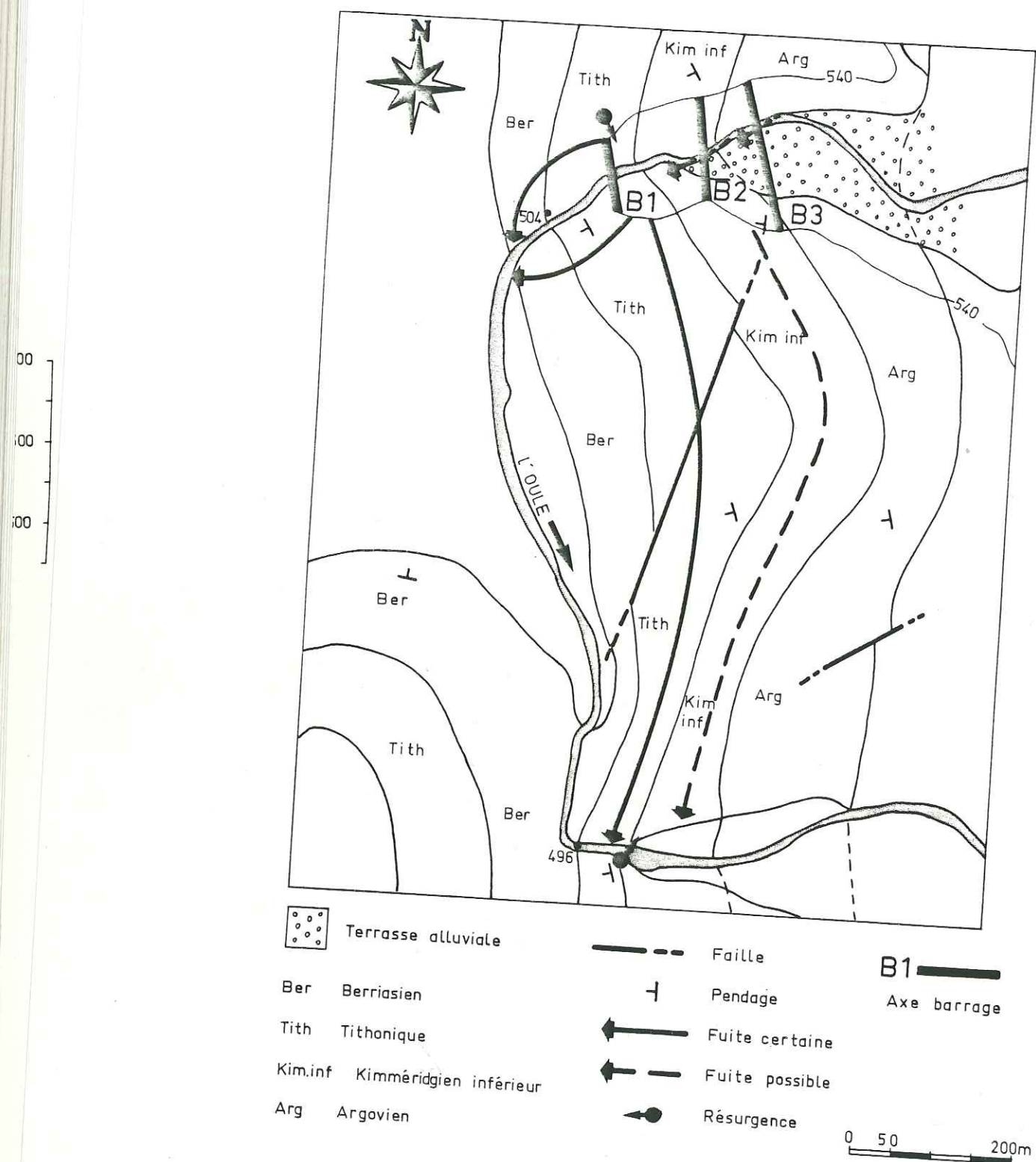
- si la perméabilité du Berriasien sus-jacent est importante, il y aura contournement rapide des appuis du barrage par les eaux (les fractures N 100° E faciliteront ces cheminements vers l'aval) ;
- si les réseaux karstiques se poursuivent vers le Sud, les eaux chemineront dans le Tithonique et pourront résurger lorsque l'Oule recoupe les calcaires au point 496 en rive gauche (des petites venues d'eau apparaissent d'ailleurs en rive droite).

Dès maintenant, on peut dire qu'en aucun cas les eaux de la retenue ne devront toucher cette formation très karstifiée, ni même trop s'en rapprocher (R. THEROND, 1973).

5.4.2 - Etanchéité au droit du Kimméridgien inférieur (Séquanien-Rauracien)

Avec ces niveaux, où l'on a des alternances de bancs calcaires et de bancs marneux (site B2), les circulations amont-aval sont déjà plus difficiles à établir, les passées marneuses, compte tenu de leur direction, formant un écran naturel. De plus, du fait de la présence des

Fig. 20. - Risques de fuites selon la position du barrage



marnes, les fractures pouvant jouer le rôle de drains (N 100° E) risquent d'être beaucoup plus fermées et remplies de matériaux argileux ce qui n'est pas le cas dans le Tithonique.

La seule possibilité de fuite serait la présence, au sein de cette série, de quelques bancs calcaires karstifiés (plutôt dans le Rauracien) qui draineraient les eaux vers l'aval en court-circuitant le méandre selon le même schéma que pour B1. L'observation de la rive gauche de l'Oule à l'aval du point 496 n'a pas montré de venues d'eau le long du versant, ni d'indices de karstification.

Dans tous les cas, la réalisation d'un voile normal sous un ouvrage en béton et d'un voile en retour en rive gauche, venant se fermer en profondeur sur les calcaires marneux et marnes de l'Argovien que l'on peut considérer comme étanches, assurerait l'étanchéité au droit du site.

Une autre solution consisterait en l'édification d'un barrage en enrochements (légèrement plus à l'amont) et dont le masque amont serait entièrement en contact avec l'Argovien, supprimant alors tous risques de fuites dans le substratum (site B3). Les alluvions seraient traitées par un voile normal ancré dans l'Argovien. Le grand éboulis de rive gauche (au Nord du Château) poserait quelques problèmes de stabilité lors du décapage des fouilles et les dimensions de l'ouvrage seraient plus importantes puisque la vallée s'élargit notablement vers l'amont.

5.4.3 - Conclusion sur l'étanchéité du site

En se tenant à l'amont du Tithonique, les risques de fuites sont beaucoup plus réduits. L'étanchéité devrait pouvoir être assurée de façon satisfaisante dans tous les cas par un organe d'étanchéité approprié selon le type de barrage retenu : voile normal et en retour pour un ouvrage en béton (B2) masque amont et voile normal pour un barrage en enrochement (B3).

6 - ETUDE PRATIQUE DE LA CUVETTE

Excepté à l'amont du site, et dans la vallée du ruisseau d'Arnayon, la cuvette est dans sa quasi totalité inscrite dans des marnes callovo-oxfordiennes.

6.1 - ETANCHEITE DE LA CUVETTE

Les marnes, à l'échelle d'une retenue, peuvent être considérées comme étanches.

Le plan d'eau étant limité à la cote 535, il n'atteint pas, dans la vallée de l'Arnyon, les calcaires tithoniques qui auraient, s'ils avaient été baignés, constitué un vecteur de fuites probables avec résurgence naturelle des eaux à la grotte du Pas des Ondes, immédiatement à l'aval de l'appui rive droite de l'ouvrage.

D'autre part, la faille F 9, qui passe au petit col du village de Cornillon, met en contact des marnes de nature différente mais, dans de tels matériaux, un accident de ce type ne peut guère jouer le rôle de drain pour les eaux de la cuvette.

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, on peut considérer la cuvette du barrage comme étanche.

6.2 - STABILITE DES VERSANTS

Nous avons vu en 3.1 que des phénomènes de glissement ou d'écroulement avaient été observés en cuvette.

6.2.1 - Glissement de terrain de La Motte-Chalancon

Ce glissement affecte le versant compris entre le Clot du Clapier et Serre des Aiguilles, en rive gauche de l'Oule, au Sud-Est de La Motte-Chalancon.

Il a fait l'objet d'une étude par R. MICHEL (1961) qui a suivi son évolution de 1957 à 1960.

La description qui suit tient compte des observations de cet auteur et de celles que nous avons pu faire en 1978.

Le phénomène s'est développé dans les séries marneuses du Callovo-Oxfordien, au droit d'un ancien torrent (les Vayeux) dont le bassin de réception inclut par une falaise de calcaires du Tithonique (point 853). Les calcaires sont d'ailleurs en contact avec les marnes par l'intermédiaire d'un accident (F 10) masqué par les éboulis.

D'après la carte, on constate que la zone glissée comporte deux parties distinctes :

- une partie amont faite de blocs de calcaire de toutes dimensions (bassin de réception et début de la gorge d'écoulement) ;

- une partie aval où se développe une coulée formée de marnes remaniées et de blocs de calcaire épars. Cette coulée recouvre d'ailleurs partiellement un ancien éboulis dont la morphologie laisse penser qu'il a été le siège de mouvements antérieurs.

Le mécanisme du glissement peut se définir de la façon suivante. Le 17 juin 1957 s'est produit un écroulement de la falaise tithonique. Cet écroulement a été facilité par le mauvais état du calcaire, sans doute dû à la proximité de la faille F 10 qui a disloqué localement cette formation et par les importantes pluies du printemps 1957 qui ont dû saturer cette masse calcaire fracturée, créant une mise en pression combinée à un effet de fluage dans les marnes, qui a provoqué la chute d'un volume de roches estimé à 200000 m³. Cette avalanche de blocs s'est précipitée dans l'étroite gorge d'écoulement du torrent des Vayeux qu'elle a rabotée profondément (8 à 10 m). Sous cette poussée, les produits d'altération des marnes, la partie haute des éboulis et de l'ancien cône de déjection du torrent, qui étaient saturés d'eau, se sont mis en mouvement formant une véritable coulée (de 700 m de longueur) qui est descendue jusqu'à l'Oule, repoussant son cours légèrement vers le Nord (formation d'un petit lac).

Des mesures de protection ont été prises : "en période de fortes pluies on pouvait prévoir que la partie amont de l'éboulement resterait assez stable... Par contre la partie basse, argileuse et gorgée d'eau, aurait pu reprendre son mouvement vers le bas... Un drain a été exécuté au moyen d'une tranchée d'une cinquantaine de mètres de longueur qui, partant au-dessous du front de l'éboulement rocheux, conduit directement les eaux de ruissellement au vallon des Vayeux".

Actuellement, on observe encore de nombreuses venues d'eau, au contact écroulement rocheux - marnes, en partie évacuées par ce qui reste de cet ancien drain. Quelques petits glissements se produisent localement en amont de la gorge de raccordement (fluage dû au ruissellement et aux eaux sortant de la couverture de blocs écroulés).

La coulée par contre semble être stabilisée malgré les nombreux suintements qui en jalonnent le corps.

L'entaille du lit de l'Oule vers la nouvelle rive droite, le plus loin possible du glissement, devant permettre une évacuation normale de ses eaux, a été satisfaisante puisque le front de la coulée est stabilisé.

6.2.2 - Masse d'éboulis à l'Ouest de Font Bruant

On observe, en rive gauche de l'Oule, à l'Ouest du Serre des Aiguilles, un important éboulis stabilisé, où l'on voit de nombreux blocs

de calcaire, de taille très variable, emballés dans une matrice argilo-marneuse jaunâtre. Une ancienne ferme est construite sur sa partie supérieure, qui forme un petit replat.

La présence, au-dessus de cette zone, d'une forte pente de marnes ravinées, de l'importante source de Font Bruant (débit estimé à 50 l/s le 28 février 1978), de la faille F 10 ainsi que d'une falaise calcaire très fracturée conduit à conclure que l'on a tous les éléments pour qu'un écoulement, du type de celui qui vient d'être décrit 300 m seulement au Nord-Est, se produise.

Il existe donc une instabilité potentielle de la partie haute du versant, qui n'est pas liée au plan d'eau de la retenue.

6.2.3 - Glissement à l'Est du Viarard

Un petit glissement en cours de formation apparaît sur le chemin qui domine de 50 m, la D 61. Ce phénomène actuellement épidermique affecte la couverture d'éboulis reposant sur les marnes. Un mouvement s'est récemment produit, créant une crevasse affaissant le chemin de 50 cm environ. Le mouvement est arrêté, mais il est certain que des fortes pluies pourraient déclencher une rupture rapide risquant d'obstruer localement la route.

Ce type de mouvement, bien moins important que ceux décrits en 6.2.1 et 6.2.2, n'aurait que peu de conséquences pour un plan d'eau, les volumes mis en cause étant très réduits.

6.2.4 - Conclusion sur la stabilité des versants

- La réalisation d'un plan d'eau est limitée en cote à celle de la base du glissement de La Motte-Chalancon. On peut toucher le pied de ce dernier, comme le fait la rivière, mais il serait risqué d'en engager une plus grande partie, sous peine de voir la coulée se remettre lentement en mouvement, surtout si les battements du plan d'eau sont fréquents. On ne dépassera donc pas une cote voisine de 535-540 (à vérifier de façon précise).
- Des petits glissements superficiels du type Viarard se produisent sans doute, mais n'intéresseront que de faibles volumes de matériaux.
- Ce qui à notre avis constitue la menace la plus sérieuse (vague et déversement sur l'ouvrage) pour le plan d'eau est la possibilité d'écroulement du rebord tithonique, au-dessus de Font Bruant, avec les conséquences qu'il a eues au glissement de La Motte-Chalancon. Il n'est évidemment pas possible de prévoir actuellement l'échéance d'une telle rupture, qui est indépendante du futur plan d'eau.

7 - MATERIAUX

- Les calcaires tithoniques et berriasiens qui affleurent soit dans la vallée de l'Arnayon, 0,7 km à vol d'oiseau à l'amont du site, soit le long de l'Oule, 0,8 km à l'aval, devraient fournir des matériaux utilisables pour des agrégats ou des enrochements.

L'ouverture de carrières serait cependant délicate, compte tenu de l'étroitesse des vallées dans les deux cas.

- L'utilisation de matériaux meubles (terres ou enrochement) prélevés dans les importantes terrasses de l'Oule (amont du confluent Oule - Arnayon à 0,5 km du site ou les alentours de la Génine 2,5 km du site) est à prendre en compte.

8 - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

L'analyse géologique de surface vient de démontrer qu'un certain nombre d'inconnues subsistaient sur cet aménagement, en particulier concernant les problèmes de perméabilité et l'appréciation des risques de fuite sur les sites B2 et B3, l'épaisseur des terrains de couverture, donc le niveau de fondation et la stabilité des versants de la cuvette. Il nous semble donc indispensable de proposer ici les travaux suivants :

- deux profils sismiques perpendiculaires à la vallée pour avoir le profil du bed-rock sous-alluvial ;
- trois à cinq sondages de reconnaissance (selon l'emplacement) avec des essais d'eau Lefranc et Lugeon, d'une cinquantaine de mètres de profondeur dans les versants et une trentaine en thalweg ; ils permettront de reconnaître :
 - . l'épaisseur exacte des alluvions en thalweg et d'étalonner la géophysique,
 - . la perméabilité du bed-rock et de se faire une idée sur l'importance et la forme du voile d'injection ;
- une coloration du torrent de l'Arnayon afin de vérifier l'origine des eaux de la résurgence du Pas des Ondes ;
- un nivellement précis de la base du glissement de La Motte-Chalancon de façon à fixer la cote maximale pour la retenue.

9 - CONCLUSION

Le site du barrage du Pas des Ondes nous donne un exemple un peu plus complexe que le précédent, où la géologie conduit à formuler un certain nombre de réserves mais permet cependant de cerner les principales difficultés et de montrer qu'elles ne sont probablement pas insurmontables. Toutefois les coûts des traitements devront être comparés à ceux de l'ouvrage et seules les reconnaissances proposées permettront d'aborder cet aspect et la suite qu'il y a lieu de donner à ce projet.

En résumant, on peut cependant dire que :

- le site du barrage du Pas des Ondes sur l'Oule devrait offrir des conditions suffisantes de stabilité et d'étanchéité (avec un voile adapté) pour la réalisation d'un ouvrage en béton, ou d'une digue en enrochement selon l'emplacement choisi. Si la cuvette est étanche, elle n'offre par contre pas toutes les garanties de stabilité de ses versants. Le glissement de La Motte-Chalancon (ainsi que la présence du village) limitent la cote du futur plan d'eau aux environs de 535 N.G.F. (à confirmer) ;
- par ailleurs, il existe en rive gauche de la retenue un risque d'écroulement (mouvement rapide et brutal) d'une partie de la falaise tithonique et des éboulis au-dessus de Font Bruant. Cet écroulement est indépendant de l'existence ou non d'un plan d'eau et ne peut être déclenché que par des causes extérieures à celui-ci (pluies exceptionnelles ou séismes). Dans l'état actuel, de nos connaissances, il est difficile de chiffrer exactement le volume de matériaux susceptible d'être mis en mouvement. Par analogie avec les conditions (géologique et topographique) ayant présidé à l'écroulement de La Motte-Chalancon, on peut grossièrement estimer ce volume à 200000-250000 m³ environ. Mais, compte tenu des pentes sous la zone instable, on ne peut affirmer que la totalité de la masse en mouvement arrivera sous la cote 535.

Si ce projet se poursuit, des reconnaissances plus spécifiques devront être entreprises sur ce point particulier.

IV - TABLEAU DE SYNTHESE (Chapitre II)

Au terme de ce chapitre, les principaux points constituant les études préliminaires sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Contenu des études	Niveau d'étude	INVENTAIRE	DIAGNOSTIC Barrages < 20 m	ETUDE GEOLOGIQUE Barrages > 20 m
Zonage géologique Régional (bureau)		1/50000 1/100000		
Visite géologique		Néant	1 à 2 j/site	
Levés géologiques		Néant		5 à 10 j/site
- Coupe schématique - Carte			A main levée Néant	1/5000 à 1/10000
Travaux de pré- reconn.		Néant	Tranchées	(Tranchées)
Définition de trav. de recon. ultérieure		Néant	Tranchées (Géophysique) (Sondages) Géot. matériaux	Tranchées Géophysique Sondages Géot. matériaux
Classement de sites		A partir de Vs/Vd	Favorable Peu favorable Défavorable	Favorable Réserves Défavorable
Document de synthèse		Rapport	Fiche type	Rapport
Exemples exposés			1. Vailhauquès (H) 2. Chabet (Maroc) 3. La Palanqué (Aude)	1. Cipières (A.-M.) 2. Ansignan (P.-O.) 3. Pas des Ondes (Drôme)
- Valeur des exemples			1. Défavorable 2. Favorable 3. Peu favorable	1. Défavorable 2. Favorable 3. Réserves
- Conditions géolog. rhéologiques ou réserves			1. Etanchéité 2. Etanchéité	1. Etanchéité et stabilité fond. 3. Etanchéité

CHAPITRE III

GEOLOGIE DE L'AVANT-PROJET

C'est à ce stade de l'étude que le géologue fournira sa plus grosse part de travail et c'est là aussi qu'il devra disposer des moyens financiers nécessaires pour accomplir au mieux sa tâche.

Les études d'avant-projet se divisent en deux stades distincts :

- l'avant-projet sommaire, où l'accent est particulièrement placé sur la faisabilité. En FRANCE, ce niveau d'étude aboutit (dans les cas favorables) à la présentation du Dossier préliminaire devant le Comité technique permanent des barrages (C.T.P.B.) ;
- l'avant-projet détaillé, dans lequel les points de détail écartés précédemment sont analysés avec le maximum de rigueur et de moyens. Ici, la faisabilité de l'ouvrage ne peut plus être remise en cause, le projet étant déjà bien engagé, puisqu'il s'agit de soumettre, in fine, le Dossier définitif à l'appréciation des membres du C.T.P.B. C'est seulement après l'acceptation de ce dossier que le projet pourra être mis en oeuvre.

Nous allons détailler maintenant ces deux phases en les étayant, comme précédemment, par des exemples vécus.

I - ETUDES GEOLOGIQUES D'AVANT-PROJET SOMMAIRE

Elles se déroulent après les études préliminaires pour les grands barrages, après le diagnostic géologique pour les petits. Pour ces derniers, la plupart du temps les études géologiques se termineront à ce stade.

En effet, un certain nombre de réserves peuvent subsister sur les sites jugés favorables. Elles concernent, comme nous le verrons au chapitre V, en particulier les problèmes d'étanchéité, surtout au niveau du site, ceux de stabilité des versants sur l'ensemble de l'aménagement et la qualité de la fondation. Pour les petits collinaires, la disponibilité en matériaux de construction peut également avoir des conséquences importantes sur la faisabilité. Que les barrages soient grands ou modestes, l'approche reste la même, et ce n'est que la quantité de travaux qui variera. Ce sera encore plus sensible pour de très petits ouvrages. Ceux-ci ne permettent généralement pas, compte tenu des budgets disponibles, des reconnaissances confortables et parfois ce stade d'A.P.S. est réduit à sa plus simple expression.

Il convient donc de lever toutes les indéterminations par des interventions complémentaires afin de pouvoir se prononcer sur la faisabilité du projet et aboutir au choix du type d'ouvrage le mieux adapté au site.

Logiquement, les études de génie civil devraient suivre les reconnaissances. La pratique montre que ce n'est hélas pas toujours le cas pour des raisons de programme ou d'emploi de personnel. Sur cette chronologie, le géologue devra, néanmoins, être intransigeant et se faire respecter. Nous avons eu l'exemple d'un A.P.S. prématuré, avec un dossier de génie civil pratiquement terminé avant la fin des reconnaissances, alors que la faisabilité du site n'était pas acquise. Par la suite, les résultats ont conduit à l'abandon du projet. On imagine les conséquences financières de telles bévues.

Pour un A.P.S., l'ingénieur de génie civil (K. JOHN, 1974) devra définir la catégorie d'ouvrage la mieux adaptée aux conditions naturelles, et ce qui l'intéresse au premier abord c'est la définition du niveau de fondation du futur barrage (importance des fouilles), mais aussi la qualité, la quantité et l'éloignement des gîtes de matériaux.

A ce stade de l'étude, les différentes interventions comprendront essentiellement :

- de la topographie,
- des études géologiques de terrain,
- des travaux de reconnaissance.

A - TOPOGRAPHIE

Un levé topographique de la zone du site et de la cuvette est nécessaire.

En ce qui concerne le site, un plan détaillé au 1/500 semble bien adapté. Pour la cuvette, une échelle au 1/1000 est souvent suffisante pour les petits ouvrages ; pour les grands, le 1/5000 est parfait.

Ces documents permettront d'estimer de façon précise les futures caractéristiques de l'ouvrage (volume du corps du barrage, volume stocké).

Le plus souvent, on aura tout intérêt à associer le géologue à ce levé. En effet, celui-ci souhaitera voir matérialisées sur le futur plan certaines particularités géologiques mises en évidence antérieurement (fractures importantes, niveaux repères) et qui pourront a posteriori permettre des corrélations ou des interprétations plus fiables. Il

interviendra simplement en remplaçant temporairement le porte-mire du géomètre, pour relever tous les points qu'il jugera singuliers.

Disposant de ce plan, le géologue aura un support de travail solide pour la suite de ses travaux.

B - ETUDES GEOLOGIQUES DE TERRAIN

Elles seront l'occasion d'un contrôle approfondi du diagnostic ou de l'étude préliminaire initiale. Nous ne reviendrons pas sur les méthodes cartographiques, supposées connues. Au chapitre V, nous donnerons seulement quelques recommandations pour la réalisation de ces documents qui devront, dans tous les cas, être les plus exacts possible.

Nous attirons l'attention sur le fait que, sur certains sites, les conditions d'observation peuvent être très mauvaises. Le géologue s'efforcera alors de reporter sur la carte toutes les observations partielles ou indirectes effectuées (morphologie particulière, indices de glissements, dépressions, sources, zones humides, etc.). Ce n'est qu'après les reconnaissances qu'il pourra les utiliser avec profit. Le prochain exemple traité montre bien l'importance de la collecte de toutes ces petites informations.

Cette géologie de détail associée à la topographie permettra également de choisir la position la plus avantageuse pour édifier des organes délicats tels que l'évacuateur de crues ou la tour de prise du barrage par exemple. Grâce à une cartographie sûre, les reconnaissances envisagées lors des études préliminaires seront finalement implantées au mieux en fonction des réserves ou inconnues qu'il faut maintenant lever.

C - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

S'agissant d'une étude de faisabilité, la maîtrise foncière des terrains n'est pas assurée et il paraît difficile d'engager ici des travaux de déboisement qui, bien que très utiles, restent délicats à effectuer tant qu'une décision de réalisation n'a pas été prise sur un site. Excepté quelques layons donnant accès au chantier pour les moyens techniques d'investigations classiques, il nous semble exclu d'investir plus à ce niveau.

Les principaux types de reconnaissance à envisager et que l'on utilisera couramment seront donc :

- tranchées et puits,
- prospection géophysique,

- forages ou sondages,
- prospection des gîtes de matériaux.

Nous ne définirons pas ces différentes techniques, mais essayerons de montrer leur intérêt et dans quel but il est souhaitable de les mettre en oeuvre, aussi bien sur le site du barrage que dans la cuvette de retenue.

1 - Tranchées et puits

Les premières devront être réalisées au moyen d'une pelle hydraulique permettant de descendre à une profondeur d'au moins 5 mètres. Il sera préférable qu'elle soit montée sur chenilles afin de pouvoir facilement circuler dans toute la zone à prospecter (site et cuvette).

Elles ont l'avantage de pouvoir être réalisées rapidement (10 à 20 tranchées ponctuelles par jour) et au moindre coût. Elles constituent de ce fait l'outil principal d'étude des barrages de faible hauteur.

Les seconds ne seront utilisés que lorsque l'on n'aura pas la possibilité d'avoir une pelle. Leur mise en oeuvre est longue et ne permet pas de ce fait un quadrillage serré de la zone à prospecter. Ce n'est qu'un pis-aller qui a cependant l'avantage de faire travailler la main d'oeuvre locale.

Les tranchées permettent une observation "in situ" et des prises d'échantillons des différentes formations rencontrées. Elles pourront bien sûr être menées de pair avec la prospection des gîtes de matériaux. Souvent les tranchées permettent de mieux implanter les sondages et même parfois de réduire leur nombre quand elles "renseignent" exactement certaines zones.

Dans certains cas, l'exécution de ces simples travaux sera suffisante pour conclure sur la faisabilité des petits ouvrages.

2 - Prospection géophysique

Il s'agit de géophysique légère : petite sismique ou prospection électrique d'un coût généralement peu élevé (LAKSHMANAN, 1970).

Ces méthodes ont l'avantage d'être non destructives et de donner des informations "en continu", contrairement aux procédés précédents qui renseignent de façon ponctuelle (SCHNEIDER, 1979).

Les principaux éléments obtenus à partir de telles reconnaissances peuvent se résumer ainsi :

- position du contact terrains de couverture-substratum donc épaisseur des premiers et morphologie du second (site et cuvette) ;
- importance de la tranche décomprimée ou altérée du substratum (zonation des vitesses sur le site) ;
- position de la nappe dans un terrain aquifère ;
- repérage de zones faillées, broyées ou altérées, dans le bed-rock (pertes de temps) ;
- évaluation des modules d'élasticité dynamique du substratum.

Rappelons que ces mesures géophysiques, pour être plus précises, doivent être "calées" sur des sondages qui autoriseront un bon étalonnage des paramètres enregistrées (vitesses ou résistivités).

En fait, on aura intérêt à demander au géophysicien d'établir un rapport provisoire après sa campagne de reconnaissance.

On procédera ensuite aux sondages et, après seulement, ce dernier rédigera un rapport définitif s'appuyant sur les renseignements du sondeur.

Pour un A.P.S. de grand barrage, il est souhaitable d'exécuter 3 profils transversaux à la vallée, dont 1 sur l'axe et les 2 autres en pied de parements de l'ouvrage, complétés par 3 profils longitudinaux dont 1 en thalweg et 1 à mi-hauteur de chaque versant.

3 - Forages ou sondages

Ces méthodes restent onéreuses mais apportent maintes informations. Les forages destructifs sont cependant deux à trois fois moins coûteux que les sondages carottés. Aujourd'hui on y associe des mesures d'enregistrement des paramètres de foration (vitesse, pression de fluide, poussée, vibrations) qui, lorsqu'ils sont bien étalonnés, renseignent parfaitement sur les changements lithologiques (ANTOINE et FABRE, 1980). On peut également les instrumenter a posteriori aux diverses méthodes de diagraphies.

a) Implantation

De toute évidence, l'implantation des sondages devra être opérée en tenant compte des résultats de l'étude géologique de surface et éventuellement de la géophysique. Ce n'est hélas pas toujours le cas. Nous avons vu des sondages suivre le même banc calcaire d'une série localement verticale, sur un site de l'Ouest de la France !

b) Nombre et longueur des sondages

Leur nombre varie en fonction des inconnues du site. Le minimum semble néanmoins de 3 (un sur chaque versant, un en thalweg) pour les petits ouvrages, et de 5 (un de plus au milieu de chaque versant) pour les grands ; cela au niveau de la zone d'emprise du barrage.

Leur longueur ne dépasse pas en principe celle de la hauteur maximale de la future construction au-dessus de sa fondation. Ceci est d'ailleurs plus une habitude qu'une règle absolue en l'absence de problèmes particuliers.

Le géologue, déjà alerté sur certains problèmes, fixe aussi pour chaque sondage inclinaison et orientation (Cf. leur inutilité dans le cas précédent).

Des sondages pourront également tester les zones d'emprunt de matériaux (tarière) ou l'emplacement d'organes annexes particulièrement délicats (évacuateur de crues, galerie, etc.) bien que ce dernier point soit plutôt du niveau de l'A.P.D.

c) Informations fournies par les sondages

Les principales informations pouvant être obtenues à partir des résultats des sondages concernent :

- la lithologie des terrains rencontrés,
- leur fracturation,
- leur perméabilité.

Nous ne rappellerons que quelques points essentiels, toutes ces techniques étant très connues (CAMBEFORT, 1957).

- Lithologie

Les coupes lithologiques des terrains associées à celles de la géophysique permettront d'effectuer des corrélations d'un sondage à l'autre et ainsi de dresser un document très détaillé au droit du site étudié. Sur celui-ci pourra en outre apparaître la profondeur de la zone d'altération du substratum (zone d'oxydation) qui souvent est voisine de la profondeur de la tranche "décomprimée" fournie par la géophysique.

Cette coupe permettra encore de fixer la cote de fondation de l'ouvrage et de la bêche d'ancrage, ce point ayant une incidence très nette sur le coût du futur aménagement.

- Fracturation

Pour les terrains qui s'y prêtent (roches peu anisotropes), l'indice R.Q.D. (DEERE, 1967) caractérise bien la fracturation globale d'un massif. Là encore, des corrélations seront recueillies d'un sondage à l'autre pour dresser une coupe de la fracturation sous l'ouvrage.

- Perméabilité

Nous ne reviendrons pas sur tous les essais de perméabilité qui sont très connus (LUGEON, 1933, - LETOURNEUR et MICHEL, 1971). Nous évoquerons seulement au chapitre V la philosophie que l'on peut en tirer, des essais Lugeon en particulier.

Le but de ces divers essais sera de pouvoir dresser une coupe des perméabilités sous l'ouvrage, bien utile à la définition des organes d'étanchéité. Dans les exemples qui suivront nous en verrons de nombreuses.

Nous remarquerons simplement que pour des retenues collinaires, les perméabilités mesurées devront rester faibles.

En effet, la réalisation d'un voile d'étanchéité profond est généralement exclue. En cas de fortes perméabilités de la fondation sur une grande épaisseur, le projet devra être abandonné. Seules des injections très superficielles peuvent être envisagées dans certains cas, ou alors la mise en place d'un tapis amont.

Pour de grands ouvrages, les dimensions des voiles d'étanchéité sont telles qu'elles peuvent avoir une très forte incidence sur le coût global de l'aménagement (de l'ordre de 10 à 20 %).

d) Etude des matériaux

Le géologue prospectera à la pelle et fera l'inventaire le plus exhaustif possible des zones apparemment favorables pour trouver des matériaux utilisables (nature, mode de gisement, roche mère). Rappelons que le volume disponible évalué devra être au moins le double de celui de l'ouvrage projeté (terres ou enrochements). Les reconnaissances devront

donc assurer ce point afin qu'il n'y ait plus de doutes sur les quantités (ALLARD, 1980). Le géologue attirera de plus l'attention sur les risques éventuels à exploiter certaines zones quand elles sont instables ou saturées par une nappe (DEBAILLE et GHISTE, 1968).

Pour ce qui est de l'étude des matériaux eux-mêmes, nous ne parlerons pas des très nombreux types d'essais à la disposition des projeteurs et qui relèvent de la mécanique des sols et des roches (PANET, 1979).

D - CONCLUSION

L'étude qui vient d'être effectuée doit impérativement conclure sur la faisabilité technico-économique du projet concerné et sur le type d'ouvrage le mieux adapté au site.

Cette étude d'avant-projet sommaire aura évidemment été plus ou moins détaillée en fonction des réserves qui subsistaient après l'étude préliminaire.

Les principales causes qui pourraient amener le géologue à conclure ici à une non-faisabilité ne concernent le plus souvent que les ouvrages collinaires. On peut les résumer ainsi :

- épaisseur trop importante de terrains de couverture perméables ou compressibles,
- présence d'accidents drainants dans le substratum,
- instabilité des versants (site et retenue),
- niveaux perméables ou solubles dans le substratum, non observés en surface et pouvant occasionner de par leur structure ou leur nature :
 - . des fuites hors de la retenue,
 - . un contournement des appuis ou de la fondation de la digue,
 - . des circulations d'eau compromettant la stabilité de l'ouvrage.

Ceci suppose qu'un traitement artificiel (injections profondes) serait dans ce cas disproportionné (coût) avec le projet envisagé.

Enfin, l'absence ou la faible quantité de matériaux adaptés à la construction d'un barrage collinaire pourra représenter un sérieux obstacle à sa réalisation (cf. chapitre V), surtout si l'on veut un type d'ouvrage "rustique" avec des dispositions constructives simples.

Pour les grands ouvrages, il est rare que des conditions géologiques rédhibitoires apparaissent à ce stade de l'étude. Les moyens mis en oeuvre sont en effet tels que des corrections peuvent être apportées et que de nombreuses solutions techniques (évidemment très onéreuses) peuvent pallier certains "défauts" d'un site qui n'apparaîtraient qu'au niveau de l'A.P.S.

E - EXEMPLES D'ETUDES

Les exemples exposés ci-après ont été pris parmi une douzaine d'avant-projets sommaires de grands et petits ouvrages étudiés dans le Sud de la France et au Maroc. Nous en avons sélectionné deux concernant une digue importante et un collinaire plus modeste.

BARRAGE DE MONTBEL (ARIEGE)

1 - GENERALITES

1.1 - SITUATION DE L'AMENAGEMENT (fig. 21)

L'aménagement de Montbel se trouve à une dizaine de kilomètres au Sud-Est de la localité de Mirepoix.

L'ouvrage prévu se situe sur la vallée du ruisseau de Trière, petit affluent rive gauche de l'Hers Vif, avec lequel il conflue 2 km environ à l'aval du site.

L'Hers ne rejoint l'Ariège qu'une cinquantaine de kilomètres au Nord-Ouest, au-delà des confins du département (hors de l'épure).

1.2 - CADRE GEOGRAPHIQUE

Le "pays de Mirepoix" est caractérisé par une zone de collines formant des cuestas plus ou moins marquées dans la topographie, au travers desquelles l'Hers a creusé une vallée souvent large et riche en alluvions où se sont fixées les principales localités (Le Peyrat, Sainte-Colombe-sur-l'Hers, Chalabre).

On se trouve dans la zone de transition entre les influences climatiques méditerranéennes et atlantiques.

Le paysage n'offre que des prairies et pâturages associés çà et là à des bois de chênes ou de pins. Hors de la vallée de l'Hers, on ne rencontre plus que de petits hameaux faiblement peuplés. Les principales ressources agricoles sont constituées par l'élevage bovin, basé sur le principe de la stabulation libre, et quelques cultures céréalières.

1.3 - CADRE GEOLOGIQUE

Le territoire considéré se développe au Nord de la chaîne du Plantaurel (hors de l'épure) sur le flanc Nord de laquelle s'étalent les séries tertiaires de l'Eocène (fig. 22).

En allant du Sud vers le Nord, on rencontre les formations suivantes :

- Montien : marnes rouges (faciès saumâtre ou lacustre) ;
- Thanétien : calcaires à miliolites (faciès marin) ;

Fig. 21. - Plan de situation

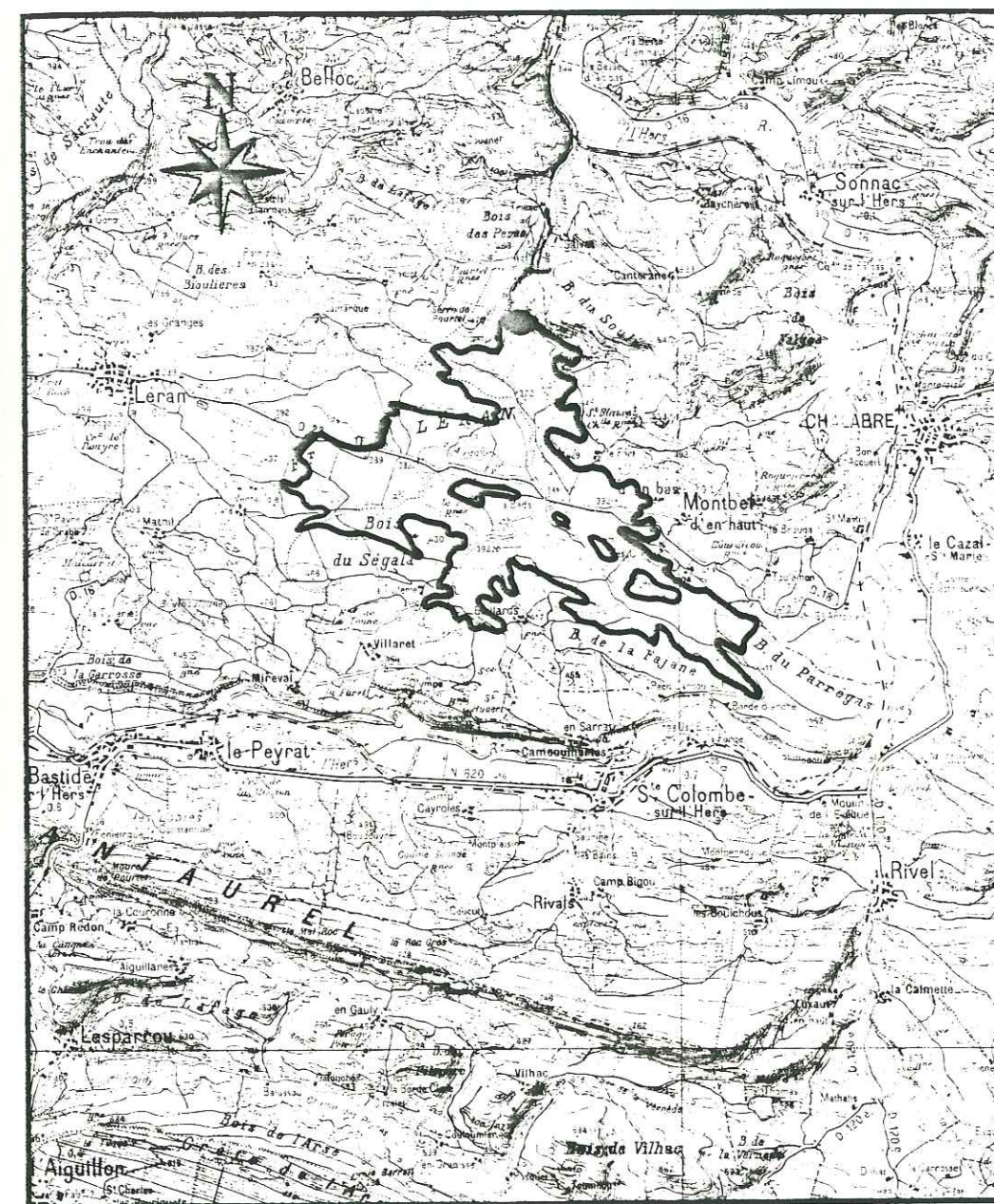
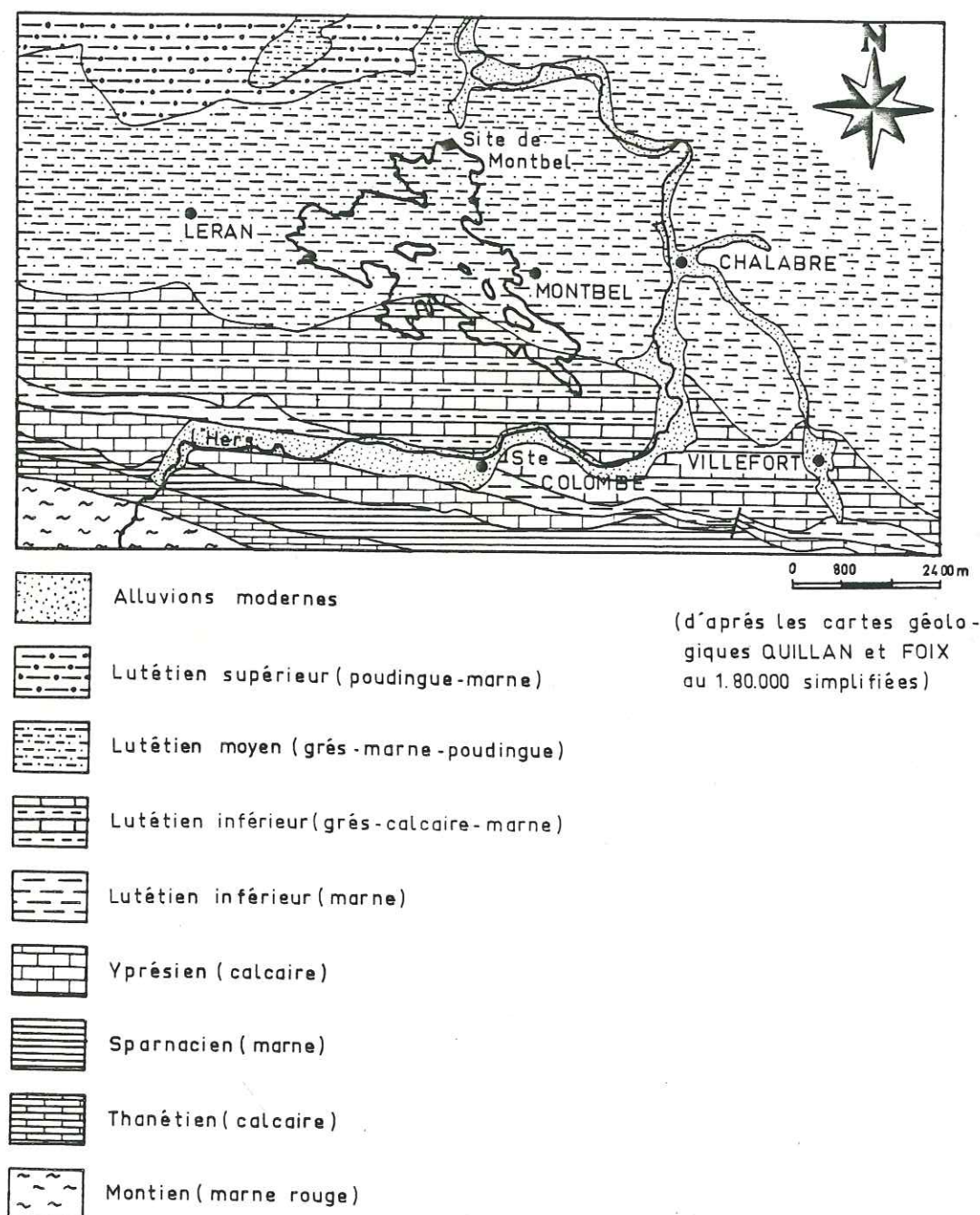


Fig. 22. - Cadre géologique général



- Sparnacien : marnes rouges et grises (faciès lacustre) ;
- Yprésien : calcaires à miliolites et alvéolines (faciès marin) ;
- Lutétien inférieur : marnes à turritelles ; grès calcaires à nummulites et alvéolines (faciès marin et saumâtre) ;
- Lutétien moyen : grès, marnes, poudingues (déposés continentaux) ;
- Lutétien supérieur : poudingues, marnes (déposés continentaux).

La structure d'ensemble est constituée par une série monoclinale faiblement pentée vers le Nord.

Le bassin de la Trière qui nous intéresse ici se développe seulement dans les couches du Lutétien inférieur et Lutétien moyen. Dès maintenant, il est important d'insister sur le fait qu'à partir du Lutétien moyen, on a une série type des dépôts de piedmont, où les faciès sont extrêmement variables avec des cônes de déjection consolidés en poudingues entre lesquels se sont déposés les niveaux plus fins. Les couches grossières sont donc assez fréquentes et se trouvent "en bandes continues avec localement des épaississements dus à des arrivées locales plus importantes et plus durables de matériaux pyrénéens" (A. CAVAILLE, 1976).

1.4 - CARACTERISTIQUES SOMMAIRES DE L'AMENAGEMENT

Les courbes des caractéristiques du réservoir ont été dressées par l'Agence de Bassin Adour-Garonne à partir d'un orthophotoplan à l'échelle du 1/5000.

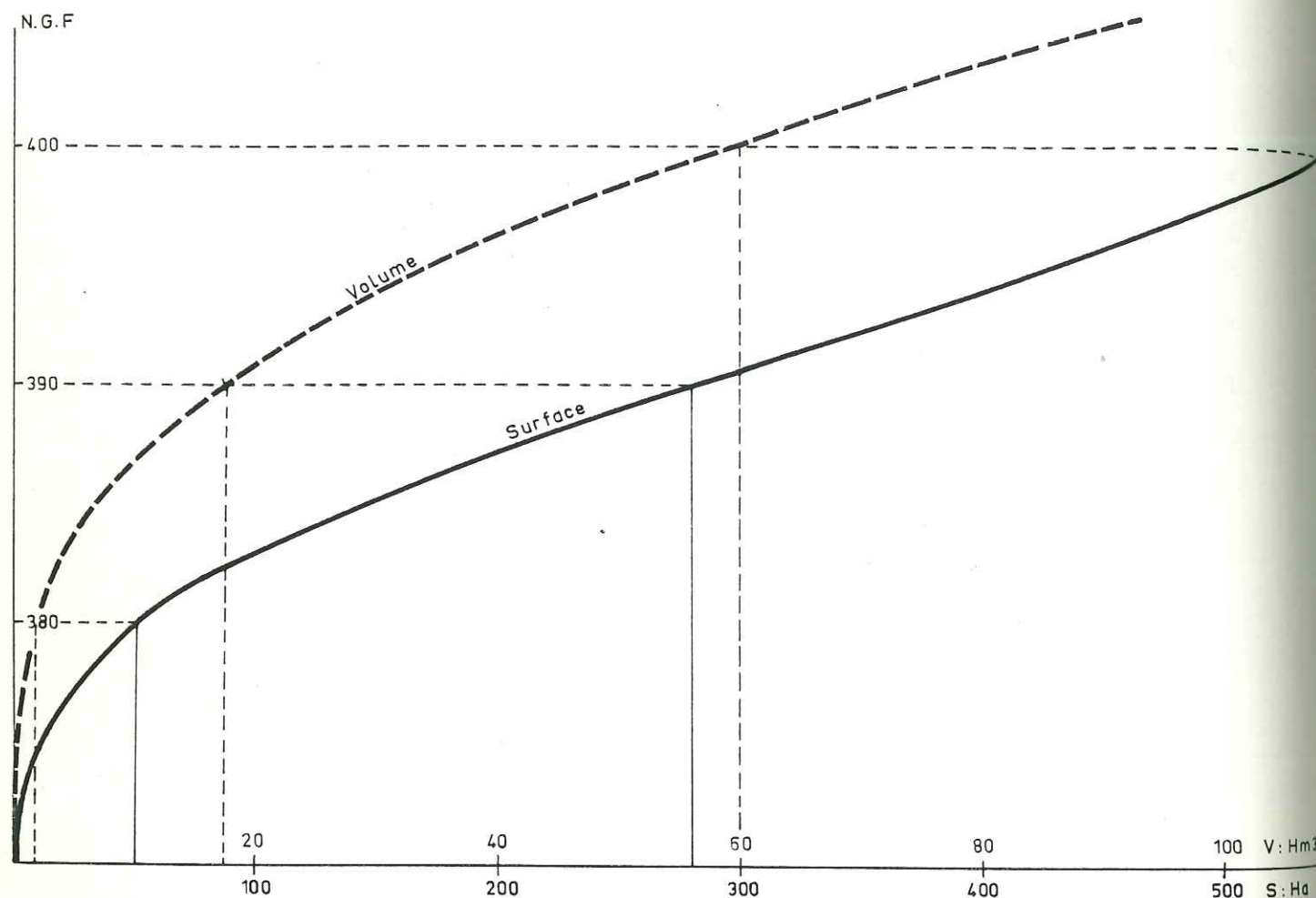
Elles montrent que, pour un plan d'eau de retenue normale à la cote 400 N.G.F., on a un ouvrage haut de 35 m environ, créant une retenue d'un volume de 60 Hm³ et d'une surface de 550 ha (fig. 23).

La longueur en crête du barrage à la cote 402 est de l'ordre de 260 m.

L'Agence a montré (1975) que la retenue de Montbel dont le bassin versant propre est de 14,5 km² sera "essentiellement alimentée par dérivation gravitaire des eaux excédentaires d'hiver et de printemps de l'Hers Vif". Cette dérivation se ferait environ à 1,5 km à l'amont de Sainte-Colombe-sur-l'Hers. L'étude de la galerie nécessaire ne fait pas partie de ce travail.

Notons enfin qu'un plan d'eau à la cote 400 implique la réalisation de deux digues aux cols 390 et 396 de part et d'autre du C.D. 28, dans la forêt de Lérans. Ces ouvrages seront hauts d'environ 7 m et 13 m avec des longueurs en crête dépassant 200 m et 300 m.

Fig. 23. - Courbes hauteurs-volumes/surfaces



2 - CUVETTE DE RETENUE

2.1 - MORPHOLOGIE

La cuvette a une forme assez étalée, se développant sur environ 3 km en longueur et 4,5 km en largeur (fig. 24).

L'ensemble de la cuvette, constitué d'assises dures et de couches plus tendres, a un relief de côtes et collines (Serre de Pourtel) dissymétriques, très influencé par la structure. A des pentes raides succèdent de grandes surfaces assez faiblement inclinées, correspondant à la disposition structurale du substratum, localement subaffleurant.

Parfois des formations résiduelles ou colluviales empâtent les faibles reliefs, aplanissant d'autant la topographie (forêt de Lérans).

Enfin on observe la présence de plusieurs cols faisant communiquer le bassin de la Trière soit avec celui du Touyre vers l'Ouest (cols 390, 396 et 402) soit avec celui de l'Hers vers l'Est (col 410 au Sud de Toulemon et col 411 au bois du Parrégas).

La vallée de l'Hers ceinture la cuvette au Sud, à l'Est et au Nord, la vallée du Touyre la borde à l'Ouest.

2.2 - GENERALITES STRATIGRAPHIQUES

La retenue n'intéresse que deux niveaux stratigraphiques (fig. 22) :

- le Lutétien inférieur
- le Lutétien moyen.

Le premier, nous l'avons vu, se caractérise par un faciès de dépôt marin saumâtre avec présence de calcaires fossilifères plus ou moins gréseux et de marnes.

Le second est au contraire beaucoup plus détritique avec des niveaux conglomératiques et gréseux intercalés dans les marnes.

Pour des raisons de commodité, nous avons fixé une limite lithologique entre ces 2 étages basée sur la disparition des niveaux calcaires ou calcaréogréseux riches en microfaune. Le Lutétien moyen

commence donc pour nous avec l'apparition de la première intercalation vraiment détritique.

Deux cartes géologiques au 1/10000 sont présentées ici :

- une carte des affleurements observés sur le terrain (fig. 24) ;
- une carte géologique interprétative (fig. 25) sur laquelle il a été fait abstraction des terrains de recouvrement et des alluvions.

Ce dernier document a été réalisé à partir des levés de terrain complétés par une étude de photo-interprétation à l'échelle approximative du 1/19000.

Sur cette carte, les niveaux durs n'ont été figurés qu'au niveau de leur tranche (aucune surface structurale n'a été dessinée afin d'avoir le document le plus schématique possible). Elle permet d'avoir une idée assez précise (mais certainement incomplète compte tenu du manque d'affleurements) de la stratigraphie locale.

2.3 - DESCRIPTION DES TERRAINS

2.3.1 - Remplissage limoneux et éluvions de versant

Les bas-fonds de la vallée de la Trière sont occupés par des matériaux fins limono-argileux surmontant un niveau gravelo-sableux ; l'extension de cette formation est très approximative.

Les versants, sur l'ensemble de la cuvette, sont généralement recouverts par des éluvions et colluvions résultant de l'altération du substratum et formant un tapis argileux ou argilo-graveleux. Ces terrains seront décrits en détail à propos du site.

2.3.2 - Série lithostratigraphique tertiaire

Elle forme le substratum rocheux. La description ci-dessous reprend les différentes assises représentées sur la fig. 25 et la fig. 26 ; elle est faite en partant des terrains les plus anciens que nous avons rencontrés.

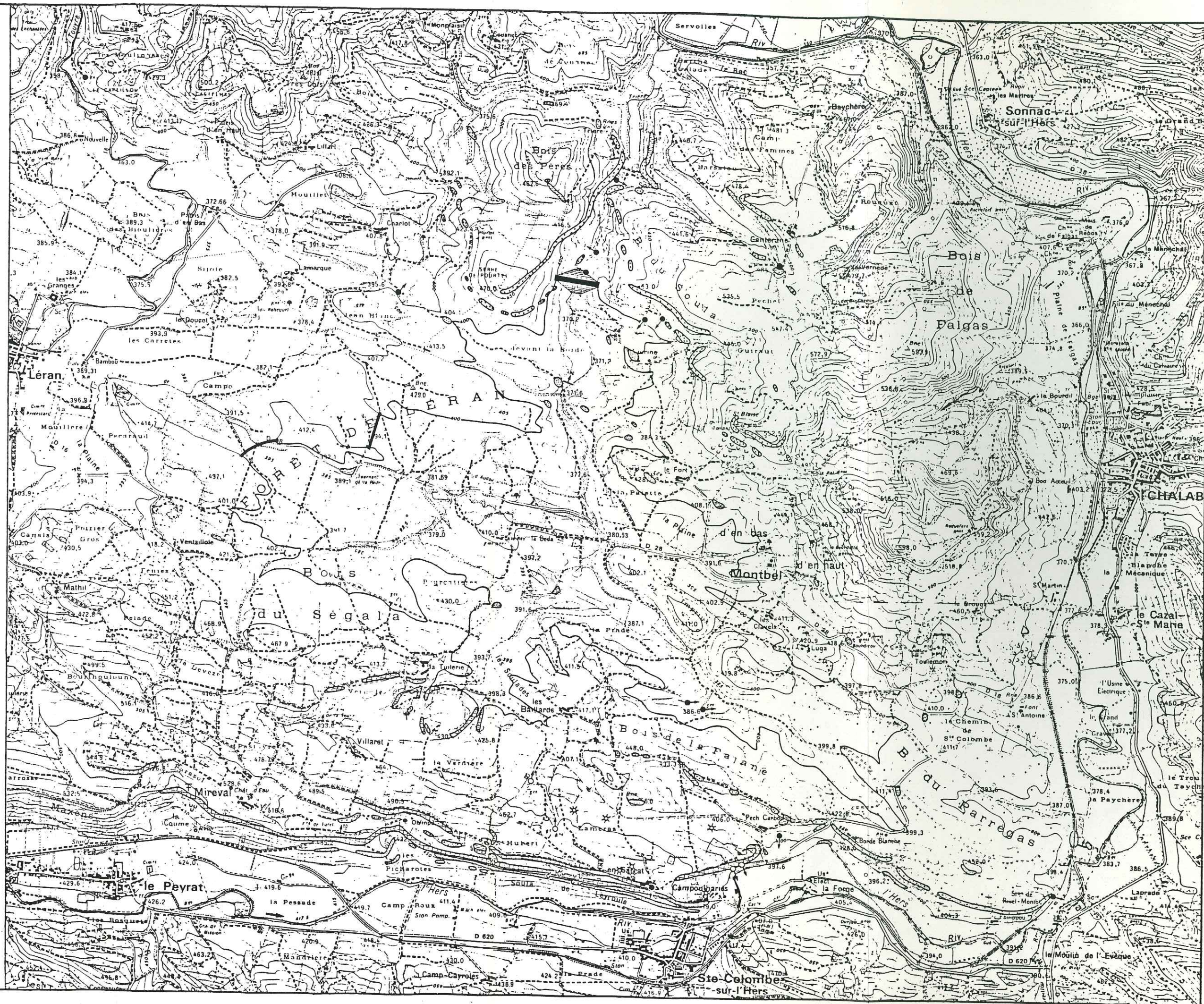
- Lutétien inférieur

Il apparaît sur le talus qui constitue au Sud de la cuvette la rive gauche de l'Hers. On a une alternance irrégulière de niveaux durs calcaréo-gréseux et de séquences marneuses.



LEGENDE

- Morne
- Conglomerat et / ou grès
- Calcaire gréseux et grès
- Source pérenne
- Source temporaire
- Entonnoir d'oblation (foliature)
- Pendage
- Fossiles
- Glissement reconnu
- Axe du barrage
- Digue de col
- Limite du plan d'eau (100 NGF)
- Plan d'eau collinaire
- Puits
- Fontaine



0 100 500 800m

Fig. 24. - Carte géologique des affleurements

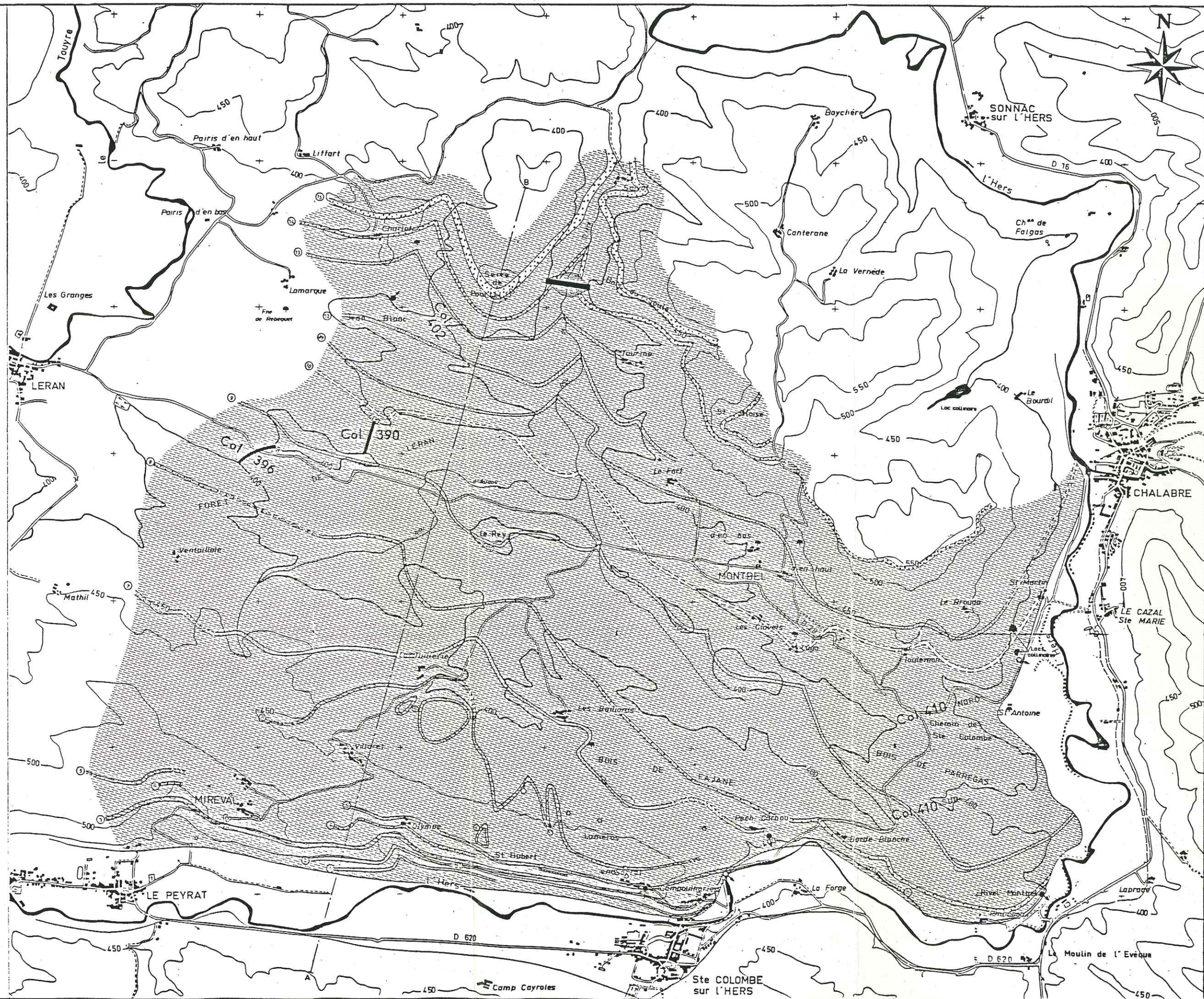
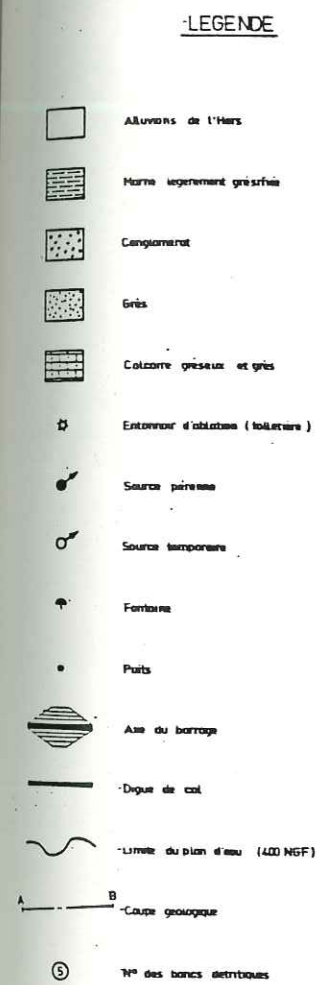
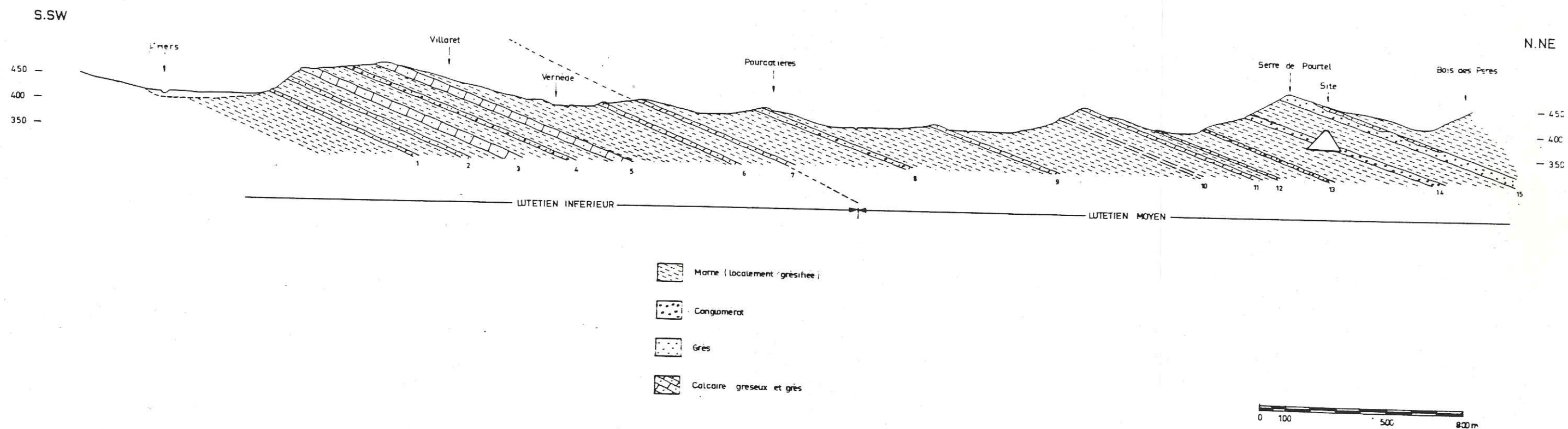


Fig. 25. - Carte géologique interprétative

Fig. 26. - COUPE GEOLOGIQUE INTERPRETATIVE AMONT-AVAL DE LA CUVETTE
(les épaisseurs des bancs sont approximatives)



Nous avons distingué 6 niveaux durs dans les marnes correspondant (de bas en haut) à :

- des passées à dominante gréseuse (1 et 2) ;
- des passées assez calcaires où la microfaune est abondante avec des alvéolines, des miliolites et des nummulites (3, 5 et 6) ;
- une passée très détritique (4).

Sur le terrain, ce découpage est évidemment moins net, car les changements locaux de faciès sont assez fréquents. Il n'est pas possible non plus de préciser les épaisseurs de chaque niveau.

Celles qui sont figurées sur la coupe de la fig. 26 sont donc très hypothétiques. Néanmoins et compte tenu de ce que nous avons dit en 2, l'épaisseur du Lutétien inférieur apparent est de l'ordre de 300 m.

- Lutétien moyen

Il se développe vers le Nord et englobe le site du barrage, s'étendant bien au-delà de la ferme Salvat.

Sur l'ensemble de l'étage, des niveaux beaucoup plus détritiques ont remplacé les séries calcaires ou grés-calcaires précédentes.

D'autre part, les passées marneuses sont plus épaisses, surtout dans la partie centrale de la cuvette.

Signalons qu'aux cols 390 et 396, dans les marnes comprises entre les niveaux détritiques 9 et 10, et 8 et 9, nous avons observé localement des concrétions de gypse, emballées dans la matrice marneuse.

Ces concrétions, dont la densité est ici difficile à estimer, ont une taille de l'ordre de 2 cm de long sur 0,5 cm à 1 cm de large et sont de couleur beige-rosé.

Nous en reparlerons au sujet de l'étude des cols.

Les niveaux du site exceptés (au-dessus du 13), nous avons répertorié 7 formations dures interstratifiées dans les marnes :

- des bancs à dominante gréseuse (7, 9 et 12) ;
- des bancs à dominance conglomératique où les grès ne sont cependant pas exclus (8, 11 et 13) ;

- le niveau 10 n'a pas été observé sur le terrain mais dessine une cuesta plus dure à l'examen des photographies aériennes.

Pour les mêmes raisons que précédemment, le détail des épaisseurs ne peut être fourni. L'ensemble du Lutétien moyen dans la cuvette représente cependant au moins 500 mètres de sédiments.

2.3.3 - Conclusion

Il ressort de tout cela que la cuvette est constituée d'une alternance de terrains marneux et de niveaux plus détritiques ou plus calcaires. La proportion de marnes semble quand même la plus importante. Ces marnes bariolées, grises ou beiges, sont généralement assez compactes et localement plus ou moins sableuses ou grésifiées.

Les grès, les calcaires et les conglomérats sont à l'affleurement peu altérés et leur fissuration présente une maille assez lâche, de l'ordre du mètre.

2.4 - STRUCTURE

Dans toute la cuvette, les couches ont une structure monoclinale.

La direction générale des bancs varie entre N 100 et N 120° E, le pendage vers le N-NE est plus marqué en queue de retenue où il atteint des valeurs de 15 à 20°. Il diminue progressivement vers le Nord où les valeurs sont alors inférieures à 10°.

Ceci s'explique par le fait qu'au Sud de la cuvette, les couches se redressent de plus en plus contre les chaînons pré-pyrénéens (montagne de Plantaurel - hors de l'épure) alors qu'au Nord, on se rapproche de l'anticlinal de Tréziers qui marque une légère ondulation WNW - ESE de l'Eocène, le pendage des couches s'atténuant de plus en plus.

Il est déjà presque horizontal au niveau de Camon, à 3 km au Nord de la retenue.

2.5 - HYDROGEOLOGIE

2.5.1 - Nappe des limons

Une petite nappe alluviale liée au ruisseau de Trière se développe dans les limons. Nous en reparlerons à propos du site.

2.5.2 - Nappes des niveaux détritiques du Tertiaire

Un certain nombre de points d'eau ont été répertoriés. Nous ferons la distinction entre ceux qui se trouvent dans la retenue et ceux qui sont hors retenue (fig. 25).

- Points d'eau dans la cuvette de retenue

Ce sont les moins nombreux ; on observe deux sources au Nord du bois de Fajane et une troisième au Nord du Rey (cote 380).

Ces deux premières situées au fond d'un thalweg (cote 385) mettent en évidence la présence d'une nappe dont l'aquifère doit vraisemblablement être représenté par le niveau 8 grés-conglomératique, qui semble s'enfouir sous les marnes.

- Points d'eau hors de la cuvette de retenue

Une vingtaine de points d'eau ont été inventoriés. Ce sont essentiellement des sources, des puits ou des fontaines, temporaires ou non.

Ils ont été regroupés dans le tableau ci-dessous qui précise, quand cela est possible, l'altitude approximative de l'émergence et l'aquifère potentiel qui est supposé alimenter chacun d'eux.

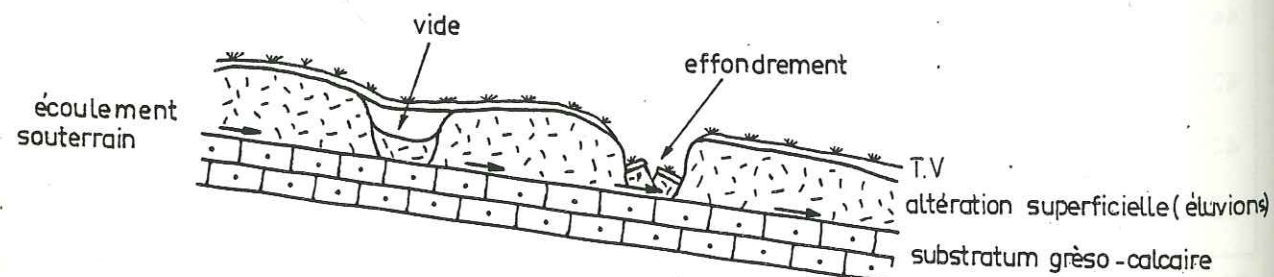
Cote NGF ap-prox.	Fon-tai-ne	Source	Puits	Lieu-dit	Pérenne	Tempo-raire	Aquifère	Niveau
465		X		En Sarraat	X		Calcaire et grès	5
460	X			Olympe thalweg				4
450		X		Laméras		X		
440	X			Montbel			Grès et conglom.	11
430	X			Montbel		X	Grès et conglom.	11
425		X		Thalweg St-Hubert		X		
420	X			Baillards	X		Grès	7

Cote NGF ap-prox.	Fon-tai-ne	Source	Puits	Lieu-dit	Pérenne	Tempo-raire	Aquifère	Niveau
420	X			Luga	X		?	10
420			X	Luga			?	10
415			X	La Tuilerie				
410			X	Montbel				
410			X	Les Clavels	X		?	10
405			X	Charlots			Grès/ conglom.	14
405		X		Pech Carbou	X			7
405			X	Taurine			Grès/ conglom.	13
405	X			Montbel				
400		X		Jean Blanc	X		Grès	12
400			X	Lefort				
400		X		Campoulha- riès		X	Calc. et grès	5
393			X	Lamarque				
390	X			Charlot				
390		X		Stat. Rivel			Conglom.	8
385	X		X	Montbel				
385		X		St-Antoine				
385				Nord Saint Antoine		X	?	10
380	X			Rebequet				

- Les phénomènes de suffosion

Il s'agit d'un phénomène d'érosion souterraine qui, par enlèvement de matière, donc création d'un vide, provoque un effondrement ou un affaissement du terrain superficiel (entonnoir d'ablation).

Le processus a été observé dans le secteur de Laméras, d'en Sarrat, et de Pech Carbou. Il peut se schématiser de la façon suivante :



(d'après LETOURNEUR et MICHEL, 1971, modifié)

Six entonnoirs d'effondrement d'un diamètre d'au moins un mètre ont été observés au fond desquels on peut voir ou entendre l'écoulement des eaux. Dans ce cas précis, cette érosion est facilitée par le pendage vers le Nord du substratum, qui est pratiquement en surface structurale, et seulement recouvert par une mince pellicule d'éluvions.

2.6 - ETANCHEITE

2.6.1 - Généralités

Le problème des cols à fermer par un ouvrage n'est pas traité ici. Il fera l'objet d'un paragraphe particulier à la fin de cette étude.

Les terrains constituant la cuvette sont, nous venons de le voir, de trois types :

- des limons et graves de fond de vallée,
- des marnes,
- des niveaux détritiques.

Les limons et graves forment un ensemble assez perméable avec présence d'une nappe dont le seul exutoire possible est au droit du site. Compte tenu de la faible épaisseur de cette formation (4 à 5 m), le problème des circulations d'eau vers l'aval sera résolu par l'organe d'étanchéité de l'ouvrage.

Les marnes, même lorsqu'elles sont grésifiées ou légèrement sableuses constituent un substratum imperméable.

Le problème du gypse rencontré aux cols 390 et 396 devra être pris en compte pour la construction des digues. En ce qui concerne l'étanchéité de la cuvette elle-même, il semble que ce gypse n'apparaisse que ponctuellement dans les marnes (observé dans 3 tranchées sur 56 réalisées aux cols) et que les circulations d'eau dans ces dernières, pouvant créer des dissolutions, soient difficilement envisageables à l'échelle de la retenue.

Les seules véritables formations perméables sont les séquences gréseuses, conglomératiques ou calcaires et nous venons de constater qu'elles pouvaient être aquifères donc devenir le siège de cheminements préférentiels lors de la mise en eau de la retenue.

2.6.2 - Cheminements dans les niveaux détritiques

Nous en distinguerons deux principaux types.

- Cheminements Est-Ouest et Ouest-Est

Les niveaux détritiques 8 à 13 recoupent à l'Ouest la vallée du Touyre à des cotes inférieures à celle de la retenue normale (400 N.G.F.). Les longueurs de cheminement varient entre 0,5 et 1,5 km pour retrouver la courbe 400. Ils sont donc assez longs et créeront certainement des pertes de charge importantes.

Les niveaux détritiques 8 à 13 recoupent à l'Est la vallée de l'Hers avec des longueurs de cheminement de l'ordre de 1,5 à 3 km. On est ramené au cas précédent, avec des pertes de charges encore plus importantes le long des niveaux perméables.

- Cheminements Sud-Nord et Nord-Sud

Compte tenu du pendage général vers le Nord, les eaux de la retenue s'infiltrant dans la formation détritique se mettront en charge vers le Nord sans qu'il y ait possibilité de fuite (absence de point bas hors de la retenue).

Si l'on envisage des circulations inverses vers la vallée de l'Hers entre Sainte-Colombe et le Moulin de l'Evêque, elles sont à exclure car les aquifères sont indépendants les uns des autres et séparés par des niveaux étanches non fracturés.

2.6.3 - Problèmes particuliers des cols non barrés

Lorsque l'on regarde la topographie de la cuvette, on note deux cols à des altitudes de 402 m et 413 m en rive gauche, à l'Est de Jean Blanc, et un col en rive droite au lieu-dit Chemin de Sainte-Colombe, à la cote 410.

- Col 402 Rive Gauche

Compte tenu de son étroitesse (100 m seulement séparent la courbe 400 de part et d'autre), il a fait l'objet d'une reconnaissance particulière au moyen de tranchées réalisées à la pelle hydraulique (fig. 27 et 28).

Fig. 27. - Implantation des tranchées et des coupes géologiques interprétatives au col 402

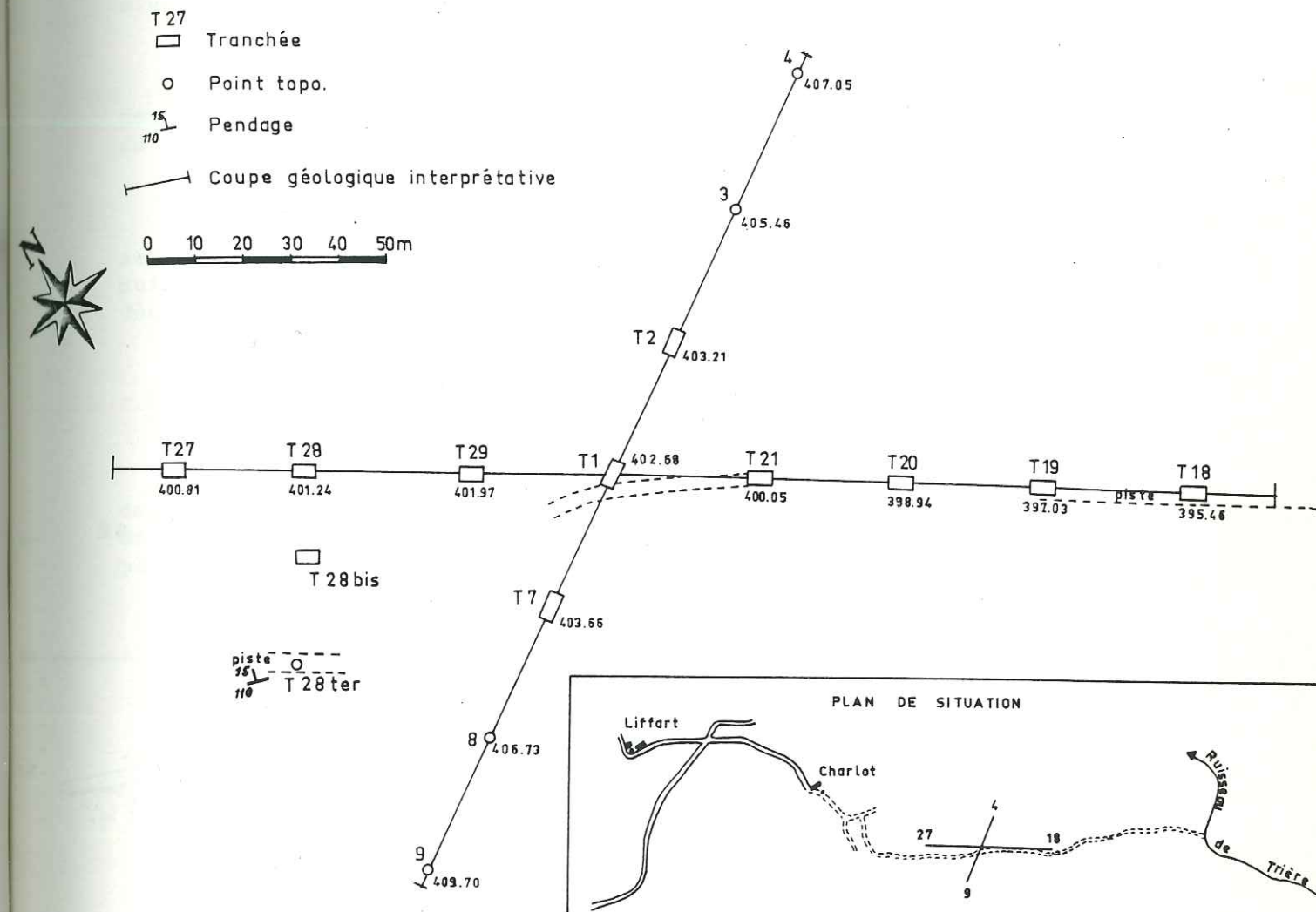


Fig. 28. - Coupes géologiques interprétatives au col 402

Onze tranchées d'une profondeur variant de 2 à 5 m ont été creusées le long du col (T1, T2 et T7) et à travers le col (T1, T18 à T21, T27 à T29).

Les coupes de la figure 28 montrent que l'on a un substratum à dominante marneuse avec de rapides variations latérales de faciès avec peut-être des passées ou lentilles plus détritiques (T27, T28, T18) assez normales dans une sédimentation de type molassique. L'épaisseur des éluvions argilo-marneuses recouvrant le substratum varie de 1 à 3 m.

Les couches sont grossièrement orientées N 110° E avec un pendage de 20° vers le Nord (ce pendage est exagéré sur les coupes à cause de la distorsion des échelles longueur/hauteur).

Compte tenu des terrains rencontrés, l'étanchéité à ce col semble pour le moment acceptable et les reconnaissances entreprises suffisantes à ce stade de l'étude. Mais, à cause de la présence de niveaux détritiques, ce point sera à surveiller après la mise en eau.

- Col 413 Rive Gauche

De part et d'autre de ce col, la courbe 400 N.G.F. est distante de 370 m environ. De plus, ce dernier doit se développer dans des terrains de nature marneuse. Les risques d'infiltrations au travers de ce col paraissent en fait assez minimes.

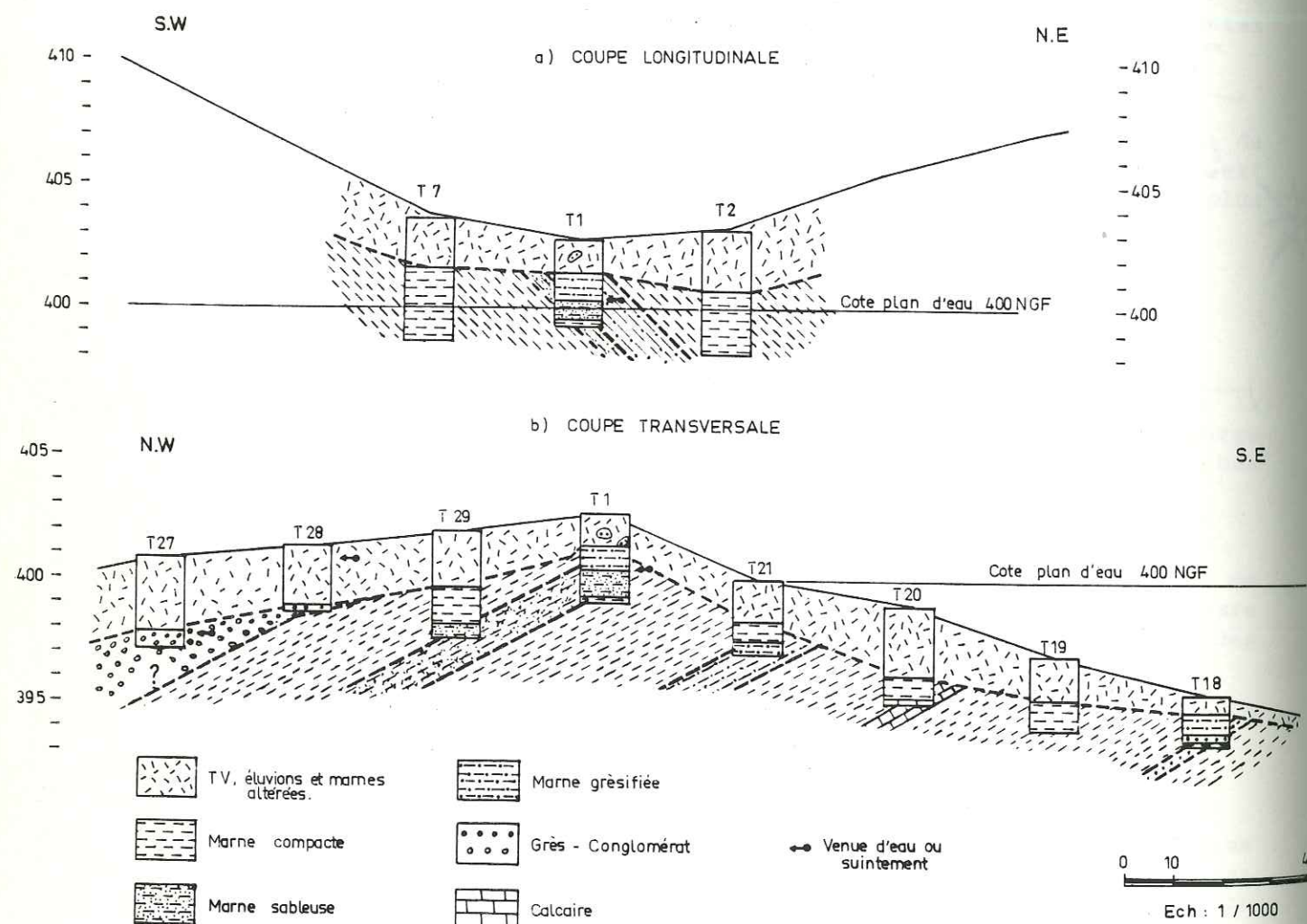
- Cols 410 Rive Droite

Au Nord et au Sud du bois de Parrégas, on observe 2 cols dont les longueurs à la cote 400 sont respectivement de 390 m et 300 m.

- Le col Sud s'inscrit dans une série à dominante marneuse comportant la barre de grès (9) qui le prend en écharpe ; les éventuels cheminements par ce niveau ont alors une longueur d'environ 1,6 km à la cote 400. Les pertes sont donc peu probables ;

- Le col Nord est également dans des marnes. L'origine des eaux de la fontaine Saint-Antoine n'a pu être précisée. Par contre, au Nord de Saint-Antoine, on observe une source temporaire (indépendante du petit plan d'eau collinaire) qui pourrait être liée au niveau (10). Là encore, les longueurs de cheminement sont de l'ordre de 2,0 km et les risques de fuites très hypothétiques.

Cependant, lors de la mise en eau du barrage, on aura intérêt à surveiller les débits à ces deux derniers points d'eau.



2.7 - STABILITE DES VERSANTS

De nombreux indices d'instabilité superficielle des pentes ont été remarqués dans la cuvette. La plupart du temps ce sont des phénomènes "épidermiques" qui n'affectent que la surface (tranche altérée du substratum).

Localement (versant Sud de Saint-Blaise), l'altération de la roche est plus profonde et les éluvions peuvent fluer en entraînant de "gros éboulements actuels ou subactuels le long des versants". Ces phénomènes apparaissent dans le Lutétien moyen où l'on retrouve épars sur les pentes marneuses des blocs gréso-conglomératiques emballés dans une matrice argileuse.

La présence d'un plan d'eau à niveau variable favorisera vraisemblablement de tels mouvements (cf. glissements au-dessus du lac collinaire près de Saint-Antoine), néanmoins, même si leur extension peut être assez importante, les volumes susceptibles d'être mis en mouvement ne devraient pas compromettre l'ensemble du projet (aucun risque d'arrivée rapide dans la retenue).

2.8 - CONCLUSION SUR LA CUVETTE

La cuvette de Montbel, formée le plus souvent de terrains à dominante marneuse, devrait avoir une étanchéité acceptable. Quelques points particuliers seront cependant à surveiller après la mise en eau (cols à barrer exceptés ici) : ce sont les cols 402 en rive gauche (source Jean Blanc) et le col 410 (Nord) en rive droite.

Pour ce dernier, on surveillera les débits à la fontaine Saint-Antoine et à la petite source qui se trouve un peu plus au Nord.

Les seuls vecteurs de fuites possibles étant les niveaux détritiques intercalés dans les marnes, on surveillera aussi le versant rive gauche de l'Hers au-dessous de la cote 400, après la mise en eau, pour voir si de nouvelles sources n'y apparaissent pas (entre l'ancienne station de Rivel-Montbel et Chalabre).

La stabilité des pentes, excepté les phénomènes décrits en 2.7, devrait également être compatible avec le projet.

3 - SITE DU BARRAGE

3.1 - MORPHOLOGIE

Le site s'inscrit 1800 m à l'amont du confluent du ruisseau de Trière avec l'Hers. Immédiatement à l'amont du site, la vallée s'élargit considérablement et aucun autre emplacement n'est possible.

Le document topographique dont nous disposons pour cette étude est un levé très précis à l'échelle du 1/500 couvrant largement l'emprise du barrage.

A cet endroit, la vallée est très faiblement dissymétrique :

- la rive gauche présente une pente régulière variant de 10° dans sa partie inférieure à 20° dans sa partie supérieure ;
- la rive droite présente dans sa partie médiane un replat d'une vingtaine de mètres de large qui rompt la régularité de la pente, surmonté par une petite "cuesta" au relief néanmoins peu accusé ;
- en thalweg, la terrasse du ruisseau est plus développée en rive droite qu'en rive gauche.

3.2 - DESCRIPTION GEOLOGIQUE DE SURFACE

L'étude de surface ne permet pas de se faire une bonne idée des conditions géologiques. Les affleurements sont quasi inexistantes et seule la rive gauche montre en amont du site une formation gréso-conglomératique aux environs de la cote 400 (niveau 14 de la fig. 25).

Les deux versants sont coiffés, aux alentours de la cote 450, par une autre formation détritique qui a une épaisseur apparente d'au moins 5 mètres (niveau 15), qui correspond au Serre de Pourtel en rive gauche et au bois de Soula en rive droite.

Ces niveaux grossiers semblent intercalés dans une série apparemment marneuse, le tout étant recouvert par des éluvions plus ou moins argileuses. Ces observations étaient beaucoup trop fragmentaires, et seuls des travaux de reconnaissance appropriés pouvaient permettre de préciser la géologie du site.

3.3 - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Les travaux de reconnaissance ont consisté en deux campagnes de sondages, la première réalisée en 1972 (Agence de Bassin Adour-Garonne), la deuxième en 1978-1979, précédée par l'exécution de tranchées creusées à la pelle hydraulique.

L'ensemble de ces travaux a fait l'objet d'un levé topographique précis avec report sur le fond de plan au 1/500 (fig. 29).

3.3.1 - Campagne de 1972

Elle comprenait 10 sondages carottés verticaux (S 1 à S 10) de 20 m de profondeur. Ils ont été le siège d'essais d'eau effectués par passes de 3 à 5 m avec des pressions maximales de 10 b.

Les emplacements des sondages S 2 et S 5 n'ont pas été retrouvés ; ils sont donc indiqués de façon approximative.

3.3.2 - Campagne de 1978-1979

Nous distinguerons les tranchées et les sondages.

- Tranchées

Six tranchées continues ont été creusées sur les deux versants et disposées de façon à dessiner grossièrement l'impact d'un barrage du type digue. Leurs caractéristiques sont les suivantes.

TRANCHEE	Longueur (m)	Altitude des extrémités N.G.F.
Amont rive gauche	115	402,19 - 371,88
Amont rive droite	113	401,71 - 377,13
Centrale rive gauche	97	398,86 - 368,55
Centrale rive droite	110	400,04 - 373,20
Aval rive gauche	102	392,01 - 367,71
Aval rive droite	124	401,36 - 369,03

Elles ont fait l'objet d'un levé géologique très détaillé, chaque contact entre des terrains de nature différente ayant été reporté sur le plan au 1/500.

- Sondages

Dix sondages carottés de reconnaissance assortis d'essais d'eau de type Lugeon par passes de 3 m et avec une pression maximale de 5 b ont été exécutés. La profondeur de ces sondages varie de 12,3 m (S 25) à 47,0 m (S 21). Ils ont ainsi permis de recouper entièrement les diverses formations du site.

Des prélèvements d'échantillons intacts ont été assez fréquents grâce à l'utilisation d'un triple carottier. On a pu de ce fait réaliser des mesures de gammadensimétrie dont nous reparlerons plus loin.

3.4 - SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECONNAISSANCE - CONDITIONS GEOLOGIQUES DU SITE

L'ensemble des travaux effectués a permis d'apporter un grand nombre de précisions concernant la nature des terrains, leur structure, la valeur de la fondation et l'étanchéité au droit du site.

3.4.1 - Les terrains

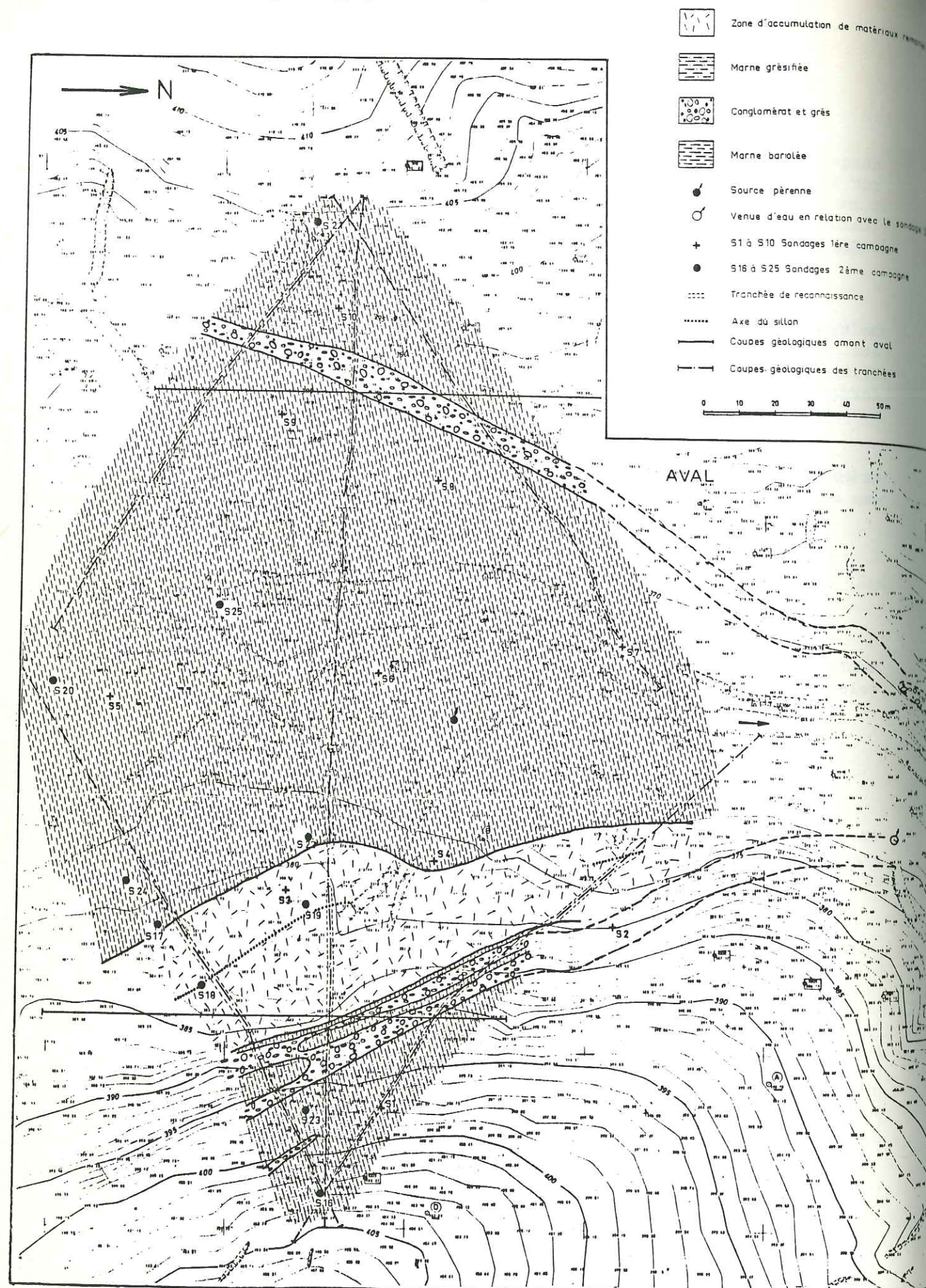
Les informations recueillies ont été synthétisées sous forme de cartes et coupes géologiques :

- une carte géologique interprétative du site (fig. 29) sur laquelle les terrains de couverture n'ont pas été figurés ;
- 3 coupes géologiques transversales exécutées sur l'axe des tranchées de reconnaissance (fig. 30) ;
- 2 coupes géologiques amont-aval sur les rives (fig. 30).

Tous ces documents sont à l'échelle du 1/500 et les renseignements portés ont été contrôlés par des relevés topographiques. On dispose ainsi d'un outil de travail précis concernant la nature des terrains et leur disposition sur le site.

Fig. 29. - Carte géologique interprétative du site

LEGENDE



- Argile limoneuse et ou galets
 - Eluvions - Colluvions
 - Remplissage avec blocs
 - Marne grise
 - Grès
 - Conglomérat
 - Marne grise
 - Marne brulée
 - Marne bariolée
- Terrains de couverture
- Marne supérieure
- Niveau détritique moyen
- Marne inférieure

→ Venue d'eau

0 % Pourcentage de carotte nul

DC Destruction carotte

E1 Echantillon intact

DESTRUCTIF - Sondage non coroté

Coupe AVAL

Coupe CENTRALE

Coupe AMONT

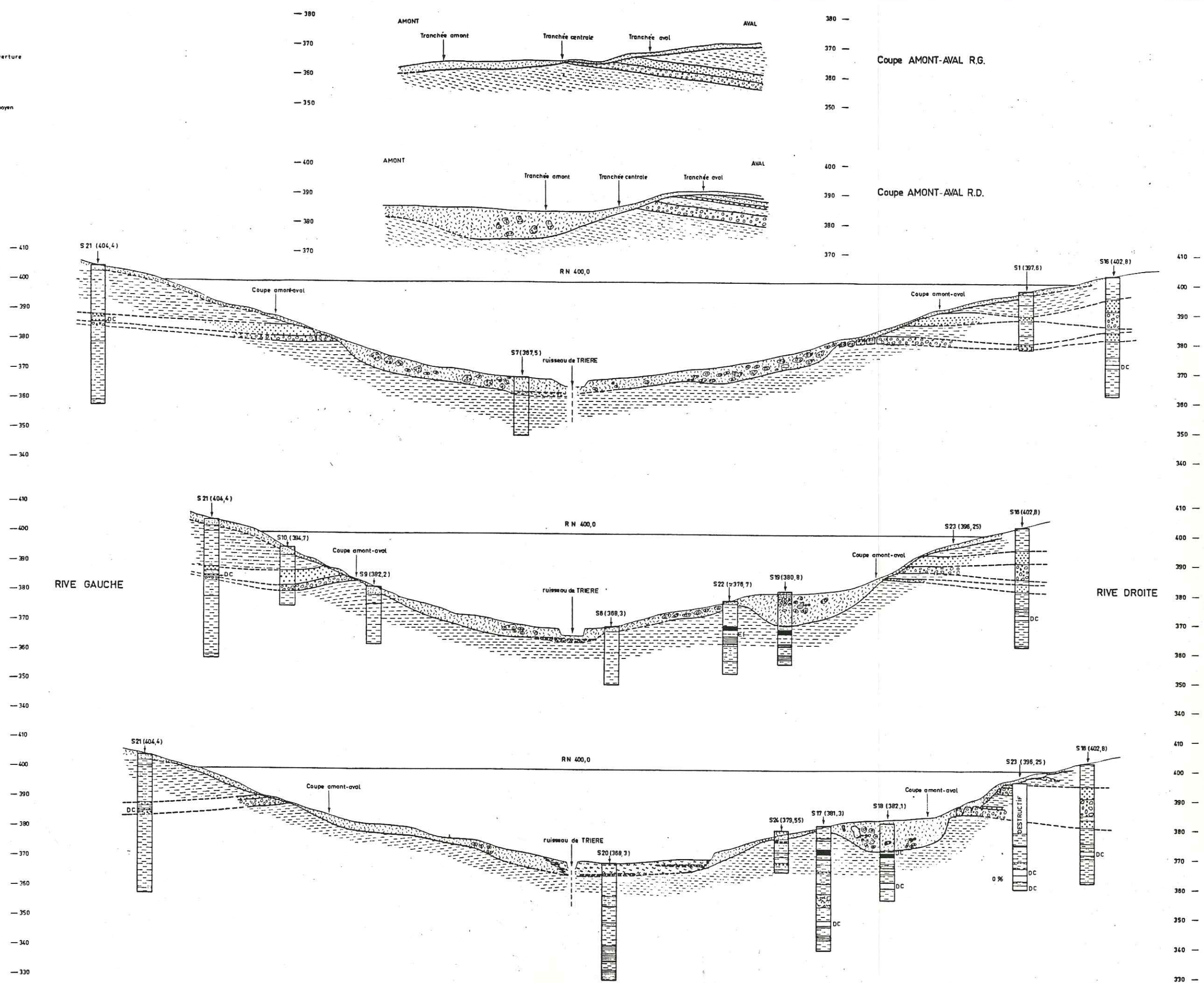


Fig. 30. - Coupes géologiques du site

3.4.1.1 - Le substratum

L'ouverture des tranchées a permis de lever une série lithologique continue.

Trois principaux ensembles ont été distingués :

- les marnes supérieures,
- le niveau détritique moyen,
- les marnes inférieures.

Les corrélations faites, de tranchée à tranchée, ont permis d'établir la figure 29 qui est en fait un écorché du substratum.

- Marnes supérieures

Les marnes beiges, jaunâtres en cassure fraîche, légèrement blanchâtres une fois altérées, sont assez grésifiées et constituent un matériau compact et dur. Nous avons observé que les déblais des tranchées laissés à l'air libre s'altéraient assez vite (précipitations) pour donner un matériau friable d'aspect un peu sablonneux, le terrain en place n'évoluant lui, pratiquement pas.

Ces marnes se développent sur la partie supérieure des deux rives. Localement, elles peuvent contenir une passée plus grésifiée certainement lenticulaire comme c'est le cas sur la coupe amont de la figure 30.

- Niveau détritique moyen

Cette formation, située sous les marnes précédentes, est présente sur les deux versants ; assez homogène dans son ensemble et caractérisée par un épisode très détritique durant la sédimentation initiale, elle est dans le détail assez hétérogène. C'est un complexe grésio-conglomératique. Les termes inférieurs sont formés d'un conglomérat polygénique extrêmement dur, auquel succèdent des niveaux de grès grossiers à fins, également durs en rive gauche. En rive droite, une passée de marne grésifiée s'intercale dans les conglomérats et fait varier d'autant l'épaisseur de cette formation.

Les observations faites sur les sondages confirment cette lithologie à l'intérieur des versants. Notons cependant qu'au sondage S 1 (rive droite), les passées purement détritiques sont beaucoup plus réduites (fig. 30 coupe aval) que de part et d'autre, à des distances de l'ordre de 25 m environ (sondage S 16 et tranchée aval).

La puissance de cette formation peut donc varier rapidement et l'on a presque, dans ce cas précis, un mode de dépôt lenticulaire. Néanmoins, ce ne doit pas être le cas général sur l'ensemble du site, où cet épisode gréso-conglomératique semble omniprésent.

Nous verrons par la suite l'importance que joue cette formation du point de vue de l'étanchéité du site ; aussi en avons-nous dressé, dans le tableau ci-dessous, une sorte de "fiche signalétique".

Caractéristiques du niveau détritique moyen sur le site	RIVE GAUCHE				
	TRANCHEES			SONDAGES	
	Amont	Centrale	Aval	S 21	S 10
Toit (N.G.F.)	390,54	388,74	384,45	387,9	386,7
Mur (N.G.F.)	387,90	384,25	379,32	383,9	379,7
Epaisseur moyenne (m) (mesurée en tenant compte du pendage)	3,0	6,0	6,0	4,0	7,0

Caractéristiques du niveau détritique moyen sur le site	RIVE DROITE					
	TRANCHEES			SONDAGES		S 23
	Amont	Centrale	Aval	S 1	S 16	
Toit (N.G.F.)	396,03	392,86	390,53	389,2	395,0	-
Mur (N.G.F.)	385,71	385,66	378,50	378,2	381,2	-
Epaisseur moyenne (m) (mesurée en tenant compte du pendage)	11,0	9,0	11,0	11,0	13,8	-

En conclusion, nous dirons qu'il y a une nette diminution d'épaisseur, de la rive droite vers la rive gauche, du niveau détritique moyen.

- Marnes inférieures

C'est sans doute la formation la plus homogène du site. Toutes les coupes de sondages montrent des terrains à dominante marneuse. Il est bien entendu possible d'y faire des distinctions de détail, mais sur l'ensemble nous n'avons retenu que trois différenciations lithologiques qui se répartissent de façon anarchique sur la hauteur de la série :

- des marnes bariolées, bleues et jaunâtres, très compactes, avec un toucher assez "gras" qui dominant en proportion, se débitant en petits cubes lorsqu'on les brise ;
- des marnes plus ou moins grésifiées souvent très indurées et au toucher plutôt "rêche" avec un débit analogue aux précédentes, de couleur brune ou grise ;
- des marnes feuilletées également très compactes, parfois légèrement sableuses ou/et grésifiées. Lorsqu'on essaye de briser un morceau de carotte, celui-ci se débite en très minces rondelles.

Très rarement, on peut rencontrer dans cette série marneuse un mince niveau nettement plus gréseux.

Nous attirerons l'attention sur deux points :

- Existence de zones où le pourcentage de carottes est nul. Pour certaines, il s'agit d'une mauvaise manœuvre de sondage avec perte et destruction consécutive de l'échantillon : S 16 de 29,40 m à 30,90 m ; S 17 de 32,10 m à 33,70 m ; S 18 de 9,60 m à 10,00 m et de 20,00 m à 22,00 m ; S 21 de 18,70 m à 19,00 m ; S 23 de 29,50 m à 31,00 m et de 34,60 m à 36,10 m ; pour d'autres : S 23 de 31,00 m à 33,10 m aucune explication satisfaisante n'a été fournie par le sondeur. Les pertes totales d'eau de foration n'ont pas permis d'examiner les sédiments qui auraient dû remonter. L'avancée légèrement plus rapide de l'outil laisse supposer qu'il s'agit peut-être de niveaux plus fins et moins consolidés qui ont été lavés ? Dans tous les cas, ces zones semblent lenticulaires puisqu'on ne les retrouve pas d'un sondage à l'autre.
- Présence de gypse diffus : des analyses diffractométriques sur la fraction fine des marnes (lab. Géol. Univers. Bordeaux) ont montré la présence de gypse à l'état diffus dans ces dernières en particulier dans les sondages : S 17 de 5,5 m à 6 m, à 8,3 m et à 21,0 m ; S 18 à 3,5 m, entre 7,0 m et 8,0 m (remplissage) ; S 20 entre 7,0 m et 7,5 m.

A la suite de cela, un dosage des sels solubles de différents échantillons de carottes pris sur le site a été effectué (laboratoire C.T.G.R.E.F. Bordeaux).

En ce qui concerne le gypse ($\text{Ca SO}_4, 2 \text{ H}_2\text{O}$), les résultats sont groupés dans le tableau ci-dessous :

N° SONDAGE	Profondeur (m)	Teneur en Ca SO_4 (g/kg)	Teneur en Ca SO_4 (%)
S 17	5,5	0,08	0,008
S 17	8,3	0,16	0,016
S 17	15,0	0,12	0,012
S 17	21,0	0,22	0,022
S 18	10,5	0,00	0,000
S 18	14,8	0,08	0,008
S 18	18,5 à 23,0	0,30	0,030
S 23	19,0	0,15	0,015
S 23	24,8	0,10	0,010
S 23	28,5	0,06	0,006
S 23	34,0	0,11	0,011

La teneur moyenne de ces échantillons (0,013 %) est extrêmement faible.

3.4.1.2 - Les terrains de couverture

Nous avons distingué des alluvions et des éboulis plus ou moins mélangés aux éluvions et colluvions de versant.

- Alluvions

Elles sont surtout développées au pied de la tranchée amont de rive droite, où l'on a un dépôt qui s'étale sur une quarantaine de mètres de large. Elles sont constituées d'une argile limoneuse ocre surmontant un niveau de galets (S 20). Parfois, la formation est nettement plus graveleuse dans son ensemble (S 5). Les variations lithologiques sont donc très rapides d'un point à un autre, ainsi que l'épaisseur, qui peut passer de 4 à 6 m.

- Eboulis

Sous ce terme, nous avons regroupé éboulis, éluvions et colluvions de versant.

Ils tapissent les deux rives. Ce sont des matériaux argileux beige - jaunâtre, assez compacts.

- Au-dessus du toit du niveau détritique moyen, ils ont une épaisseur assez uniforme de 1 à 2 m.

- Au-dessous on trouve, emballés dans la matrice argileuse, des blocs de grès ou de conglomérat dont certains dépassent le mètre cube et qui proviennent du démantèlement du niveau détritique du substratum. Leur épaisseur augmente progressivement en descendant la pente, pouvant atteindre 4 à 5 m au pied du versant rive gauche (fig. 30).

- Comblement du sillon rive droite

Dès maintenant nous attirons l'attention sur la présence en rive droite d'un sillon, profond d'une dizaine de mètres environ et rempli de matériaux remaniés (fig. 29), correspondant au replat déjà signalé (cf. 3.1.).

On y trouve en effet des blocs de grès et conglomérats, des blocs de marnes, mélangés dans une matrice argileuse altérée jaunâtre. La granulométrie de ces éléments est très variable (de quelques décimètres-cubes à plusieurs mètres cubes).

3.4.2 - La structure

La description est faite à partir des coupes transversales et des coupes amont-aval de la figure 30.

3.4.2.1 - Structure de la rive gauche

Les coupes géologiques montrent que l'on a une structure simple, isoclinale avec un pendage des couches vers le Nord de l'ordre de 7° et de direction générale N 85° E. Les couches ont légèrement tendance à plonger vers l'intérieur du versant. La régularité de ces dispositions n'est simplement rompue que par les variations d'épaisseur au sein du niveau détritique moyen.

3.4.2.2 - Structure du haut de la rive droite

Elle prolonge celle de la rive gauche par rapport à l'axe du ruisseau avec cette fois une légère tendance des bancs à plonger vers le versant d'air.

Enfin sur cette rive, la continuité de certains niveaux semble localement moins nette et témoigne d'une sédimentation parfois lenticulaire (cf. 3.4.1.1).

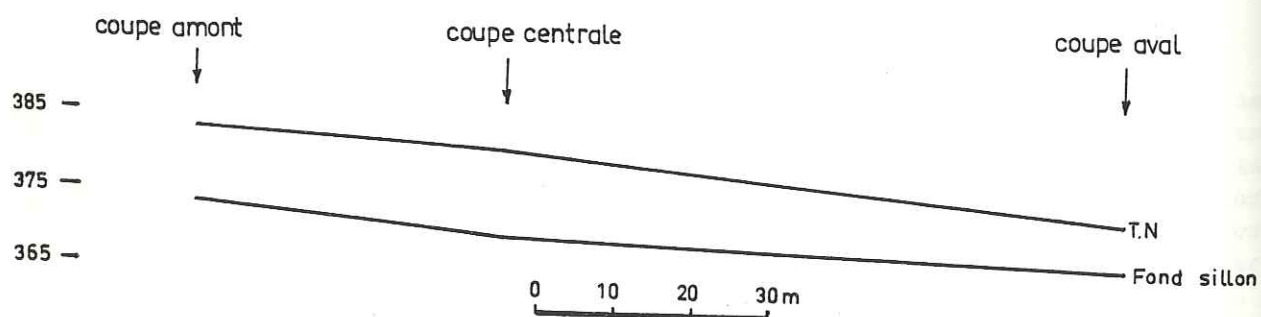
3.4.2.3 - Structure du bas de la rive droite

- Le sillon et la ride (fig. 30)

- Ce sillon a été découvert lors de l'ouverture de la tranchée amont. En élargissant celle-ci, la pelle mécanique a pu atteindre le substratum marneux, qui représente sa limite inférieure, à 10 m de profondeur. A la suite de cela, les tranchées centrale et aval ont également fait l'objet d'un approfondissement. Il a permis de préciser la forme et la direction de cette anomalie qui est en fait à l'origine de la zone plus plate que l'on a à mi-pente. A l'Est, la limite longe grosso-modo le bas de la petite cuesta formée par le niveau détritique moyen. La limite ouest (limite du remplissage anormal) est confondue avec la remontée du substratum marneux qui de ce côté dessine alors une véritable ride.
- Les coupes en travers indiquent que cette disposition se prolonge sous toute la zone du site mais qu'elle s'atténue beaucoup au droit de la tranchée aval, où ride et sillon ont pratiquement disparu.

La largeur moyenne de cette "gouttière" est d'une quarantaine de mètres au T.N.

- Si l'on essaye d'en tracer un profil longitudinal, le long de son axe, on obtient le graphique suivant :



Ce sillon a donc une pente générale dirigée vers l'aval qui suit pratiquement celle de la topographie (avant que celle-ci n'ait été bouleversée par les travaux).

Afin de préciser l'origine de cette structure, plusieurs sondages ont été décidés pour tester aussi bien le sillon (S 18 et S 19) que la ride (S 17, S 22 et S 24).

- Origine de cette structure

Deux hypothèses peuvent être envisagées, à savoir : soit un glissement de terrain du bas de versant, soit un processus d'érosion par ruissellement superficiel.

Nous allons examiner les arguments en faveur de l'une ou de l'autre de ces hypothèses.

a) Hypothèse glissement

La figure 31 résume les stades d'évolution d'un glissement. Il n'aurait affecté que les marnes inférieures du versant. La rupture aurait été favorisée par une altération plus grande des marnes au contact des conglomérats qui par moment peuvent maintenir un environnement humide au toit de ces dernières (1).

Le glissement amorcé se serait poursuivi sur une surface de glissement préférentielle (2). Le vide laissé derrière elle par la masse glissée se serait comblé petit à petit par érosion du talus dominé par les conglomérats (2) et (3).

b) Hypothèse gouttière d'érosion

La figure 32 montre les stades d'évolution supposée du phénomène.

Dans un premier temps, le ruissellement superficiel aurait amorcé un petit thalweg avec un écoulement à peu près Sud-Nord (1). Une érosion intensive (absence de dépôts alluvionnaires) aurait ensuite permis le creusement d'une gouttière (2). Puis cette gouttière aurait été comblée par des éboulements successifs du versant, l'érosion ayant atteint et affouillé la base du niveau détritique moyen. Au stade ultime, éboulis et colluvions ont définitivement rempli la gouttière (3).

Afin d'essayer de vérifier ces hypothèses, des reconnaissances particulières ont alors été entreprises.

Fig. 31. - Hypothèse glissement de versant

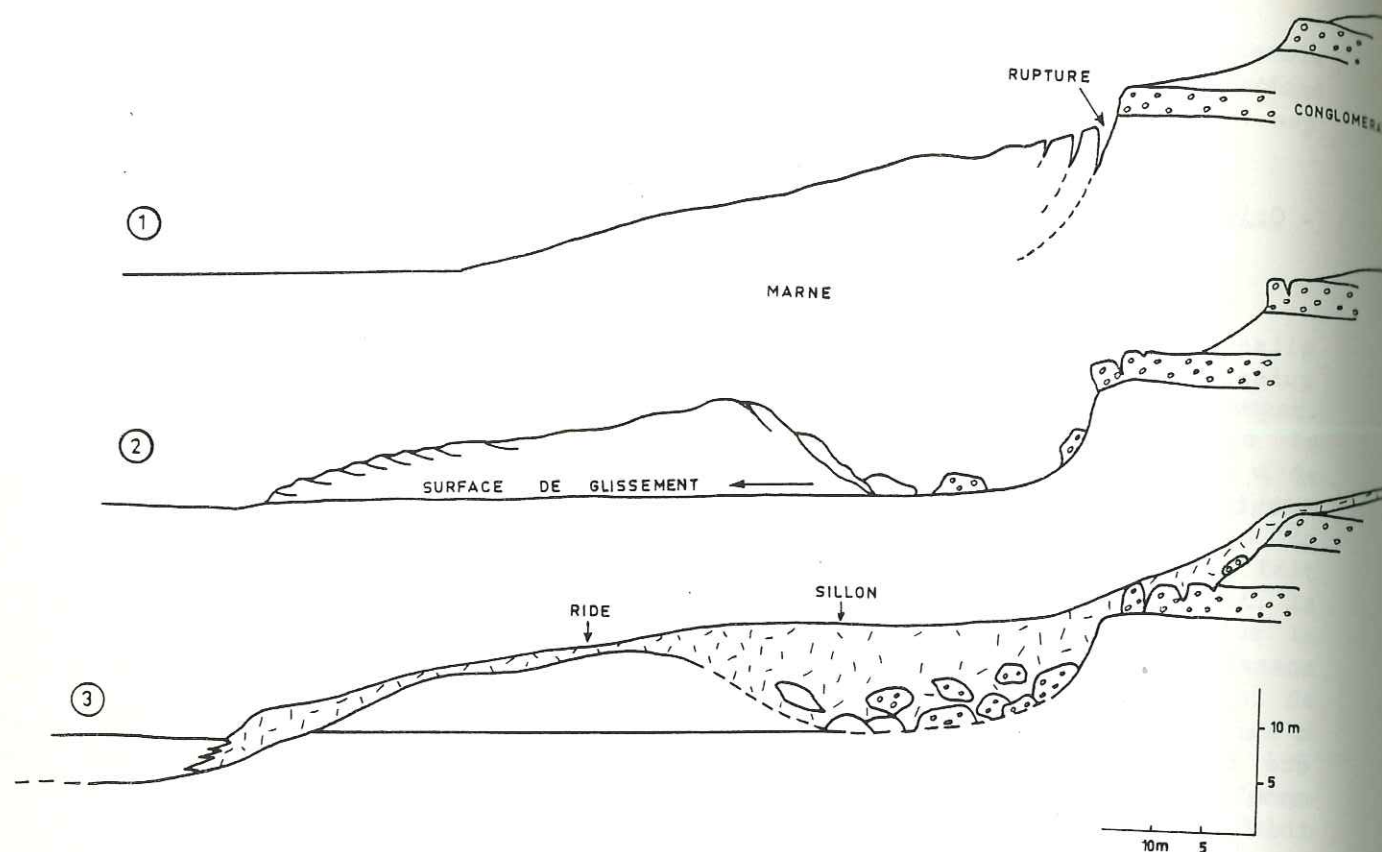
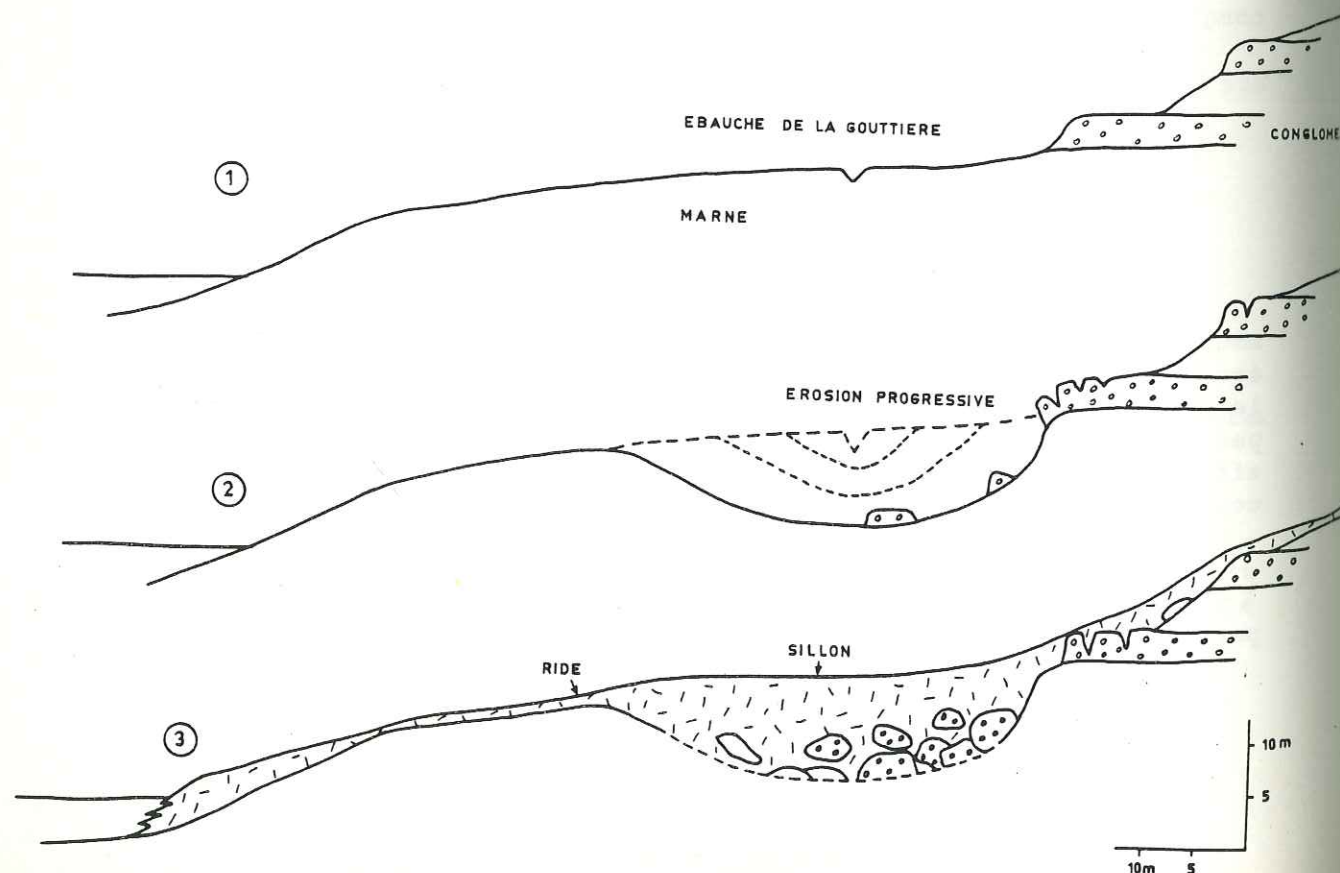


Fig. 32. - Hypothèse gouttière d'érosion



c) Moyens d'analyse

. Sondages de reconnaissance

Les sondages S 16, S 17, S 18, S 22, S 23 ont permis de reconnaître le versant rive droite.

Ils ont été le siège de prélèvements d'échantillons intacts pour comparer certains paramètres physiques des marnes inférieures, selon leur position.

Aussi les longueurs suivantes ont-elles été mises sous gaine (triple carottier) :

S 16 :	23,50 à 33,10
S 17 :	4,00 à 19,00
S 18 :	11,00 à 18,50
S 22 :	2,20 à 20,20
S 23 :	17,00 à 34,60

et ont permis un certain nombre d'analyses.

. Mesures des densités apparentes au banc de gammadensimétrie

Ces mesures ont été réalisées au C.E.T.E. de Toulouse. Les échantillons sous gaine ont été passés au banc de gammadensimétrie. Le but était de mesurer les densités apparentes des marnes inférieures dans la ride (S 17) et de comparer les valeurs avec celles des marnes situées sous l'hypothétique plan de glissement (S 17 - S 18) ou dans le versant (S 16) à une profondeur correspondant à celle de la ride (compte tenu du pendage).

Les résultats n'ont pas été concluants pour le but recherché. En effet, les marnes de la ride, au-dessus du plan supposé de glissement, n'ont qu'une densité très légèrement plus faible que les autres. On aurait pu croire en fait qu'un remaniement, dû ici à un transport gravitaire, aurait entraîné des différences densimétriques plus marquées.

. Examen des carottes après ouverture des gaines

Les sondages S 18 et S 19 ont confirmé que les tranchées amont et centrale avaient bien touché les marnes du fond du sillon.

Sur la ride, les sondages S 17, S 22 et S 24 avaient pour but de rechercher "le plan de glissement" et de comparer la structure des marnes de la ride avec celle des marnes sous ce plan.

L'examen visuel de la structure des 2 types de marnes n'a rien apporté.

En ce qui concerne le plan de glissement, seul un niveau de marnes plus grises a été observé en S 17, S 18, S 19 et S 22. Son épaisseur varie de 1,9 m à 2,2 m. Il pourrait correspondre, compte tenu de sa profondeur, à la surface de glissement, mais les traces de rupture et de friction dans ce niveau ne sont pas évidentes. Cette passée plus grise n'apparaît cependant pas dans le versant (S 23).

. Mesures de teneurs en eau

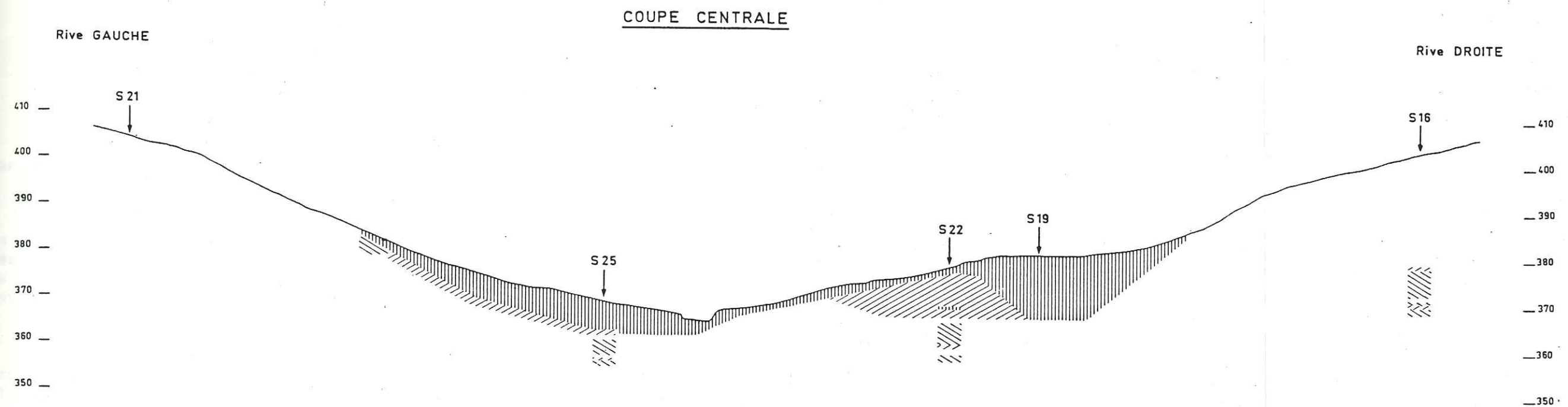
L'ouverture des tranchées avait montré de nombreux suintements et petites venues d'eau dans le sillon. De fréquentes mesures de teneurs en eau (D. LAUTRIN, 1979) ont été faites sur les sondages afin d'étudier la répartition de ces teneurs en fonction des différents terrains et de leur position. Les coupes de la figure 33 attirent un certain nombre de remarques :

- les terrains de couverture et le sillon ont des teneurs en eau comprises entre 11 et 15 % ou supérieures à 15 % ;
- les marnes situées immédiatement au-dessous sont les plus humides (11 à 15 %) sur environ 3 m d'épaisseur (S 20) ;
- les marnes sous la ride, en thalweg et en versant ont des teneurs inférieures à 11 % ;
- la ride marneuse a des valeurs de l'ordre de 11 à 15 % voire supérieures à 15 %.

Il semble qu'il y ait contamination aqueuse de la ride par le sillon, et cela au-dessus de l'hypothétique plan de glissement (marnes grises) décrit plus haut. Les marnes de la ride ayant une perméabilité vraisemblablement très faible, il n'est pas impossible de penser qu'une légère désorganisation de ce niveau aurait pu faciliter les percolations, ce qui irait dans le sens de l'hypothèse glissement.

d) Conclusion

Si un certain nombre d'observations vont plutôt dans le sens d'un glissement (niveau marneux gris sous la ride et absent dans le versant, teneurs en eau plus élevées dans la ride), elles ne sont pas suffisantes pour conclure de façon absolue et l'origine de cette structure particulière de la rive droite n'est pas complètement élucidée. Nous verrons par la suite que cela a été d'une grande importance lors de la réalisation de l'ouvrage.



LEGENDE

$W > 15\%$

$15\% > W > 11\%$

$W < 11\%$

(D'après dossier géotechnique, simplifié)

0 5 10 20 40m.

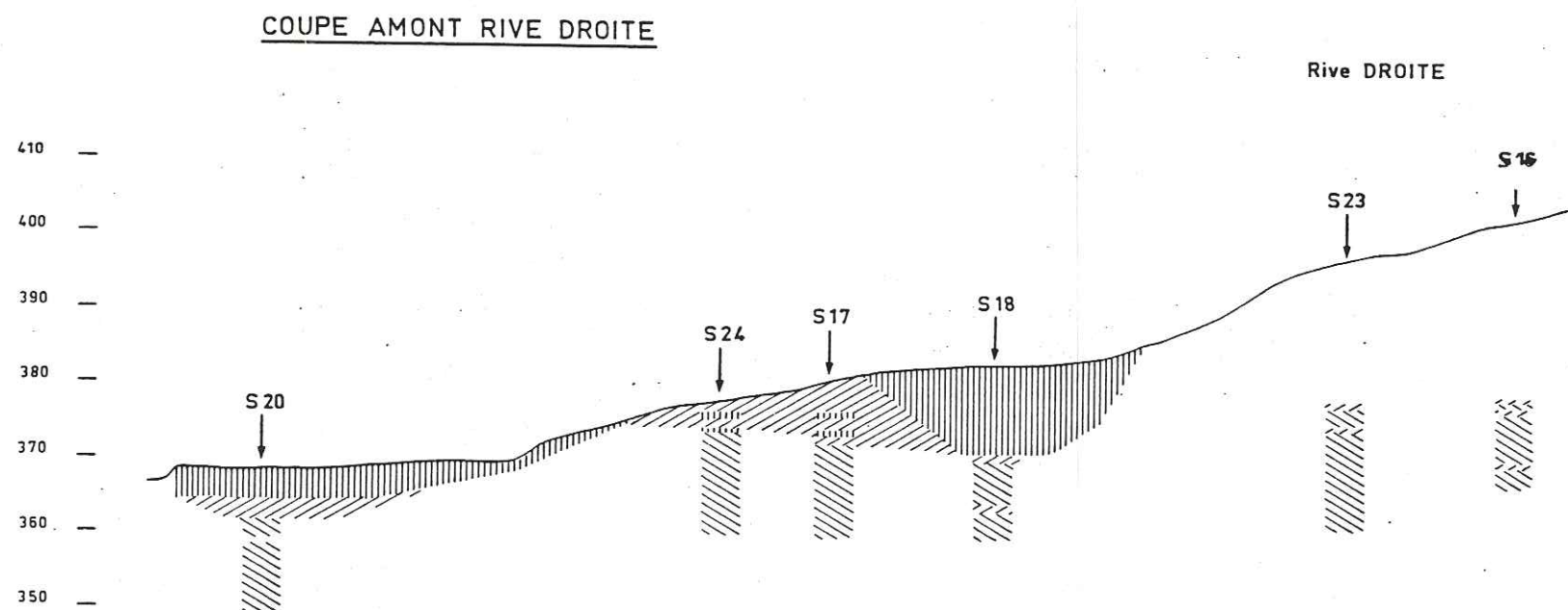


Fig. 33. - Coupes des teneurs en eau sous l'ouvrage

3.4.3 - Valeur de la fondation

3.4.3.1 - Valeur mécanique des terrains

- Dans le versant et en thalweg

Le substratum marneux sain recoupé par le niveau détritique moyen devrait constituer une assise non rigide de qualité acceptable. Les marnes supérieures et inférieures sont la plupart du temps très compactes, voire indurées lorsqu'elles sont grésifiées. Les risques de tassements seront donc vraisemblablement très réduits.

En ce qui concerne les terrains de couverture, on purgera les versants de la totalité des gros blocs instables du niveau grésoconglomératique et des éboulements grossiers qui apparaissent au-dessous.

En thalweg, les alluvions, compte tenu de leur faible extension pourraient être curées, à moins que leurs qualités mécaniques ne soient suffisantes.

- Dans le sillon et la ride

- . Le sillon est comblé de matériaux d'altération ou résultant de l'écroulement gravitaire du niveau conglomératique. Cet ensemble hétérogène constitue une zone d'assez mauvaise qualité accrochée dans le versant. Les essais géotechniques n'ont pu être réalisés que sur la partie fine de ce remplissage et risquent ainsi d'être peu représentatifs de son comportement d'ensemble. N'oublions pas qu'à l'ouverture des tranchées, on a pu constater que localement, on pouvait avoir des blocs se touchant les uns les autres, sans matrice argileuse, donc avec des possibilités de vides.

De plus, le fait que ce sillon naturel soit garni des terrains les plus humides laisse supposer que ce sera au détriment de leurs qualités mécaniques.

- . La ride, entièrement marneuse, est elle aussi plus humide et de moins bonne qualité mécanique, mais ces marnes sont néanmoins compactes et leur conservation totale ou partielle pourrait, sous certaines conditions, être envisagée sous l'ouvrage, même si, dans le cas le plus défavorable, elles ont subi un déplacement gravitaire. L'étude géotechnique permettra de conclure (des études géophysiques n'ont pas été envisagées car les terrains ne sont pas assez contrastés). En fait, leur conservation ou leur décapage sera surtout lié, comme nous allons le voir, à des considérations de chantier.

3.4.3.2 - Terrassements nécessaires

- Décapage des versants

Comme nous l'avons dit plus haut, les versants des deux rives feront l'objet d'un décapage général qui les débarrassera de la terre végétale et de l'altération normale (environ 1 m). Les parties basses, où les gros blocs se sont accumulés, (fig. 30) seront nettoyées de telle manière que ces blocs ne perturbent pas le déroulement du chantier. Dans ce cas, l'épaisseur à traiter peut être assez considérable (> 4 m) en bas des versants.

- Enlèvement du sillon et de la ride

A priori, il semble difficile d'enlever uniquement le remplissage du sillon et les marnes constituant la ride devront également être plus ou moins écrêtées. Une estimation très grossière indique que, sous l'emprise d'un ouvrage souple, le volume à enlever est d'environ 40000 m³ pour le sillon seul (L = 130 m, l = 40, épaisseur moyenne = 8 m) et de 100000 m³ pour le sillon et la ride (L = 150 m, l = 80 m, épaisseur moyenne = 8 m). Ces quantités ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur.

- Stabilité du versant rive droite

Près du versant d'air, se manifeste une instabilité du niveau détritique moyen, qui se découpe en gros blocs, dépassant parfois le mètre cube, qui à leur tour basculent par appel au vide (les ébauches de ce basculement se voient très bien dans les tranchées, où l'on constate un écartement des lèvres des fissures orientées NNE - SSW dans les conglomérats).

L'instabilité des marnes du dessous, bien que non prouvée de façon certaine, est également à prendre en considération pour le chantier.

. Stabilité au cours de l'enlèvement du sillon et de la ride

Il apparaît très vraisemblable que si l'on enlève une grosse quantité de matériaux au pied du versant les risques d'instabilité de sa partie supérieure deviennent importants. Aussi, il semble que le chantier doive être organisé de telle façon que les matériaux déblayés soient immédiatement remplacés, afin de conserver au maximum l'appui de pied de

versant. Ceci nécessitera de procéder par panneaux successifs et il est certain qu'il faudra une organisation du chantier très soignée (*).

. Stabilité après enlèvement du sillon et de la ride

Si l'on a pu remplacer de façon progressive et complète les matériaux préexistants, on devrait conserver un état d'équilibre du versant acceptable pour poursuivre l'édification de l'ouvrage.

3.4.3.3 - Conclusion sur la valeur de la fondation

Dans son ensemble, le site du barrage intéresse des terrains qui constituent une assise de qualité suffisante pour un ouvrage souple de type digue en terre ou en enrochements.

Le gypse diffus en quantité extrêmement faible ne doit pas poser de problème.

Par contre, il est évident que le sillon et la ride de la rive droite, qu'il faudra sans doute plus ou moins déblayer, vont imposer au chantier des contraintes importantes si l'on veut limiter les risques d'instabilité du versant lors du retrait des matériaux. Une fois cette opération délicate réalisée, la mise en place du corps de digue proprement dit ne devrait pas entraîner de sujétions particulières.

Il faudra cependant tenir compte de points durs représentés, à mi-hauteur des versants, par le niveau conglomératique, points durs qui peuvent induire des tassements différentiels.

3.4.4 - Etanchéité au droit du site

3.4.4.1 - Les essais de perméabilité

Des essais Lugeon ont été réalisés lors des deux campagnes de reconnaissance, soit un total de 29 + 54 = 83 essais (fig. 34).

(*) Lors de la construction de ce barrage, l'hypothèse du glissement de versant a été confirmée ; plusieurs dizaines de milliers de m³ ont été mises en mouvement lors des terrassements et la surface de glissement de la figure 31 a été retrouvée.

Nous attirons l'attention sur le fait que si les essais Lugeon de la première campagne ont pu être exécutés de façon convenable, il n'en a pas été de même pour la seconde campagne, où l'entreprise semble avoir eu de nombreux déboires avec des obturateurs déficients qui ont été très souvent contournés lors des montées successives en pression.

Néanmoins, on a pu se faire une idée relativement précise de la perméabilité des différentes formations lithologiques.

Niveaux lithologiques	ABSORPTIONS	
	1re Campagne (P. max. 10 b)	2e Campagne (P. max. 5 b)
Marnes supérieures	0 U.L.	1,7 l/m/mn
Niveau détritique moyen	Débit max. pompe 180 l/mn sous 3 b	Débit max. pompe 100 l/mn sous 1,2 b
Marnes inférieures	0 U.L.	0,4 à 2 l/m/mn

On peut donc considérer que :

- les marnes supérieures sont pratiquement étanches ;
- le niveau détritique moyen est extrêmement perméable car, déjà à la foration, des pertes totales d'eau s'y sont produites (S 16 et S 21) et le débit maximal de la pompe a été atteint pour des pressions faibles (entre 1 et 3 b) ;
- les marnes inférieures sont quasi étanches. L'absorption anormale de 6 l/m/mn que l'on observe en S 16 entre 26,5 et 29,5 m de profondeur, avec un phénomène de colmatage à la descente en pression, devrait également être imputable à une tenue plus ou moins douteuse de l'obturateur.

3.4.4.2 - Circulations dans le niveau détritique moyen

Etant donné sa perméabilité, des circulations dans ce niveau sont certaines.

D'ailleurs il a déjà été possible d'en observer une.

En effet, lors de la réalisation du sondage S 23 (rive droite), on a pu constater une venue d'eau (fig. 29) à la cote 367, à l'aval du site. Cette eau boueuse n'était qu'une résurgence de l'eau de foration injectée au sondage S 23 : son débit devenait pratiquement nul lorsque la foration était arrêtée et était maximal lors du creusement du trou.

De plus, on a constaté qu'elle se situait sur le prolongement théorique vers l'aval du niveau détritique moyen. La longueur de cheminement des eaux est d'au moins 180 m.

Ce niveau sera donc un vecteur de fuite certain.

3.4.4.3 - Présence de gypse dans les marnes

Nous avons signalé précédemment que du gypse avait été trouvé à l'état diffus dans les marnes.

Compte tenu des faibles teneurs de ce dernier et de la bonne étanchéité des marnes, les risques de circulations d'eau dans le terrain sont minimales, et de ce fait les possibilités de dissolution et création de vides pouvant compromettre l'étanchéité sous l'ouvrage et sa stabilité sont pratiquement exclues.

3.4.4.4 - Etanchéité des terrains de couverture

Ils n'ont pas fait l'objet d'essais de perméabilité.

Cependant, au vu des observations lithologiques, on peut dire que :

- les alluvions présentent des horizons graveleux certainement très perméables ;
- les éboulis et éluvions, bien que possédant une matrice très argileuse, sont localement riches en gros blocs entre lesquels cette matrice est souvent moins compacte, voire absente.

Cela peut faciliter des circulations préférentielles à leur contact et permettre l'établissement de phénomènes de renard. Nous considérerons donc qu'ils ont une perméabilité potentielle non négligeable.

3.4.4.5 - Ebauche d'un écran d'injection

Sur la figure 34, ont été distinguées trois catégories de perméabilités :

- des zones perméables (niveau détritique, sillon et alluvions),
- des zones de perméabilité douteuse (éboulis et éluvions),
- des zones quasi imperméables (marnes).

Dans tous les cas, la clef d'ancrage du barrage devra recouper les terrains de couverture et s'ancrer dans le substratum. Cette clef sera poursuivie par un voile d'étanchéité normal qui devra traiter impérativement le niveau détritique moyen et pénétrer d'au moins 5 mètres dans les marnes inférieures.

De plus, le voile normal sera poursuivi par un voile au large, retourné vers l'amont sur les deux rives, et traitant ce niveau détritique tant que celui-ci sera baigné, vers l'amont, par le plan d'eau. Son extension sera précisée par des sondages de reconnaissance ultérieurs.

Ce voile au large est indispensable pour éviter tout contournement immédiat des appuis du barrage.

Enfin, on installera à l'aval du barrage un réseau de piézomètres qui devra permettre de surveiller l'efficacité du voile normal et du voile au large.

3.5 - CONCLUSION SUR LE SITE

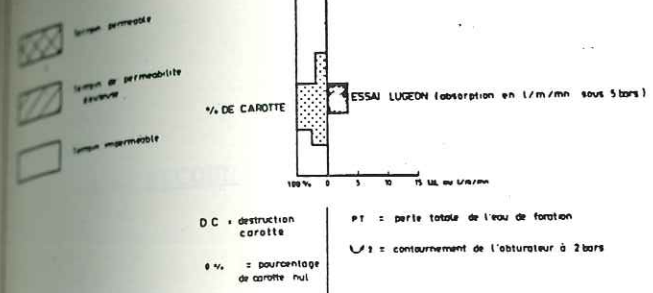
Le site du barrage, formé par une barre rocheuse détritique comprise entre deux assises marneuses, peut assez bien s'accommoder d'une digue souple mais se prête mal à la construction d'un ouvrage rigide.

La présence de gypse diffus dans les marnes en teneurs extrêmement faibles ne doit pas poser de problème de dissolution compromettant la stabilité et l'étanchéité sous l'ouvrage.

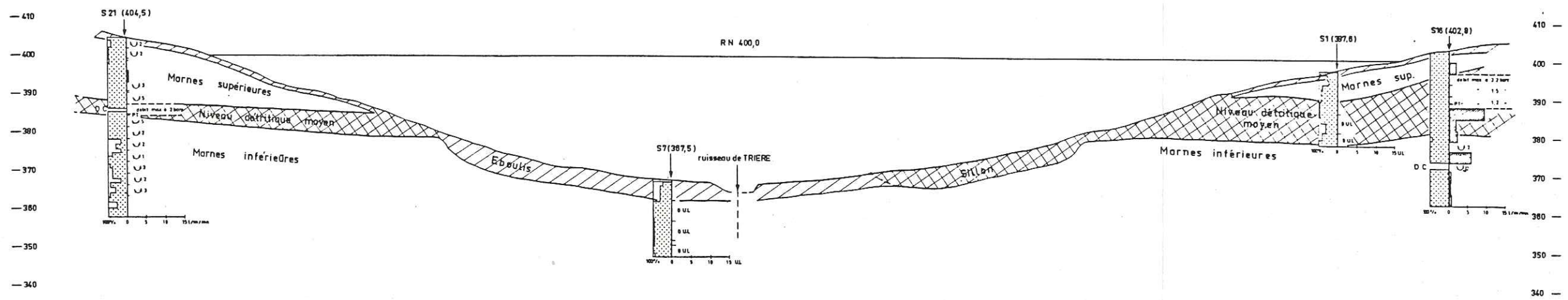
Par contre, l'enlèvement partiel ou total des matériaux du sillon et de la rive droite posera de sérieuses sujétions de chantier pour la stabilité de cette berge.

L'étanchéité des terrains au droit de l'ouvrage relèvera des techniques classiques d'injection d'un voile normal et d'un voile au large.

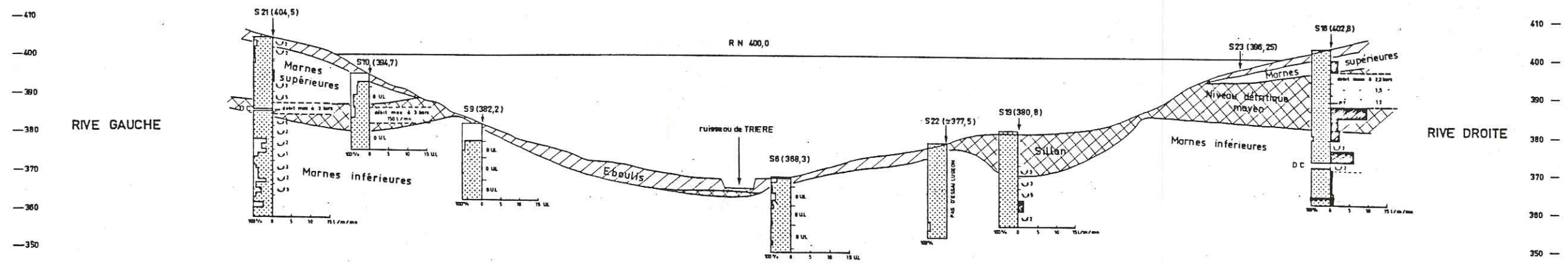
LEGENDE



Coupe AVAL



Coupe CENTRALE



Coupe AMONT

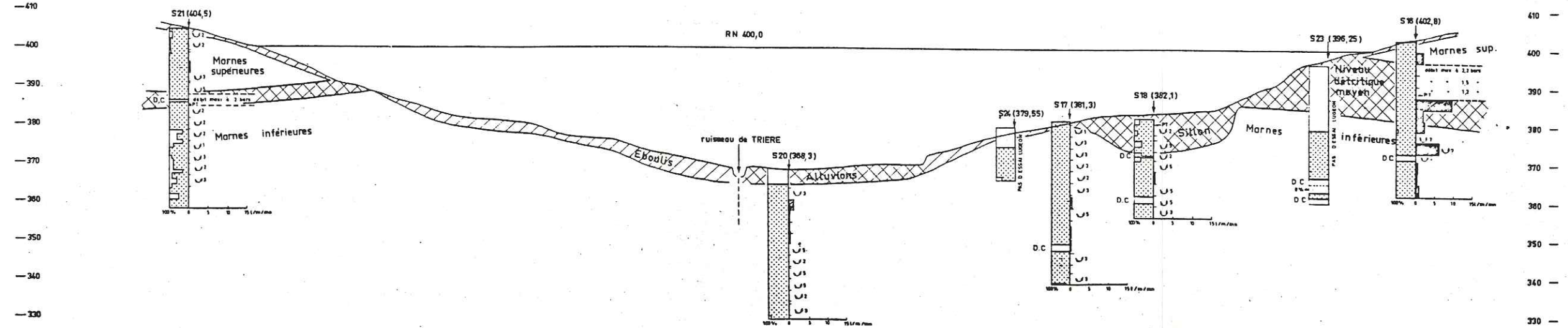


Fig. 34. - Coupes des perméabilités sous l'ouvrage

4 - RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE SUR LES MATERIAUX DE CARRIERE

L'examen des disponibilités en matériaux a fait l'objet de deux études :

- l'une concernant les matériaux fins (étude du C.T.G.R.E.F.),
- l'autre concernant les possibilités de carrières.

4.1 - FORMATIONS REPERTORIEES

Le nombre d'affleurements en cuvette et dans ses alentours immédiats est extrêmement réduit (fig. 24).

4.1.1 - Formations "rocheuses"

La seule formation rocheuse présentant un développement assez important est constituée par la barre de conglomérats (niveau 14, figure 25) qui affleure au-dessus des marnes supérieures du site. On observe, sur les deux rives de la vallée, une falaise naturelle formée de grès ou conglomérats, plus ou moins consolidés, dont l'épaisseur apparente varie entre 5 et 10 m. En rive droite, elle se développe sous le bois de Soula, en rive gauche, elle forme le Serre de Pourtel.

4.1.2 - Formations "marno-gréseuses"

Il s'agit en fait de substratum marneux compris entre deux niveaux détritiques. Au niveau de cette étude géologique, il n'a fait l'objet que d'une reconnaissance par sondage pour apprécier en un point son épaisseur, dans une zone située non loin du site.

4.2 - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

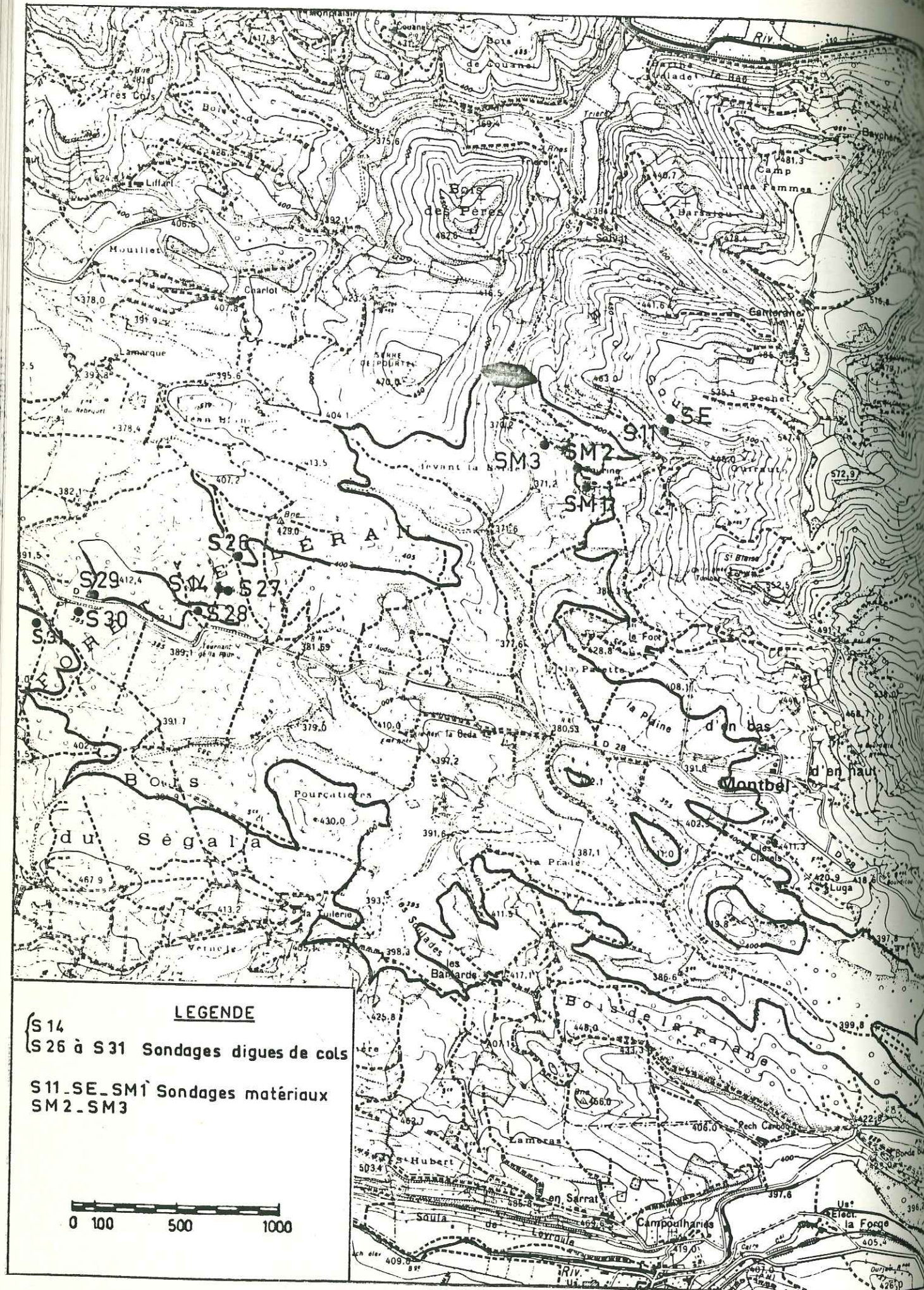
Trois sondages carottés ont été réalisés (fig. 35) :

- deux ont testé les conglomérats du bois de Soula,
- un autre a reconnu les marnes formant la butte sous la ferme de Taurine.

4.2.1 - Conglomérats et grès du bois de Soula

Le sondage de la première campagne (S 11, Agence de Bassin) a montré 18 m environ de terrains durs gréseux puis conglomératiques, plus ou moins consolidés. Ils sont déjà enfouis, en bord de falaise, sous 4 m de marnes impropres pour des enrochements.

Fig. 35. - Plan d'implantation des travaux de reconnaissance en cuvettes



Le sondage de la deuxième campagne (SE), situé plus à l'intérieur du versant, a rencontré 11,5 m de marnes environ recouvrant un premier niveau détritique gréseux de 12,6 m auquel succèdent 9 m de marnes. Au-dessous, on retrouve des grès et conglomérats localement très brisés et mal consolidés sur au moins 11 m de puissance.

On constate, à partir de ces deux sondages, que ce niveau détritique est très hétérogène aussi bien dans sa nature que dans sa structure, et qu'il est recouvert d'un volume important de stérile. Ces conditions ont conduit à abandonner cet éventuel gîte d'enrochements dont la qualité et les conditions d'exploitation se révèlent très médiocres.

Si l'on a besoin d'une petite quantité d'enrochements (de médiocre qualité), on aura peut-être intérêt à prospector le gisement de Serre de Pourtel qui affleure pratiquement en surface structurale sur le sommet de cette colline, donc sans couverture notable de stérile.

4.2.2 - Marnes de la ferme de Taurine

Toute la butte située sous la ferme de Taurine est formée de marnes bariolées en général, localement feuilletées. Les sondages SM1, SM2 et SM3 les ont reconnues sur respectivement 30, 20 et 15 m d'épaisseur.

Si les qualités géotechniques de ce matériau sont intéressantes, on disposerait alors d'un volume de terrain important pour l'ouverture d'une carrière, située à environ 600 m du site.

4.3 - CONCLUSION SUR LES MATERIAUX

L'utilisation des conglomérats et grès du niveau 14 est assez aléatoire en raison de l'hétérogénéité de la formation et des difficultés d'exploitation, particulièrement en rive droite, au bois de Soula.

Les matériaux disponibles près du site en quantité illimitée sont des marnes plus ou moins grésifiées. Leur mode d'utilisation a été étudié par E. ALONSO (1985). Pour la réalisation de cette digue, il est apparu que ces marnes compactées avaient des caractéristiques mécaniques médiocres, ce qui a conduit à avoir des fruits pour l'ouvrage de 4 pour 1 à l'amont et 3,5 pour 1 à l'aval. "En ce qui concerne le corps du barrage, il a été convenu d'utiliser les marnes tendres les moins sèches (teneur en eau supérieure à 13) dans la zone amont et dans la zone aval, les marnes tendres les plus sèches (teneur en eau comprise entre 10 et 13), un filtre séparant ces deux zones".

5 - DIGUES DE COLS

Dans la partie ouest de la cuvette, au milieu de la forêt de Lérans, deux cols font communiquer le bassin du ruisseau de la Trière avec celui du Touyre. Ces cols, situés respectivement aux cotes N.G.F. 396,60 et 390,93, devront être fermés par deux digues d'environ 7 m et 13 m de hauteur qui permettront le stockage d'une tranche d'eau de l'ordre de 40 Hm³. Ces cols jouent donc un rôle important dans cet aménagement et ont fait l'objet d'une étude géologique complète. La topographie assez molle et le manque d'affleurements ont fait que des travaux de reconnaissance ont été d'emblée nécessaires (fig. 36).

Examinons pour chacun des deux cols, les résultats obtenus lors de ces reconnaissances.

5.1 - COL 390

5.1.1 - Tranchées et sondages

Trente-quatre tranchées (T 23 et T 56) et 3 sondages (S 26 à S 28) ont été réalisés.

Ces derniers ont été complétés par 11 essais Lugeon avec 9 paliers de pression par essai : 0,5 - 1 - 2 - 3 - 5 - 3 - 2 - 1 - 0,5 bars.

5.1.2 - Terrains de couverture

Sous la terre végétale de surface, on rencontre des éluvions constituées le plus souvent par des marnes altérées, plus ou moins sableuses, ou grésifiées.

Sur l'ensemble des tranchées, la terre végétale a une épaisseur moyenne de 0,5 m. La tranche altérée des marnes a une puissance comprise entre 1,1 m et 2,5 m avec une moyenne sur l'ensemble du site de 1,6 m (fig. 37).

5.1.3 - Substratum

Il est essentiellement marneux. La nature des marnes varie localement et l'on trouve des marnes compactes bariolées, assez argileuses, des marnes sableuses, des marnes feuilletées ou grésifiées.

rêt de
e avec
396,60
m de
re de
et ont
molle
ssance

lors

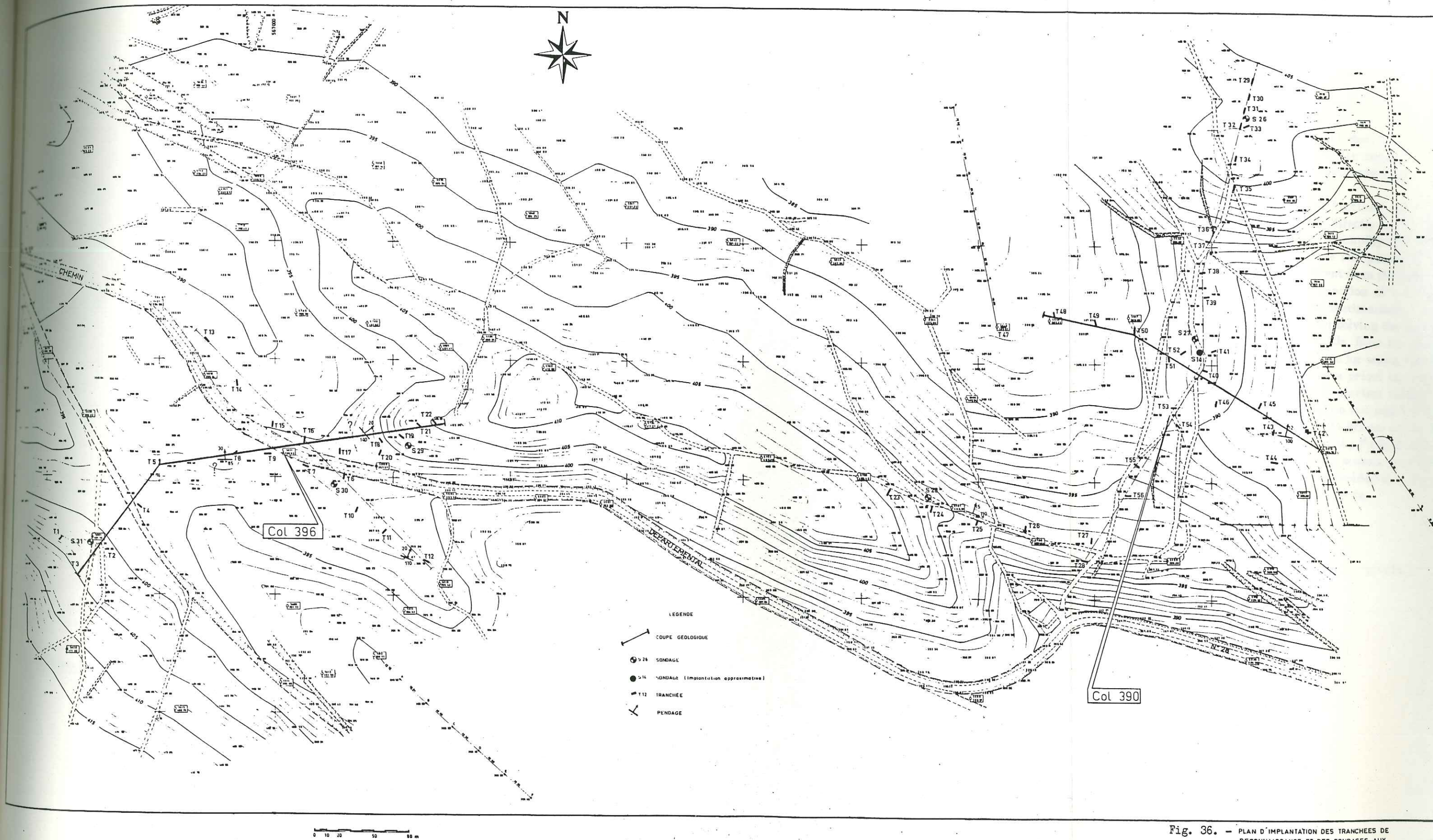
à S

rs.

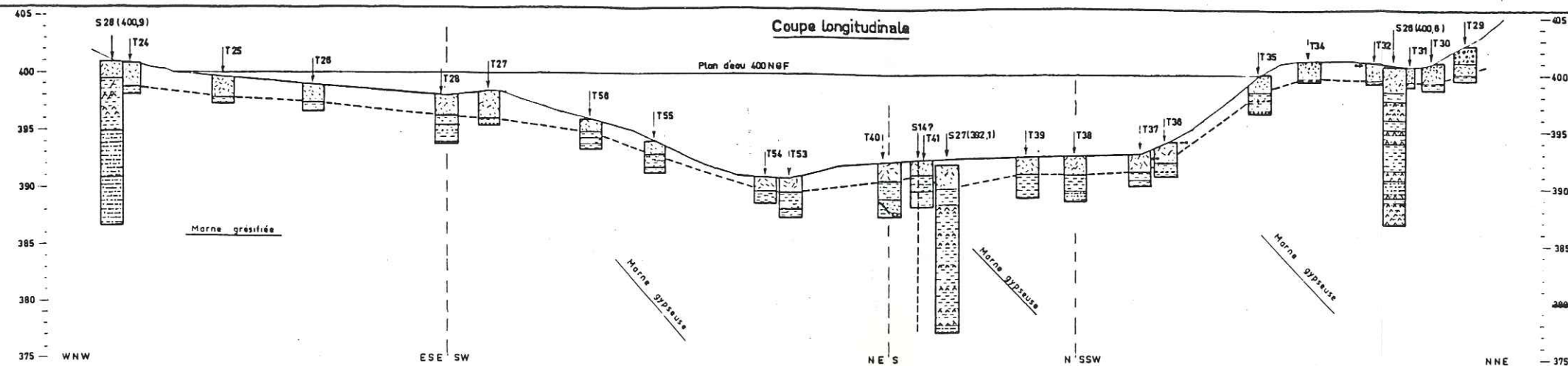
ns
ns

ur
se
m

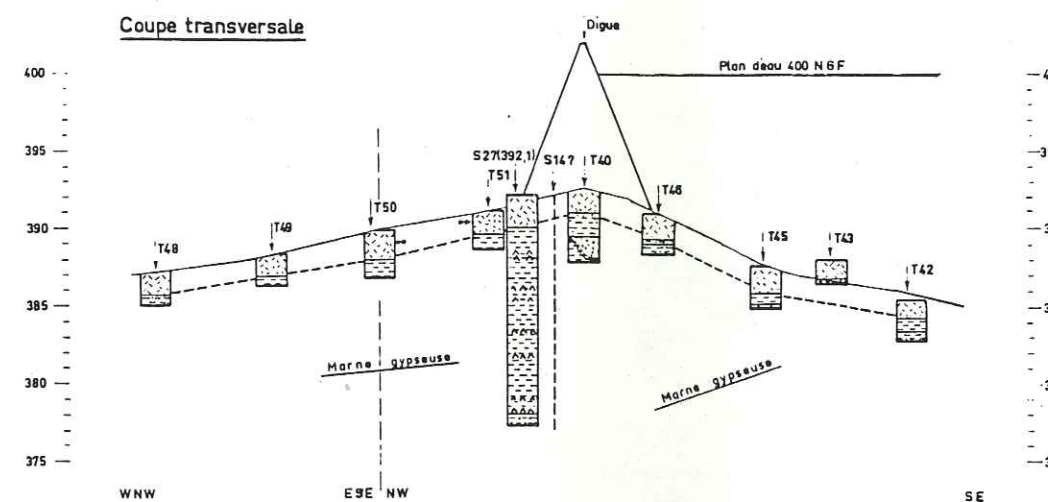
e
z



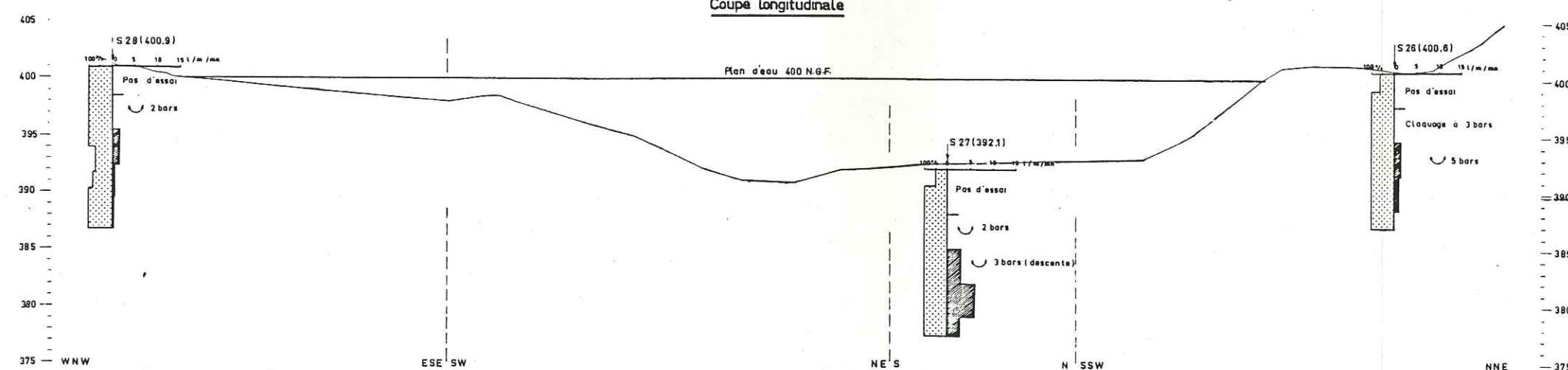
GÉOLOGIE



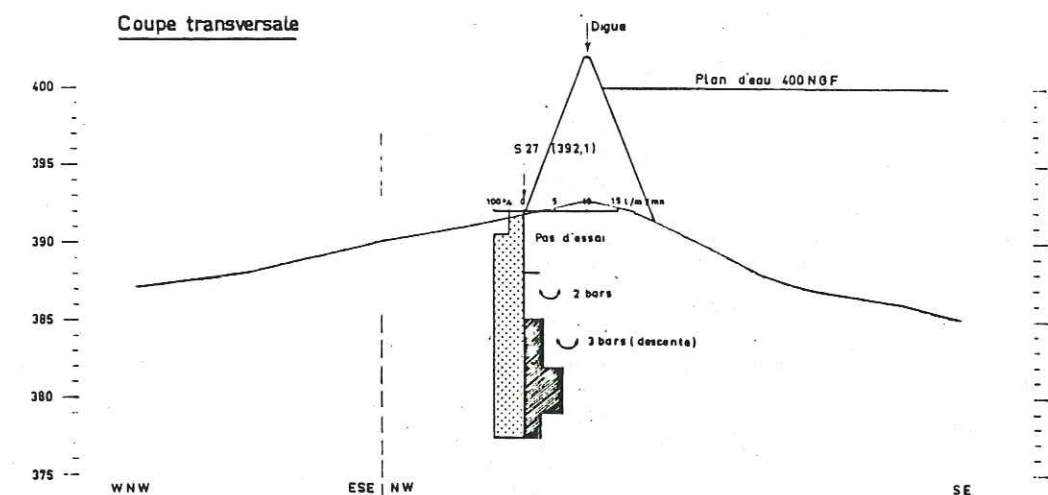
Coupe transversale



Coupe longitudinale



Coupe transversale



- Terre végétale, éluvions (marnes altérées)
- Marnes compactes baritiques localement gypseuses
- Marnes sableuses
- Marnes grésifées parties feuilletées
- Grès, conglomérat
- Sables
- Gypse fibreux filamenteux ou en aggrégats
- Venue d'eau
- Limite des marnes altérées
- Pendage apparent des couches tenant compte de la distorsion des échelles

PERMEABILITE

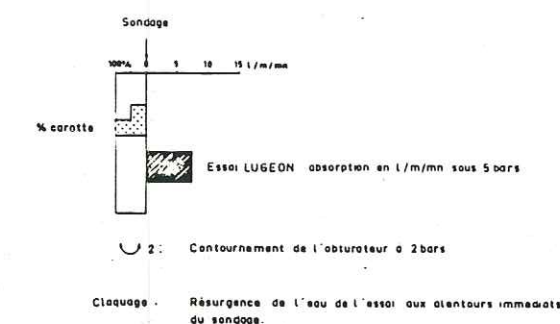


Fig. 37. - Coupes géologiques et perméabilités au col 390

Entre 2 et 5 m de profondeur, ces marnes sont souvent recoupées de racines et de petites fissures parfois oxydées. Quelques lentilles de sable ont été rencontrées (T 40 et T 54). Enfin, sur l'appui rive droite, un niveau de conglomérat (correspondant peut-être au niveau détritique 10) a été touché (T 29). La cote de son mur se situe au-dessus du plan d'eau (# 401 N.G.F.). Le niveau 9 n'a pas été retrouvé en S 28 et doit passer plus en profondeur.

Un point important est à signaler : nous avons observé fréquemment la présence de gypse dans ces marnes.

Le gypse se rencontre sous plusieurs formes :

- agrégats formant de petits cailloux anguleux, beige rosé, de 2 cm de long sur 1 cm de large (T 50, T 51, T 52) ;
- filons de gypse fibreux, blanc et pur, d'épaisseur variant de 0,1 cm à 2,5 cm (S 26 surtout, S 27 et S 28). Les filons, d'orientation variable, sont présents sur toute la longueur des forages S 26 et S 27 (de 3 à 15 m de profondeur au moins). Sur le sondage S 26, on a compté 13 filons ;
- ponctuations gypseuses sous forme de tâches blanchâtres sur les bords de certaines carottes (S 26 et S 27) ;
- fines paillettes de gypse diffus dans les marnes.

Ces observations visuelles ont été confirmées par des analyses diffractométriques (laboratoire de Cristallographie, Université de Grenoble).

Afin de préciser les teneurs en gypse, différents échantillons de marnes ont été analysés (laboratoire C.T.G.R.E.F. Bordeaux).

N° Sondage	Profondeur (m)	Teneur Ca SO ₄ (g/kg)	Teneur Ca SO ₄ (%)
S 26	12,2 m	17,70	1,77
S 27	4,3 m	13,10	1,31
S 27	6,6 m	0,39	0,039
S 28	3,0 m	4,97	0,497
S 28	4,5 m	1,18	0,118

On constate que les teneurs sont faibles ($< 2 \%$) mais ces analyses ne tiennent pas compte du gypse filonien.

Aussi afin d'avoir une "valeur moyenne globale" du gypse dans la fondation, nous avons fait broyer la moitié longitudinale du sondage S 26 (le plus riche en gypse filonien) de 3 à 13 m de profondeur (laboratoire S.C.P. Aix-en-Provence).

Après homogénéisation de la poudre obtenue, on a prélevé des éprouvettes par la méthode des "tas mineurs".

Ces éprouvettes donnent les teneurs générales en gypse :

SONDAGE S 26	PROFONDEUR	TENEUR Ca SO_4 en %
Echantillon 1	3 à 13 m	3,0
Echantillon 2	3 à 13 m	3,5

5.1.4 - Structure

La série monoclinale de marnes est pentée vers le Nord. Les rares mesures de pendage effectuées dans les tranchées donnent une direction des couches $N 100^\circ - 110^\circ E$ avec un pendage compris entre 10 et 15° vers le NNE.

(Sur les coupes de la fig. 37, la lithologie est écrite suivant le pendage : l'inclinaison des écritures correspond à la valeur déformée par la distorsion des échelles hauteurs - longueurs).

5.1.5 - Valeur de la fondation

Les marnes saines devraient fournir une fondation très acceptable pour la digue. Le pourcentage de carottes et le R.Q.D. sont pratiquement toujours égaux à 100% dans les marnes non altérées. Il n'y a qu'en S 28 de $7,0$ à $9,2$ m de profondeur où l'on a un R.Q.D. nul avec un pourcentage de carottes de l'ordre de 70% dû à un niveau peut-être plus sableux.

Terre végétale et marnes altérées devront être décapées sous l'emprise de la digue. Nous avons vu ci-avant que cela représentait une tranche de $1,6$ m d'épaisseur moyenne.

En ce qui concerne le gypse présent dans les marnes, nous ferons plusieurs remarques (d'après L'HERITEAU et MICHEL, 1974) :

- les ennuis résultant de l'existence de gypse proviennent essentiellement de la solubilité de ce dernier ;
- du gypse diffus (poudre) risque de se dissoudre plus vite que du gypse massif car sa surface spécifique est plus grande ;
- le comportement des terrains gypsifères est fonction des matériaux qui entourent le gypse ;
- lorsque le gypse est diffus dans des éléments fins silteux limoneux ou argileux, la disparition de celui-ci par dissolution entraînera une diminution de volume d'où tassement et une diminution des caractéristiques mécaniques de résistance.

Dans le cas présent, nous avons vu que les teneurs en gypse diffus dans les marnes sont faibles ($< 1,8 \%$) ainsi que les teneurs globales prenant en compte le gypse filonien ($< 3,5 \%$). Les matériaux qui entourent le gypse sont fins et de ce fait assez imperméables, donc les possibilités de dissolution plus limitées. L'HERITEAU et MICHEL ont montré que pour des "teneurs en gypse de l'ordre de 2% , la perte de volume ou les tassements, ainsi que la diminution de résistance mécanique à prévoir sont relativement faibles et vraisemblablement acceptables dans tous les cas". Pour des teneurs supérieures, "tout le gypse dissous ne donnera pas qu'un tassement ou qu'une diminution des résistances mécaniques. On peut, en considérant qu'une partie de la disparition du gypse se traduira par un tassement et une autre partie par une diminution de résistance mécanique, envisager que pour une teneur en gypse ne dépassant pas 7% par exemple les conséquences à prévoir peuvent rester dans un domaine acceptable (tassement $< 5 \%$, diminution des résistances mécaniques $< 30 \%$)" (*).

Au vu de tout cela, nous concluons que le gypse présent dans la fondation ne devrait pas compromettre la stabilité de l'ouvrage compte tenu de sa faible teneur.

(*) Ces résultats ont été obtenus pour un limon dont les caractéristiques sont les suivantes :

Densité sèche en place $\gamma_d \# 1,46 \text{ t/m}^3$
 Limite de liquidité $w_l = 43,6 \%$
 Limite de plasticité $w_p = 27 \%$

5.1.6 - Étanchéité au droit de la digue

Les 3 premiers mètres n'ont pu être le siège d'essais Lugeon. Jusqu'à 6 ou 7 mètres de profondeur, il y a eu, soit des contournements d'obturateur, soit claquage du terrain avec résurgence au niveau du T.N. à proximité du sondage. La présence de racines ouvrant de petites fissures dans la partie supérieure des marnes (2 à 5 m) peut expliquer ces phénomènes.

Au-delà de 6 m de profondeur, les absorptions sous 5 b en versant (S 26 - S 28) sont inférieures à 1,5 l/m/mn. Au col (S 27), pour une même pression et à partir de 7 m de profondeur, elles sont comprises entre 2,5 et 6 l/m/mn. Ces dernières valeurs ne sont pas négligeables.

Notons de plus que le gypse filonien s'est sans doute mis en place dans des zones moins résistantes des marnes (cassures avec racines dans les premiers mètres de marnes non altérées, petites fissures en profondeur). Une dissolution même très faible de gypse pourrait réouvrir partiellement ces cassures et faciliter les circulations d'eau vers l'aval augmentant d'autant le phénomène, surtout dans la partie supérieure des marnes qui est plus décomprimée. Notons également que ce col est très étroit.

Il semble alors prudent d'envisager la réalisation d'un organe d'étanchéité sous l'ouvrage afin de limiter au maximum les possibilités de circulations et de renouvellement de l'eau sous la digue. Cet organe d'étanchéité pourra être soit une bêche d'ancrage étanche, profonde d'au moins 5 m au-dessous du décapage et poursuivie par un voile d'injection, soit une paroi moulée sur toute la hauteur. Dans tous les cas, il faudra descendre jusqu'à une profondeur de 10 à 15 m.

Le contrôle de l'efficacité de cet organe d'étanchéité devra être assuré par des piézomètres implantés à l'aval de la digue.

La réalisation de ces ouvrages devrait garantir l'étanchéité au droit de ce col.

5.1.7 - Matériaux

Les seuls matériaux disponibles aux alentours immédiats de la digue sont les marnes. Là encore, l'étude géotechnique devra préciser leurs conditions d'utilisation.

5.1.8 - Conclusion

La digue du col 390 est un ouvrage important. Les marnes débarrassées de leur altération constitueront un terrain de fondation très acceptable.

On prendra la précaution de réaliser un organe d'étanchéité approprié sous l'ouvrage interdisant tout cheminement des eaux vers l'extérieur. L'étanchéité de ces marnes sera ainsi améliorée et on s'affranchira des éventuelles, mais peu probables sujétions (dissolution - fuites) que pourrait entraîner la présence de gypse.

5.2 - COL 396

5.2.1 - Tranchées et sondages

La prospection à la pelle hydraulique a permis la réalisation de 22 tranchées auxquelles sont venus s'ajouter 3 sondages de 10 m de profondeur complétés par des essais Lugeon.

5.2.2 - Terrains de recouvrement

Comme sur le col précédent, on retrouve la terre végétale et les produits d'altération sur place des marnes.

L'épaisseur moyenne de terre est de 0,6 m ; celle de l'altération est de 1,8 m avec un minimum 1,2 m et un maximum 2,5 m (fig. 38).

5.2.3 - Substratum

On se trouve toujours dans des marnes, le plus souvent grésifiées ou finement sableuses.

Quelques niveaux minces plus détritiques (conglomérats, grès) apparaissent au sommet des deux versants (T 3 et S 31 en rive gauche, T 22 en rive droite) ; ce sont peut-être les témoins annonçant la proximité des niveaux détritiques 9 et 8 signalés lors de l'étude de la cuvette. Ces derniers n'ont pas été recoupés par les sondages.

Du gypse a également été rencontré sous forme d'agrégats dans la tranchée T 6 et dans les niveaux de marne bariolée, entre 2,3 et 3,4 m au sondage S 30. Ici, le gypse cristallisé emplit une fissure verticale qui a vraisemblablement été ouverte par des racines de végétaux, qui sont nombreuses dans ce niveau. Des cassures oxydées avec racines apparaissent jusqu'à 4 à 5 m de profondeur, comme sur le col précédent. Les sondages S 29 et S 31 n'ont pas retrouvé de traces de gypse.

5.2.4 - Dispositions structurales

Là encore, les couches marneuses ont une direction moyenne autour de N 110° E avec un pendage vers le NE de 20° environ. Ces valeurs sont peu précises, car les conditions de mesure dans les tranchées étaient très défavorables.

5.2.5 - Valeur de la fondation

Les marnes altérées seront décapées sous l'emprise de la digue. La roche saine fournira une fondation valable pour un ouvrage souple. Le gypse ne semble présent qu'au niveau du sondage S 30 et ne dépasse pas 3 m de profondeur. Il n'a pas été observé sous forme de filons comme précédemment. Sa teneur devrait être inférieure à celle du col 390, et de ce fait on ne devrait pas avoir de désordres particuliers, ni dans la fondation ni en profondeur, pouvant compromettre la stabilité de la digue.

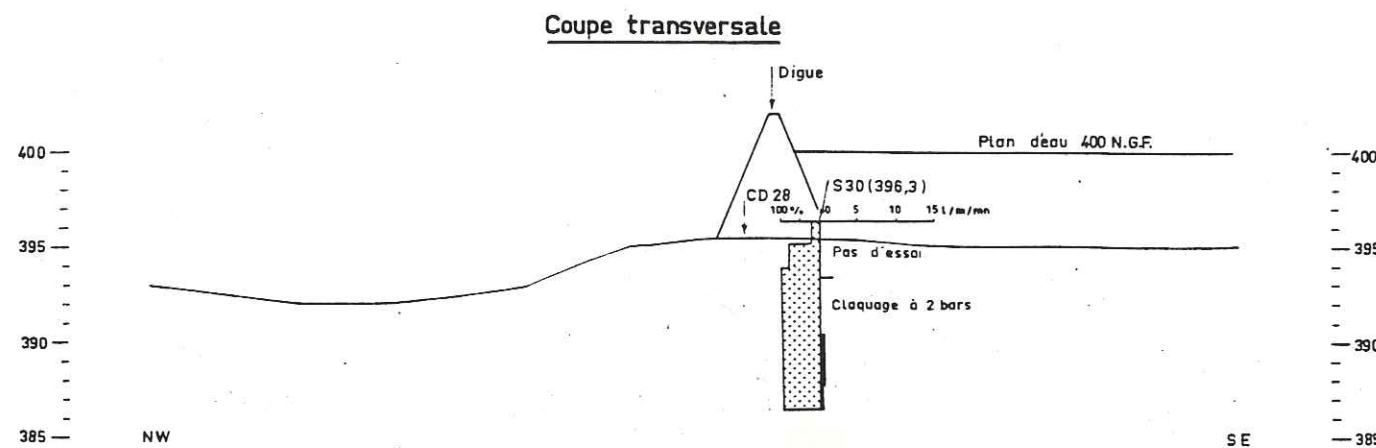
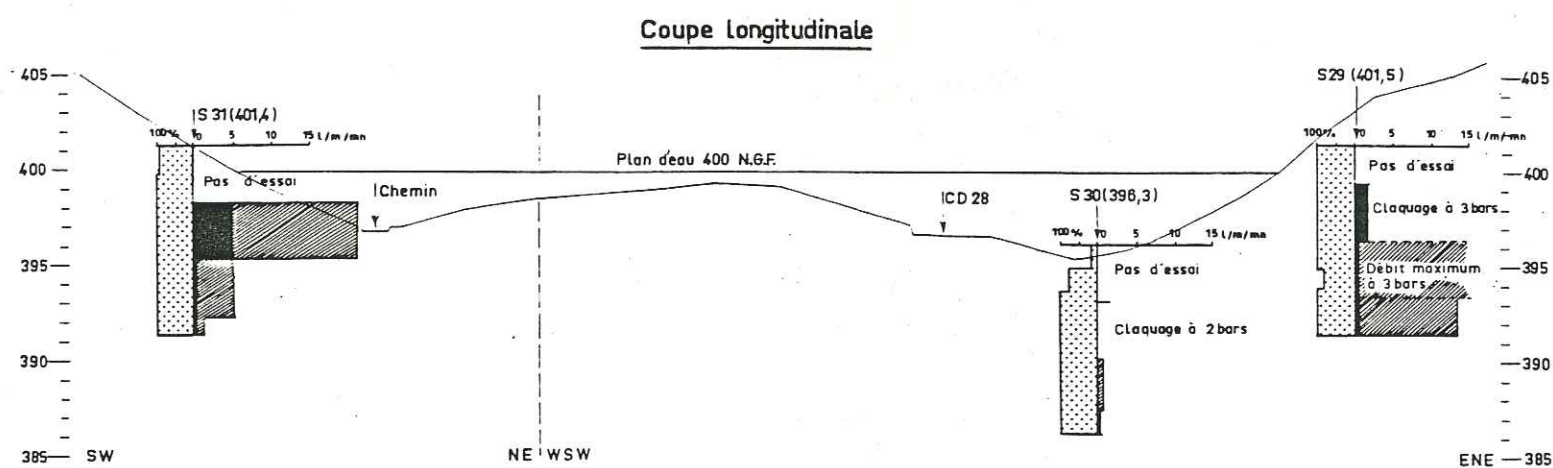
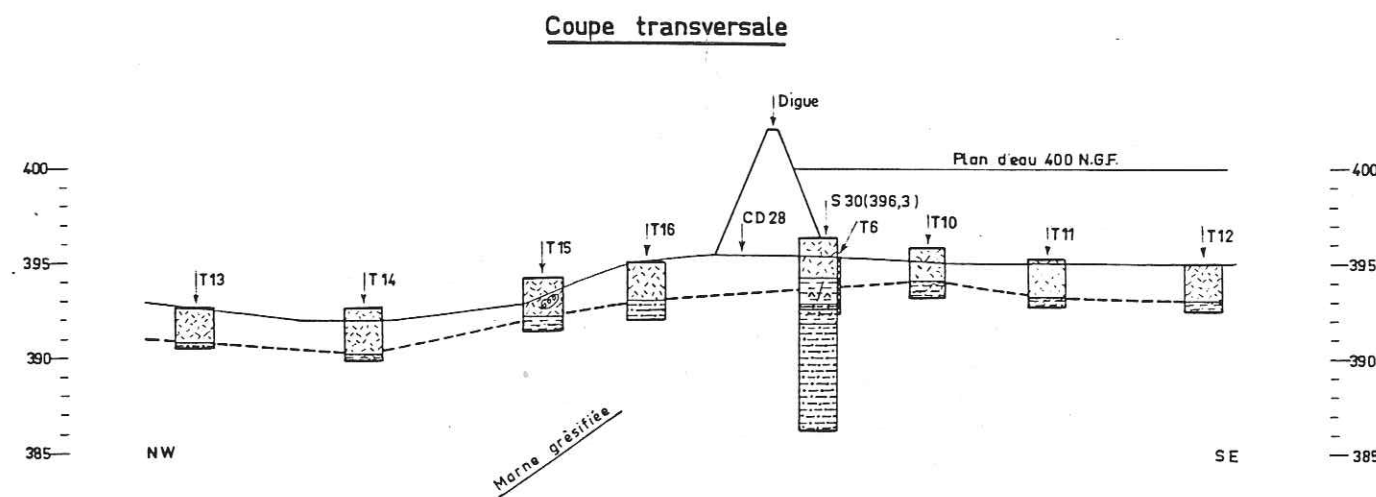
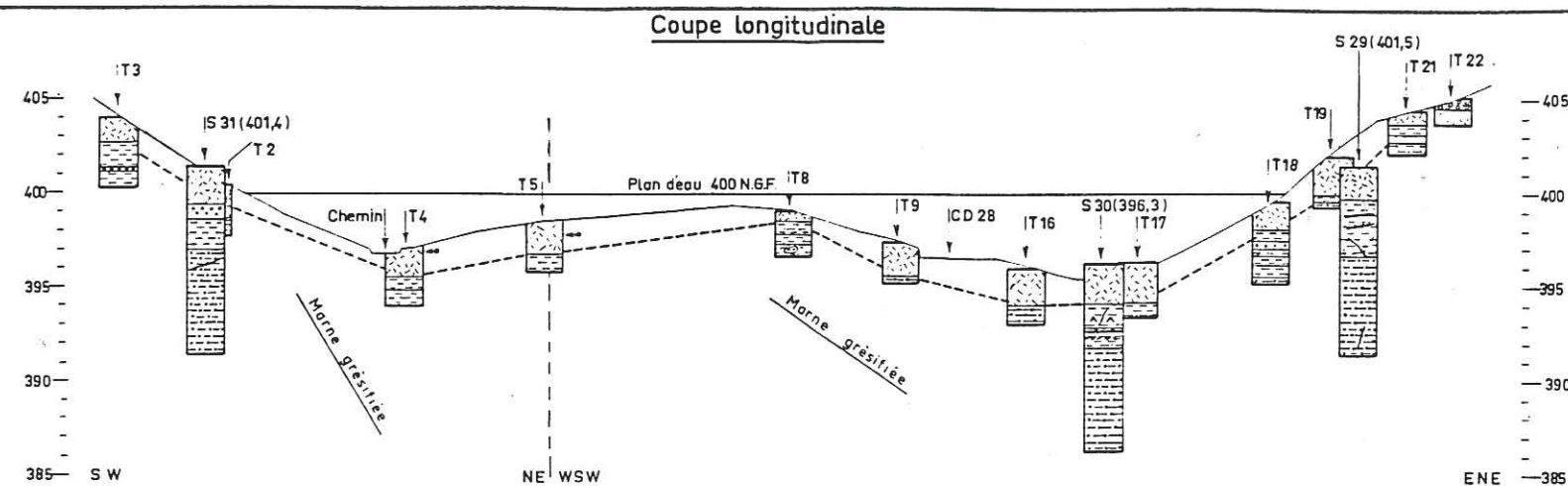
5.2.6 - Etanchéité au droit de la digue

Les quatre ou cinq premiers mètres des marnes sont riches en petites racines qui ouvrent autant de petites fissures, ce qui explique les claquages du terrain avec résurgence de l'eau près des sondages.

Sur le sondage S 31, les absorptions sous 5 b sont fortes jusqu'à 9 m de profondeur (5 à 16 l/m/mn), et on observe même un phénomène de claquage du terrain entre 9 et 10 m avec résurgence de l'eau en surface à 5 m de distance du sondage. Elles le sont aussi sur le sondage S 29 puisqu'à 10 m de profondeur on a une valeur supérieure à 13 l/m/mn (fig. 38).

Pour des pressions de 2 bars, le terrain absorbe encore 4 l/m/mn en S 31 de 3 à 6 m, au-dessous les débits sont négligeables comme pour l'ensemble du sondage S 29.

GEOLOGIE



- Terre végétale, éluvions (marnes altérées.)
- Marne compacte barolée localement gypseuse.
- Marne sableuse.
- Marne grésifiée parfois feuilletée.
- Grès, conglomérat.
- Sable.
- Gypse fibreux filamen ou en agrégats.
- Venue d'eau.
- Limite des marnes altérées.
- Pendage apparent des couches tenant compte de la distorsion des échelles.

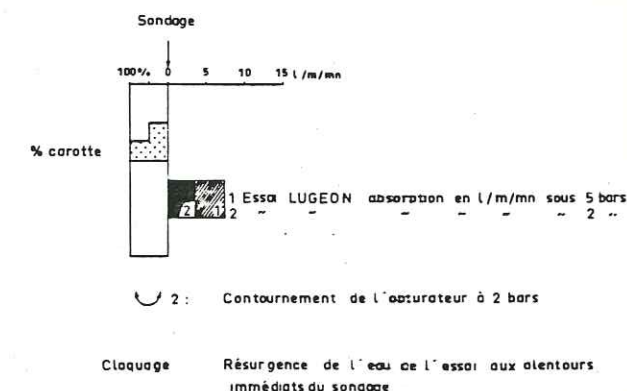


Fig. 38. - Coupes géologiques et perméabilités au col 396

Au sondage S 30, au col, l'absorption est nulle à partir de 6 m, pour toutes pressions d'injection d'eau.

Au vu de ces résultats, certaines précautions devront être prises pour assurer une bonne étanchéité sous la digue :

- une clef d'ancrage étanche recoupant la tranche supérieure des marnes (racines et fissures) sur 5 m d'épaisseur sous le décapage pour stopper tous risques d'infiltration. Au-delà, les absorptions ne sont pas négligeables pour des pressions de 5 bars mais faibles à partir de 2 bars. Compte tenu de la mince tranche d'eau que l'on a derrière cette digue (# 5 m), cette clef d'ancrage devrait être suffisante. Un réseau de piézomètres à l'aval permettra de surveiller son efficacité ;
- conception de la digue permettant de revenir pour poursuivre la clef en profondeur par un petit voile d'injection ou une paroi moulée si, par la suite, des désordres apparaissent.

5.2.7 - Matériaux

Le problème est le même que pour le col 390. L'étude géotechnique devra dire si l'on peut utiliser les marnes présentes autour du col 396.

5.2.8 - Conclusion

Les marnes débarrassées de l'altération fourniront une fondation suffisante pour une telle digue.

Le gypse semble moins développé que sur le site précédent et ne devrait plus poser de problèmes sérieux.

De plus, compte tenu de la hauteur d'eau relativement faible ici, près de l'ouvrage, l'organe d'étanchéité ne sera représenté que par une simple clef d'ancrage constituée de matériaux étanches.

On se gardera néanmoins la possibilité d'y revenir facilement par la suite.

BARRAGE DE COCUMONT (LOT-ET-GARONNE)

1 - INTRODUCTION

Le site de Cocumont se trouve dans le département du Lot-et-Garonne à une dizaine de kilomètres au Sud de Casteljaloux.

Le projet prévoit la construction, sur le ruisseau du Sérac, d'une digue de 13 mètres de hauteur environ, longue de 240 mètres en crête, arasée à la cote 56 et retenant à la cote 54 une réserve de l'ordre d'1 Hm3 destinés à l'irrigation.

2 - GEOLOGIE REGIONALE

La totalité de l'aménagement est située dans une série tertiaire : la molasse du Stampien. Il s'agit d'une formation assez hétérogène, constituée principalement par des grès plus ou moins consolidés et indurés, et des sables parfois argileux.

Des terrains de couverture très développés et une végétation importante ne découvrent qu'un petit nombre d'affleurements lesquels ont en général une surface assez réduite (fig. 39).

En ce qui concerne la couverture meuble, elle est constituée par des formations très graveleuses, vraisemblablement d'anciennes alluvions, auxquelles nous avons attribué le nom de cailloutis de versants. Il s'agit de galets très quartzeux, bien émoussés, dont la taille est généralement inférieure au dm et qui se trouvent emballés dans un liant argilo-sableux de teinte marron rouge, due à des phénomènes d'oxydation. La proportion des galets par rapport à la matrice est très variable et l'on peut même parfois avoir des graves un peu plus propres, qui ont fait l'objet d'exploitation dans de petites carrières particulières.

3 - SITE DU BARRAGE

3.1 - LES APPUIS

3.1.1 - Appui rive gauche

Lors d'une visite préalable, il est apparu que l'emplacement initialement choisi ne pouvait être retenu, car l'appui rive gauche montrait sur toute sa hauteur des cailloutis de versants (graves) qui, du reste, ont été exploités sous la ferme.

On note, une cinquantaine de mètres en amont, quelques petits affleurements, et la morphologie indique que le substratum est sub-affleurant.

Les trois tranchées qui ont été creusées à la pelle mécanique ont permis de confirmer cette hypothèse (fig. 40 et 41).

La tranchée D montre, à la partie inférieure, des sables gris fins, au milieu, un niveau gréseux dur d'environ 6 m de puissance et au sommet, des argiles très sableuses de 3,5 m d'épaisseur. Des graves sableuses recouvrent le haut du versant et son flanc sur 2 mètres d'épaisseur environ.

Il en est de même pour la tranchée F, mais les sables fins situés sous les grès n'ont pas été atteints.

3.1.2 - Appui rive droite

A l'amont du site primitivement choisi, aucun affleurement n'apparaît ; aussi, deux tranchées supplémentaires ont-elles été creusées (fig. 42).

La tranchée B montre à la base des sables fins, devenant de plus en plus grossiers et argileux. Au milieu apparaît un niveau gréseux compact et dur de 6,5 m d'épaisseur. A la partie supérieure apparaît une mince passée argileuse de 30 cm environ. Des graves sableuses recouvrent enfin le sommet du versant, alors que son flanc est plutôt limono-sableux sur 3 m d'épaisseur, ce qui a créé des éboulements lors de l'ouverture de la tranchée.

La coupe C présente à peu près le même schéma.

3.1.3 - Valeur des appuis

- La molasse stampienne présente, en résumé, la coupe suivante :
 - . à la base, un horizon sableux dont le sommet se situe en rive droite entre les cotes 47,26 en aval et 48,70 en amont, et en rive gauche à la cote 47,25 ;
 - . à la partie moyenne, un horizon gréseux compact avec des niveaux durs montant en rive droite jusqu'à la cote 53,69, et en rive gauche jusqu'à la cote 51,50 en aval et 53,22 en amont ;

Fig. 40. - Implantation des travaux de reconnaissance

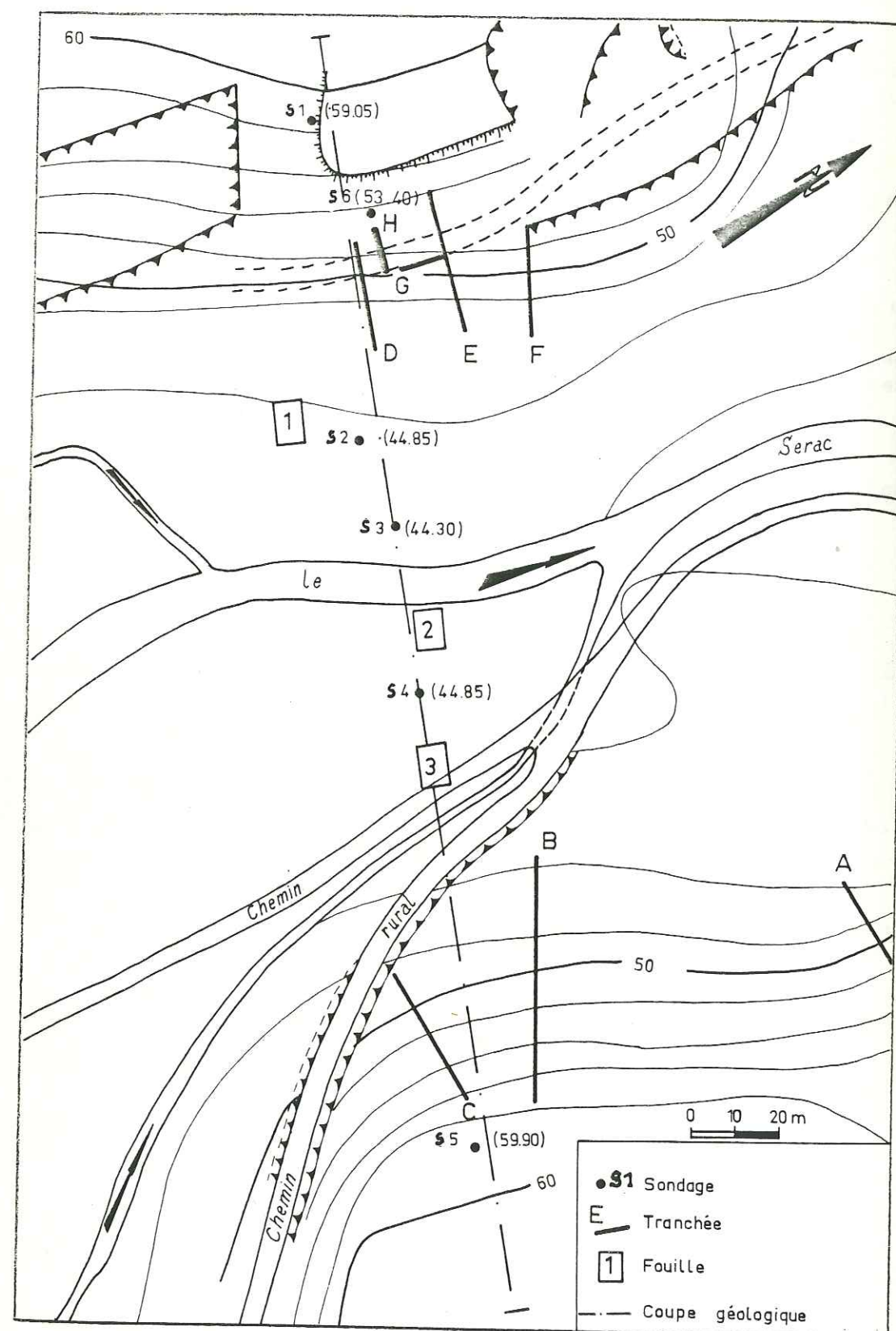


Fig. 41. - Coupes des tranchées rive gauche et thalweg

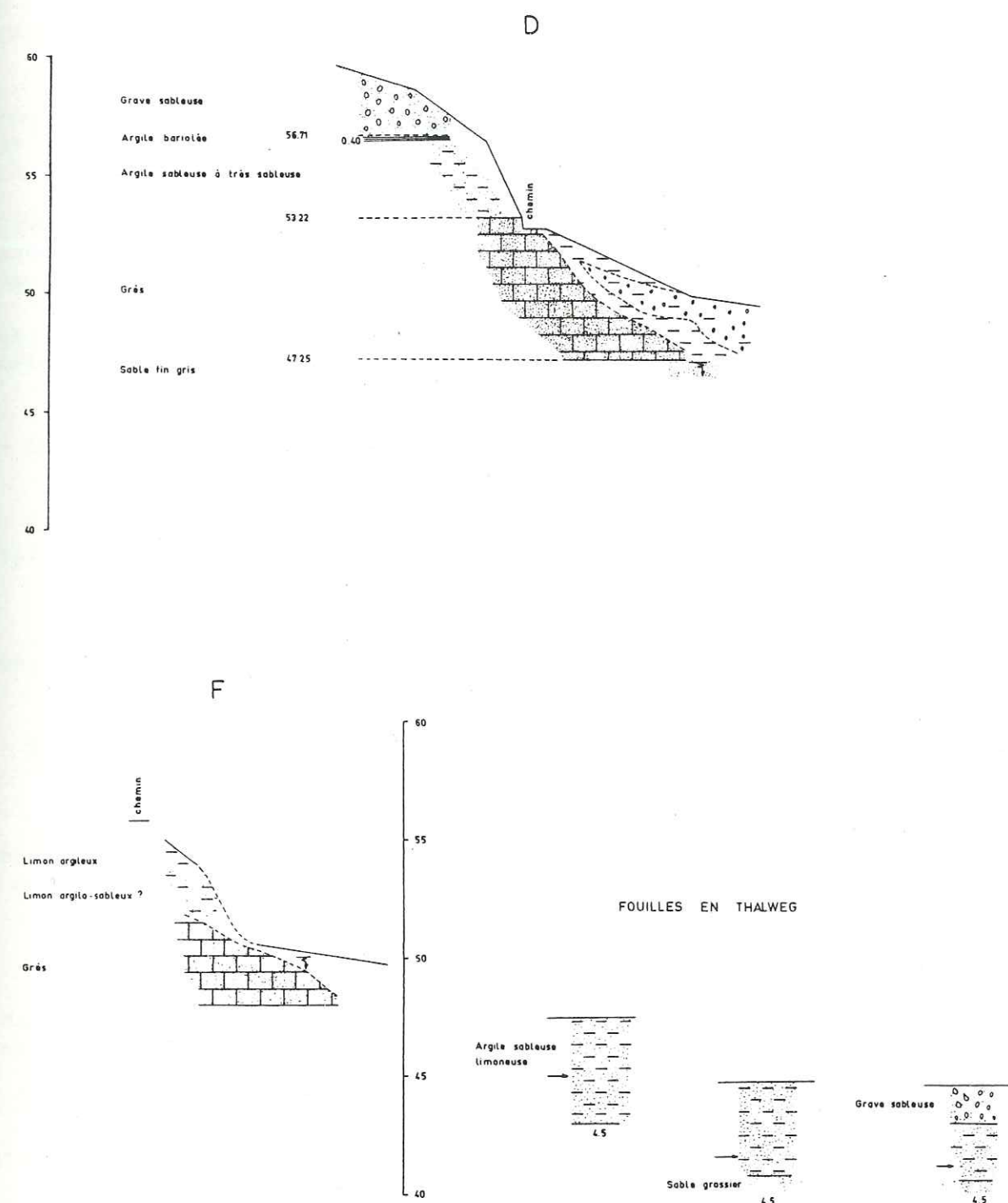
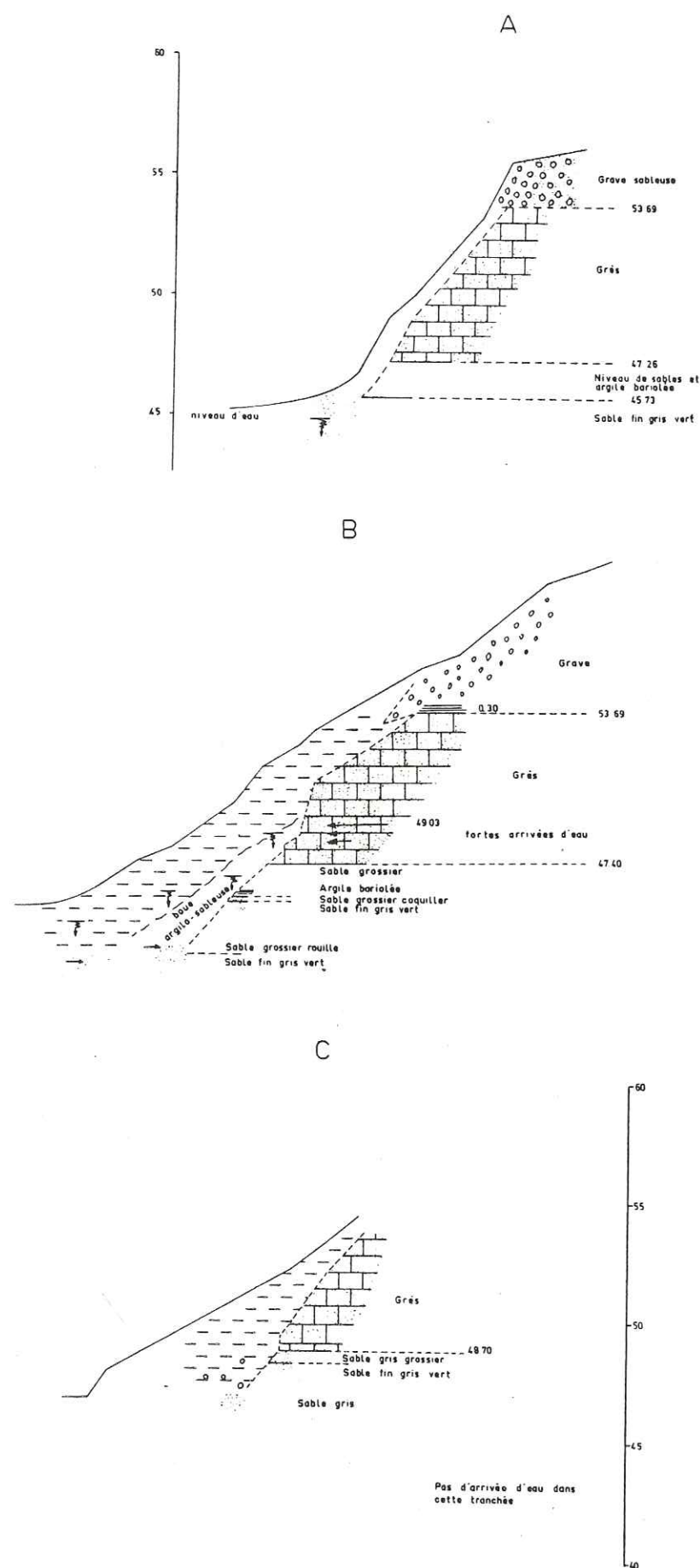


Fig. 42. - Coupes des tranchées rive droite



. au sommet, un niveau d'argile plus ou moins sableuse qui apparaît en rive gauche à partir de la cote 51,50 en aval et 53,22 en amont, alors qu'en rive droite, il commence à la cote 53,69 et n'existe que dans la tranchée B où il y a une épaisseur réduite (30 cm) ;

. notons que ces trois niveaux sont recouverts de grave sableuse et que celle-ci est combinée plus ou moins aux produits d'altération de la molasse ; l'ensemble peut recouvrir le flanc des versants sur plus de 3 m d'épaisseur.

- Le décalage de 1,3 m de la base de l'horizon gréseux entre les tranchées B et C en rive droite est sans doute dû à la présence d'une petite faille.

- Nous dirons enfin que ces terrains de substratum présentent des conditions de stabilité acceptables sur les deux rives.

3.2 - FONDATION EN THALWEG

Le thalweg est comblé d'alluvions constituées par des limons argilo-sableux ou graves sableuses surmontant des sables grossiers.

La pelle mécanique n'a pas permis de descendre à plus de 4,5 m et le substratum n'a jamais été atteint.

3.3 - ETANCHEITE AU DROIT DU SITE ET TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Sur les deux rives, des niveaux d'eau ont été trouvés lors de l'ouverture des tranchées. Ils se situent à la cote 47 en rive gauche, entre 45 et 47 en rive droite. Ils apparaissent dans les sables fins, sous les grès.

Il y a également des venues d'eau dans les niveaux gréseux, surtout dans la fouille B à la cote 48,6 et légèrement dans la F à la cote 50,3. Seule la tranchée C ne montre pas d'arrivées d'eau.

Le puits de la ferme en rive gauche, qui est busé, indique un niveau piézométrique à la cote 51 environ, qui doit être situé dans les grès.

Signalons enfin, à 400 m à l'aval du site en rive gauche, la présence, entre les bancs de grès, d'une source dont le débit a été estimé entre 0,5 et 1 l/s le 12 février 1975. D'après les fermiers, ce débit est relativement constant toute l'année.

En thalweg, l'eau est apparue dans les fouilles 1, 2 et 3 entre 2 et 3 m de profondeur.

Ainsi, que ce soit sur les versants ou en thalweg, le problème de l'étanchéité au droit du site est lié à la perméabilité des différents horizons, perméabilité qu'il n'est pas possible de chiffrer.

Il peut y avoir des fuites et seuls les essais effectués sur des sondages de reconnaissance placés sur l'axe de la digue permettront d'apprécier si les débits de fuite sont compatibles avec les apports du Sérac en période d'étiage.

Il conviendrait alors d'envisager un sondage de 20 m de profondeur sur le haut de chaque rive et trois en thalweg, pénétrant dans la molasse sableuse (15 m environ), accompagnés d'essais d'eau de type Lugeon, lorsqu'on aura affaire à des matériaux durs et cohérents, mais sans dépasser 5 bars de pression. Pour les terrains meubles, on effectuera des essais Lefranc. Ces sondages seront équipés en piézomètres et disposés sur l'axe de la digue (fig. 40).

3.4 - CHOIX DE L'AXE DE LA DIGUE

De ce qui précède, il semble que l'axe le plus favorable se situe à l'amont des tranchées D en rive gauche et B en rive droite (fortes arrivées d'eau).

4 - CUVETTE DE RETENUE

On retrouve les mêmes terrains que sur la zone de site (fig. 39).

4.1 - STABILITE DES VERSANTS

4.1.1 - Moitié aval de la retenue

On peut y observer, à la faveur de talus, quelques affleurements de la molasse. Ceux-ci sont également recouverts de cailloutis de versants qui semblent assez stables, sauf peut-être en rive gauche où l'on note, juste à l'amont du site, une petite zone où apparaissent des phénomènes de solifluxion peu développés. Il en est de même à l'aval de la mare.

A cet endroit-là, il y a également une petite zone légèrement instable due à l'affouillement des cailloutis et sables de versants par le trop plein de la mare. Ce phénomène risque de se produire lorsque le plan d'eau baignera ces formations, mais l'ampleur des glissements est limitée. Il faudra néanmoins en tenir compte.

4.1.2 - Moitié amont de la retenue

La topographie devient plus douce et aucun affleurement n'est visible.

Il existe deux zones marécageuses : l'une près de la mare, l'autre à 250 m environ du pont, en queue de retenue.

Prairies et cultures rendent l'observation difficile mais il semble que les cailloutis de versants soient moins développés et n'arrivent pas au niveau du plan d'eau.

4.2 - ETANCHEITE DE LA CUVETTE

Les terrains étant les mêmes que sur le site, les risques de fuite dépendent également de la perméabilité de la molasse.

Il est nécessaire d'avoir les résultats des travaux de reconnaissance effectués sur le site pour conclure (cf. 3.3) en extrapolant leurs résultats à la cuvette.

5 - MATERIAUX UTILISABLES

Au vu des tranchées creusées dans la plaine alluviale, il semble que l'on devrait y trouver des matériaux limono-sableux de qualité moyenne (compressibles) convenant à l'édification de la digue.

6 - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE COMPLEMENTAIRE

Ils ont essentiellement eu lieu au droit du site. Ils comportaient (fig. 40) :

- des sondages avec essais d'eau,
- des tranchées complémentaires.

6.1 - SONDAGES

Au nombre de six, ils sont répartis comme suit :

- 2 sur le versant rive gauche (S1 et S6),
- 3 en thalweg (S2, S3, S4),
- 1 sur le versant rive droite (S5).

Cette campagne avait deux objectifs :

- reconnaître la succession des différents terrains en versant et en thalweg dont les tranchées creusées auparavant mettaient en évidence l'hétérogénéité ;
- juger le comportement des différents terrains lors d'essais d'eau de type Lugeon (substratum molassique) ou Lefranc (remplissage alluvial).

Ces différentes opérations ont été décrites en détail dans le rapport de la société SOGEO (1975).

6.2 - TRANCHEES COMPLEMENTAIRES

Elles ont été ouvertes soit pendant l'exécution des sondages (G), soit après la campagne de sondage (H) pour préciser la nature de l'anomalie apparue dans les sondages.

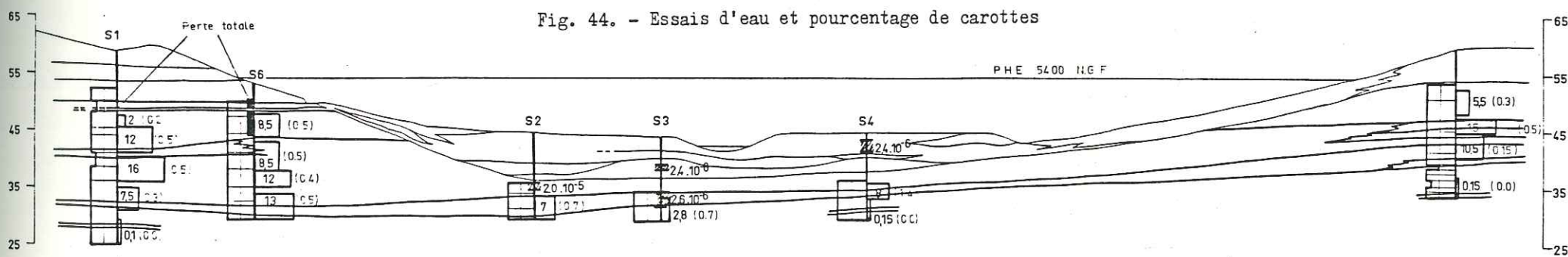
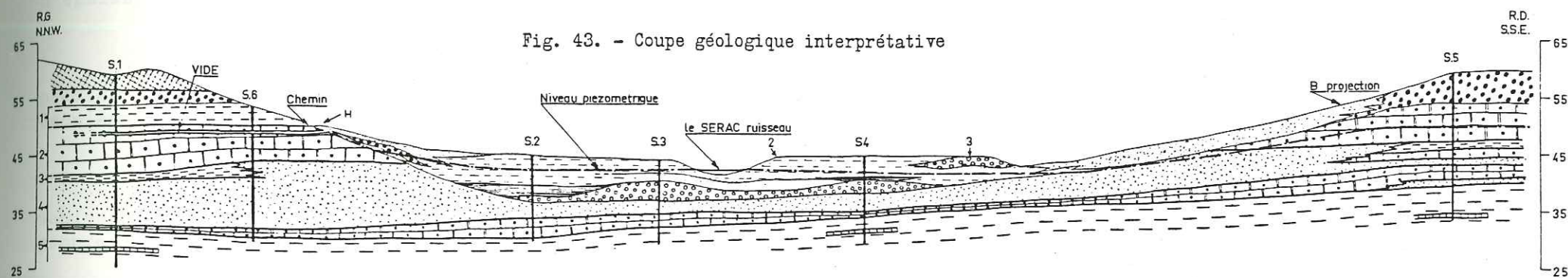
6.3 - COUPE GEOLOGIQUE INTERPRETATIVE

A partir des travaux de reconnaissance, nous avons dressé une coupe géologique interprétative en travers de la vallée, sur laquelle apparaissent différentes formations (fig. 43).

6.3.1 - Alluvions modernes

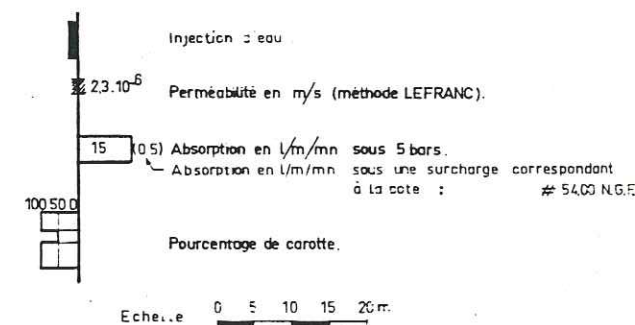
C'est un mélange en proportions variables de sables, argiles, galets disposés de façon lenticulaire. Depuis la surface du sol, on distingue trois niveaux :

- des argiles sablo-limoneuses dont l'épaisseur varie de 2 à plus de 3 m,
- des argiles plastiques en lentilles de 2 m d'épaisseur environ,



LEGENDE

- Remblai.
 - Galets et graviers
 - Sables
 - Argiles limoneuses.
 - Argiles plastiques noires.
 - Cailloutis des versants.
 - Matrice limono-sableuse
 - Marnes ou argiles gris-vert.
 - Grès
 - Sables argilo-limoneux gris-vert.
 - Marnes argilo-sableuses gris-bleu avec un petit banc de calcaire sableux.
- Alluvions modernes, mélangées en proportions variables.
- Alluvions anciennes ?
- Molasse stampienne.
- S1 Sondage mécanique.
- H Tranchée.
- 3 Fouille.
- Niveau piezométrique.



- des galets et graviers enrobés dans une matrice sableuse, dont l'épaisseur semble très inégale.

Ces alluvions ont une puissance moyenne de 8 m.

6.3.2 - Alluvions anciennes

Elles coiffent le sommet des versants et peuvent atteindre 6 m d'épaisseur en rive droite.

En rive gauche, elles ont sans doute été décapées dans un premier temps, puis des matériaux de remblai ont été rapportés dans un deuxième temps.

Elles sont constituées de galets dans une matrice limono-sableuse plus ou moins développée (à l'aval du site les galets sont très propres).

Le mur de cette formation se situe aux environs de la cote 54 N.G.F.

6.3.3 - Substratum

Il montre les niveaux suivants, de haut en bas :

Niveau 1 - Marnes ou argiles gris vert.

Niveau 2 - Grès.

Niveau 3 - Marnes ou argiles gris vert parfois interstratifiées avec des sables.

Niveau 4 - Sables argilo-limoneux gris vert terminés par une passée grésifiée.

Niveau 5 - Marnes argilo-limoneuses gris bleu avec un petit banc de calcaires sableux.

Sur cette coupe, il apparaît de légères différences entre la rive gauche et la rive droite. En effet, le niveau 1 est inexistant en rive droite et le niveau 2 se trouve directement sous les cailloutis de versants. Ce phénomène est vraisemblablement dû à l'érosion ou à des lentilles synsédimentaires.

Le vide présent près du toit du niveau 2 en rive gauche ne semble pas exister en rive droite.

Dans cette dernière, le niveau 4 débute par une passée grésifiée, inexistante en rive gauche, et se termine par des sables, qui eux non plus n'apparaissent pas de l'autre côté de la vallée. Ceci s'explique par le fait que la sédimentation molassique est lenticulaire dans le détail et qu'il existe de nombreuses variations de faciès.

Néanmoins, si l'on regarde cette coupe de façon plus synthétique, on constate que la molasse stampienne est légèrement pentée vers la rive gauche et que deux grandes unités se distinguent nettement dans le substratum :

- l'alternance marne-grès-sables gris vert,
- les marnes argilo-limoneuses gris bleu qui forment un plancher continu.

6.4 - COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE DES DIFFERENTS TERRAINS

Deux types d'essais ont été effectués (fig. 44) :

- des essais Lefranc dans les alluvions modernes et le niveau 4 du substratum,
- des essais Lugeon dans le substratum molassique.

6.4.1 - Alluvions modernes

La perméabilité passe de $8,1 \times 10^{-7}$ m/s pour les alluvions fines à $2,4 \times 10^{-6}$ m/s pour les grossières.

Les perméabilités ne sont pas très élevées ce qui est vraisemblablement dû à la présence d'un liant argileux (surtout pour les niveaux grossiers).

Le niveau piézométrique apparaissait aux environs de la cote 42 le 2 octobre 1975 soit 2 m sous le terrain naturel.

6.4.2 - Substratum molassique

- Essais Lefranc

Ils ont été effectués sur le niveau 4. La perméabilité varie de $2,0 \times 10^{-5}$ (S2) lorsque ce niveau est sableux à $2,6 \times 10^{-6}$ (S3) lorsque sa base est grésifiée.

On a donc les perméabilités les plus faibles non pas dans les alluvions modernes, mais dans la partie du substratum sableux situé immédiatement au-dessous.

- Essais Lugeon

Nous avons essayé de visualiser sur une coupe transversale quelle était l'absorption des terrains en l/m/mn sous une pression d'injection de 5 bars. Cette pression dépasse de beaucoup la charge créée par un plan d'eau à la cote 54 N.G.F., mais permet de différencier plus nettement les valeurs entre elles et de mieux distinguer les horizons les plus absorbants (les valeurs données dans le rapport SOGEO et correspondant à la surcharge réelle créée par le plan d'eau sont marquées entre parenthèses).

Il ressort que, pour le substratum, le niveau le plus perméable est le 4 (excepté l'anomalie du niveau 2), c'est-à-dire les sables plus ou moins argileux. Ils absorbent jusqu'à 16 litres/m/mn sous 5 bars ($0,5$ l/m/mn sous la charge réelle créée par le plan d'eau). Le niveau 5, par contre, représente le plancher étanche de la molasse, puisqu'il n'absorbe pratiquement rien, quelle que soit la pression.

- Essais d'injection dans le vide du niveau 2

Il a été injecté de l'eau dans le sondage 6 entre les cotes 50,55 et 47,35 N.G.F. Avec un débit de 5 m³/h (pendant 16 h) qui donnait un niveau stabilisé en S6, celui-ci était remonté de 1,47 m. En S1, la remontée était de 1,2 m au bout du même temps.

Lorsque le débit a été porté à 12 m³/h (pendant 4 h), des venues d'eau sont apparues dans la tranchée G, très rapidement, témoignant d'une relation directe entre la tranchée et le vide ; pendant la durée de l'injection, 11 m³/h environ ont été recueillis en G.

- Niveau piézométrique

Il se situe aux environs de la cote 51 dans les versants (vide en rive gauche) puis se raccorde progressivement à la plaine alluviale.

- Rive droite

La partie supérieure des cailloutis est à la cote 54,3, donc légèrement au-dessus des P.H.E., mais ceux-ci ont cependant "coulé" (solifluxion) sur le versant. Il en résulte un placage de produits limono-sableux ou graveleux dont l'épaisseur varie entre 3 m (bas du versant) à plus de 5 m (haut du versant).

Ils nécessiteront un décapage, de façon à rejoindre le substratum molassique, car ils constituent un "épiderme" instable et perméable.

6.6.3 - Substratum

- Vide du niveau 2

Il crée un niveau de fuite privilégié par lequel pourraient transiter des débits importants vers l'aval, par contournement immédiat de l'appui ou bien latéralement (couche légèrement pentée vers la rive gauche).

Compte tenu de cette particularité, deux solutions peuvent être envisagées :

- soit la réalisation d'essais d'injection de coulis à base de ciment pour essayer d'obturer ce vide important ;
- soit le pivotement vers l'amont de l'appui rive gauche afin de l'éviter.

Cette dernière solution, qui semble la plus rationnelle, repousserait l'appui d'une quarantaine de mètres en amont de façon que le pied du parement aval ne vienne pas recouvrir l'axe préalablement choisi. Un ou deux sondages supplémentaires seront indispensables en R.G. pour tester le nouvel appui.

- Hétérogénéité de la molasse

Des niveaux gréseux durs alternent avec des niveaux sableux tendres et friables. De fait, des risques de circulations d'eau préférentielles dans les niveaux sableux pouvant créer des phénomènes de "renard" existent.

La disposition structurale des couches est favorable aux fuites vers l'aval ou vers la rive gauche.

Aussi, pour éviter ce risque de circulations dans les niveaux tendres, des travaux d'injection de tout le substratum seront également nécessaires, quelle que soit la solution envisagée.

Le rideau d'injections devra assurer l'étanchéité de la molasse jusqu'au niveau 5 naturellement étanche.

Des dispositifs de drainage devront également être mis en place.

6.7 - CONCLUSION

Les dimensions très modestes de l'ouvrage prévu sur le ruisseau du Sérac ne doivent pas faire sous-estimer les risques de fuite avec apparition de renards, mis en évidence par les travaux de reconnaissance.

Nous insistons spécialement sur le problème du niveau de dissolution trouvé en rive gauche : rien ne peut dire si on ne le rencontrera par ailleurs. A notre avis, il peut être traité par des injections de coulis de composition étudiée.

Par ailleurs, il y a nécessité absolue d'une coupure étanche sous l'ensemble de la digue ; elle est indispensable à la sécurité de l'ouvrage.

Toutes ces sujétions seront vraisemblablement assez onéreuses. Si elles demeurent techniquement possibles, elles n'en risquent pas moins de remettre en cause l'intérêt de ce projet.

Il apparaît donc urgent de chiffrer le coût de ces dispositions particulières pour être fixé sur la suite à donner à cette étude.

II - ETUDES GEOLOGIQUES D'AVANT-PROJET DETAILLE

Ces études font suite à l'avant-projet sommaire. Pour des barrages de faible hauteur, les interventions géologiques ont, en principe, été terminées à l'A.P.S. Pour de grands ouvrages, il reste à régler tel ou tel point particulier sur lequel subsistent un certain nombre d'incertitudes.

A - RECONNAISSANCES COMPLEMENTAIRES AU NIVEAU DE L'A.P.D.

Leur nombre et le volume de travail varient énormément en fonction de chaque type d'ouvrages (béton ou digues). Ces reconnaissances concernent aussi bien le site du barrage, la cuvette de retenue, que les carrières de matériaux.

1 - Site du barrage

Il est indispensable de vérifier plus en détail l'emplacement de certains ouvrages annexes, le tracé du voile d'injection ou la qualité de la fondation.

a) Ouvrages annexes

On retrouve sous cette rubrique et pour tous types de barrages confondus :

- l'évacuateur de crues de surface, dont le tracé doit tenir compte de la structure géologique puisque, parfois, il est accroché au versant dans des conditions où la difficulté d'exécution est souvent proportionnelle à sa taille. Sur ce point, le géologue veillera particulièrement aux problèmes de stabilité : épaisseur des terrains de couverture, orientation des plans de stratification ou de schistosité par rapport au tracé possible. Des sondages et des profils géophysiques compléteront ses observations ;
- tulipe et tour de prise feront également l'objet d'investigations puisqu'elles sollicitent le sol (problèmes de portance) de manière très ponctuelle ;
- conduites et galeries diverses nécessiteront, elles aussi, une adaptation à la structure géologique (M. GIGNOUX et R. BARBIER, 1955) où l'on cherchera le tracé le moins sensible aux risques de "hors profils" et aux venues d'eau importantes. Là encore des sondages seront profitables ;

- le bassin de dissipation est quelquefois oublié dans les programmes de reconnaissance, surtout lorsque le rocher "semble bon". Pourtant, le problème de son revêtement et de son drainage se pose fréquemment et peut avoir une forte incidence sur le coût de l'ouvrage. Le géologue s'attachera à déterminer la profondeur à atteindre en fond de fouille. Il veillera aux problèmes d'altération et de décompression du massif (disposition de la fracturation par rapport à l'écoulement des eaux et prévision du développement de l'érosion). Dans la plupart des cas, des sondages courts permettent une étude fine du R.Q.D.

b) Voiles d'étanchéité

Ces ouvrages très importants, dont le coût peut atteindre rappelons-le 10 à 20 % du prix de l'aménagement, doivent faire l'objet de reconnaissances attentives. En particulier, dans les avant-projets où il peut exister plusieurs variantes de barrages, il faut impérativement, dès le début des reconnaissances, prendre la précaution de faire des sondages sur les différents emplacements possibles du voile (par exemple à l'aplomb du noyau central ou bien au pied du masque amont d'une digue), ceci afin d'estimer rapidement la perméabilité des terrains sous-jacents. A l'A.P.D., des sondages complémentaires préciseront simplement le tracé définitif de cet organe d'étanchéité. Maintenant se pose aussi le problème de la réalisation de plots d'essais d'injection. A notre avis, ils ne doivent pas être exécutés systématiquement à ce stade, car ils ne sont pas toujours représentatifs. En effet, pour des raisons financières, ils sont souvent limités à quelques sondages injectés dont l'efficacité sera jugée au moyen d'un ou deux sondages de contrôle. Les informations qu'obtiendra le projeteur pour estimer les quantités de coulis nécessaires au traitement resteront alors peu significatives. Aussi, dans le cas de terrains homogènes, d'un point de vue lithologique, préférons-nous reporter ce type d'intervention au début des travaux, où une portion de voile sera réalisée, en vraie grandeur et sur son emplacement définitif, par l'entreprise retenue.

Par contre, dans certains cas particuliers et difficiles, (nous le verrons au chapitre IV avec l'exemple du barrage de Laprade), un plot d'essai, même réduit, est intéressant. Cela, surtout lorsqu'on risque de rencontrer de fortes variations lithologiques nécessitant des modes d'injection différents (une arène granitique ne se traite pas comme sa roche mère). Ici, un plot permettra de faire des prévisions sur la technique d'injection à adopter, sur les variations de quantités de produits absorbés et sur les types de coulis à envisager.

c) Qualité de la fondation

Un des principaux objectifs de l'ingénieur projeteur est d'estimer le niveau de fondation (nous en reparlerons au chapitre V). Disons simplement qu'il ne faudra pas hésiter, pour ajuster au mieux l'assise du futur ouvrage, à faire creuser des tranchées supplémentaires ou même effectuer un décapage local, comme nous le verrons par la suite.

La géophysique peut alors apporter, en complément, de bons renseignements, surtout en prenant la précaution de faire des mesures microsismiques avec étude des vitesses transversales. Elles permettent de calculer des modules d'élasticité dynamique et d'envisager le comportement global du massif.

Des mesures d'analyse structurale fine sont également utiles pour définir certains risques d'instabilité et mieux orienter des injections de confortement, par exemple.

2 - Cuvette de retenue

Il est rare d'effectuer des reconnaissances d'A.P.D. dans la cuvette car, en principe, les problèmes posés par la retenue sont déjà réglés. Les quelques interventions complémentaires peuvent concerner l'estimation plus précise de masses instables localisées (volume), confirmer par des mesures directes l'éloignement suffisant d'un niveau perméable, etc. Signalons enfin, pour mémoire, que c'est à ce moment de l'étude que l'on peut demander au géologue de regarder de nouveaux tracés routiers pour rétablir les voies de communication qui seront noyées par le futur plan d'eau, et qu'à cette occasion, bien que l'on soit hors de l'emprise de la cuvette, des observations intéressantes peuvent être faites.

3 - Carrières de matériaux

Bien souvent, il faut affiner l'évaluation des volumes disponibles ainsi que la qualité des matériaux. Cette fois encore, des sondages et forages sont obligatoires. En revanche, on aura tout intérêt à faire exécuter des essais de sautage ou d'abattage sur le site de la future carrière, avec des essais de blocométrie (enrochements) et même la mise en place de planches d'essais de compactage (terres ou enrochements).

C'est aussi à ce niveau d'étude que seront effectués la plupart des essais mécaniques complexes (sols et/ou roches).

4 - Conclusion

Tout ce qui aura été fait à l'A.P.D. a pour but de mieux estimer le coût de l'aménagement et d'obtenir le plus grand nombre d'informations afin de constituer un dossier définitif très complet et de préparer un solide dossier de consultation des entreprises.

B - EXEMPLE D'ETUDE

L'exemple retenu l'a été parmi des études faites dans les départements de l'Hérault et du Tarn. Pour le site de l'Hérault, une variante de conception a été introduite à l'A.P.D., ce qui n'est pas le cas le plus courant. Celle-ci propose un type de barrage nouveau réalisé selon la technique du béton compacté roulé (B.C.R.) et qui vient d'être mise en oeuvre en France pour la première fois sur un grand barrage.

BARRAGE DES OLIVETTES (HERAULT)

1 - INTRODUCTION

Le site du barrage des Olivettes se trouve sur la rivière la Peyne, à environ 1 km au Nord de la commune de Vailhan (fig. 46).

A cet endroit, un barrage haut de 36 m retiendrait un volume de 6,7 Hm³ à la cote 169 N.G.F. (P.H.E). La surface de la retenue pour cette cote serait de 50 ha.

2 - CADRE GEOLOGIQUE

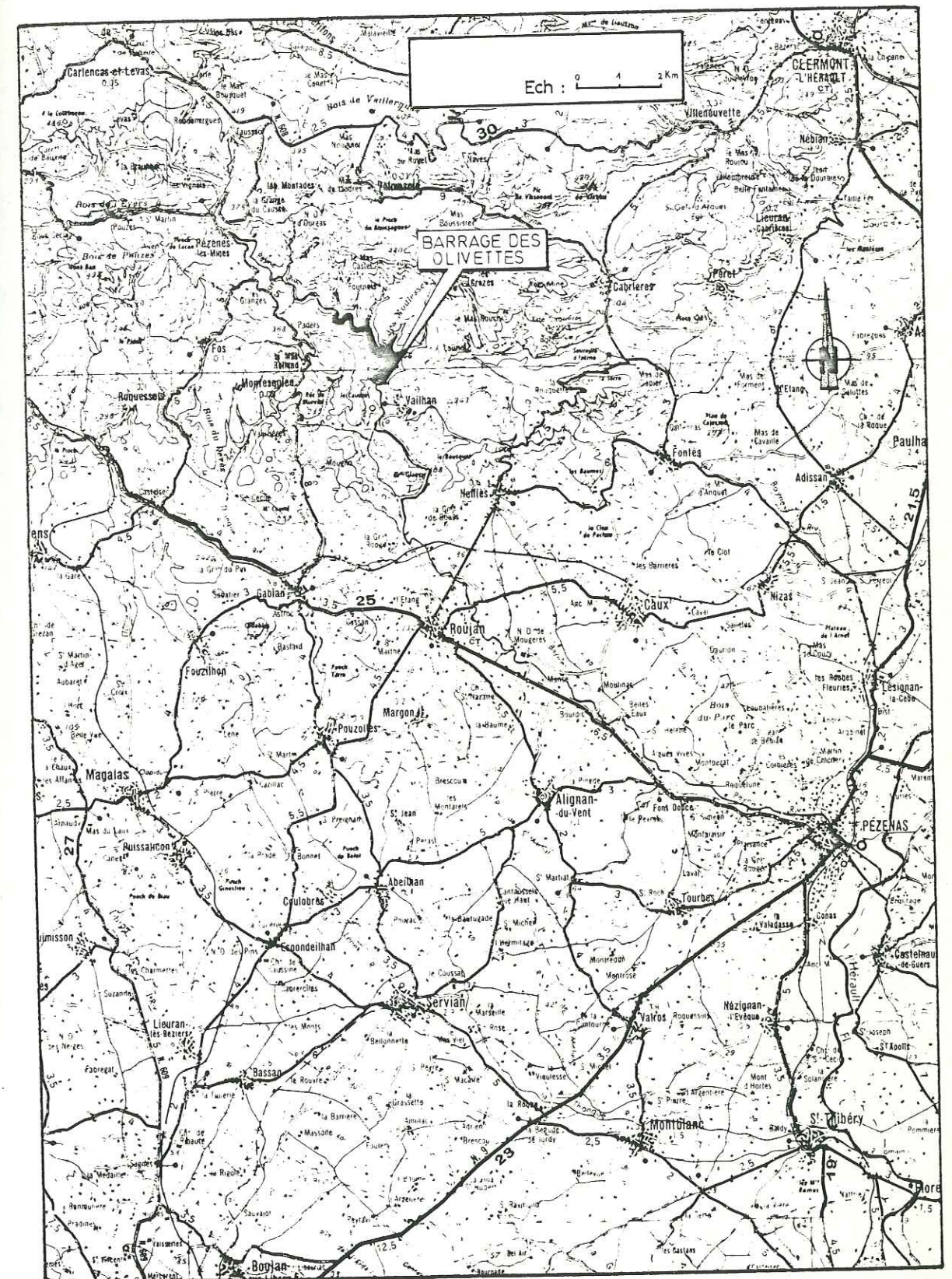
Le site du barrage des Olivettes intéresse des terrains paléozoïques appartenant à l'extrémité SE de la Montagne Noire. Ce massif ancien, structuré lors de l'orogénèse hercynienne, est constitué dans cette région par l'empilement d'unités tectoniques chevauchantes, déversées vers le Sud.

L'empilement initial des masses allochtones a été affecté, postérieurement à leur mise en place, par des mouvements tectoniques tardi-hercyniens (plissements et cassures) qui les morcellent et les juxtaposent de manière complexe.

Le site du barrage et la cuvette de retenue sont localisés dans l'unité dite des "Monts de Faugères", immédiatement au Nord de l'unité des "Ecailles de Cabrières", dont elle est séparée par la faille de Roquessels (accident important jalonné par des filons de quartz).

L'unité des "Monts de Faugères" est caractérisée par un matériel de type flysch, d'âge Viséen supérieur ; l'unité des "Ecailles de Cabrières" est constituée d'un amas chaotique de masses rocheuses d'âges et de lithologie variés (lentilles calcaires en particulier) emballées dans les sédiments de type flysch du Viséen supérieur.

Les études récentes concernant ce secteur tendent à interpréter ces terrains comme résultant du remplissage d'une fosse sous-marine au Carbonifère, en liaison avec la mise en place des unités allochtones chevauchantes qui fournissaient le matériel sédimentaire et les blocs ou écailles (olistolithes, mis en place gravitairement) emballés dans le flysch.



3 - GEOLOGIE DE LA RETENUE

3.1 - MORPHOLOGIE

L'ensemble de la cuvette se développe vers le NNW. Elle est assez encaissée, entre des versants raides, avec une pente d'environ 25 à 30°, mais entièrement recouverts d'une végétation dense (chênes verts, arbousiers essentiellement).

Les principaux ruisseaux affluents apparaissent en rive gauche de la Peyne (ruisseaux de la Charette, de Fer, de la Bouysse).

3.2 - LITHOLOGIE

3.2.1 - Terrains de couverture

Ce sont essentiellement des alluvions de fond de vallée, des éboulis et des colluvions de versants (fig. 47).

- Alluvions

Elles garnissent le lit majeur de la Peyne. Elles sont constituées en majeure partie par des galets de taille variable (centimétriques à pluri-décimétriques) de nature quartzeuse, schisteuse ou volcanique, mélangés çà et là à des lentilles sableuses.

- Eboulis et éluvions de versants

La tranche d'altération du substratum (éluvions) est de faible épaisseur (inférieure ou égale à 1 m) mais contribue à masquer le bed-rock que l'on peut dans ce cas considérer comme sub-affleurant. Les éboulis sont également peu importants.

En de rares points, très localisés, on peut cependant observer des formations éluviales (débris schisteux et éléments fins) dont l'épaisseur apparente peut dépasser 4 à 5 m (immédiatement à l'aval en rive gauche du ruisseau de la Charette, le long de la D. 125).

3.2.2 - Substratum

Dans sa totalité, la cuvette s'inscrit dans la série de flysch du Viséen. Ce sont surtout des schistes plus ou moins silteux, alternant parfois avec des niveaux gréseux ou charbonneux. On y trouve également associés quelques rares bancs calcaires (à l'Ouest du Coulech) et des filons de quartz dans les zones fracturées.

Signalons aussi, bien que l'on soit au-dessus de la cote du futur plan d'eau, que ces schistes sont surmontés par des calcaires et des dolomies du Dévonien (Pech Perdu) ou des coulées volcaniques de basalte et de tufs et brèches scoriacées plus ou moins empilées, que les phénomènes d'inversion du relief ont placés aujourd'hui en altitude (mont Redon, le Causse).

3.3 - DISPOSITIONS STRUCTURALES

Dans toute la région considérée, la structure hercynienne est complexe. On observe effectivement de nombreux microplis, des petites cassures, des zones plus ou moins broyées ou désorganisées affectant les flyschs (F. BESSET, 1980).

En fait, il semblerait que la cuvette se développe sur le flanc NW d'une "structure anticlinale" dont l'axe passerait dans le versant rive droite du site et se poursuivrait avec une direction SW-NE vers le ruisseau de la Charette.

Dans la cuvette et ses alentours immédiats, la schistosité a une direction générale variant entre N 40° et N 90° E et un plongement de 20° à 35° vers le N ou le NW.

En ce qui concerne les failles, les mauvaises conditions d'affleurement et l'absence de niveaux repères n'ont pas permis de mettre en évidence des accidents importants.

Rappelons cependant pour mémoire, bien qu'elle soit à l'aval du site, la faille majeure de Roquessels qui est jalonnée par un important filon de quartz formant une arête très marquée dans la topographie et de direction générale WSW - ENE.

3.4 - STABILITE DES VERSANTS

La stabilité générale des versants de la cuvette ne devrait pas poser de problèmes particuliers en ce qui concerne le substratum.

Si de petits mouvements de versant se produisent, ils ne devraient intéresser que les zones où les formations de couverture sont assez épaisses (altération). Dans tous les cas, les risques de mise en mouvement de ces terrains meubles lors des variations du futur plan d'eau n'affecteront que des volumes assez faibles (quelques dizaines de milliers de mètres cubes) qui ne devraient pas remettre en cause la sécurité de l'aménagement.

3.5 - ETANCHEITE DE LA CUVETTE

A l'échelle d'une retenue, les schistes peuvent être considérés comme un matériau imperméable en grand. En effet, ils constituent pour d'autres formations telles que les calcaires du Pech Perdu, par exemple, un véritable plancher étanche ; leur contact sur les schistes est matérialisé par une source.

Les seuls vecteurs pour des fuites pourraient être constitués par les petites passées calcaires ou gréseuses contenues dans les flyschs à condition que celles-ci recoupent une vallée hors de la retenue suffisamment proche et à une cote inférieure à celle du futur plan d'eau. Ceci ne semble pas être le cas ici, bien que les conditions d'affleurement ne permettent pas de les suivre de façon précise. De plus, ces passées ont le plus souvent un caractère discontinu, lenticulaire, ce qui rend cette éventualité encore plus improbable. De ce fait, on peut être alors assuré de la bonne étanchéité de cette retenue.

4 - GEOLOGIE DU SITE

4.1 - MORPHOLOGIE

Au droit du site, la vallée est assez large mais symétrique, avec 125 m en fond et 220 m à la cote des P.H.E.

Les versants ont une pente moyenne de l'ordre de 30° en R.D. et 25° en R.G..

Les reliefs au-dessus du site culminent respectivement aux cotes 267 N.G.F. en R.D. et 300 en R.G. (Pech Perdu).

Le C.D. 125 permet de longer le versant R.G. aux environs de la cote 160.

4.2 - LITHOLOGIE

4.2.1 - Terrains de couverture

On retrouve les mêmes que ceux qui ont été décrits à propos de la cuvette. Sur la carte géologique au 1/500 du site, il a cependant été distingué (fig. 48) :

- des alluvions du lit mineur de la Payne, constituées en grande partie de galets pouvant atteindre plusieurs décimètres ;
- les terrasses alluviales de même nature, avec quelques niveaux sableux lenticulaires ;
- des éboulis et éluvions de pied de versants argilo-schisteux ;
- des éboulis et colluvions de versants plus ou moins continus.

Nous avons vu que ces terrains étaient généralement peu épais ; ceci sera confirmé par les résultats des sondages et de la géophysique.

4.2.2 - Substratum

- Schistes (Viséen)

L'ensemble de l'ouvrage projeté s'inscrit dans une seule formation.

Il s'agit de schistes du Viséen supérieur, constituant l'unité des Monts de Faugères.

A l'affleurement, ces schistes sont de couleur gris-verdâtre, et à dominante rouille (altération), d'aspect plus ou moins feuilleté. On note çà et là des passées détritiques gréseuses et quartzitiques caractéristiques des séries de type flysch. Ces passées sont particulièrement visibles à l'aval du site en rive droite où l'on voit de véritables bancs de quartzite.

- Filons -----

De nombreux filons ou filonnets de quartz recoupent la série schisteuse.

Les plus importants ont été observés sur l'appui rive droite, où l'on note la présence de gros amas de quartz laiteux dont certains semblent grossièrement orientés suivant la direction de la schistosité.

Le plus gros filon reste celui qui borde la zone de faille de Roquessels, 100 m en aval du site rive gauche sur le C.D. 125.

Ce dernier remonte localement la rive gauche suivant une direction N 70°, avec un pendage de 70° vers le SE. Mais d'une manière générale, il est plutôt orienté WSW - ENE.

Apparemment, il ne traverse pas la zone d'emprise de la digue mais passe plus au large dans le versant.

4.3 - STRUCTURE

Les schistes ont, sur la plus grande partie du site, une disposition de type "isoclinal", la schistosité ayant une direction comprise entre N 60° et N 90° E et un pendage général de la rive droite vers la rive gauche. Dans le détail, on peut cependant faire les remarques suivantes :

- en rive gauche et en thalweg, les "couches" plongent dans le versant, légèrement de l'amont vers l'aval avec des valeurs comprises entre 40° et 60°, et cela d'une façon assez régulière. Quelques replis ont été observés en pied de versant ;
- en rive droite, il en est de même pour la partie basse de l'appui où les couches plongent selon le versant avec des valeurs plus faibles de 20° à 40°. Par contre, lorsque l'on remonte vers le haut de la rive, la schistosité d'ensemble bascule progressivement à l'intérieur de celle-ci et l'on peut très grossièrement déterminer un "axe anticlinal" qui semble descendre progressivement dans le versant lorsque l'on va vers l'amont. Sur le flanc nord de cette forme anticlinale, la schistosité s'enfouit vers l'intérieur du massif de 10° à 20°.



- ALLUVIONS DU LIT DE LA PEYNE
- TERRASSE ALLUVIALE
- BOULIS ET ALTERATION DE PIED DE VERSANT
- BOULIS ET ALTERATION DE VERSANT
- FILON DE QUARTZ
- BANC DE QUARTZITES
- SCHISTES (VISEEN SUPERIEUR)
- SCHISTES ET QUARTZITES (ORDOVICIEN)
- CHARNIERE DE PLIS
- PLIS
- DIRECTION DE LA SCHISTOSITE
- PENDAGE DE LA SCHISTOSITE
- FAILLE DE ROQUESSELS
- AXE ANTICLINAL
- SUINTEMENT
- SONDAGES

Fig. 48. - Carte géologique du site

4.4 - FRACTURATION GENERALE

Dans le détail, les schistes apparaissent assez fissurés. Les principales solutions de continuité de la roche sont au nombre de 6, à savoir :

- schistosité N 60° - 90° E à pendage 20° - 60° SSE,
- cassures N 170° E à pendage 75° W,
- cassures N 30° E à pendage 35° NW,
- cassures N 85° E à pendage 75° N,
- cassures N 125° E à pendage 75° SW,
- cassures N 60° E à pendage 80° SE.

Nous reparlerons plus en détail de la fracturation lors de l'examen des sondages.

4.5 - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Les travaux de reconnaissance réalisés sur le site comprennent :

- . une campagne de prospection géophysique (S.E.G.G., 1984),
- . une 1ère campagne de sondages (SOGEO, 1984),
- . une 2ème campagne de sondages (SOLETANCHE, 1985).

Leur localisation précise est indiquée sur la figure 49.

Ils ont permis d'obtenir des renseignements assez complets sur la qualité du massif de fondation du futur barrage.

4.5.1 - Résultats de la géophysique

Une campagne de petite sismique réfraction a quadrillé l'ensemble du site. Elle comportait 5 profils en travers de la vallée (P1, P4, P8, P9, P10) et 5 profils longitudinaux (P2, P3, P5, P6, P7).

Le détail de cette étude fait l'objet d'un rapport S.E.G.G. de février 1984. Nous résumerons ici les grandes lignes et y ajouterons quelques observations.

- Vitesse sismique et nature des terrains

Les vitesses obtenues ont permis de différencier les catégories de terrains suivantes :

- . 350-700 m/s éboulis, colluvions de versant, alluvions sèches,
- . 700-1200 m/s alluvions mouillées grossières du lit majeur,
- . 1000-1800 m/s substratum plus ou moins altéré très décomprimé et très fissuré,
- . 2000-3400 m/s substratum peu décomprimé et fissuré,
- . 3600-4400 m/s substratum peu fissuré à sain.

- Coupes sismiques

L'examen des coupes sismiques en travers de la vallée (P1, P4) plus celui d'une coupe construite au droit de l'axe à partir de la carte des isohypses du toit de massif pour lequel $V > 3500$ m/s (S.E.G.G., 1984) permet de dresser le tableau suivant :

	Profondeur substratum sain/T.N. (m)		
	Profil P4	Profil axe	Profil P1
Haut du versant (170 N.G.F.)			
R.D.	16	16	14
R.G.	13,5	14	9
Pied du versant (140 N.G.F.)			
R.D.	11	11	9
R.G.	7	6	6

On peut donc en déduire que le substratum rapide est plus profond d'environ 3 à 5 m sous le T.N. en rive droite de la Peyne qu'en rive gauche. Ceci s'explique assez naturellement par la structure, les schistes étant plus sensibles à la décompression en R.D. où les plans de schistosité sont presque parallèles à la surface topographique, alors qu'en rive gauche, ils plongent dans le versant et sont donc plus comprimés sous l'effet de la charge lithostatique des terrains situés au-dessus.

En ce qui concerne les profils longitudinaux (P2, P3, P5, P6 et P7), il ne semble pas qu'il y ait de grosses anomalies sur la carte du toit du substratum sain ou sur sa profondeur par rapport au terrain naturel entre l'amont et l'aval, cette dernière étant à peu près constante sur tous ces profils, sauf peut-être sur le profil P5 où il y a un léger approfondissement entre les capteurs 501 et 509.

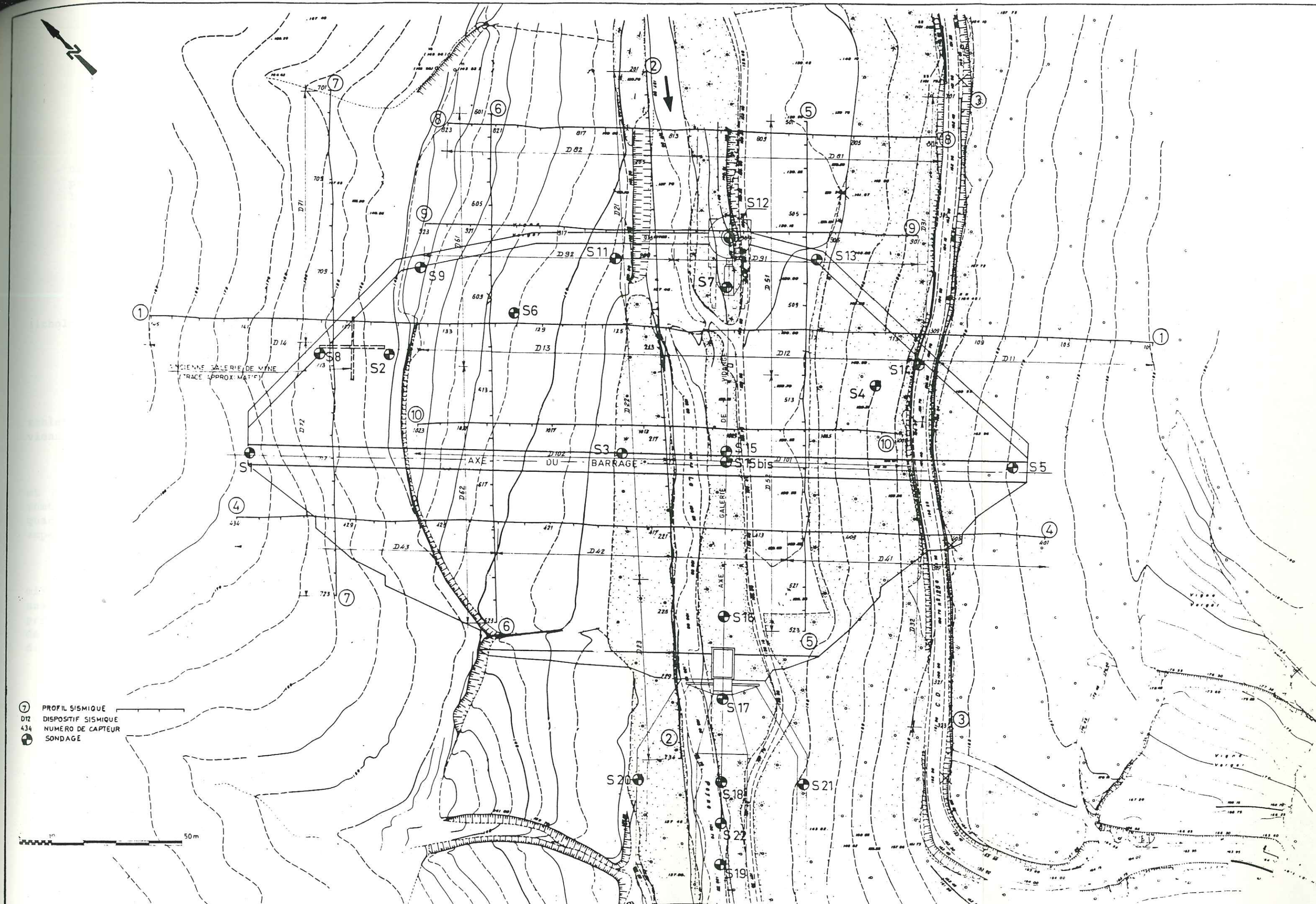


Fig. 49. - Plan de situation des travaux de reconnaissance

4.5.2 - Résultats des sondages

- une première campagne de sept sondages carottés de 40 à 45 m de profondeur a permis d'explorer la zone du site (rapport SOGEO, 1984) ;
- une deuxième campagne a complété ces reconnaissances, en particulier au droit de l'organe d'étanchéité de l'ouvrage, le long de la conduite de vidange et à l'emplacement du bassin de dissipation (rapport SOLETANCHE, 1985).

Ces travaux ont fourni de nombreuses informations concernant la lithologie, la fracturation et la perméabilité du massif rocheux.

4.5.2.1 - Lithologie (fig. 50 et 51)

Les carottes ont montré la très forte proportion des niveaux schisteux constituant le "flysch". Seules des passées quartzitiques viennent rompre la monotonie de cette formation (S5, S6, S7, S12, S13).

Lorsque la roche est saine, ces schistes sont de couleur noire, et ont parfois un débit lamellaire très fin. Les niveaux quartzitiques sont massifs, gris, légèrement verdâtres ou brunâtres. Parfois schistes et quartzites alternent en "lits" centimétriques ce qui donne à la roche un aspect rubané, pour peu que la schistosité soit un peu plissotée.

Des filons et filonnets de quartz blanc laiteux de taille millimétrique à pluri-décimétrique recoupent la roche de façon assez anarchique. Ils peuvent être parfois minéralisés (chalcopryrite, pyrite) et présenter des vides (géodes avec cristallisation dans S1). On note aussi de très petits filonnets de calcite, qu'il est souvent bien difficile de distinguer du quartz, sur lequel elle se trouve parfois en impuretés.

En ce qui concerne l'altération de la roche, les traces d'oxydation peuvent atteindre 12 à 15 m de profondeur sur le haut des versants et 4 à 5 m en fond de vallée. Là encore, l'oxydation a pénétré plus profondément en rive droite où le versant semble plus décomprimé.

Pour les terrains de couverture, les sondages ont confirmé qu'ils étaient peu épais, les colluvions et formations de versants ayant entre 1 et 2 m d'épaisseur, les alluvions 2,5 m en moyenne avec 4,0 m au maximum (S6).

4.5.2.2 - Fracturation (fig. 52 et 53)

Les logs de sondages montrent de nombreuses zones où la roche est très fracturée, voire brisée, surtout en tête des sondages dans la zone d'oxydation (S1, S2, S4, S5, S7, S9, S11). Néanmoins, on trouve également des passages brisés en profondeur (S2, S3, S5, S6, S7, S12, S14, S15 bis) qui sont parfois liés à la présence de quartz abondant (S1) ou de zones "charbonneuses" lithologiquement plus fragiles.

Nous avons également distingué des passages où la roche semblait mécaniquement déformée ou broyée (c'est le cas en particulier sur les sondages S1, S2, S3 et S6), et qui doivent correspondre à des cassures dans le massif.

Signalons enfin la très mauvaise qualité du sondage S19, dans la partie aval du bassin de dissipation. Ici, la roche est complètement décomposée et mécaniquement déformée. On se rapproche en effet de la zone perturbée par la grande faille de Roquessels (le filon de quartz qui la souligne n'est qu'à 100 m à l'aval du S19). Peut-être s'agit-il d'un accident satellite de cette grande cassure.

Sur chacun des sondages, l'indice R.Q.D. a également été mesuré pour des longueurs de carottes de 1 m (1ère campagne) ou par caisse (2ème campagne). Le résultat ne semble pas très exploitable. En effet, l'amélioration de la valeur du R.Q.D. avec la profondeur, qui est le cas général, n'est pas nette ici, sauf peut-être au sondage S1. Ceci est en partie dû au fait que les roches schisteuses à débit lamellaire ne sont pas favorables à l'emploi de cet indice, qui est faussé par le débit même de la roche.

Néanmoins en faisant la moyenne par sondage et la moyenne pour tous les sondages on peut quand même avoir une idée de la fracturation "globale" du massif.

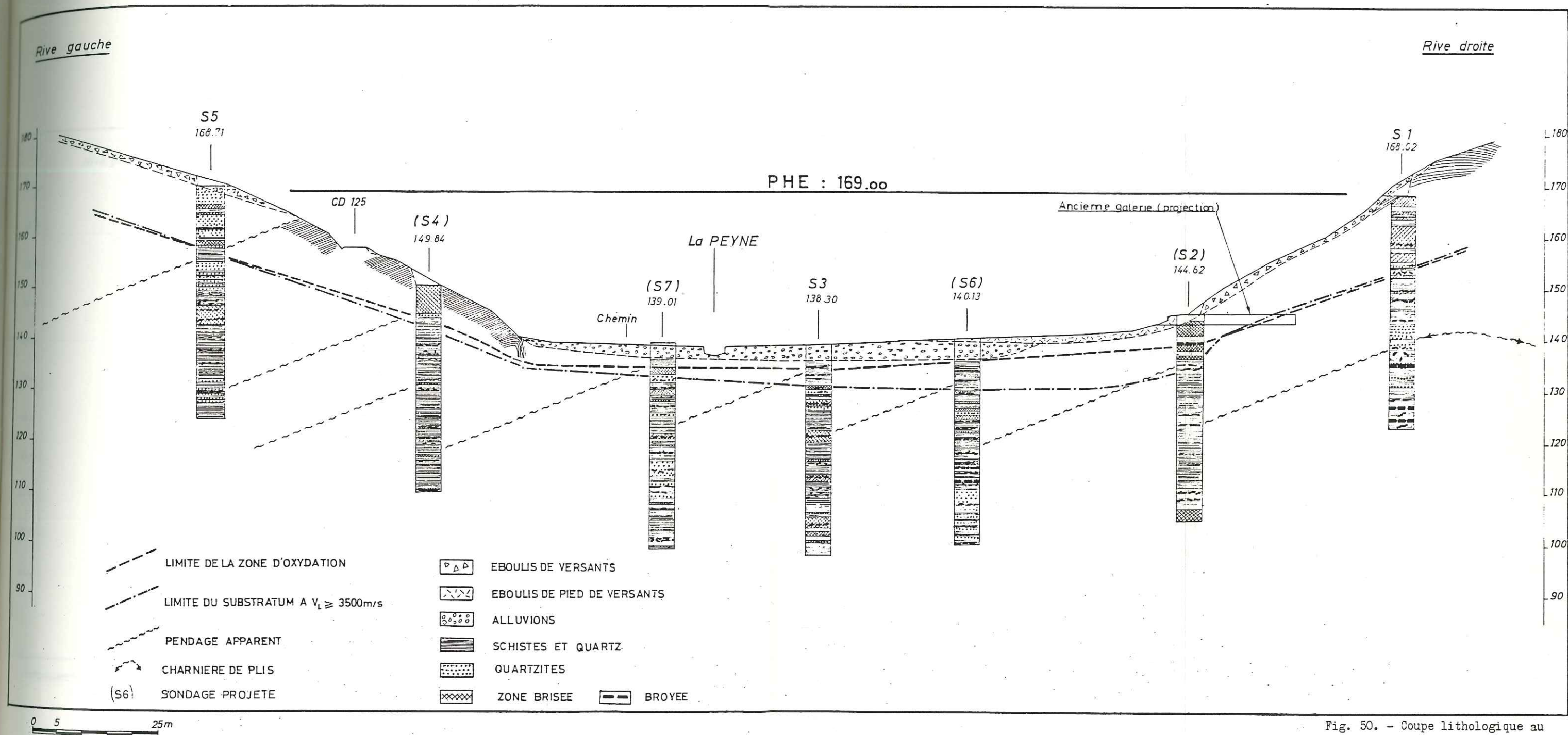


Fig. 50. - Coupe lithologique au droit du site, axe barrage

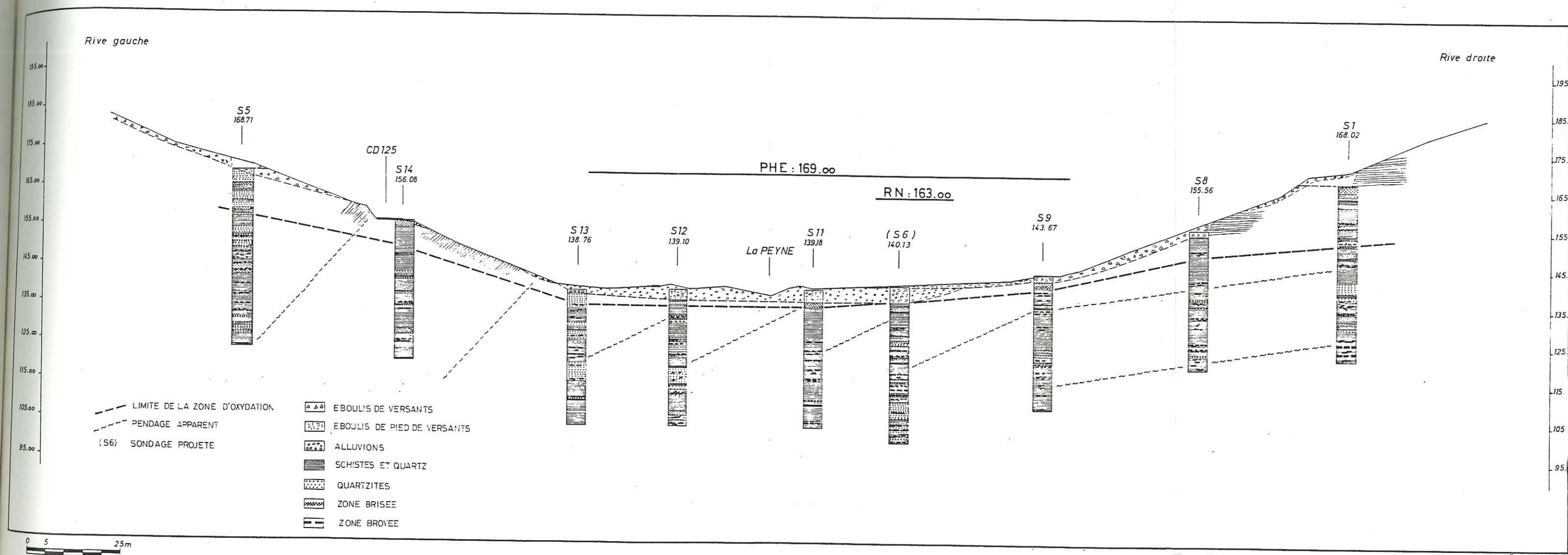


Fig. 51. - Coupe lithologique au droit du site, pied amont

Rive gauche

Rive droite

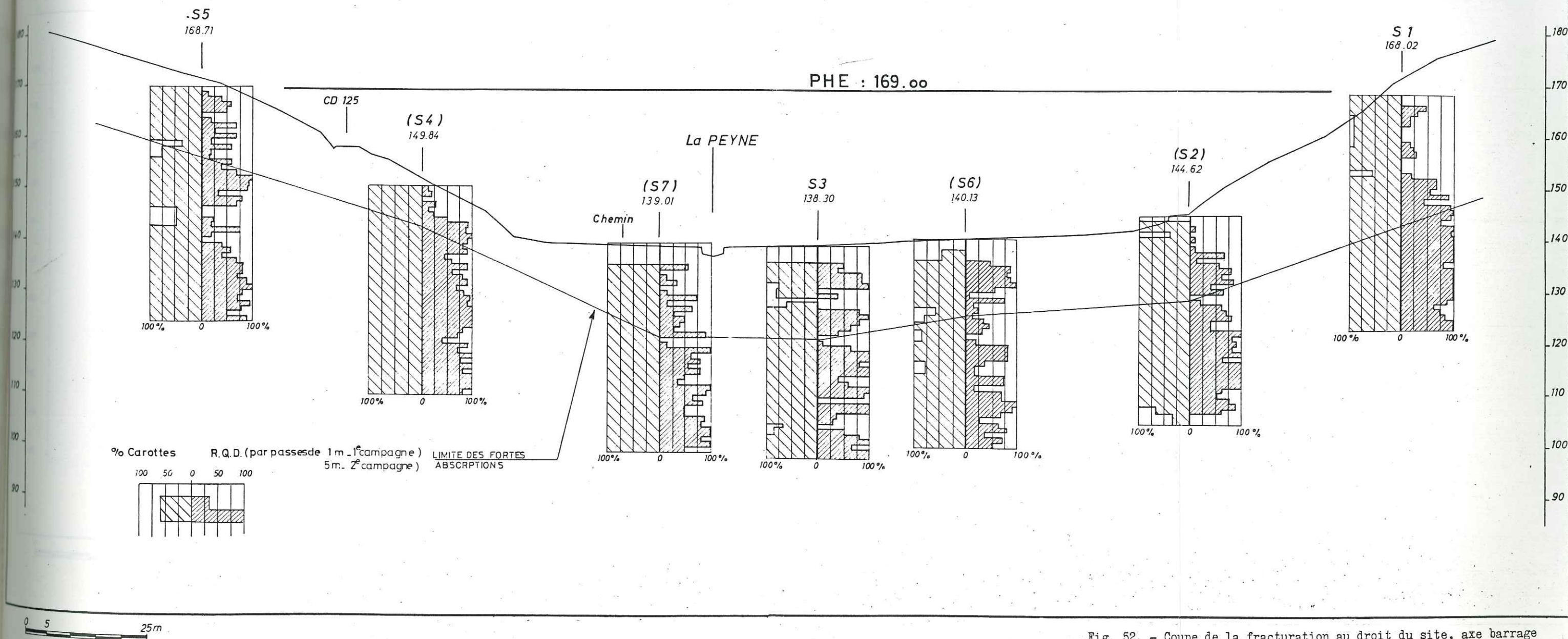


Fig. 52. - Coupe de la fracturation au droit du site, axe barrage

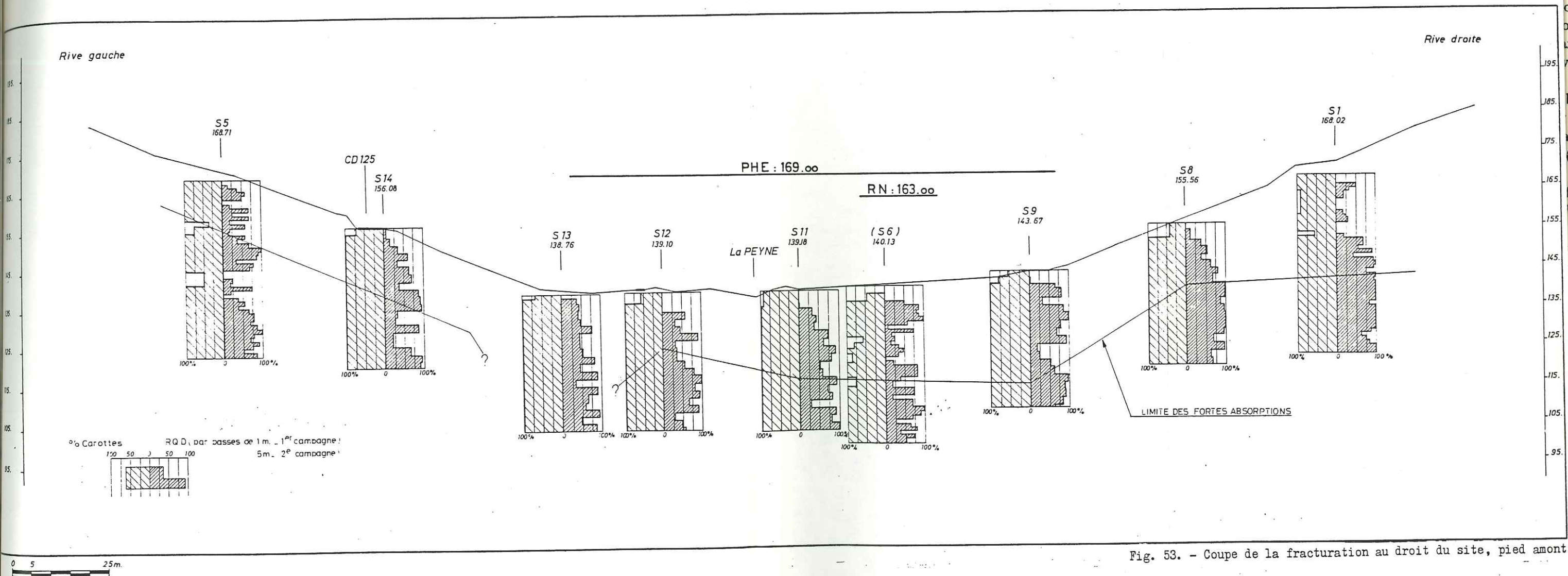


Fig. 53. - Coupe de la fracturation au droit du site, pied amont

Sondages	R.Q.D. Moyen %	Position
S 4 S 5 S 13 S 14	73 51 62 54	Rive gauche
S 3 S 6 S 7 S 11 S 12 S 15 b S 16 S 17 S 18 S 19 S 20 S 21 S 22	63 55 54 66 56 20 63 49 75 0 77 66 23	Thalweg
S 1 S 2 S 8 S 9	59 59 73 65	Rive droite

Les résultats donnent une valeur moyenne pour tout le site de 58 % ce qui permet de qualifier le massif de moyennement fracturé (fourchette 50-75 %) et nous paraît assez représentatif.

4.5.2.3 - Essais d'eau

Deux types d'essais ont été effectués :

- des essais Lefranc dans les alluvions,
- des essais Lugeon dans le substratum.

ESSAIS LEFRANC

Deux essais ont testé les alluvions sur les sondages S6 et S7 et donné respectivement des valeurs de $2,7 \times 10^{-5}$ m/s et $6,9 \times 10^{-6}$ m/s qui correspondent à une perméabilité que l'on peut qualifier de moyenne pour de tels matériaux.

ESSAIS LUGEON

Treize sondages du site ont été le siège de 140 essais Lugeon. Ces derniers ont en général été faits pour des passes de 3 m et avec la gamme de pressions suivantes : 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 5 - 2 - 1 - 0,5 bars, soit 9 paliers de pressions croissantes puis décroissantes, maintenues 10 mn par palier. Ils ont été interprétés en pressions effectives tenant compte des pertes de charge.

Les résultats obtenus sont synthétisés sur les figures 54 et 55, où l'on peut visualiser toutes les valeurs de perméabilité sur chacun des sondages et en particulier la limite des fortes perméabilités en profondeur, c'est-à-dire la cote à partir de laquelle K est inférieur à 3 U.L. sous 10 b ou bien inférieur à 2 l/m/mn sous 5 b.

La figure 54 représente une coupe sur l'axe de la digue, la figure 55 une coupe développée au pied du parement amont de l'ouvrage, c'est-à-dire à peu de chose près sur le voile d'étanchéité de l'ouvrage.

Les résultats sont les suivants :

	Rive gauche				Thalweg					Rive droite			
	S5	S14	S4	S13	S12	S7	S11	S3	S6	S9	S2	S8	S1
Profondeur (en m) à par- tir de la- quelle : K < 2 l/m/mn à 5b K < 3 U.L.	13	17	7,5	>35	14,5	18	22,5	17	24	28,5	17	15,5	29

Rive gauche

Rive droite

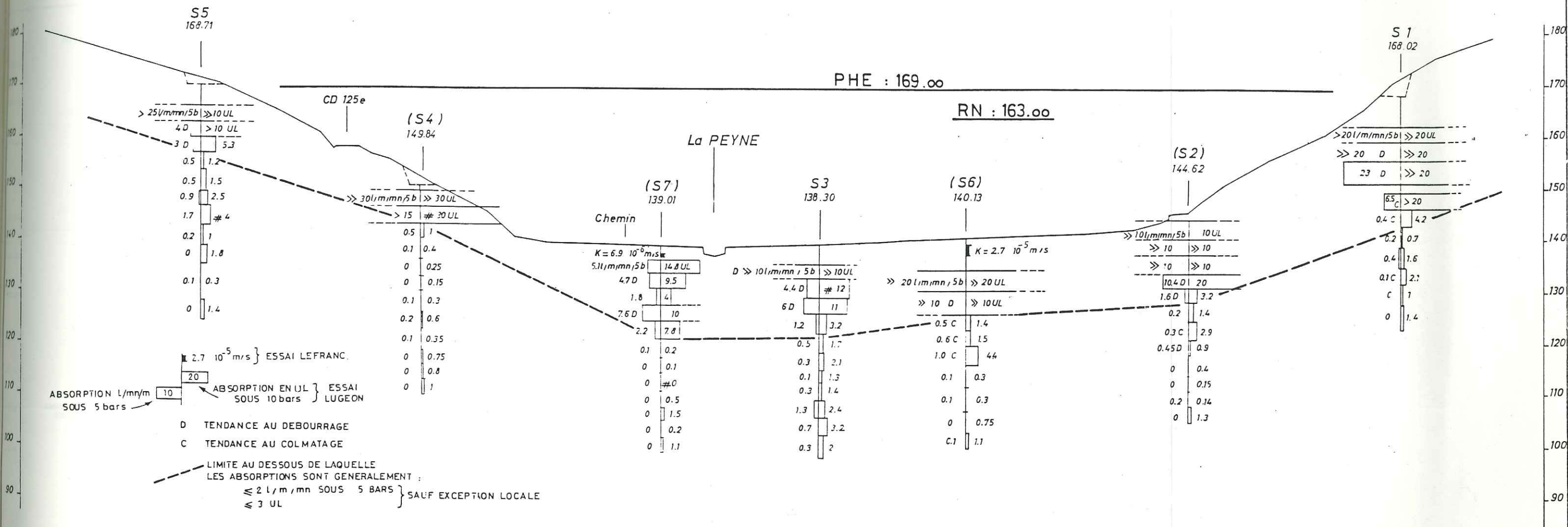
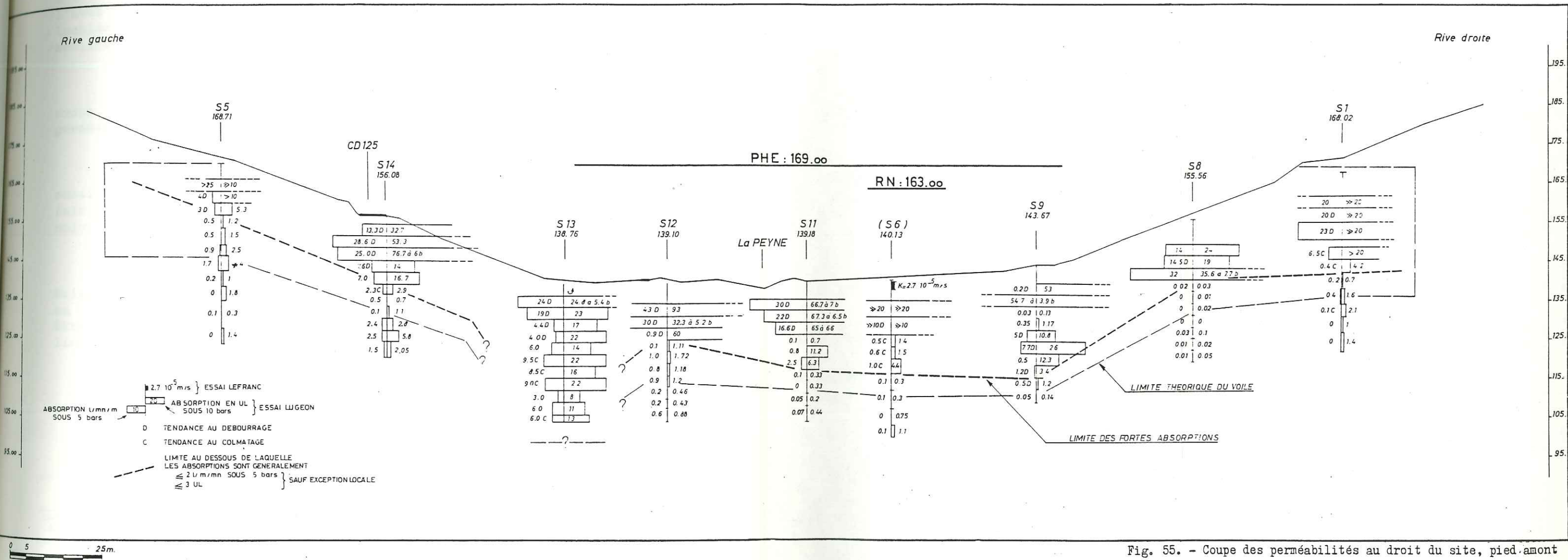


Fig. 54. - Coupe des perméabilités au droit du site, axe barrage



Le pied du versant rive gauche montre de fortes perméabilités en S13 qui, entre 27 et 35 m, de profondeur sont encore supérieures à 10 U.L. C'est le seul sondage qui présente un tel comportement. Si sa lithologie est un peu différente des autres (plus de quartzite), sa fracturation n'indique cependant rien d'anormal.

Signalons cependant que lors des 2 premiers essais Lugeon (de 3 à 6 m et de 6 à 9 m), l'eau injectée ressortait dans le terrain 4 m à l'aval du sondage, ceci pouvant peut-être s'expliquer par une fissuration localement ouverte (les quartzites étant un matériau plus cassant que les schistes s.str.).

Pour les autres sondages, ces données confirment ce que nous avons dit précédemment, puisque le versant rive droite apparaît plus perméable dans le haut (décompression) que le gauche.

En thalweg, on constate que de fortes perméabilités existent aussi sur une hauteur peu différente de celles des versants et, de ce fait, la frange perméable du massif rocheux dessine une "bande" plus ou moins régulière en travers de la vallée.

Cette forte perméabilité semble liée à la présence des zones brisées (cassures) et oxydées dans la tranche superficielle. Par contre, en profondeur, les zones brisées apparaissent assez étanches et doivent être, soit colmatées par des matériaux fins, soit d'extension assez limitée.

L'examen du comportement "hydromécanique" des terrains (forme des courbes d'essais Lugeon) permet de dresser le tableau suivant :

	Rive gauche				Thalweg					Rive droite				TOTAL
Comportement de l'essai à 5 b	S5	S14	S4	S13	S12	S7	S11	S3	S6	S9	S2	S8	S1	
Tendance au débouillage	3	4		4	3	3	3	3	1	5	3	1	1	34
Tendance au colmatage		1		4					3		1		3	12
Ni débouillage Ni colmatage	8	6	10	3	7	9	7	8	4	5	5	9	4	85
Absorption du débit de la pompe		1	2	1			3		1	1	3		2	14

Tous les essais qui ont tendance au débouillage ou qui absorbent le débit total de la pompe sont bien situés dans la tranche supérieure des fortes perméabilités.

Les autres montrent une tendance au colmatage mais surtout la plupart des essais ont un comportement confirmant une permanence des caractéristiques du milieu (ni débouillage, ni colmatage).

On peut donc dire que les schistes se comportent de façon satisfaisante. La seule anomalie dans les perméabilités ou dans le comportement du massif rocheux se situe au niveau du S 13 où l'absorption ne diminue pas nettement avec la profondeur.

4.5.2.4 - Piézométrie

Les sondages S1, S5 et S6 ont été équipés en piézomètres qui doivent tester le substratum.

Si une nappe a bien été mise en évidence dans les alluvions, il est difficile de se prononcer sur l'existence d'un niveau statique dans le substratum sain. L'eau observée dans ces trous peut encore correspondre à de l'eau de foration. Les quelques mesures que nous avons aujourd'hui ne semblent pas très concluantes pour l'instant.

Signalons dès maintenant que, lors du creusement de la plate-forme du sondage S2, en pied de rive droite, nous avons découvert, immédiatement à l'amont (1,5 m), une ancienne galerie de mine (époque romaine ?) dont l'entrée était masquée par les éboulis de bas de pente (figure 50). Cette galerie est orientée N 136° E, c'est-à-dire perpendiculairement au versant et le hasard a voulu qu'elle se trouve sous l'emprise de l'ouvrage.

Elle pénètre d'une vingtaine de mètres à l'intérieur du massif. A une dizaine de mètres de l'entrée partent, de chaque côté, deux rameaux perpendiculaires, longs d'une dizaine de mètres chacun. Elle a 2 m de haut sur 1 m de large et reste en bon état bien que non soutenue.

Les sondeurs ont pompé l'eau qui était à l'intérieur pour alimenter le sondage S2 et l'ont asséchée. Ceci confirme les possibilités de circulations d'eau dans la tranche oxydée du massif. Signalons aussi qu'au moment de la réalisation du sondage S1 sur le haut du versant, la galerie s'est de nouveau remplie d'eau. Cette opération s'étant déroulée en période pluvieuse, il est difficile de faire la part des choses entre l'injection d'eau des essais Lugeon (grosse absorption dans la tranche

oxydée) et les précipitations (infiltrations dans la tranche oxydée altérée puis drainage par la galerie). Ce qui est certain c'est que la galerie telle que nous l'avons représentée sur la figure 50 joue le rôle d'un drain pour la partie décomprimée de l'appui.

4.6 - VALEUR DE LA FONDATION DU BARRAGE

L'ensemble du site se prête bien à l'édification d'une digue souple en enrochement après un décapage des terrains de couverture.

Les schistes, même oxydés, constitueront une fondation acceptable pour ce type d'ouvrage.

Compte tenu des informations fournies par la géophysique et les sondages, un décapage de 1 à 2 m sur les versants et de 2 à 4 m en thalweg devrait être suffisant pour avoir une bonne assise pour l'ouvrage.

4.7 - STABILITE DES APPUIS DU BARRAGE

La rive gauche ne devrait pas poser de problèmes particuliers à l'ouverture des fouilles, la schistosité plongeant dans le versant de manière assez régulière.

En rive droite par contre, où les "couches" plongent suivant le versant, des risques de glissements gravitaires de type "banc sur banc" pourront se produire, surtout quand celui-ci ne sera plus protégé par la végétation et les terrains de couverture. Des épinglages pourront être alors localement nécessaires.

4.8 - ETANCHEITE DU SITE

Nous avons vu en 4.5.2.3. que les fortes perméabilités atteignaient 13 à 17 m de profondeur sur le haut du versant rive gauche, 15 à 25 m en thalweg et 15 à 29 m sur le versant rive droite. De plus, une zone plus perméable existe au pied de la rive gauche (S13).

Un voile d'injection maximal classique à 2 ou 3 lignes (1,25 m entre lignes et 2,5 m entre sondages), de 25 à 35 m de profondeur suivant les cas, devrait permettre d'assurer une étanchéité satisfaisante sous l'ouvrage projeté (figure 55). Ces dispositions pourront être précisées par la réalisation d'un plot d'essai d'injection au début des travaux.

En ce qui concerne les fortes perméabilités du S13, ce secteur pourra faire l'objet d'un traitement plus serré et plus profond, mais vraisemblablement assez localisé.

Un voile au large à 2 lignes de 25 à 35 m de profondeur, s'enfonçant d'une trentaine de mètres dans les versants, devra poursuivre l'organe d'étanchéité principal, surtout en rive droite où les perméabilités sont plus importantes.

Le traitement de peau se fera sur le même principe mais avec 4 ou 5 lignes arrêtées à 6 m de profondeur, le voile normal étant poursuivi sur les 2 ou 3 lignes les plus amont.

L'ensemble des injections devra être fait par passes descendantes.

Quant aux anciennes galeries signalées précédemment, elles se trouveront trop près de l'organe d'étanchéité du barrage pour être intégrées au réseau de drainage. Elles devront donc être rebouchées soigneusement.

4.9 - DRAINAGE

Une ligne de drains verticaux de 15 m de profondeur environ, à 15 m à l'aval du voile et espacés de 10 m, permettra de drainer la fondation.

Sur les appuis et particulièrement en rive droite, où les plans de schistosité sont pentés suivant le versant donc favorables à la mise en charge des eaux (rôle d'écran), on réalisera des drains verticaux ou inclinés en fonction de la structure géologique, le long du parement aval de l'ouvrage et espacés de 10 à 15 m.

4.10 - FONDATION DE L'OUVRAGE D'EVACUATION DES CRUES (tulipe)

Elle a été reconnue par le sondage S12, qui a montré 2,7 m d'alluvions surmontant 2,2 m de schistes ou quartzites très fissurés, brisés et oxydés. Ce n'est qu'à partir de 4,9 m sous le T.N. (cote 134) que l'on a une roche de qualité acceptable pour fonder l'ouvrage. La cote de fondation retenue à 133 devrait donc bien convenir, la roche montrant une vitesse sismique de 2800 m/s (capteurs 901-910), à cette profondeur.

4.11 - FONDATION DE LA GALERIE DE VIDANGE (fig. 56)

Son tracé, d'une longueur de 98 m, a été jalonné par 4 sondages (S7, S12, S15b et S16), dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-après :

N° sondage	S7	S12 (Tulipe)	S15b	S16
Cote	139,01	139,10	138,55	137,42
Epaisseur alluvions /T.N.	2,80	2,70	3,50	1,85
Epaisseur rocher oxydé/T.N.	4,80	4,40	4,00	4,55
Profondeur rocher sain/T.N.	4,50	4,90	4,50	5,00
Cote rochers sain	134,20	134,20	134,00	132,40

La galerie sera fondée en amont à la cote 134 et à 132 en aval ; elle devrait donc rencontrer des terrains de qualité acceptable. Au droit du S7, la roche reste cependant assez brisée à la cote de la fondation.

En ce qui concerne les vitesses sismiques, elles sont comprises entre 2400 m/s (capteur 1009) et 2900 m/s (capteur 120) correspondant à un substratum peu décomprimé et peu fissuré.

4.12 - BASSIN DE DISSIPATION

Il a été reconnu par 6 sondages de 10 m (S17 à S22) qui ont donné les résultats ci-dessous :

N° sondage	S17	S18	S19	S20	S21	S22
Cote	136,87	135,95	135,32	137,16	137,26	135,35
Epaisseur alluvions/T.N.	1,10	1,30	1,70	2,30	2,80	0
Epaisseur rocher oxydé/T.N.	3,40	3,20	2,60	4,70	4,10	3,10
Profondeur rocher sain/T.N.	3,50	3,30	> 10	4,80	5,10	3,20
Cote rocher sain	133,30	132,60	< 125	132,30	132,10	132,30
R.Q.D. sur les 2 derniers mètres	62	82	0	79	93	22

Le fond du bassin sera creusé jusqu'à la cote 126. On constate que toute la partie à l'amont de S22 ne devrait pas poser de problème particulier, et trouver des schistes peu fissurés (le R.Q.D. sur les 2 derniers mètres est de l'ordre de 80 %). Par contre, au droit du S19, les schistes sont très désorganisés (cf. 4.5.2.2) sur plus de 10 m d'épaisseur (Faille de Roquessels). Il est vraisemblable qu'une protection particulière du fond et des berges du bassin sera nécessaire sur la partie se trouvant à l'aval de S22.

5 - MATERIAUX

5.1 - ENROCHEMENTS

5.1.1 - Formations présentes dans les alentours de l'aménagement

5.1.1.1 - Schistes

Ils constituent le cadre géologique de cet aménagement mais ne peuvent en aucun cas être utilisés comme enrochements à cause de leur débit très lamellaire.

5.1.1.2 - Calcaires récifaux (Viséen)

Ils apparaissent à l'aval du site à l'Ouest et au Sud de Vailhan. Ce sont des olistolithes calcaires composés de très gros blocs massifs de calcaire sub-récifal.

Les plus importants d'entre eux constituent le Roc de Castel, le Roc du Loup, le Château, etc. Le gisement le plus intéressant pour ouvrir une carrière serait le Roc de Castel, qui se trouve à 700 m à l'aval du site en rive droite de la Peyne. Son volume peut très grossièrement être évalué entre 300000 et 500000 m³. Les autres gisements situés en bordure de la route qui conduit à Vailhan pourraient être également utilisés (Roc du Loup, le Château).

Il est bien évident que l'exploitation de ces buttes créera une contrainte temporaire pour la localité de Vailhan. De plus, un réaménagement des zones exploitées sera nécessaire pour préserver l'environnement de la localité.

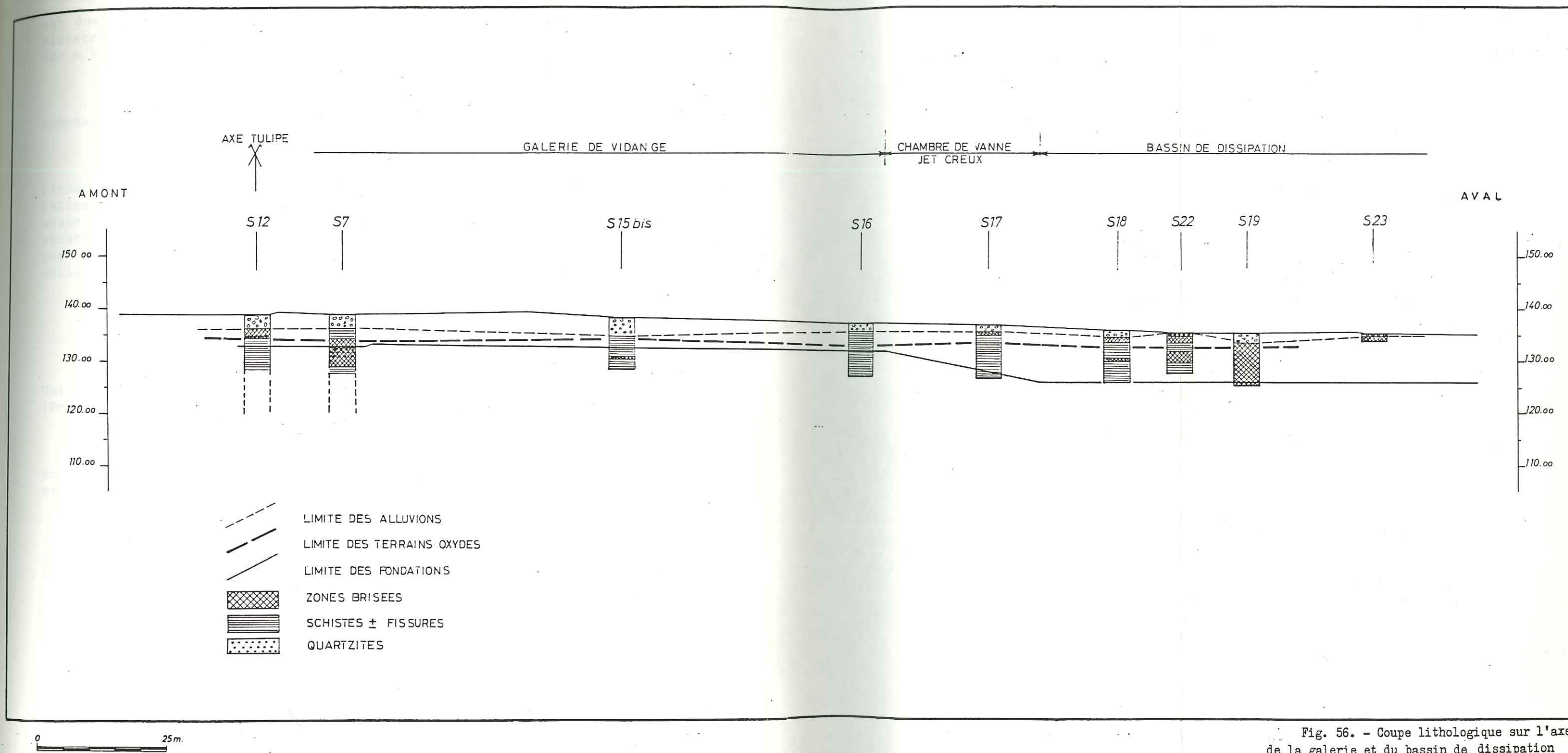


Fig. 56. - Coupe lithologique sur l'axe de la galerie et du bassin de dissipation

5.1.1.3 - Basaltes

D'anciennes coulées de basalte, dont la position en "plateau" est due à des phénomènes d'inversion de relief par surcreusement depuis le pléistocène, apparaissent sur le "Causse" à environ 250 m d'altitude et à 800 m à vol d'oiseau du site.

Ces coulées ont une épaisseur de l'ordre de 5 m à 10 m et sont composées d'une roche plus ou moins massive, parfois altérée.

Une seule coupe a pu être observée sur le versant nord du Causse (front naturel de basalte franc d'environ 10 m de haut). Plus au Nord (Mas Rolland), on a pu se rendre compte que ce matériau pouvait localement être assez hétérogène (présence de brèches, cinérites ou cendres interstratifiées). De ce fait, il nous a semblé indispensable de reconnaître par des travaux appropriés ce gisement avant de nous prononcer sur sa validité.

5.1.1.4 - Dolomies (Dévonien)

Elles constituent la partie supérieure des hauteurs dominant Vailhan et le site (rive gauche) qui culminent à 307 m (le Pioch) et 300 m (Pech Perdu).

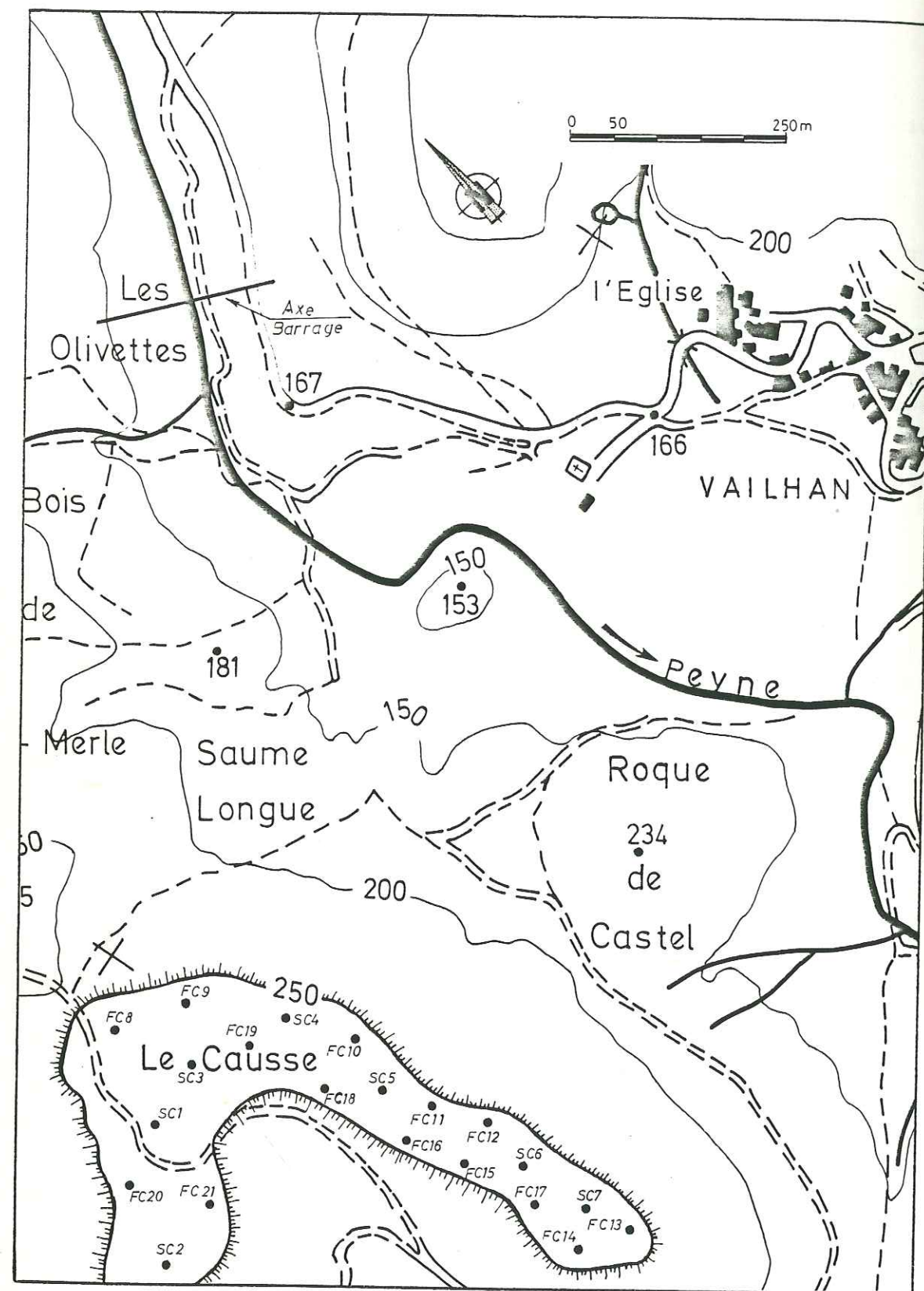
Ce sont des roches massives, rousses en patine, dont le soubassement est constitué par les schistes. Les volumes disponibles sont très importants.

Notons cependant qu'elles constituent l'aquifère de la source qui alimente le village de Vailhan en eau potable (fig. 47). L'exploitation du massif pour des enrochements risquant de perturber les conditions de captage, il nous a été demandé d'éviter d'utiliser ces matériaux.

5.1.2 - Etude des basaltes (fig. 57)

Le plateau de basaltes du Causse a fait l'objet de 2 campagnes de sondages de reconnaissance comportant 7 sondages carottés d'une profondeur de 10 m environ (FONDASOL, 1984) et 14 forages destructifs avec enregistrement de paramètres d'une profondeur variant de 6 à 14 m (SOLETANCHE, 1985), d'un essai de sautage (BEC, 1985), d'une analyse granulométrique, de mesure des caractéristiques physiques et d'un essai de compactage (S.C.P., 1985).

Fig. 57. - Plan de situation des travaux de reconnaissance
de la carrière



5.1.2.1 - Lithologie

Les sondages et forages ont montré que la coulée était constituée d'une couche de basaltes surmontant un niveau de cinérites parfois indurées, lesquelles reposaient sur le substratum schisteux.

Il s'agit d'un basalte gris sombre, avec un pseudo-litage bien marqué lui donnant un débit caractéristique en lauzes.

5.1.2.2 - Etude microscopique

Elle a été réalisée au laboratoire de Minéralogie de l'Université de Grenoble par R. COSTARELLA.

- Texture de la roche : Elle est microlitique porphyrique, avec 10 à 15 % de phénocristaux.

- Phénocristaux

. Olivine automorphe à subautomorphe, avec des figures de corrosion en doigt de gant souvent bien marquées.

. La taille des cristaux varie entre 0,5 et 2 mm.

. Toutes les sections sont altérées en iddingsite, à des degrés variables suivant la taille du phénocristal :

* entièrement iddingsitisées pour les sections de 0,5 à 1 mm

* altérées en bordure (liseré d'iddingsite) pour les sections plus importantes.

. Clinopyroxène de la variété augite, automorphe à subautomorphe en sections hexagonales ou en prismes allongés.

. La taille des cristaux se situe entre 0,5 et 1 mm.

. Les sections sont faiblement zonées et développent des macles caractéristiques h^1 ou (100).

. Quelques individus faiblement pléochroïques témoignent de la présence d'augite légèrement titanifère.

- Mésostase

. Formée de lattes d'augite (identique aux phénocristaux) de 0,05 mm associées à des microlites de plagioclase calcique (labrador ?) et à de petits cristaux cubiques de magnétite.

- Le verre est peu abondant, et ne porte aucune trace d'altération en chlorite ou argile.
- La présence d'analcime, toujours difficilement observable optiquement, peut être soupçonnée à l'état de minéral primaire dans la mésostase. En effet, quelques sections isotropes (éteintes en lumière polarisée) montrent des teintes rouges avec la lame "gypse teinte sensible". Elles témoignent ainsi d'une faible biréfringence qui serait en accord avec les caractères optiques de l'analcime.

- Altération

- L'altération se résume à la formation d'iddingsite sur les phénocristaux d'olivine.
- Le reste de la paragenèse ne semble pas déstabilisé :
 - * l'augite est intacte,
 - * le plagioclase ne montre aucune trace d'altération (damourite, séricite),
 - * la magnétite n'est jamais associée à de l'hématite.
- Le verre est parfaitement limpide et incolore.

La roche montre donc un degré d'altération assez faible, et les structures sont bien conservées.

- Conclusion

On peut attribuer le nom de basanite à analcime à l'échantillon étudié.

5.1.2.3 - Fracturation

Les mesures R.Q.D. effectuées ont confirmé que la roche était assez fracturée.

En effet, les valeurs moyennes obtenues par sondages sont les suivantes :

Sondage	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7
R.Q.D. moyen (%)	26	25	46	29	60	21	10

Soit une valeur moyenne (pour une passe de 2 m environ) de 28 % pour l'ensemble du gisement.

5.1.2.4 - Homogénéité du gisement

Les sondages et forages ont permis de préciser l'épaisseur réelle de matériaux basaltiques constituant la coulée (on a enlevé systématiquement 1,0 m de terrain stérile à toutes les épaisseurs des sondages et forages).

Sondages	Epaisseur de basalte	Forages	Epaisseur de basalte
SC1	6,2	FC8	3,5
SC2	5,2	FC9	3,1
SC3	4,9	FC10	8,7
SC4	7,8	FC11	8,3
SC5	> 9	FC12	9,1
SC6	> 9	FC13	5,8
SC7	> 9	FC14	6,0
		FC15	7,7
		FC16	7,5
		FC17	6,9
		FC18	7,3
		FC19	4,8
		FC20	0
		FC21	7,7

L'examen des enregistrements de paramètres (rapport SOLETANCHE 1985) montre qu'à poussée constante :

- la vitesse instantanée d'avancement dans les basaltes est de l'ordre de 25 m/h et dans les cinérites de 10 m/h seulement (bouchonnage de l'outil, à cause du caractère argileux de la formation);
- la vibration réfléchie est de 12 à 20 g pour les basaltes, inférieure à 8 g pour les cendres ;

- le temps pour forer 0,5 cm de basalte est en moyenne de 0,41 s alors que pour les cendres il sature rapidement l'échelle choisie à 2 s.

A l'examen des cuttings (couleur), la différenciation entre basalte et cendre est de plus très aisée.

Enfin les corrélations avec les sondages carottés ne semblent pas montrer de fortes différences.

Il n'y a qu'en FC13 que l'on retrouve des cinérites interstratifiées dans les basaltes. Ailleurs la coulée est très homogène.

L'examen des enregistrements de paramètres montre que, en FC20, il n'y a pas de basalte. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'on est dans une légère dépression en bordure du plateau et que les basaltes se sont éboulés, ou que l'on se trouve en limite d'extension de la coulée.

Les plus fortes épaisseurs de basalte sont dans la partie est de la coulée, les plus faibles au Nord Ouest et à l'Ouest. On a donc, dans l'ensemble, un massif assez uniforme.

5.1.2.5 - Estimation du volume du gisement

La surface de la coulée est d'environ 8 ha. Si l'on fait la moyenne des épaisseurs de basalte s.str. on arrive à 6,5 m. Ceci permet de dire que l'on a un gisement potentiel de l'ordre de 400000 à 500000 m³ pour un volume de digue de 320000 m³.

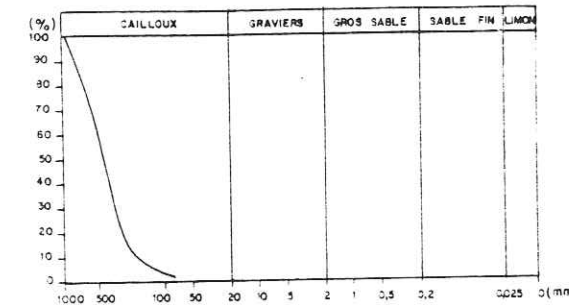
5.1.2.6 - Qualité du matériau

Un essai de sautage a été réalisé sur le flanc Sud de la coulée. A l'abattage, nous avons pu constater que le matériau obtenu contenait peu de produits fins. Les diverses analyses effectuées ont montré que (S.C.P., 1985) :

- le coefficient de forme des gros blocs (> 500 mm) est assez médiocre avec 0,15. Il a été calculé avec la formule $C = 6P/\pi \cdot \sqrt[3]{d \cdot d^3}$;

Ceci est dû, comme nous l'avons déjà évoqué en 5.1.2.1., au débit particulier de la roche, avec fractures horizontales assez rapprochées ;

- la courbe granulométrique après abattage apparaît très redressée avec le d 50 compris entre 400 et 500 mm ;



(d'après S.C.P., 1985)

- la sensibilité au gel des basaltes à l'état saturé est assez grande ; par contre, à l'état non saturé, le matériau est pratiquement insensible au gel ;
- le poids spécifique est d'environ 2,7 t/m³ ;
- les essais de compactages (2 planches) donnent des densités en place respectives de 2,1 et 2,3.

De qualité assez moyenne, ce matériau devrait cependant pouvoir constituer des enrochements valables pour une digue du type de celle envisagée.

5.2 - MATERIAUX MEUBLES

Toutes les reconnaissances effectuées n'ont pas permis de trouver de gisements acceptables excepté le "tout-venant" fourni par les alluvions de la Peyne.

6 - SISMICITE

La sismicité du site est définie dans une note succincte établie par l'Institut de physique du globe de Strasbourg dont voici les principales conclusions.

Dans le passé, il apparaît que pour le département de l'Hérault, des événements sismiques se sont produits assez près du site des Olivettes, et que l'intensité VI - VII a été atteinte.

En ce qui concerne la sismicité instrumentale, des magnitudes 4 ont été observées à moins de 20 km du futur site. Actuellement, l'activité sismique reste faible.

Malgré la proximité de zones actives (Pyrénées - Catalogne), le département n'est cependant pas classé parmi les zones dans lesquelles les règles PS 1969 doivent être appliquées.

7 - CONCLUSION

Cet avant-projet détaillé montre bien le degré de précision auquel il faut arriver pour pouvoir se prononcer définitivement sur un site. Ce degré est fonction du type de barrage envisagé. Ici, une digue en enrochements avec masque amont (puisque'il n'y a pas de matériaux pour noyau) s'intègre parfaitement au site d'un point de vue fondation. C'est en fait le type d'ouvrage le plus simple, quand on dispose d'une carrière valable à proximité. Le géologue a choisi les basaltes puisque, parmi d'autres roches, il apparaît qu'ils sont de qualité et en quantité suffisantes, et que leur exploitation est celle qui aurait le moins d'impact sur l'environnement. Enfin, que ce soit sur le site ou en cuvette, il n'y a pas de problèmes particuliers d'étanchéité (tranche altérée et décomprimée sous l'ouvrage mise à part) et un voile traditionnel devrait empêcher toutes infiltrations préjudiciables.

Mais dans un tel contexte, on pouvait également envisager un ouvrage rigide. Dans ce cas, l'approche géologique n'était plus la même, un ouvrage de ce type ne s'adaptant pas aussi facilement à un substratum schisteux. Nous allons donc voir maintenant de quelle façon, il faut procéder pour obtenir un degré de connaissance équivalent sur une variante de conception prenant en compte un modèle de barrage bien différent.

8 - ETUDE D'UNE SOLUTION VARIANTE

La solution variante envisagée est un ouvrage du type poids-béton, mais réalisé avec un béton sous-dosé en ciment et dont la mise en place se fait par couches successives compactées au rouleau (B.C.R.). Cette solution, nouvelle en France, semble économiquement intéressante.

Cependant, un certain nombre de sujétions apparaissent et des investigations supplémentaires deviennent nécessaires, afin surtout de préciser la qualité de la fondation, donc le niveau du fond des fouilles du nouveau projet.

8.1 - TRAVAUX COMPLEMENTAIRES

Différentes investigations ont été réalisées, à savoir :

- creusement d'une fouille en pied de versant rive gauche,
- une étude géophysique complémentaire sur la zone décapée, sur l'axe du barrage et dans l'ancienne galerie rive droite, en amont du site,
- essais mécaniques sur les carottes de sondage et sur des échantillons prélevés dans la fouille.

8.1.1 - Fouille en pied de versant rive gauche

Une zone de 45 m de long sur 25 m de large en moyenne a été décapée sur l'emprise du barrage, au pied de l'appui rive gauche, afin d'observer le substratum sous la partie alluvionnaire du thalweg et les éboulis de bas de versant. Ce travail a permis de faire un certain nombre d'observations concernant la lithologie, la structure, la fracturation (fig. 58).

- Lithologie

- En fond de vallée, le substratum relativement sain a été atteint rapidement et l'on a eu le refus du ripper aux environs de la cote 134.

Il s'agit d'un schiste sombre, noir bleuâtre.

Localement, on y retrouve des niveaux interstratifiés, plus ou moins développés, de roche massive et compacte du type quartzite, tels que ceux observés dans le sondage S5.

Ces niveaux forment d'ailleurs des "bosses" apparentes dans le fond de la fouille. De nombreux filons ou filonnets de quartz recoupent localement les schistes.

Enfin signalons des zones où la roche est plus altérée ou déformée, le long de certains plans de cassure, ou bien dans la partie tout à fait aval de la fouille.

- En remontant dans le versant, la roche est rapidement altérée à très altérée, peu consolidée et facilement rippable.

L'épaisseur apparente de la tranche d'altération est de l'ordre de 4 m entre la roche saine et le haut de la fouille.

- Fracturation

Il est nécessaire de distinguer la fracturation proprement dite du massif et les cassures ou failles affectant ce dernier.

La fracturation a été étudiée avec les méthodes de l'analyse structurale classique. Elle a fait l'objet de 2 stations de mesures, à savoir :

- le long de la route en R.G., où les affleurements sont assez fréquents (fig. 59 et 60),
- dans la fouille R.G. en pied de versant (fig. 61-62-63).

Les figures 59 et 61 représentent les pôles de tous les plans mesurés. Les figures 60, 62 et 63 sont la représentation cyclographique des plans moyens dont on peut ainsi visualiser les orientations respectives par rapport à l'axe du barrage qui est N 135° E.

Ainsi les principales familles de discontinuités sont les suivantes :

Station	Fractures	Schistosité	Failles ou cassures avec joints argileux
Route R.G.	N 166° E - 76° W N 32° E - 34° NW N 84° E - 74° NW N 125° E - 74° SW N 60° E - 80° SE	N 68° E - 46° SE	
Fouille R.G.	N 168° E - 66° W N 77° E - 46° NW N 150° E - 81° E	N 72° E - 40° SE	N 30° E - 70° E N 75° E - 80° SE N 60° E - 65° SE N 90° E - 40° S

En ce qui concerne les failles avec joints argileux, il faut noter que ces derniers peuvent atteindre 2 à 3 cm d'épaisseur et que localement on note quelques suintements.

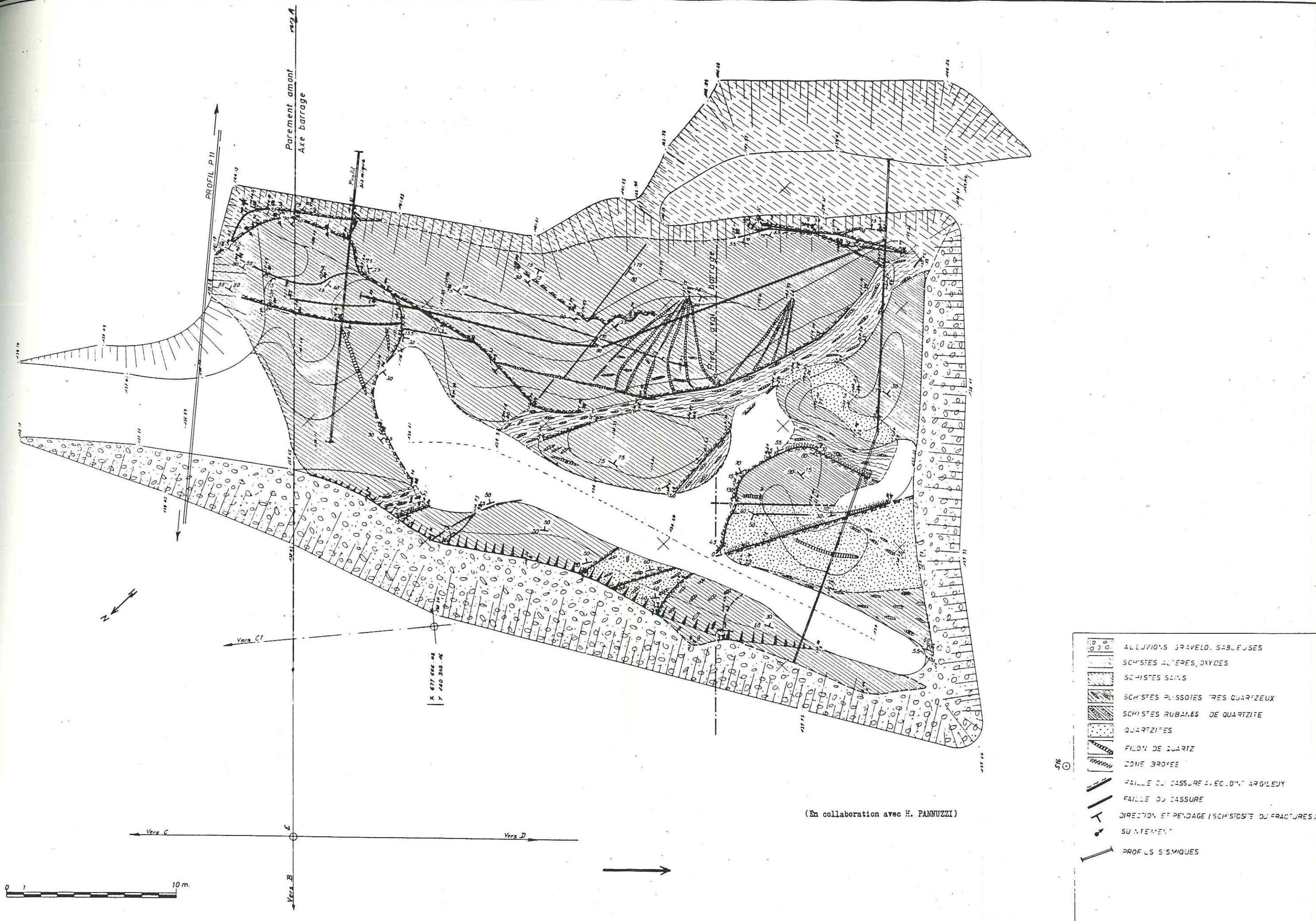


Fig. 58. - Levé géologique de la fouille rive gauche

Fig. 59. - Représentation polaire des plans de fractures le long de la route R. G. et schistosité du versant R. G.

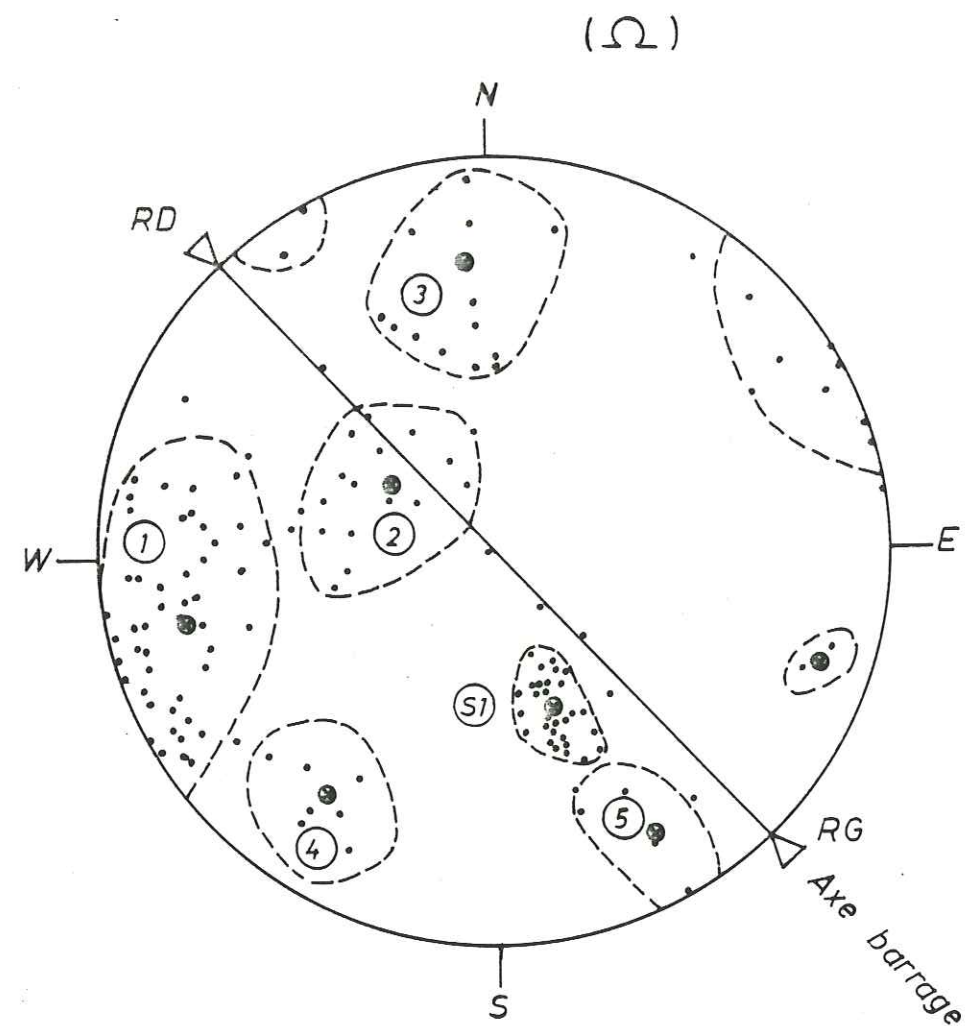
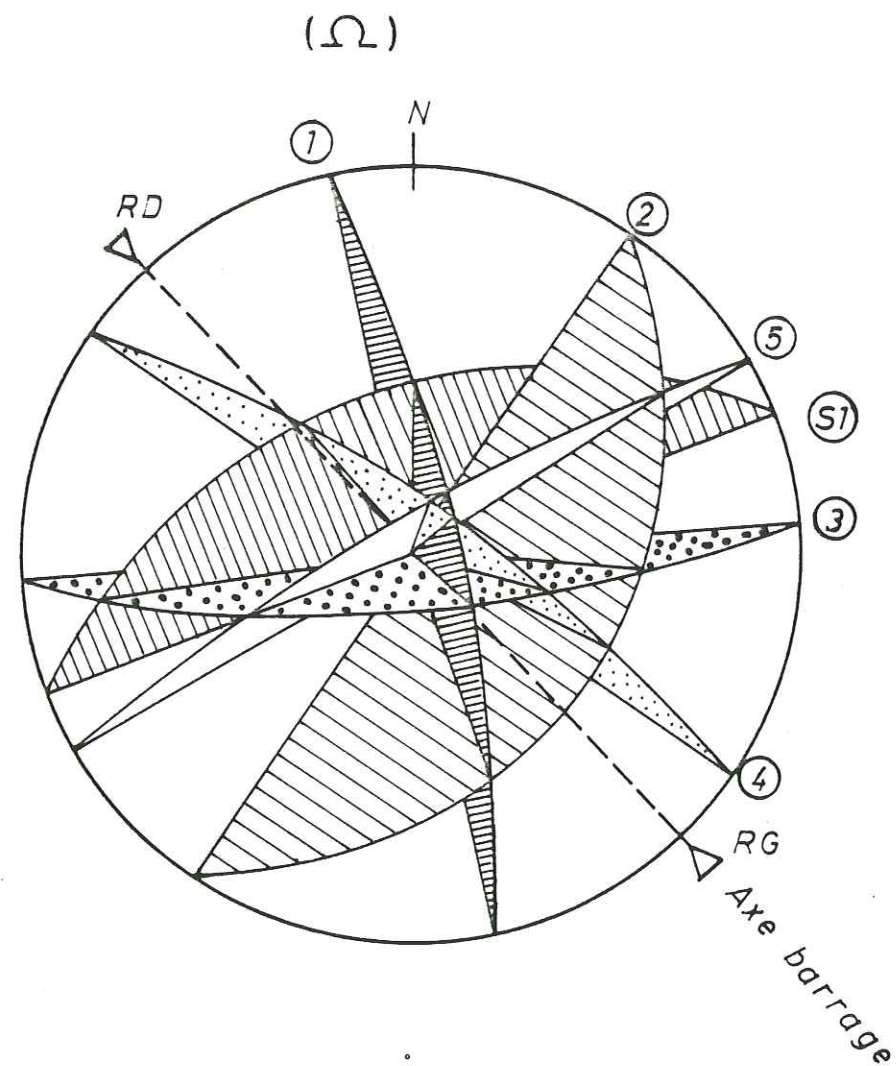


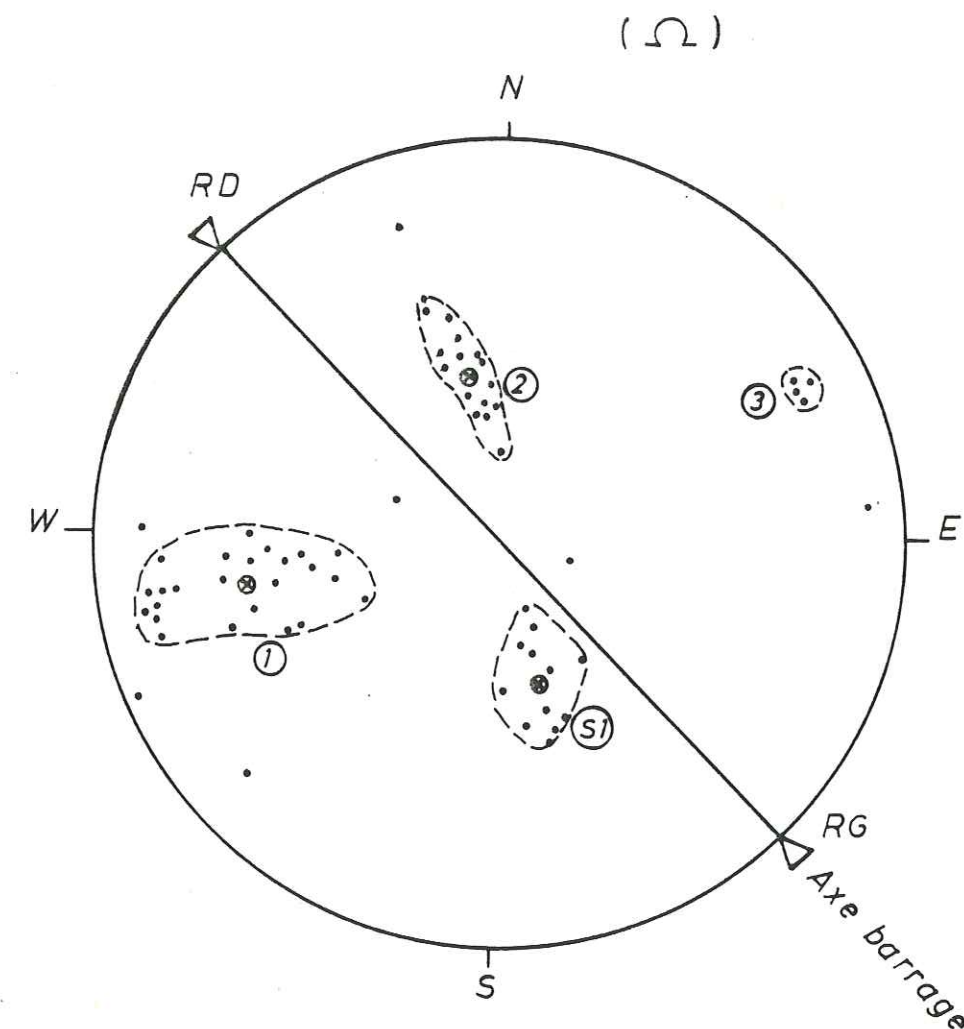
Fig. 60. - Plans de fractures le long de la route R. G. et schistosité du versant R. G.



S1	N 68° E - 46° SE	Schistosité
1	N 166° E - 76° W	FRACTURES PRINCIPALES
2	N 32° E - 34° NW	
3	N 84° E - 74° NW	
4	N 125° E - 74° SW	
5	N 60° E - 80° SE	

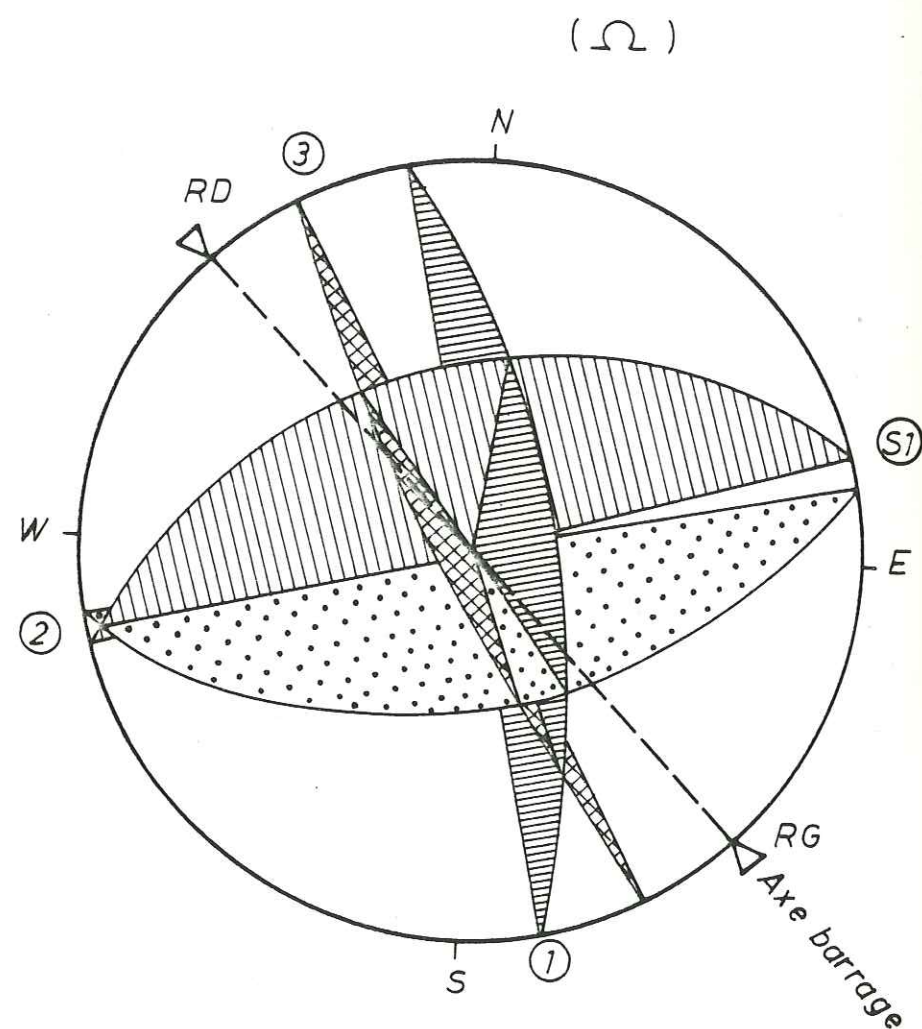
CANEVAS DE WULFF
PROJECTION DE L'HEMISPHERE SUPERIEUR

Fig. 61. - Représentation polaire des plans de fractures et de la schistosité dans la fouille en pied de versant R. G.



CANEVAS DE WULFF
PROJECTION DE L'HEMISPHERE SUPERIEUR

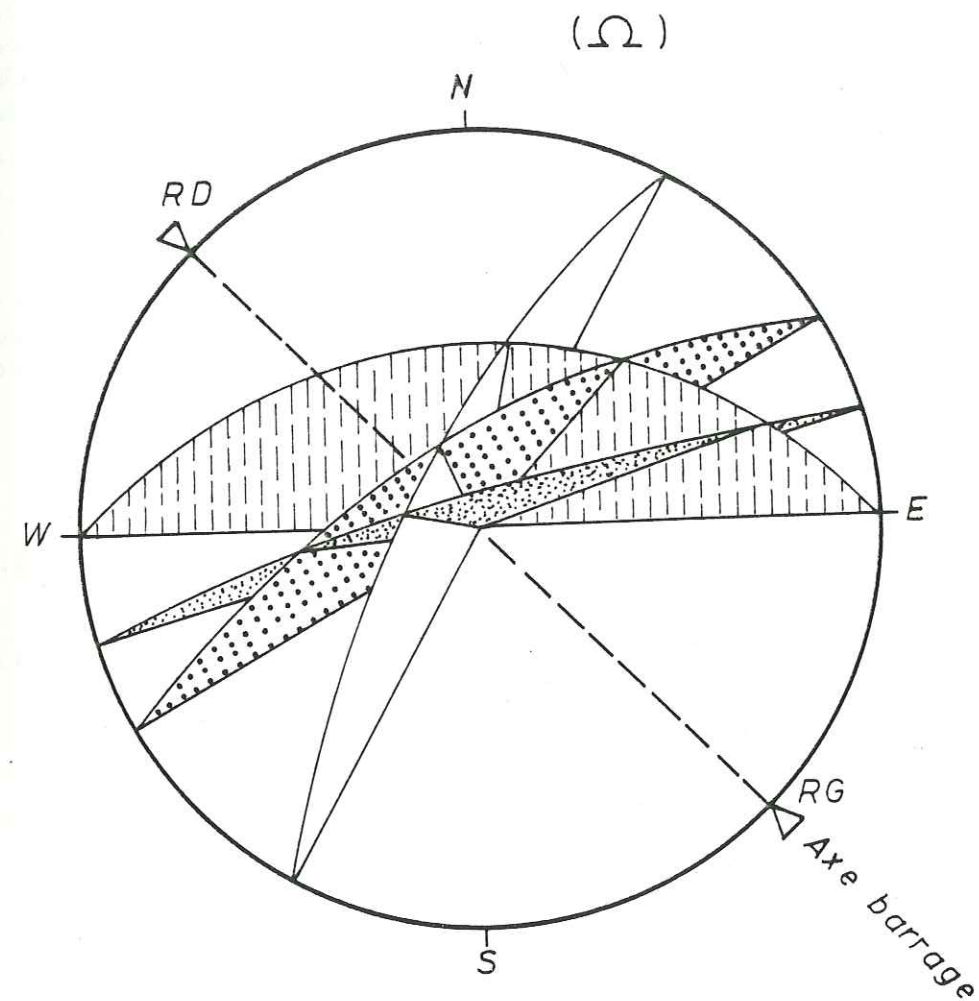
Fig. 62. - Plans de fractures et schistosité dans la fouille en pied de versant R. G.



- S1 N72°E - 40°SE
- 1 N168°E - 66°W
- 2 N77°E - 46°NW
- 3 N150°E - 81°E

CANEVAS DE WULFF
PROJECTION DE L'HEMISPHERE SUPERIEUR

Fig. 63. - Plans de failles avec joints argileux dans la fouille en pied de versant R. G.



- N 30°E - 70°E
- N 75°E - 80°SE
- N 60°E - 65°SE
- N 90°E - 40°S

CANEVAS DE WULFF
PROJECTION DE L'HEMISPHERE SUPERIEUR

Parfois, certaines discontinuités sont soulignées par des filons de quartz.

Les directions des failles ou cassures sont très proches de celle de la grande faille de Roquessels WNW - ESE qui passe en R.G. du site (cf. solution de base) à savoir N 75° E - 80° SE. Des accidents paraissant très importants sont orientés N 30° E avec un pendage de 70° E ou vertical tel F1 ou F2. Pour ce dernier, son tracé est jalonné d'une bande de schistes plissotés et déformés injectée de quartz. Ces éléments de fracturation n'ont pas entraîné de contraintes particulières pour une solution barrage poids, qui ne sollicite que peu ses appuis. Ils ont l'avantage de permettre une bonne visualisation des systèmes de fractures par rapport au barrage.

8.1.2 - Etude géophysique

Des compléments de géophysique ont été effectués sur l'emprise de la digue en béton compacté. Ils ont fait l'objet d'un rapport complet (S.E.G.G., 1986).

Ces reconnaissances ont comporté :

- quatre dispositifs de microsismique, dont 3 dans la fouille R.G. et 1 dans l'ancienne galerie de R.D. ;
- un dispositif normal sur l'axe du barrage, en travers de la vallée.

Elles ont apporté les renseignements suivants :

8.1.2.1 - Coupe sur l'axe du barrage (fig. 64)

Cette coupe permet de dresser le tableau ci-dessous :

NIVEAUX SISMQUES	Profondeur/TN en RG à la cote				Profondeur/TN en thalweg à la cote			Profondeur/TN en RD à à la cote		
	170	160	150	140	138 (S3)	140	141	150	160	170
Substratum à 2500-2800 m/s	9,0	4,5	4,0	2,5	3,0	2,5	6,5	6,0	6,0	14,0
Substratum > 3900 m/s	18,0	14,0	11,0	6,0	6,5	9,0	10,5	11,0	12,0	20,0

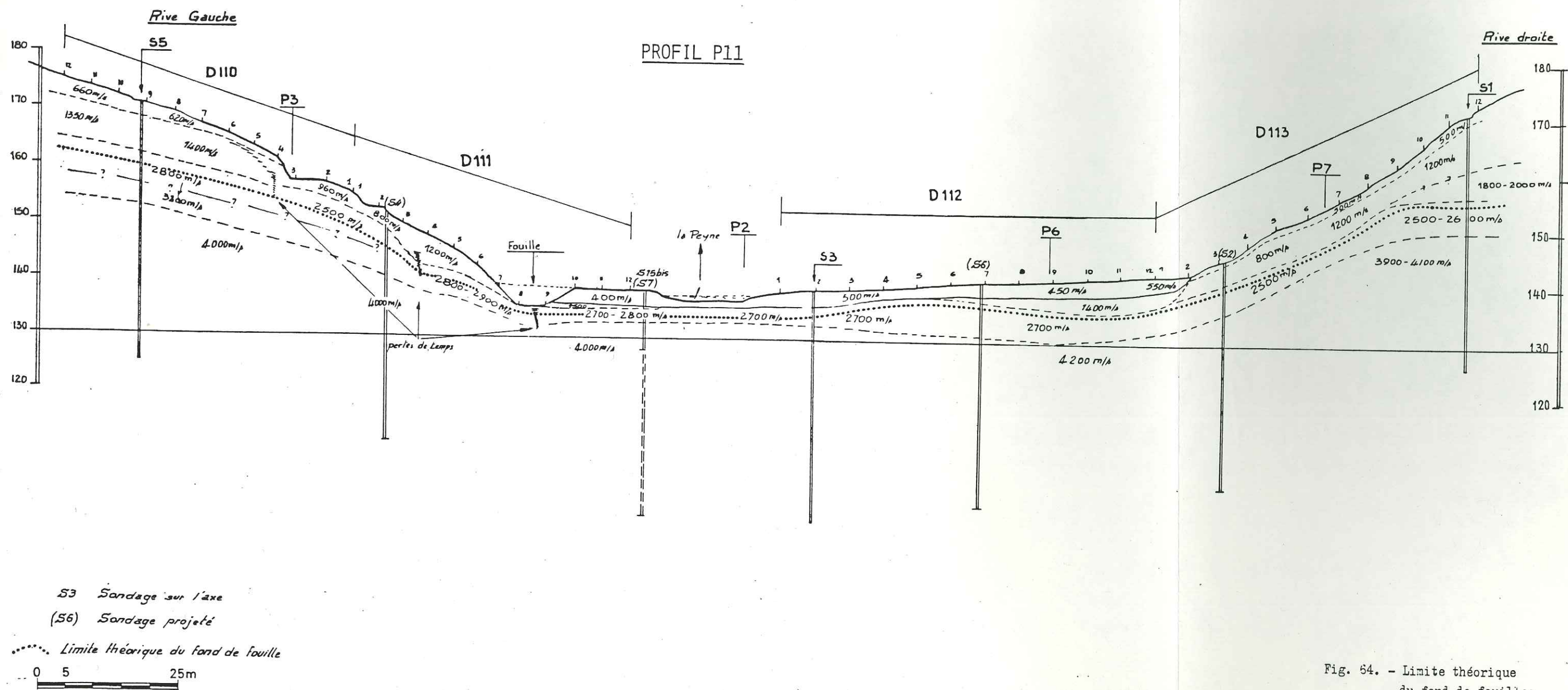
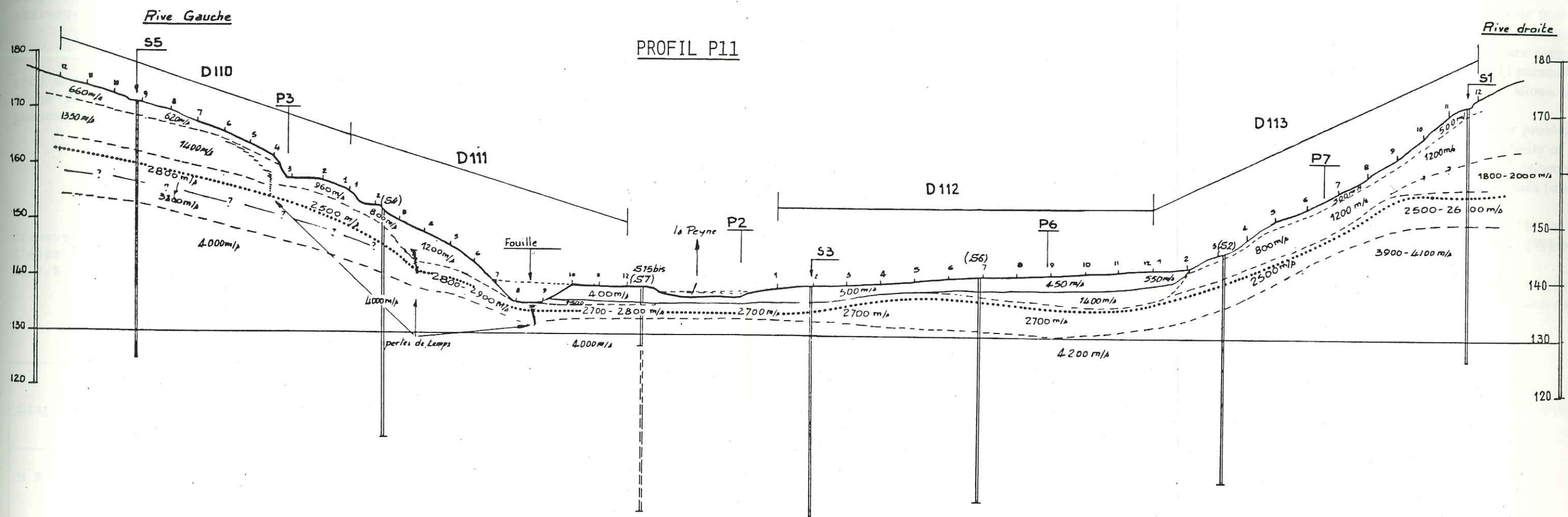


Fig. 64. - Limite théorique
du fond de fouilles



S3 Sondage sur l'axe

(S6) Sondage projeté

..... Limite théorique du fond de fouille

Fig. 64. - Limite théorique
du fond de fouilles

Il est à noter que, sur le versant rive gauche, on observe des zones de perte de temps qui pourraient correspondre à des cassures ou failles du type de celles observées dans la fouille elle-même, où elles provoquent ce type d'anomalie.

On remarque également, près de l'intersection du profil P11 avec P6, une "gouttière" dans les vitesses, avec un terrain à 1400 m/s qui pourrait correspondre à une surépaisseur d'alluvions (ancien chenal) ou à la présence d'une tranche plus altérée du substratum dans cette partie du thalweg.

Enfin à l'aplomb de la cote 170 en R.D., le substratum à 2600 m/s s'enfouit nettement dans le versant, ce qui semble témoigner d'une forte décompression et/ou altération du massif, plus sensible à ces phénomènes compte tenu de l'orientation de la schistosité.

8.1.2.2 - Microsismique

Elle avait pour but de mesurer les vitesses longitudinales et transversales pour déterminer un coefficient de Poisson ainsi qu'un module d'élasticité dynamique (E_d) calculé en prenant une densité de la roche de 2,5.

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après :

Dispositif	Position/ barrage	Position/ direction schistosité	V_L (m/s)	σ	E_d (Mpa)	E_s (Mpa estimé)
M S D 1	Perpendi- culaire	# longi- tudinal	3700-3800	0.31	26500	8000
M S D 2) M S D 3)	Parallèle	# trans- versal	3200-3300	0.29 0.33	18800	5700
M S D 4	Parallèle	"	3200	0.32	18000	5400

L'examen de ce tableau permet de faire quelques remarques.

- L'orientation par rapport à la schistosité a une grande influence sur les valeurs mesurées, les vitesses diminuant lorsque l'on recoupe le plus de plans.

- Comme pour les bétons, un coefficient correcteur de l'ordre de 3,3 doit être appliqué à E_d si l'on veut obtenir des valeurs comparables avec un module statique, soit $E_s = E_d/3,3$ (S.E.G.G., 1986).
- Les valeurs de modules d'élasticité obtenues témoignent d'une roche de qualité moyenne, assez fissurée.
- Si l'on compare les modules statiques estimés avec ceux calculés à partir des résistances à la compression simple sur des morceaux de carottes (8.1.3 ci-après), on constate une différence de 1 à 3. Ceci s'explique par le fait que les mesures sur carotte n'intègrent pas les fissures comme le font les études sismiques. La valeur "statique" sur carotte est alors plus proche de la valeur "dynamique". La mesure est donc plus optimiste sur l'échantillon (effet d'échelle).

8.1.2.3 - Indices sclérométriques

De nombreuses mesures au scléromètre ont été faites dans la fouille ou dans la galerie, afin d'estimer la résistance à la compression simple de la roche à partir de courbes d'étalonnage. Ceci ne peut évidemment être considéré que comme des ordres de grandeur. Ils sont néanmoins très proches des résultats des essais de compression simple obtenus sur les schistes (ci-après), ce qui est assez remarquable.

Lieu	Indice	R_c équivalente (Mpa)
Fouille	29 à 41	28 à 48
Galerie	21	16

8.1.3 - Essais sur les schistes

Des essais à la compression simple et à la traction (brésiliens et Protodiakonov) ont été effectués par le C.E.B.T.P. sur différents échantillons de roches pris dans les sondages.

Le tableau ci-dessous rassemble les principaux résultats :

Sondage et numéro d'échantillon	Densité (t/m ³)	R_c (Mpa)	Module (Mpa)	R_t (Mpa)	
				Brésilien	Protodiakonov
S3 1 3 2 2	2.58	27.1 8.6 48.8	24.100 - 24.000		1.7 4.7 7.0
S5 10 11 12	2.54 2.64			3.4 1.6	
S16 4 4 5 7	2.71	61.4	23.900	5.1 4.4 2.2	11.7
S15 bis 7 8 9	2.64				3.4

La résistance de la roche à la traction est faible (< 5) et les résultats des essais à la compression simple caractérisent une roche tendre.

8.2 - STABILITE DES APPUIS

La géophysique confirme, dans les versants, la présence de schistes altérés, décomprimés et fissurés (800 à 1400 m/s), surtout en rive droite.

Cette dernière, compte tenu de la schistosité pratiquement parallèle à la topographique, risque de voir se développer des glissements de type "banc sur banc" à l'ouverture des fouilles (celles-ci vont être plus profondes que celles de la solution barrage en enrochements). Il sera peut-être nécessaire de prévoir des épinglages pour pallier cet inconvénient. Ceci d'autant plus que des cassures avec joints argileux, du type de celles vues dans la fouille rive gauche doivent vraisemblablement exister dans l'appui rive droite, où elles plongeront plus ou moins selon la pente topographique.

8.3 - VALEUR DE LA FONDATION

Pour asseoir convenablement un ouvrage rigide, il est nécessaire de prévoir un décapage assez important. Les éléments permettant de préciser la profondeur du décapage sont essentiellement les sondages et la géophysique.

- Sondages

L'examen visuel des carottes (lithologie, altération, oxydation et R.Q.D.) permet de fixer déjà une profondeur à partir de laquelle la roche semble acceptable. En allant de la R.G. à la R.D. et en tenant compte des sondages à l'amont de l'axe (projetés), on a les résultats suivants (fig. 50, solution de base) :

S5	(168,71)	:	11,5 m
S4	(149,84)	:	6,0 m (projection)
S15 bis	(138,55)	:	4,5 m
S3	(138,30)	:	4,5 m
S6	(140,13)	:	4,5 m (projection)
S2	(144,62)	:	5,0 m (projection)
S1	(168,02)	:	16,0 m

- Géophysique (fig. 64)

Dans tous les cas, il sera nécessaire de chercher le niveau de fondation minimal dans les zones à 2500 - 2800 m/s. Pour des ouvrages en béton, rappelons que c'est sur des terrains à 3000 m/s que l'on s'arrête le plus couramment.

Les profondeurs indiquées à partir des sondages semblent moins optimistes que la géophysique. En fait, la réalité du décapage sera sans doute comprise entre le toit de l'horizon à 2500 - 2800 m/s et les profondeurs mentionnées ci-avant. Le contrôle du fond de fouille pendant les travaux pourra se faire par de nouvelles mesures géophysiques sur le bed-rock décapé (*).

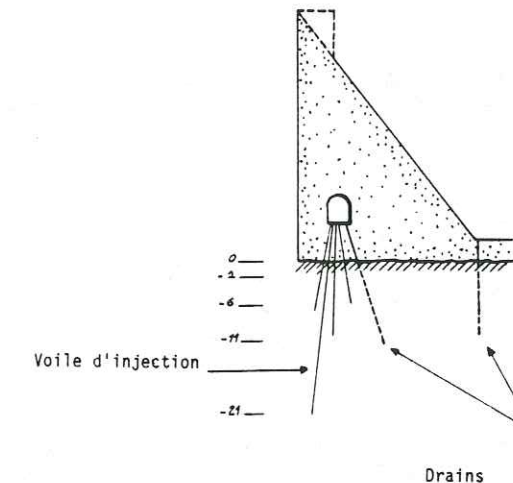
8.4 - ETANCHEITE DU SITE

Situé sur l'axe du barrage, le voile normal sera plus court, d'environ 70 m, mais ses caractéristiques seront les mêmes que pour la solution de base. Il sera foré dans un premier temps jusqu'à la cote 140 à partir du radier de la galerie, puis de 140 à 152 dans la galerie proprement dite. Cela nécessitera d'incliner les forages d'injection de

(*) Ces prévisions se sont avérées exactes lors de la construction de ce barrage en 1986-1987.

façon à pouvoir disposer les lignes du voile et d'injection de peau. Au-dessus de la cote 152, les lignes du voile seront forées à partir du couronnement à 169,5 et les forages seront verticaux.

Le voile au large pourra, quant à lui, être rabattu vers l'amont sur les deux rives sur une trentaine de mètres.



8.5 - DRAINAGE

Compte tenu du type d'ouvrage et de la nature du substratum, le système de drainage de la fondation et des appuis du barrage doit être complet si l'on veut limiter au maximum les risques de sous-pression.

Il apparaît nécessaire de prévoir :

- une ligne de drains verticaux, de 12 m minimum de profondeur et espacés au plus de 4 m, immédiatement à l'aval du voile d'injection. Forés à partir de la galerie, ces drains seront légèrement inclinés vers l'aval de façon à ne pas pénétrer le voile ;
- une ligne de drains en pied aval de l'ouvrage, de 10 m minimum de profondeur et espacés au plus de 4 m, jusqu'à la cote des plus hautes eaux ;
- éventuellement des faisceaux de drains remontant dans l'appui rive droite où les plans de schistosité sont défavorables (rôle d'écran), pour éviter une mise en pression du versant.

L'espacement des drains sera ajusté lors de l'exécution et ils ne seront forés qu'après la réalisation complète des injections.

Ils devront être disposés de façon à pouvoir être facilement nettoyés ou remis en état.

8.6 - MATERIAUX

Le barrage représente un volume de 84000 m³ ; les agrégats utilisés seront calcaires. Pour la première phase (jusqu'à la cote 140), qui représente environ 16000 m³, ils seront extraits d'une carrière existant près de Béziers (la Galiberte) dans le Jurassique supérieur. Pour le reste, une carrière sera ouverte à Roque Redonde, à 1,5 km à l'aval du site, dans les olistolites calcaires du Viséen.

8.7 - CONCLUSION

La réalisation d'un ouvrage poids en béton compacté au rouleau sur le site des Olivettes est envisageable, mais entraîne certaines sujétions, à savoir :

- la profondeur des fouilles sera assez importante puisqu'il faudra s'ancrer suffisamment dans les terrains à 2500-2800 m/s pour avoir une assise de qualité acceptable;
- la stabilité de l'appui rive droite, compte tenu de l'importance du décapage, nécessitera sans doute la réalisation de confortements ;
- le drainage de la fondation sera un élément important de la sécurité de l'ouvrage et devra être particulièrement soigné ;
- les agrégats à béton seront pris sur des sites calcaires sur lesquels l'entreprise doit effectuer un certain nombre d'essais.

Pour le reste, les conclusions faites lors de l'étude de la solution en enrochement restent inchangées.

III - TABLEAU DE SYNTHESE (Chapitre III)

Les principales interventions nécessaires lors des études d'avant-projet sont rassemblées dans le tableau ci-après (S = Site, C = Cuvette, OA = Ouvrages Annexes, PT = Profil Transversal, PL = Profil Longitudinal, GM = Gîte Matériaux). Les quantités, lorsqu'elles sont indiquées, sont des valeurs minimales ou des fourchettes.

Contenu des études	Niveau d'étude	AVANT-PROJET SOMMAIRE		AVANT-PROJET DETAILLE	
		Barrage < 20 m	Barrage > 20 m	Barrage < 20 m	Barrage > 20 m
<u>Levés topo et géol. à réaliser</u>					
- Site		1/1000 à 1/500	1/500 à 1/200		
- Cuvette		1/1000	1/500		
- Rétablissements routiers					1/2000
<u>Travaux reconnaissance</u>					
- Layons			S		S
- Déboisement part.					OA
- Tranchées ponct.		0 à 30 sur S et C	0 à 110 sur S et C		Décapage local S
- Tranchées contin. (pas ou peu d'affleurements)			1 à 6 sur S		
- Géophysique					PT sur S et OA
. Sismique		1 PT sur S	3 PT sur S		PL sur S et OA
. Electrique			3 PL sur S éventuellement		
- Sondages					
. Nombre		0 à 5 sur S	5 à 20 sur S		Sur S et GM
. Longueur		Haut.Bar.	Haut.Bar. ou +		Sur OA et Voile
- Essais sur sond.					Haut. Bar. ou +
. Lefranc		Alluvions	Alluvions		Alluvions
. Lugeon		Rocher	Rocher		Rocher
. RQD		Par caisse	Par caisse		Par caisse
- Essais sur matériaux		Qualité et volume	Qualité et volume		Essais
- Plots d'essai d'injection					spéciaux
- Document de synthèse		Rapport	Dossier préliminaire pour le C.T.P.B.		Définition voile
<u>Exemples exposés</u>					Dossier définitif pour le C.T.P.B.
- Type d'ouvrage		Cocumont (Lot et Gar.)	Montbel (Ariège)		Olivettes (Hérault)
- Hauteur		Digue souple 13 m	Digue en marne 35 m		Enroch. ou B.C.R. 36 m
- Volume stocké		1 Hm3	60 Hm3		7 Hm3

CHAPITRE IV

GEOLOGIE PENDANT ET APRES LES TRAVAUX

Si l'intervention du géologue était essentielle dans les phases d'études précédentes, sa présence est souhaitable au moment de l'exécution des travaux et lors des auscultations au cours de l'exploitation du barrage.

I - ETUDES GEOLOGIQUES D'EXECUTION

Il paraît indispensable en effet que le géologue puisse suivre, de façon discontinue, certaines étapes de la réalisation du barrage, à savoir :

- levé géologique des fouilles,
- réalisation de l'organe d'étanchéité de la digue,
- implantation du réseau de drains et de piézomètres.

A. LEVES GEOLOGIQUES DES FOUILLES

Ces levés géologiques sont généralement faits à grande échelle (1/100, 1/200, 1/500).

Ils intéresseront principalement :

- le décapage général et la clef d'ancrage pour une digue,
- la fouille poussée "au rocher" pour un barrage en béton,
- les galeries diverses (dérivation provisoire, vidange, drainage),
- le bassin de dissipation,
- les fouilles de l'évacuateur de crue et des ouvrages de prise,
- celles des batardeaux et contre-digues annexes.

Les éléments obtenus permettront d'avoir en plan la localisation précise de certaines anomalies qui, bien que traitées à la réalisation, pourraient par la suite avoir une influence sur l'ouvrage : failles, zones altérées, etc. Un traitement complémentaire a posteriori pourrait être plus facilement envisagé en cas de désordre apparaissant lors de l'exploitation de l'ouvrage.

Ce type de levés n'intervient que pour des ouvrages importants. Pour ceux de faible hauteur, pratiquement jamais utilisé, il est parfois remplacé par une simple visite de contrôle. Ceci est d'ailleurs extrêmement regrettable.

B. SUIVI DE LA REALISATION DES ORGANES D'ETANCHETTE

Quel que soit le type de dispositif retenu (clef d'ancrage, injections, paroi moulée, tapis), le géologue devra veiller à sa mise en place et fixer, à l'avancement, la profondeur définitive à laquelle il doit s'arrêter, sans se contenter d'une cote fixée préalablement. La réalité géologique conditionne l'exécution du projet.

Pour les petits ouvrages notamment, lorsqu'il n'y a qu'une clef d'ancrage comme organe d'étanchéité pour la digue, il faudra contrôler que celle-ci est adaptée à d'éventuelles anomalies locales (surépaisseur d'alluvions par exemple) et qu'on ne laisse pas en fond de fouille un niveau, même très mince, au travers duquel les eaux de la retenue pourraient percoler sous la digue.

Il en est de même pour un tapis, qui devra être dessiné selon la position exacte des zones perméables.

Pour la réalisation d'importants voiles d'étanchéité, les techniques et modalités d'injection (géométrie du voile, importance, espacement et profondeur des forages, nature des coulis, zone de traitement spécial, inclinaison des forages, pressions d'injections et de refus, etc.) seront ajustées, par rapport au projet initial, avec le géologue, qui en principe a la meilleure connaissance physique du site.

C. DEFINITION DU RESEAU DE DRAINS ET DE PIEZOMETRES

Le géologue devra prendre part à la mise au point et à l'adaptation des réseaux de drains et de piézomètres. Son expérience du terrain lui permettra d'orienter le projeteur sur l'implantation, les dimensions et le nombre de ces dispositifs, afin qu'ils aient la meilleure efficacité.

D. EXEMPLE D'ETUDE

L'exemple choisi l'a été parmi quatre barrages dans les départements du Tarn, de l'Aude et de l'Hérault à la construction desquels nous avons collaboré.

BARRAGE DE LAPRADE (AUDE)

Avec cet exemple, nous allons mettre l'accent sur le traitement des fondations du barrage et sur la démarche suivie pour arriver à un résultat satisfaisant.

1 - INTRODUCTION

Le barrage de Laprade, dans le département de l'Aude, est situé sur la rivière de la Dure, à l'extrémité sud de la Montagne Noire (fig. 65), entre Mazamet au Nord et Carcassonne au Sud. il a été réalisé en 1983-1984. C'est une digue en matériaux meubles dont l'étanchéité est assurée par un noyau vertical, épais, constitué des produits d'altération du substratum granitique (arène et gore).

D'une hauteur de 27 m, l'ouvrage stocke 8,8 Hm³ à la cote 770. Sa longueur en crête est de 612 m. Le volume du corps du barrage est de 590000 m³.

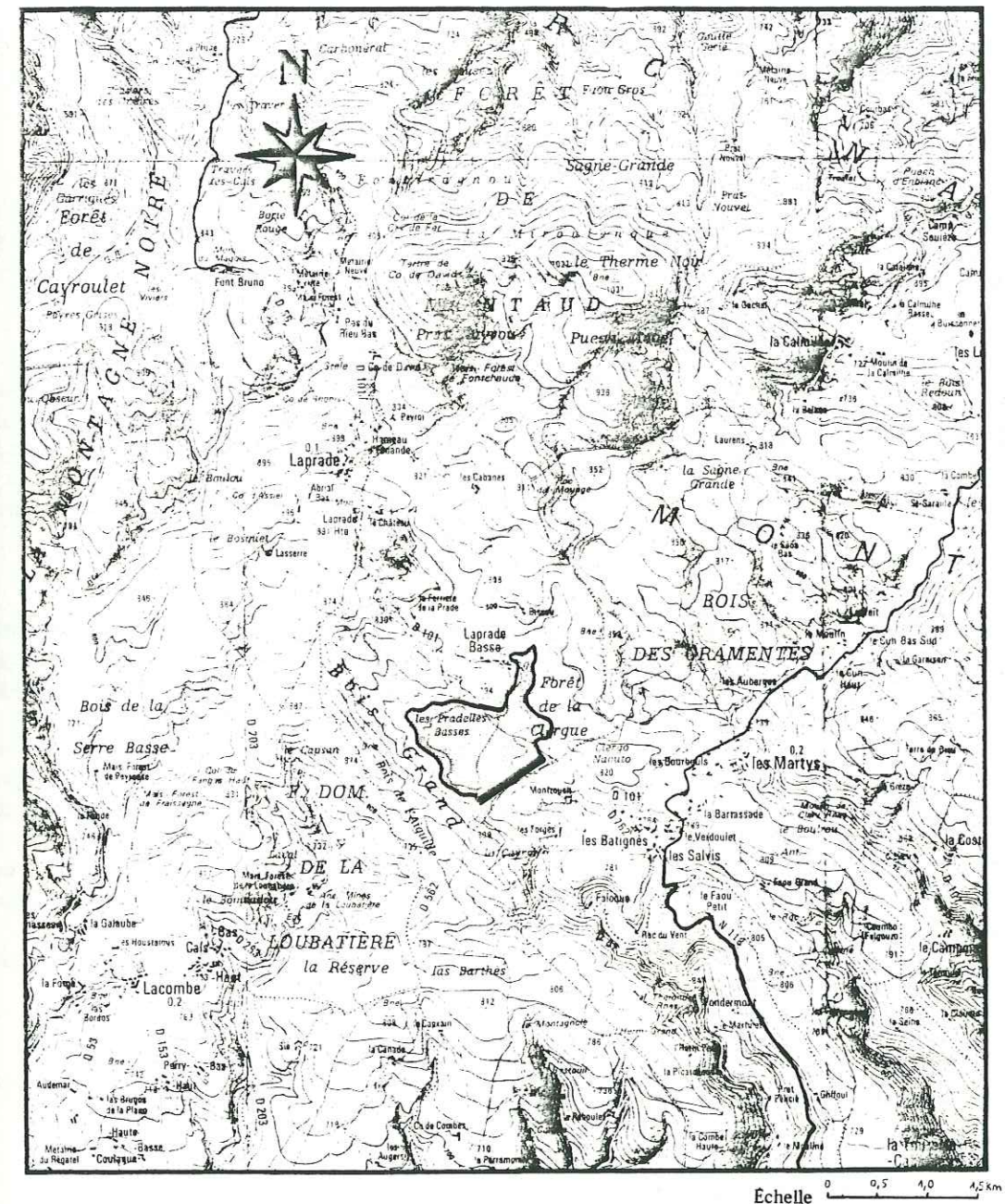
2 - CADRE GEOLOGIQUE

L'ensemble de l'aménagement se trouve dans le massif granitique des Martyrs.

Le vieux socle hercynien est formé de granite ou de granulite caractérisés par des variations importantes des phénomènes d'altération. On observe ainsi de grandes zones saines et des coins d'altération profonde très développés.

Sur le site proprement dit, il y a très peu d'affleurements, et il est souvent difficile de faire la part entre le granite en place et de grosses boules.

Fig. 65. - Plan de situation



3 - RAPPEL DES RESULTATS DES ETUDES D'AVANT-PROJET

3.1 - VALEUR DE LA FONDATION

Les études d'A.P.S. et d'A.P.D. (G. CHEYLAN, 1978) et la géophysique en particulier, ont montré que l'on avait quatre grandes catégories de terrains, à savoir :

- arène et gore (G0)	]	700 à 1700 m/s
- granite altéré à très altéré (G1)	]	
- granite sain fissuré (G2)	:	3100 à 3750 m/s
- granite sain peu ou pas fissuré (G3)	:	4000 à 5550 m/s

Le toit du granite sain (G2 ou G3), susceptible de servir d'assise à un barrage rigide se trouve, pour la moitié de l'ouvrage, à une profondeur trop importante (supérieure à 15 m) qui exclut la solution d'un barrage béton.

On ne peut donc concevoir sur le site qu'une digue souple, qui pourra s'accommoder de l'hétérogénéité lithologique. En effet, la structure géologique montre trois zones profondément altérées dessinant des "sillons" parallèles à la vallée, l'un en thalweg, les autres à mi-versants, séparés par des "rides" qui sont des remontées du granite sain.

Les sillons rive droite et central sont formés d'arène et de gore (G0), le sillon rive gauche, de granite altéré (G1) et cela sur au moins 15 m d'épaisseur. Ces sillons peuvent contenir des boules respectées par l'érosion.

Le long des rides, le substratum sain (G3) est à 3 ou 4 m de la surface en rive droite. En rive gauche, la ride est en granite sain fissuré (G2) à partir de 4 m de profondeur et le granite sain (G3) est à environ 12 m. Ces rides forment des "points durs" par rapport aux sillons.

3.2 - PERMEABILITES

Des essais Lefranc ou Lugeon ont été faits sur les sondages de reconnaissance lors des études préalables.

Ils ont montré que :

- les arènes avaient une perméabilité variant de $4 \text{ à } 8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$;

- Le gore ou le granite altéré avaient des perméabilités élevées pour des pressions faibles (0,5 à 2b) dans les tranches supérieures et diminution de la perméabilité avec la profondeur;
- Le granite sain fissuré était également perméable avec impossibilité de monter en pression (max. 4,5b) ;
- Le granite sain peu ou pas fissuré était encore perméable sur les 3 premiers mètres mais au-dessous (3 passes) les perméabilités étaient inférieures à 5 U.L.

Ainsi on peut dire que la limite inférieure des fortes perméabilités se situe 3 m sous le toit du niveau G3.

On devra donc fermer l'étanchéité sous cette ligne théorique, dans des terrains à perméabilité inférieure ou égale à 3 U.L., admissible pour un ouvrage haut de moins de 30 m.

Le voile devrait donc avoir une profondeur approximative d'une dizaine de mètres au sommet des rives, une vingtaine à mi-hauteur des versants et une trentaine de mètres en thalweg.

3.3 - PLOTS D'ESSAIS D'INJECTION

Deux plots d'essais d'injection ont été réalisés dans les zones à forte épaisseur d'arène et de gore (sillons). Ils ont été effectués avec des tubes à manchettes, aussi bien dans le terrain altéré que dans la roche plus saine. Ils comprenaient 5 lignes superficielles (0 à 10 m) et 2 profondes (10 à 25 m en A, 10 à 30 m en B). Les coulis étaient des coulis stables (bentonite) avec C/E de 0,25 à 1,5. Sur le plot A, l'arrêt de l'injection était fixé par la pression de refus ou l'absorption de 1500 kg de coulis au ml. Sur le B, l'absorption a été limitée à 465 kg de coulis au ml et le nombre de phases d'injection réduit de 4 à 2.

Les principaux résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-après :

Profondeur (m)	Injection de G0 (kg/m)			Injection G1-G2-G3 (kg/m)			Injection totale	
	Plot A	Plot B	P.refus (b)	Plot A	Plot B	P.refus (b)	Plot A	Plot B
0 - 10	511.3	414.5	4 à 7			4 à 11		
10 - 15			9	184.1	226.6	16		
25 (A)								
15 - 30 (B)			12 à 17	16.7	69.8	21 à 31		
0 - 30							365	265.7

On doit noter que, pour le traitement profond G2-G3, les tubes à manchettes ne semblent pas utiles et pour ces zones, il faudra revenir à des injections classiques (par passes de 3 m en descendant). Pour le traitement de G0 - G1 (assimilables à une roche "meuble") les tubes à manchettes ont donné des résultats satisfaisants.

La diminution de la perméabilité est sensible, sur l'arène et le gore au plot A, alors qu'il n'y en a pas au plot B. Ceci est dû aux valeurs de refus fixées. Pour les couches profondes, les 2 plots ont eu la même efficacité. Ceci apparaît sur le graphique de la figure 66.

4 - ORGANES D'ÉTANCHEITÉ RÉALISÉS

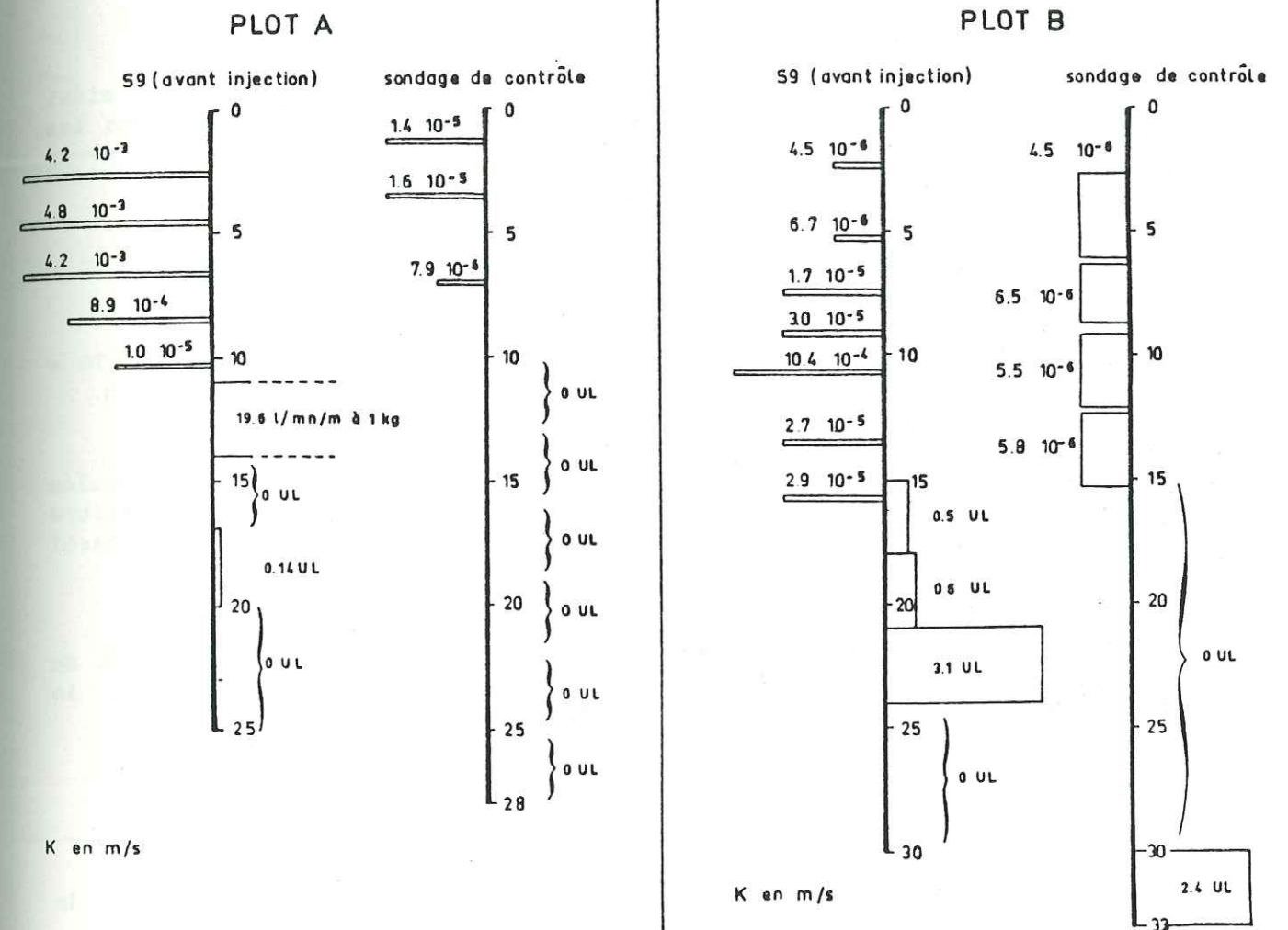
4.1 - CHOIX DU TRAITEMENT

Compte tenu de la structure (3 sillons remplis de gore et contenant parfois des boules plus massives) et des résultats des plots, trois solutions de traitement d'étanchéité de la fondation avaient été envisagées : injections seules, paroi moulée seule, paroi moulée et voile d'injection (G. CHEYLAN, 1978).

Injections seules

Les plots d'essais ont montré la nécessité de faire 5 lignes de forages injectées, assez profondes au droit des sillons pour avoir un traitement efficace. Dans un premier temps, cette solution est apparue comme la plus intéressante (A.P.D.). Le traitement des premiers mètres restait cependant assez difficile.

Fig. 66. - Perméabilité des terrains avant et après injection sur les plots A et B



(D'après G. CHEYLAN)

Paroi moulée seule

Avec cette formule, le risque était grand d'avoir, pendant le chantier, d'importantes quantités d'excavation au trépan puisqu'on savait que des boules peu altérées étaient réparties de façon aléatoire dans les "coins" ou "sillons" d'altération.

Paroi moulée et voile d'injection

Considérant les inconvénients des deux solutions extrêmes, ainsi que les propositions de l'entrepreneur quant à la reconnaissance dans les sillons des boules de granite et à la possibilité de les détruire avant exécution de la paroi, cette solution mixte a été adoptée.

4.2 - RECONNAISSANCE DES SILLONS

Le plus important était le sillon central, d'une largeur de 70 m (dans la zone de forte altération) avec une profondeur maximale de 15 m.

Afin de bien définir les dimensions de la paroi moulée nécessaire pour recouper les arènes ou les gores, il a fallu reconnaître avec précision la limite du substratum sain, à partir de laquelle la paroi serait prolongée par des injections (fig. 67).

Pour ce faire, 200 sondages destructifs munis d'enregistreurs de paramètres ont été réalisés tous les 2 m, pratiquement sur l'axe de la paroi (entre les profils P8+16 et P13+34).

Les principaux paramètres enregistrés ont été :

- la vitesse de pénétration instantanée de l'outil,
- les vibrations réfléchies dans le train de tige (indice de dureté de la roche),
- la pression de poussée sur l'outil,
- la pression d'injection du fluide de circulation.

Les résultats ont été étalonnés sur les sondages carottés. Les vitesses de pénétration de l'outil surtout ont permis de définir des catégories de terrain du plus altéré au non altéré nettement différenciées, à savoir :

- | | | |
|-------------------------------------|---|--|
| - arène et gore (G0) | : | $V_p > 200 \text{ m/h}$ |
| - granite altéré à très altéré (G1) | : | $40 < V_p < 200 \text{ m/h}$ |
| - granite sain fissuré (G2) | : | $V_p < 40 \text{ m/h}$, avec pointes à 60 m/h |
| - granite sain (G3) | : | $V_p < 40 \text{ m/h}$ |

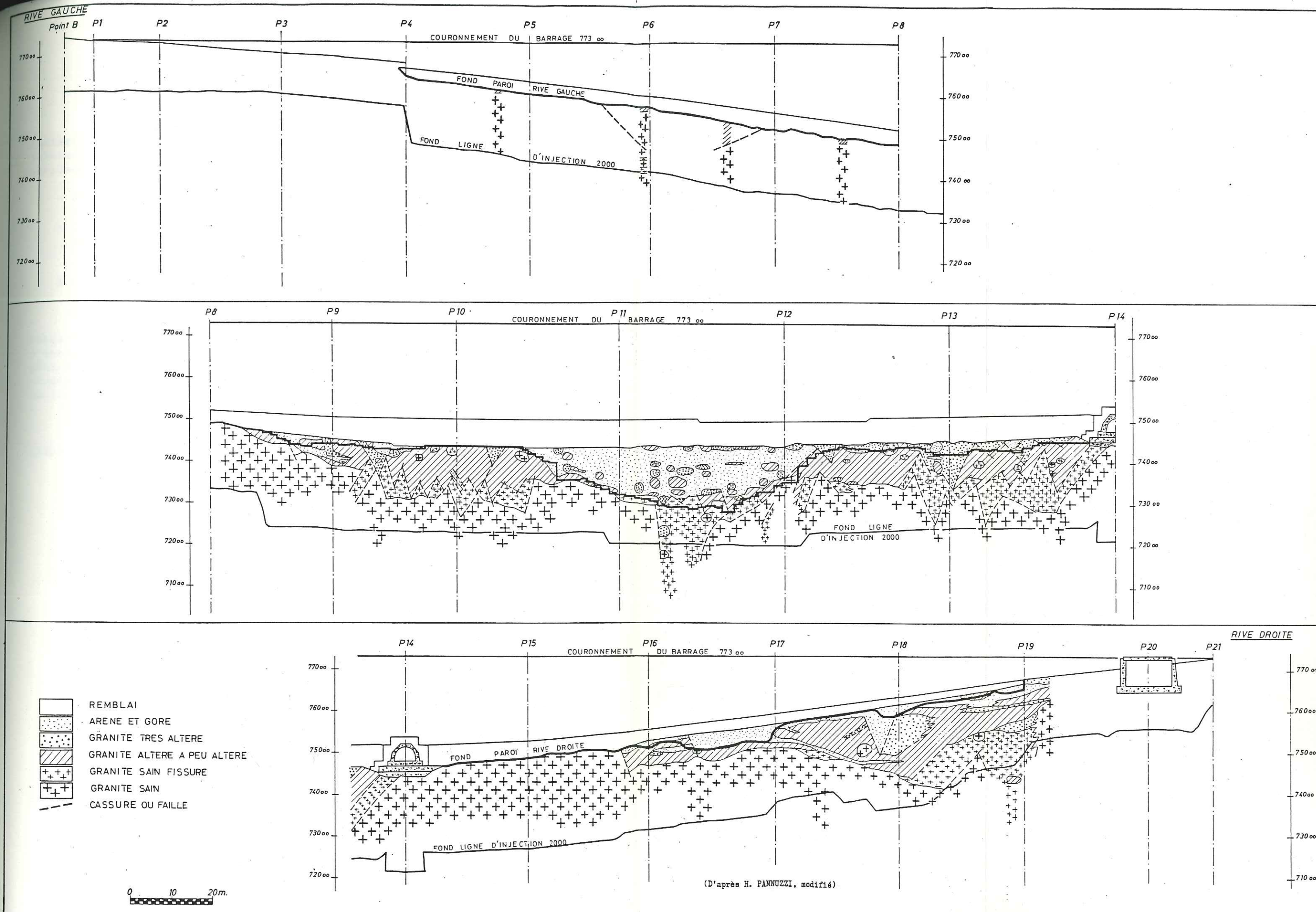


Fig. 67. - Coupe géologique au droit du voile d'étanchéité (ligne 4000) et de la paroi

Les reconnaissances ont confirmé la présence, dans le sillon central arénisé, de boules de granite plus ou moins décomposées pouvant atteindre 4 m de diamètre, que l'on voit nettement sur la coupe géologique extrêmement précise de la figure 67.

- Le sillon rive droite a été reconnu par un maillage plus lâche avec des forages espacés d'environ 4 m ;
- Quant au sillon rive gauche, compte tenu de sa cote élevée, il n'a pas fait l'objet de reconnaissances spéciales.

4.3 - MINAGE DES BLOCS SAINS EN TERRAIN ALTERE

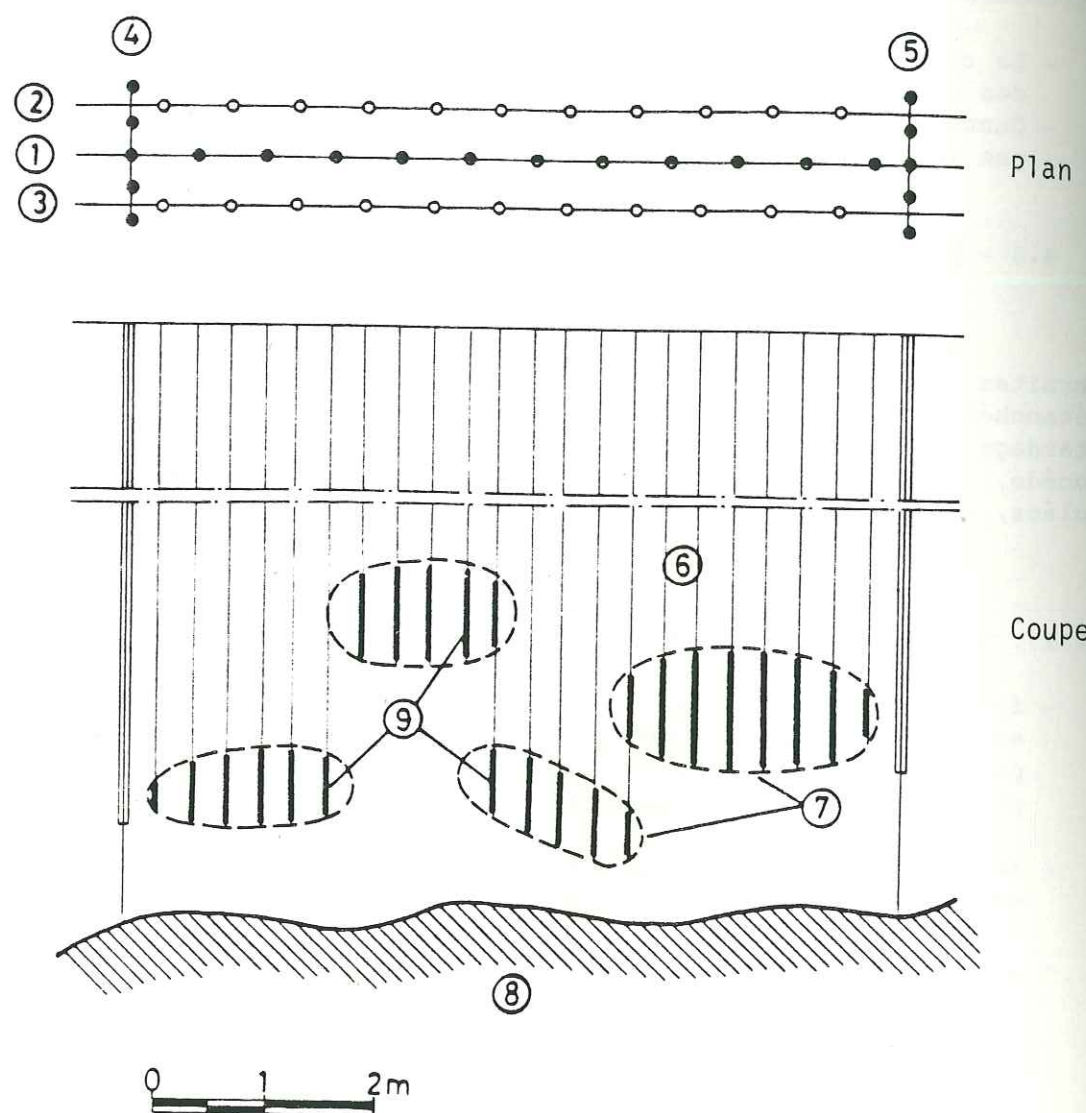
Il est bien évident que ces nombreuses boules ne pouvaient être extraites à la benne lors de la réalisation de la paroi moulée d'étanchéité. Afin de faciliter le creusement de cette dernière, un pétardage préalable pour fragmenter les boules a été réalisé. Par ce procédé, on a traité des zones riches en boules ou bien de grosses boules isolées, mais bien individualisées.

La méthodologie employée, définie avec l'entreprise SOLETANCHE (1982), a été la suivante (fig. 68) :

- forages sous l'axe de la paroi, espacés de 0,6 m, avec enregistrement des paramètres de foration (vitesse de perforation en particulier), ceci afin de connaître la disposition et la forme précise des boules (ligne 1) ;
- forages de part et d'autre de la future paroi, en quinconce, et aussi espacés de 0,6 m (lignes 2 et 3) ;
- quatre forages à chaque bout des panneaux de traitement, perpendiculairement à la paroi, espacés de 0,3 m (lignes 4 et 5). Ce sont en fait des trous de décompression qui avaient pour but de diminuer les vibrations de surface et d'obtenir ainsi une meilleure fissuration des boules après le tir (augmentation de la taille des fissures qui a facilité par la suite la désagrégation des boules) ;
- enfin, mise au point d'un plan de tir pour lequel la charge d'explosif est placée de façon sûre sur chacune des boules à disloquer.

Les résultats seront très satisfaisants, puisque sur la totalité de la fouille de la paroi, 1693 m³ seront excavés à la benne et 4,4 m³ seulement auront nécessité un trépanage coûteux.

Fig. 68. - Dispositif de pétardage



- (1) - (5) Lignes de forages
1 à 5
- (6) Gores
- (7) Boule de granite
- (8) Granite sain
- (9) Zone pétardée

4.4 - DEFINITION DES ORGANES D'ETANCHEITE

Les organes d'étanchéité du substratum ont été adaptés au terrain et à sa structure. On peut ainsi distinguer deux types de traitement de la fondation :

- étanchéité mixte avec injection et paroi moulée,
- étanchéité par injections seules en faisant varier le nombre de lignes du voile profond.

4.4.1 - Etanchéité mixte (fig. 69)

Elle a été réalisée dans le sillon de fond de vallée et dans la partie en gore du sillon rive droite. Le dispositif étant le suivant : à partir d'un merlon en matériaux meubles faisant partie du noyau épais de la digue, une paroi moulée de 0,80 à 1,0 m d'épaisseur en coulis bentonite-ciment descend jusqu'au granite altéré et fissuré (de 0 à - 16 m). Elle est prolongée, jusqu'au substratum fissuré ou sain, par 2 lignes d'injection : la ligne amont (2000) descend entre - 18 et - 24 m par rapport à la base du remblai, la ligne aval (4000) jusqu'à - 21 à - 24 m.

4.4.2 - Etanchéité par injections seules (fig. 70 et 71)

4.4.2.1 - Voile normal

Ce traitement a été préconisé en rive gauche et rive droite. On peut distinguer un traitement de peau, jusqu'à - 6 m sous le merlon, et comprenant 5 lignes de forage (1000 à 5000) espacées de 1,1 m avec une distance entre forages de 2,0 m.

Au-dessous, le voile profond est constitué soit par 2 lignes (2000 et 4000) de forages espacées de 2,2 m avec 2,0 m entre forages, la ligne amont descendant vers - 21 m et l'aval vers - 15 m, soit par 3 lignes (2000, 3000 et 4000) espacées de 1,1 m, avec le même écartement entre forages, la ligne amont allant de - 15 m à - 24 m, les lignes centrales et aval de - 12 à - 24 m. Cette dernière solution a été utilisée dans la partie du sillon rive droite non traitée par la paroi et dans un rocher altéré à sain fissuré.

4.4.2.2 - Voile au large

Dans ce cas, le traitement de peau a été réduit à 3 lignes (1000, 2000 et 3000), espacées de 1,1 m et descendant toujours à - 6 m sous le merlon. Le traitement profond n'a comporté qu'une ligne (2000) descendant de - 6 à - 12 m.

Fig. 69. - Etanchéité mixte injection et paroi moulée
(sillon fond de vallée et sillon rive droite en gore)

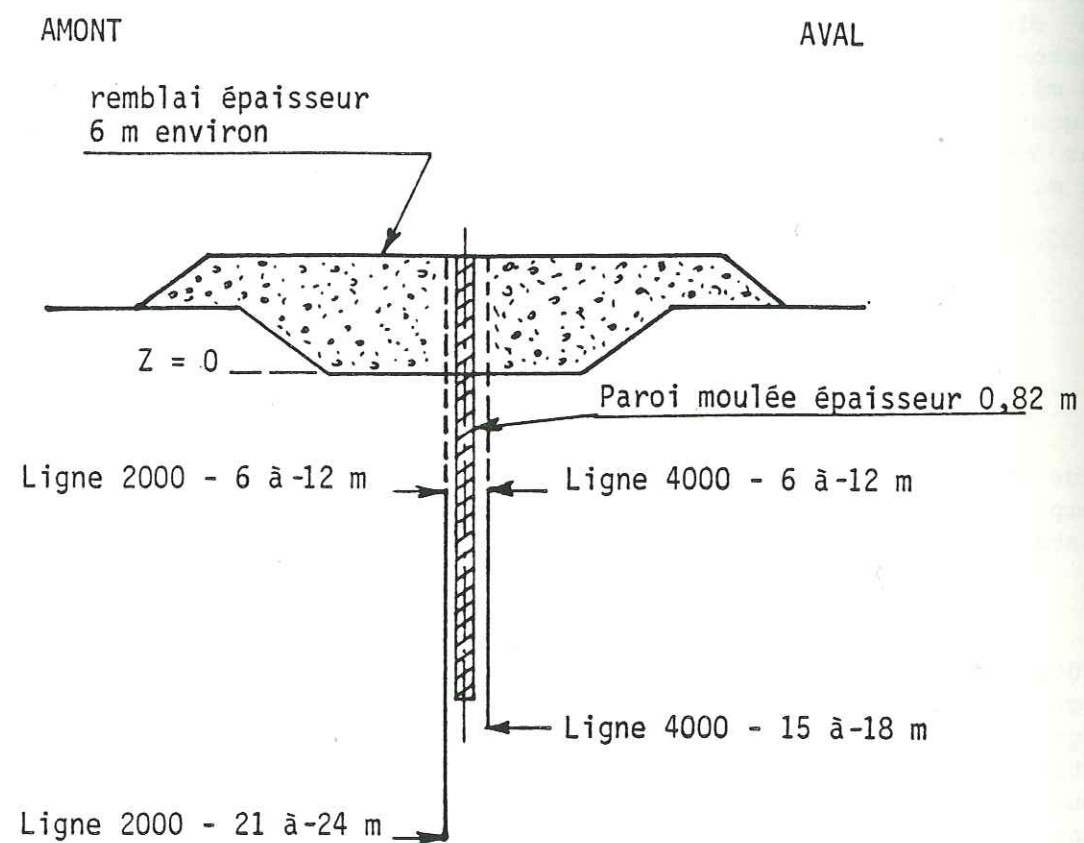
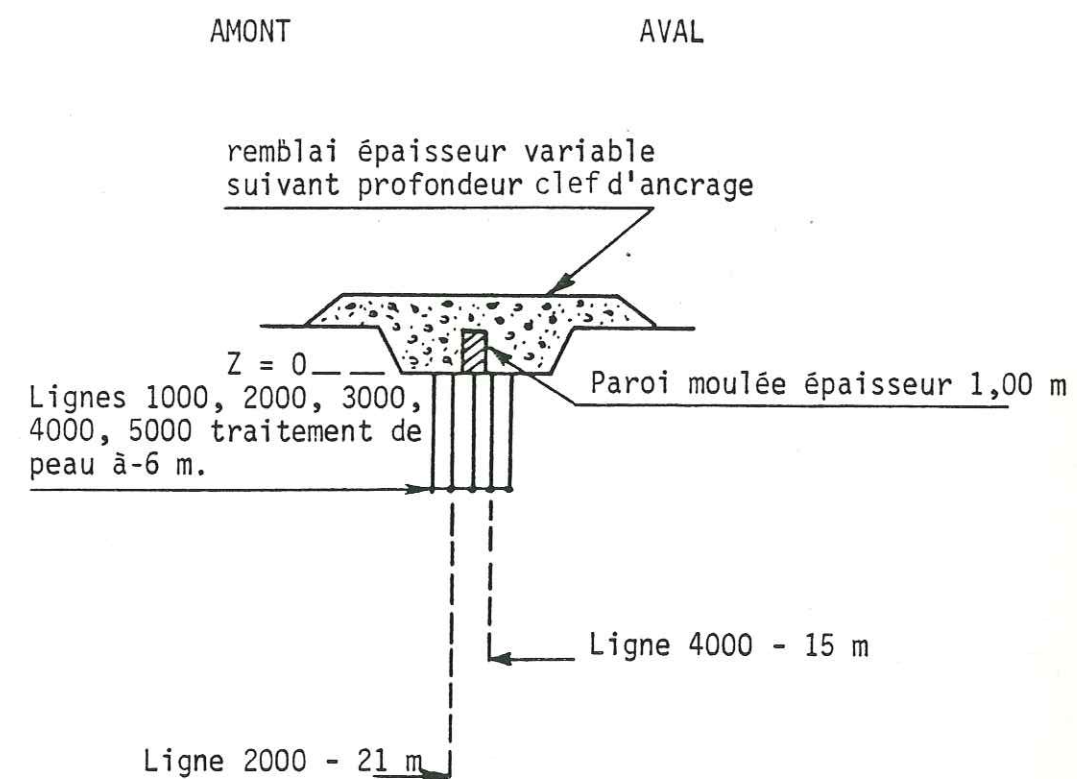


Fig. 70. - Etanchéité en rocher sain fissuré
(rive gauche et droite)



Enfin nous trouverons rassemblées dans le tableau 1 ci-après les variations de détail du type de traitement tel qu'il a été réalisé entre les différents profils du barrage.

Signalons à cette occasion que le mode d'injection a varié selon que l'on avait affaire à des terrains peu cohérents (arène-gore), pour lesquels on a utilisé la méthode des tubes à manchettes (M), ou bien des terrains plus rocheux, qui ont fait l'objet d'injections classiques (C) par passes descendantes ou localement remontantes.

Rappelons également que sur la figure 67 est matérialisée la limite inférieure des parois et de la ligne d'injection 2000.

Fig. 71. - Etanchéité en rocher altéré à sain fissuré

P16 à P21 (sillon rive droite), P9 à P10+25 et
P12 à P14

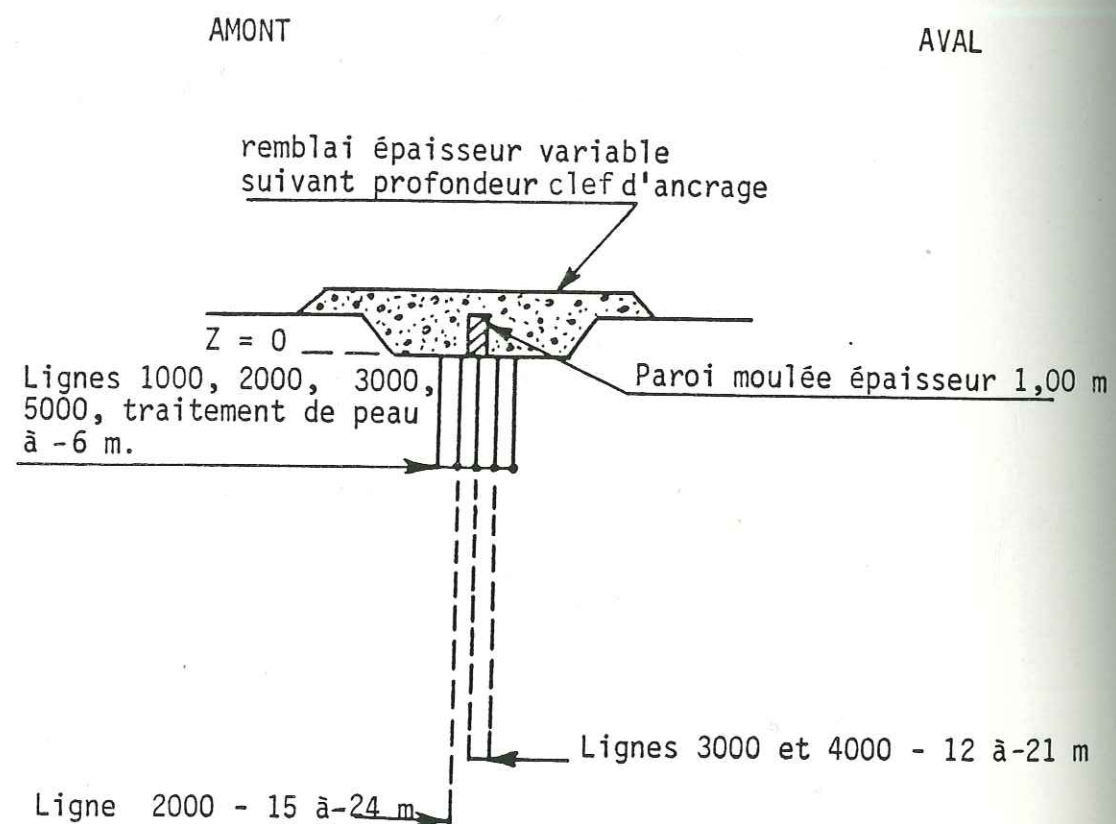


TABLEAU 1. DETAIL DU TRAITEMENT

Voile normal de peau	Nombre lignes	Espac. lignes	Espac. forages	Profondeur injection ou paroi, à partir de base remblai (R) ou décapage (D)					TYPE D'INJECTION M ou C
				1000	2000	3000	4000	5000	
P1 à P4	3	1,10	2,00	D-6	D-6	D-6			C
P4 à P8 + 13	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	C
P8+13 à P9	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P9 à P10 + 25	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P12 à P13 + 37	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P13+37 à P15+23	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	C
P15+23 à P16+16	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P16+16 à P17	2	2,20	2,00		R-6		R-6		M
P17 à P17 + 16	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P17+16 à P17+20	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P17+24 à P18+25	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P18+9,5 à P18+15,5	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P18+15,5 à P18+23,5	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P18+23,5 à P19+ 1,5	5	1,10	2,00	R-6	R-6	R-6	R-6	R-6	M
P19+1,5 à P19+24	5	1,10	2,00	D-6	D-6	D-6	D-6	D-6	M
P19+24 à P20+7,5	5	1,10	2,00	D-6	D-6	D-6	D-6	D-6	M
P20 + 7,5 à P 21	5	1,10	2,00	D-6	D-6	D-6	D-6	D-6	M
Voile normal profond									
P1 à P4	1		2,00		D-6-9				C
P4 à P8 + 13	2	2,20	2,00		R-6-15		R-6-15		C
P8 + 13 à P9	2	2,20	2,00		R-6-21		R-6-15		M & C 2000 de R-6-21
P9 à P10 + 25	3	1,10	2,00		R-6-21	R-6-12	R6-15		M & C 2000 de R-12-21
P10 + 25 à P11	2	2,20	2,00		R-6-21		R-6-15		M & C 2000 de R-12-21
P11 à P11+12	2	2,20	2,00		R-8-23		R-11-17		M & C 2000 de R-12-23
P11 + 12 à P11 + 33	2	2,20	2,00		R-12-24		R-12-18		M & C 2000 de R-12-24
P11 + 33 à P 12	2	2,20	2,00		R-9-24		R-9-16		M & C 2000 de R-9-24

TABLEAU 1. DETAIL DU TRAITEMENT
(suite)

Voile normal profond	Nombre lignes	Espac. lignes	Espac. forages	Profondeur injection ou paroi, à partir de base remblai (R) ou décapage (D)					TYPE D'INJECTION M ou C
				1000	2000	3000	4000	5000	
P12 à P13 + 37	3	1,10	2,00		R-6-21	R-6-12	R-16		M & C 2000 de R-6-21
P13 + 37 à P15 + 23	2	2,20	2,00		R-6-21	R-6-21			C
P15 + 23 à P16 + 16	2	2,20	2,00		R-6-21	R-6-15			M & C 2000 de R-9-21
P16 + 16 à P17	2	2,20	2,00		R-6-21	R-6-15			M & C 2000 de R-9-21
P17 à P17 + 16	3	1,10	2,00		R-6-18	R6-15	R-6-15		M & C 2000 de R-12-18
P17 + 16 à P17 + 24	3	1,10	2,00		R-6-21	R6-18	R-6-18		M & C 2000 de R-15-18
P17 + 24 à P18+9,5	3	1,10	2,00		R-6-24	R6-21	R-6-21		M & C 2000 de R-18-24
P18+9,5 à P18+15,5	2	2,20	2,00		R-6-21		R-6-18		M & C 2000 de R-15-21
P18+15,5 à P18+23,5	3	1,10	2,00		R-6-15	R-6-12	R-6-12		M & C 2000 de R-12-15
P18+23,5 à P19+1,5	3	1,10	2,00		R-6-18	R-6-15	R-6-15		M & C 2000 de R-12-18
P19+1,5 à P19+24	2	2,20	2,00		D-6-15		D-6-18		M & C 2000 de D-6-15
P19+24 à P20+7,5	2	2,20	2,00		D-6-9		D-6-9		M
P20+7,5 à P21	2	2,20	2,00		D-6-12		D-6-12		M

TABLEAU 1. DETAIL DU TRAITEMENT
(suite)

VOILE AU LARGE RG	Nombre lignes	Espac. lignes	Espac. forages	Profondeur injection ou paroi, à partir de base remblai (R) ou décapage (D)					TYPE D'INJECTION M ou C
				1000	2000	3000	4000	5000	
Traitement de peau P1 - 40 à P1	3	1,10	2,00	D-6	D-6	D-6			M
Traitement profond P1-40 à P1	1		2,00		D-6-12				M
VOILE AU LARGE RD	Nombre lignes	Espac. lignes	Espac. forages	1000	2000	3000	4000	5000	
Traitement de peau P21 à P21 + 40	3	1,10	2,00	D-6	D-6	D-6			M
Traitement profond P21 à P21 + 40	1		2,00		D-6-12				M
PAROI MOULEE				Profond. Hauteur Remblais (HR)		Epaisseur			
Paroi RG P3+28,8 à P8+12,3				H.R.- 1-5		1,00 m			
Paroi fond de vallée P8+12,3 à P13+35				H.R.- 5-23		0,82 m			
Paroi RD (1ère partie) P14+4,2 à P16+8,5				H.R.-2,5-5		1,00 m			
Paroi du sillon RD P16+8,5 à P16+29,8				H.R.- 4-5		1,50 m			
Paroi RD (2ème partie) P16+29,8 à P19				H.R.- 1-4		1,00 m			

5 - NORMES DU TRAITEMENT

Nous allons définir ci-après de quelle façon les injections ont été réalisées, à savoir : nature des coulis, pressions d'injection, ordre des injections, type d'injection.

5.1 - COULIS UTILISES

Il s'agit de coulis bentonite-ciment auxquels ont été ajoutées des cendres volantes et de l'Actisol (bicarbonate de soude). Selon les zones, on a utilisé les coulis suivants durant la période du 18 janvier au 25 mai 1983 :

COMPOSANTS	A1 Eq.C/e = 0,30	A2 Eq.C/e = 0,50
Eau	850 l	764 l
Bentonite	30 kg	28 kg
CLK 45	165 kg	270 kg
Cendres	165 kg	270 kg
Actisol	11 kg	16 kg

L'équivalent C/e a été calculé en prenant 100 kg de cendres = 50 kg de ciment afin d'avoir des résistances du coulis à la compression comparables à 28 jours, à celles d'un coulis de ciment pur.

A partir du 26 mai 1983, il y a eu rupture de stock pour les cendres et jusqu'au 27 juin 1983 on a utilisé alors les coulis de remplacement ci-dessous :

COMPOSANTS	A'1 C/e = 0,25	A'2 C/e = 0,5
Eau	913 l	845 l
Bentonite	25 kg	24 kg
CLK 45	230 kg	428 kg

5.2 - PRESSIONS D'INJECTION

Les pressions théoriques d'injection ont été les suivantes (fig. 72). Elles ont été choisies afin de pouvoir moduler en fonction de l'état de la roche et de l'ordre des injections.

Profondeur en m	Pression en b.		Moyenne
	Minima	Maxima	
0 - 3	2 (4)	4 (6)	3 (5)
3 - 6	3 (5)	7 (10)	5 (7,5)
6 - 9	7 (12)	10 (15)	8,5 (13,5)
9 - 12	8 (13)	12 (20)	10 (16,5)
12 - 15	9 (15)	14 (22)	12 (18,5)
15 - 18	11 (17)	18 (24)	14,5 (20,5)
18 - 21	13 (19)	21 (26)	17 (22,5)
21 - 24	15 (21)	24 (28)	19,5 (24,5)

Dans l'arène et le gore ainsi que pour les lignes 1000 et 5000 (extérieures et courtes) on appliquait théoriquement les pressions minimales dans le granite et sur la ligne 3000 (centrale) les maximales. Quant aux lignes 2000 et 4000 (intermédiaires et profondes) elles ont été injectées avec des pressions comprises entre les minimales et la moyenne pour les arènes et les gores et la moyenne et les maximales pour le granite au sens large.

A l'usage, ces pressions ont été localement augmentées (valeurs entre parenthèse et en pointillé sur la fig. 76) de façon à produire des claquages remplis de coulis, créant un réseau de filons artificiels qui augmentent la densité de la roche en place, en particulier dans les terrains meubles, qui se trouvent alors recomprimés ("serrage du terrain"). L'arrêt des injections était soit le refus (P.max.) soit l'absorption de 1500 kg/ml de coulis dans les granites fracturés ou 1000 kg/ml de coulis dans les gores.

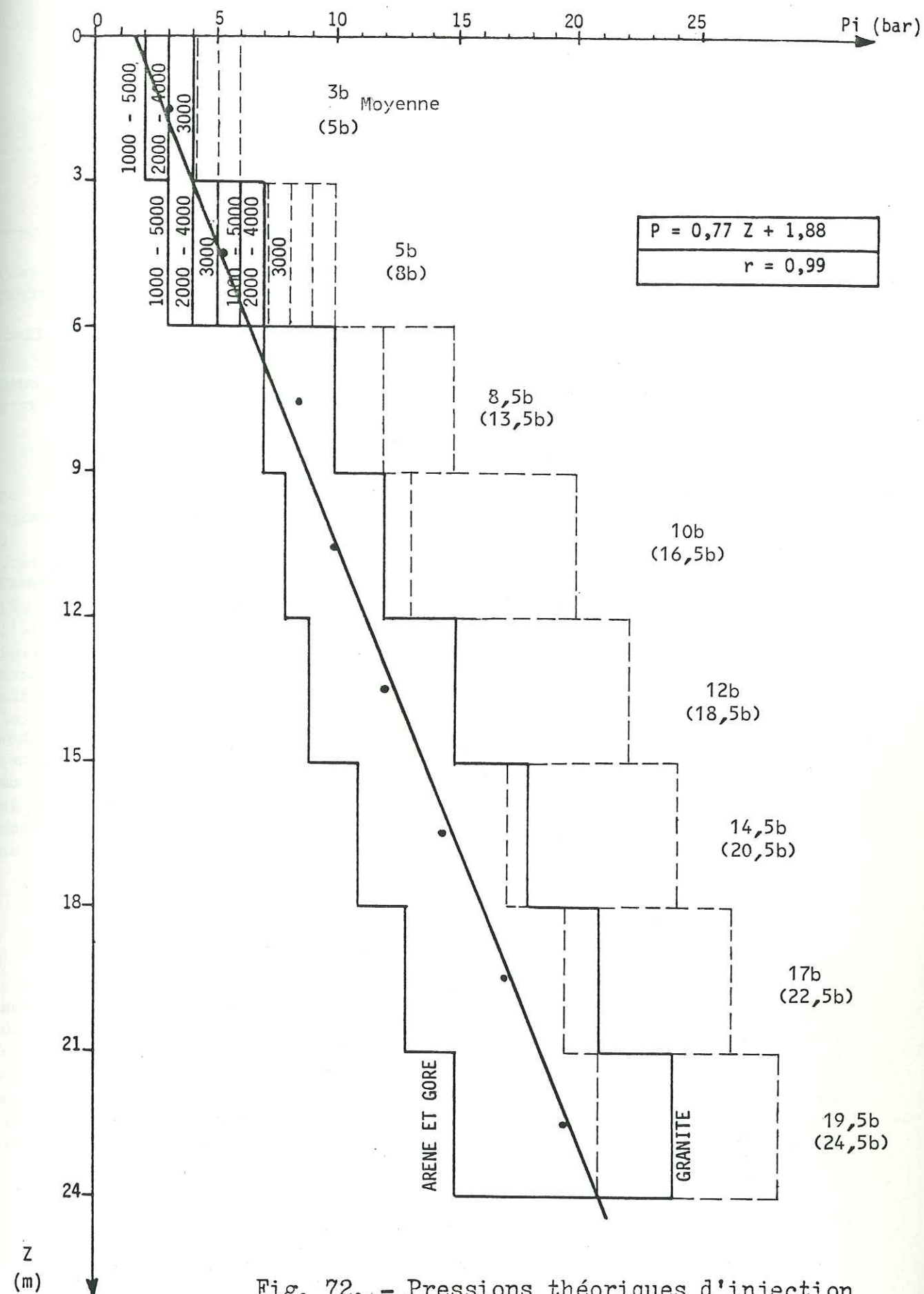


Fig. 72. - Pressions théoriques d'injection

5.3 - ORDRE DES INJECTIONS

L'ordre des injections est résumé dans le tableau ci-après :

	Lignes voile normal (par passe)	Lignes voile au large (par passe)
Traitement de peau (0 à 6 m)	5000 et 1000, Iaire et IIaire 4000 et 2000, Iaire et IIaire 3000, Iaire et IIaire	4000 et 2000, Iaire et IIaire
Traitement profond (6 à 24 m)	4000 et 2000, Iaire et IIaire 3000, Iaire et IIaire	2000, Iaire et IIaire

Les passes d'injection étaient de 3 m. Les forages primaires correspondent à un trou sur deux.

5.4 - TYPE D'INJECTIONS

Sauf emploi des tubes à manchettes, les injections ont d'abord été effectuées par passes descendantes. En effet, par passes remontantes, il aurait fallu une meilleure qualité du rocher, tant pour assurer une bonne tenue de l'obturateur que pour éviter des contournements et les remontées de coulis. Néanmoins certaines parties saines des rives gauche et droite ont pu faire l'objet d'injections en remontant (traitement profond uniquement).

6 - RESULTATS GLOBAUX

Les résultats ci-après concernent uniquement le voile normal sous le barrage et prennent en compte 1363 forages - 14424 ml et 3258 T.E.C. Rappelons aussi que les valeurs des absorptions représentent des kilogrammes ou des tonnes d'équivalent ciment au ml. Cela signifie que dans les quantités annoncées, 2 kg de cendres ont été comptés comme 1 kg de ciment (cf. 5.1). Si l'on veut cependant se faire une idée de la quantité totale de produits secs consommés, les moyennes globales données en équivalent-ciment doivent être multipliées par un coefficient de 1,47.

6.1 - VOILE TOTAL

6.1.1 - Absorption de ciment au mètre linéaire (fig. 73)

Il apparaît nettement que les fortes absorptions concernent la tranche 0 à 6 m du voile de peau et la 1ère tranche de 6 à 9 m du voile profond, pour laquelle la pression d'injection augmente nettement.

Le rôle de la pression d'injection est donc déterminant au début. En effet, l'absorption par passe augmente de 0 à 9 m. Au-delà, elle a tendance à diminuer avec la profondeur, mais de façon irrégulière.

L'absorption maximale en équivalent ciment a lieu pour la passe de 6 à 9 m avec 327 kg/ml, la minimale pour la passe 18 à 21 m avec 55 kg/ml. La valeur moyenne pour l'ensemble du voile normal est de 226 kg/ml. Si l'on compare ce chiffre avec celui d'autres barrages en terrain granitique, il est du même ordre que pour les barrages de Couesque (Massif Central) : 220 kg/ml, Sarrans (Massif Central) : 240 kg/ml, Seeuferegg (Suisse) : 252 kg/ml (GIGNOUX et BARBIER, 1955). On peut dire que l'absorption est assez élevée, comparativement à d'autres ouvrages comme Spitallam (Suisse) : 122 kg/ml, le Chambon (Isère) : 160 kg/ml. Ceci est essentiellement dû au fait qu'il y a localement des zones profondément altérées et qui ont absorbé beaucoup de coulis comme nous le verrons plus loin dans le détail.

Enfin, le coefficient de corrélation calculé entre les quantités injectées et la profondeur d'injection est significatif, puisqu'il a une valeur de 0,79.

6.1.2 - Absorption totale de ciment (fig. 74)

Si l'on considère les quantités brutes en tonnes d'équivalent ciment injectées en fonction de la profondeur, le graphique de la fig. 74 montre encore que c'est dans le voile de peau et dans la première passe du voile profond que la plus grosse quantité de produits a été utilisée.

En effet, sur les 3258 T.E.C. injectées pour le voile normal, 2592 ont été nécessaires entre 0 et 9 m de profondeur soit 79 % et 1140 pour la seule tranche 3 à 6 m soit 35 %. Les 686 tonnes restantes ont servi à traiter entre 9 et 24 m de profondeur et représentent seulement 20 % des produits.

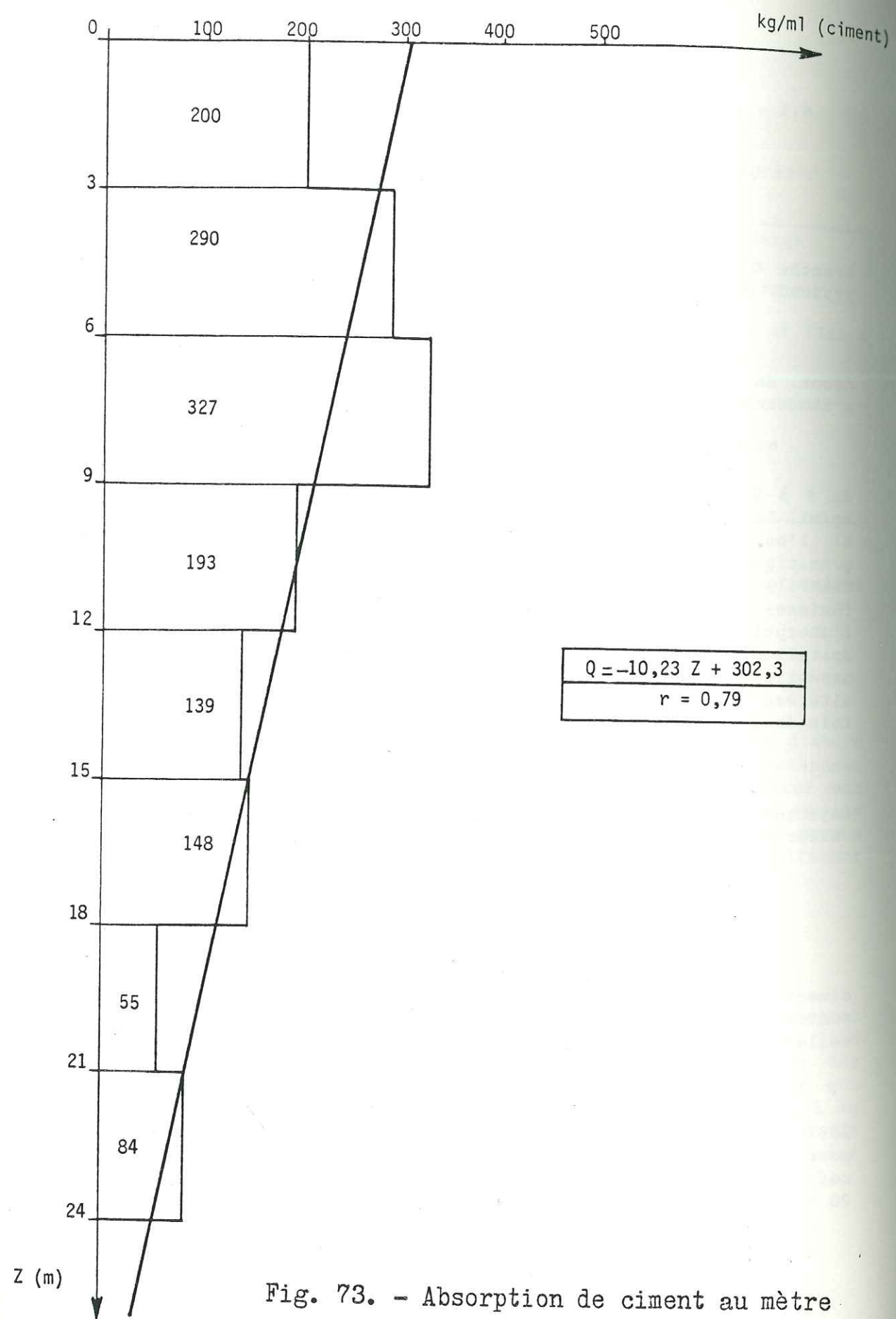


Fig. 73. - Absorption de ciment au mètre linéaire sur le total du voile

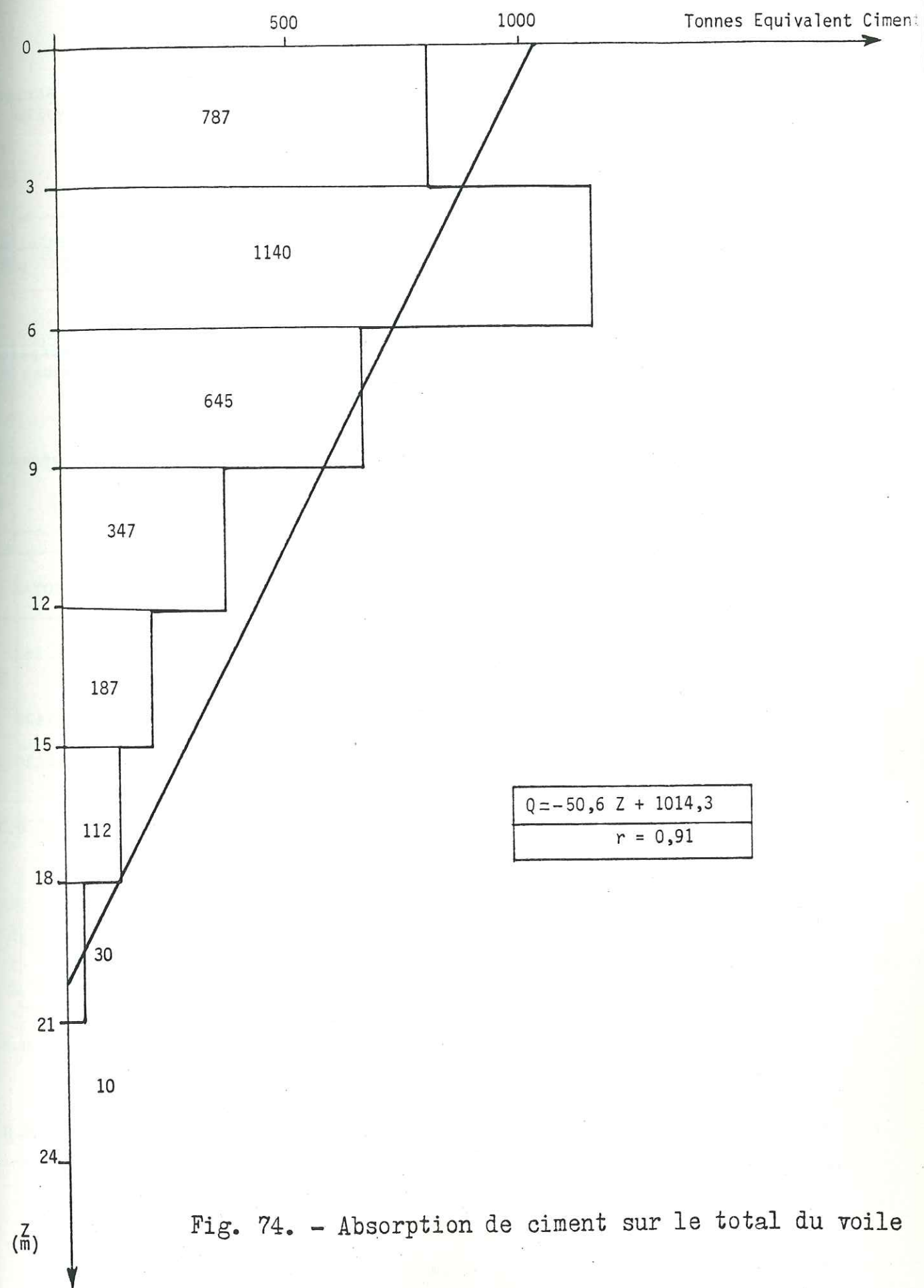


Fig. 74. - Absorption de ciment sur le total du voile

Enfin si l'on considère les injections de peau au sens strict, c'est-à-dire la tranche 0-6 m, elles représentent 59 % du total du voile.

6.2 - INJECTIONS PAR LIGNES

L'ordre des injections a été défini en 5.3. Rappelons qu'elles ont été commencées par les lignes extérieures 5000 et 1000 puis intermédiaires 4000 et 2000 et terminées par la ligne 3000.

Pour chacune des lignes, il a été représenté l'absorption d'équivalent ciment en kg/ml en fonction de la profondeur et par passes de 3 m pour le voile normal (fig. 75a à 75e).

Les principales caractéristiques de chaque ligne sont résumées dans le tableau ci-après :

N° LIGNE	1000	2000	3000	4000	5000	TOTAL
Nbre forages	280	311	272	269	231	1.363
Mètres linéaires	1713	5262	2391	3621	1437	14424
m3 de coulis	990,83	2799	2896	2761	1182,08	10629,2
m3 de coulis au ml	0,58	0,53	1,21	0,77	0,82	0,73
% de coulis A1	65,6	41,5	65,5	62,1	53,5	
% de coulis A2	34,4	23,0	34,5	37,5	46,5	
% de coulis A'1		24,5				
% de coulis A'2		11,0				
T.E.C.	302,13	838,00	888,25	851,41	378,79	3258,58
Absorption moyenne en kg/ml	176	159	372	235	264	225,9

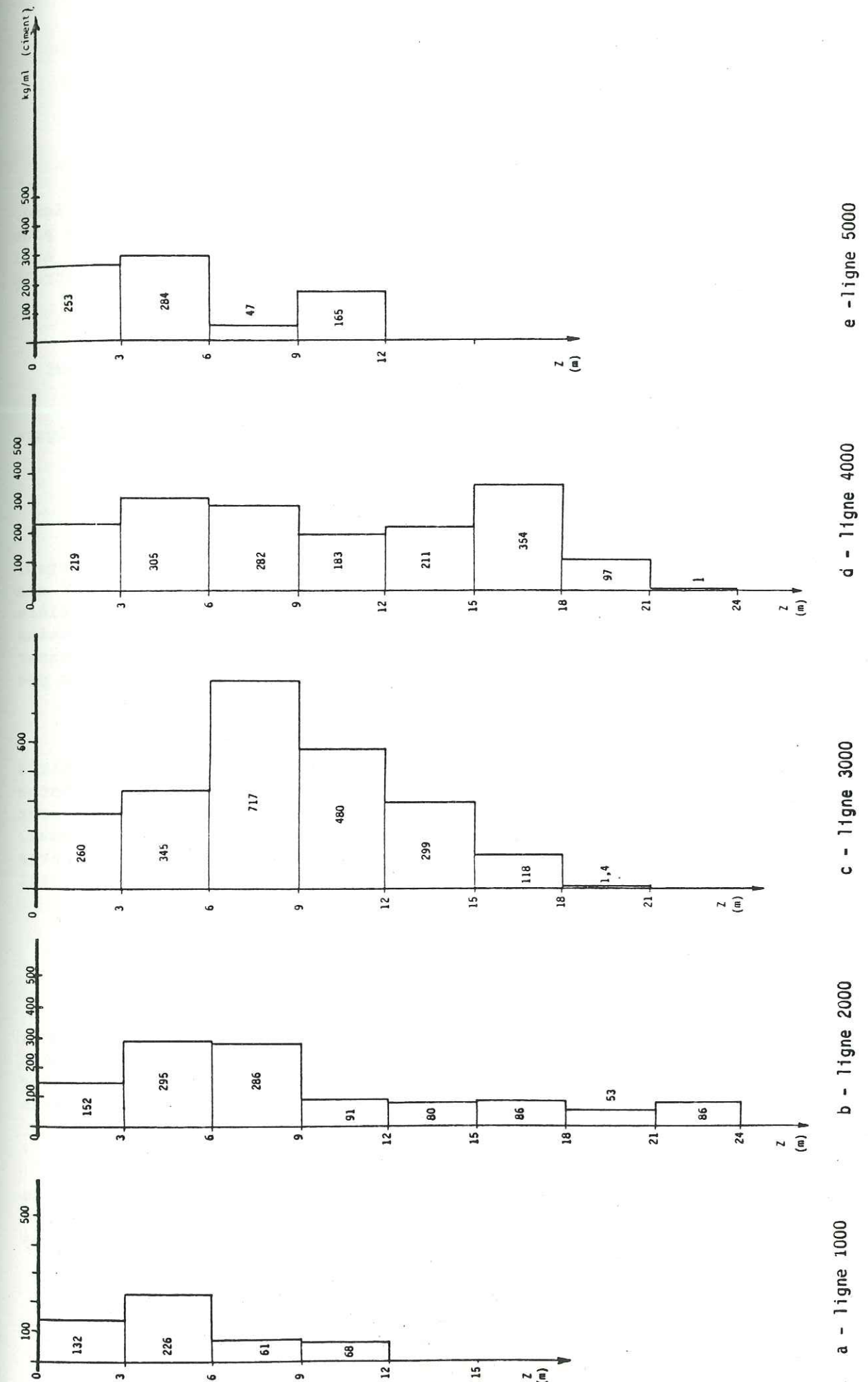


Fig. 75. - Absorption de ciment par ligne

6.2.1 - Absorption moyenne par ligne

Les quantités d'équivalent ciment absorbées par chaque ligne, telles qu'elles apparaissent dans le tableau ci-dessus, indiquent une plus faible absorption des lignes amont (1000-2000) que des lignes aval (4000-5000), et montrent d'importantes quantités pour la ligne centrale (372 kg/ml), injectée en dernier mais à une pression supérieure.

6.2.2 - Variation des absorptions par ligne avec la profondeur

Les résultats de cette variation sont synthétisés sur la figure 76.

- Voile de peau

Il a été pratiquement partout traité par tubes à manchettes. L'effet d'encagement qu'auraient dû produire les 4 lignes extérieures n'a que peu influencé l'injection de la ligne 3000. En effet, cette dernière présente des absorptions toujours supérieures aux autres. Néanmoins l'écart reste faible surtout avec les lignes 4000 et 5000. On peut penser que la pression d'injection plus forte de la 3000 a quand même été un peu "contenue" par les injections antérieures.

Il y a toujours prépondérance de la pression sur les quantités des 2 premières passes (0-6 m). Ceci s'explique par la faible charge lithostatique, la très forte altération des terrains et son comportement plus proche d'un sol dans les arènes et gores que d'un substratum rocheux. Notons enfin que de nombreuses résurgences se sont produites dans cette partie supérieure du voile et parfois assez éloignées vers l'aval (plusieurs dizaines de mètres).

- Voile profond

Le type d'injection a été le plus souvent mixte, à savoir : méthode classique ou par tubes à manchettes. Les quantités de ciment apparaissant sur les lignes 1000 et 5000 entre 6 et 12 m de profondeur correspondent à un approfondissement local des lignes de peau sous l'évacuateur de crues et doivent être considérées comme telles.

- Lorsqu'il y a 3 lignes profondes, c'est à dire dans la zone du sillon R.D., les consommations de la ligne 3000 sont encore supérieures aux autres jusqu'à 15 m de profondeur, même si elles diminuent plus rapidement.

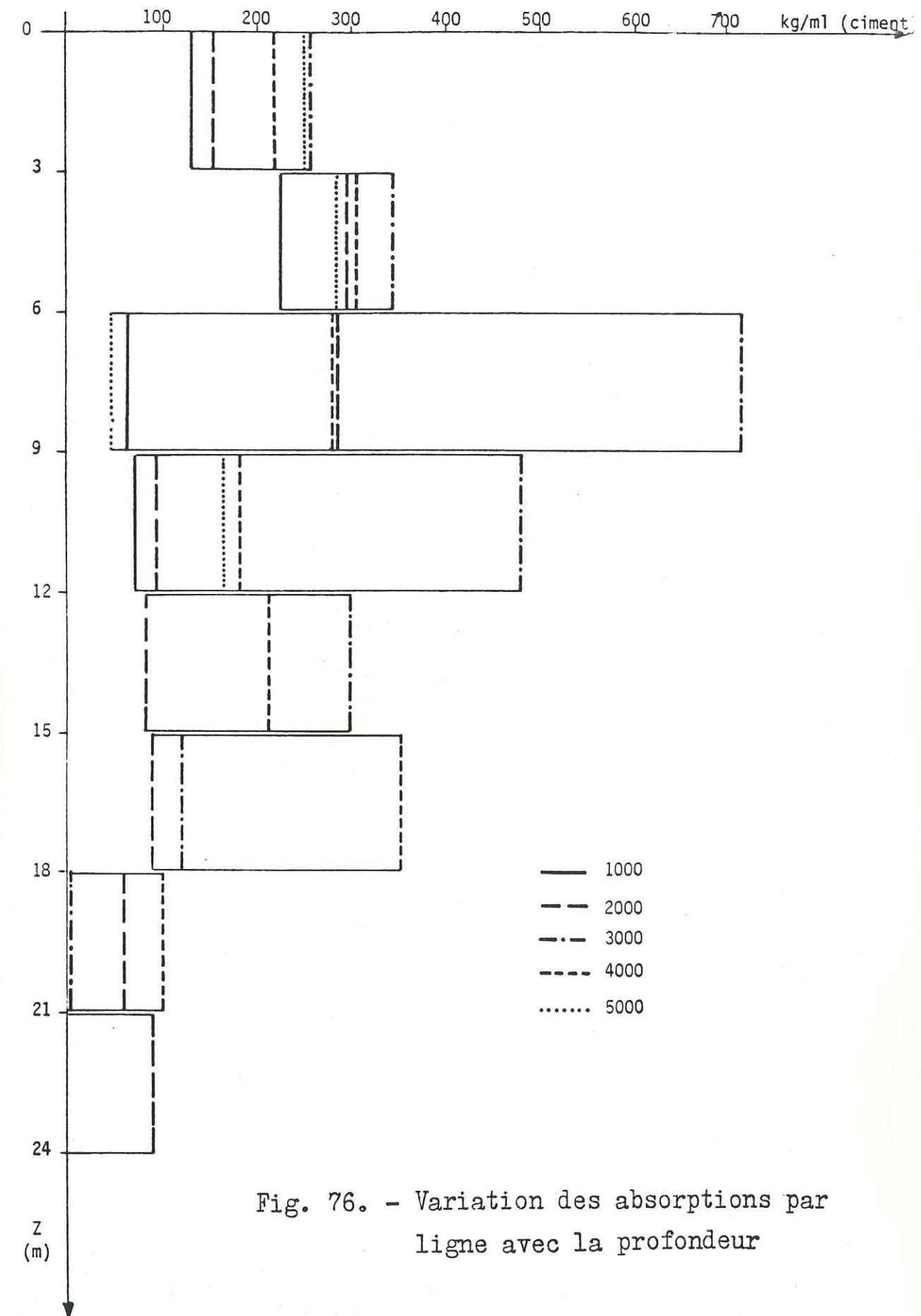


Fig. 76. - Variation des absorptions par ligne avec la profondeur

Ce n'est vraiment qu'à partir de 18 m que la ligne centrale semble "bloquée" par 2000 et 4000. L'effet d'encagement par les lignes extérieures n'est donc pas sensible jusqu'à cette profondeur.

- Pour le voile profond le plus courant, à 2 lignes, la diminution des quantités absorbées avec la profondeur est faible, et l'on a un certain équilibre entre l'augmentation de pression d'injection et l'enfouissement des lignes 2000 et 4000.

Remarquons aussi que la ligne 4000, injectée la première, absorbe plus que la 2000.

- Enfin, quel que soit le nombre de lignes, on notera la grosse quantité de produits injectés dès la lère passe du voile profond, de 6 à 9 m, qui semble avoir été la passe critique du voile. Cela apparaît nettement sur le bloc diagramme de la figure 77, qui matérialise une perspective des volumes injectés entre les profils P9 et P10+25 (bas de rive gauche) et prenant en compte 135 forages.

6.3 - CONTROLE GLOBAL DU TRAITEMENT

Pour avoir une vue d'ensemble de l'efficacité du traitement, nous avons construit 2 graphiques rassemblant chacun le plus grand nombre d'essais de perméabilité réalisés avant puis après les injections, en essayant d'avoir les perméabilités par tranches de 3 m correspondant aux passes d'injection du voile. Les perméabilités ont parfois été données en unité Lugeon par extrapolation, car beaucoup d'essais n'ont pas atteint les 10 bars. On sait le peu de rigueur d'une telle méthode, aussi ne faut-il la considérer que comme une esquisse de la réalité. Qu'une passe absorbe 100 ou 300 U.L. avant injection n'a pas beaucoup d'importance, ce qui compte surtout, ce sont les ordres de grandeur et les comparaisons.

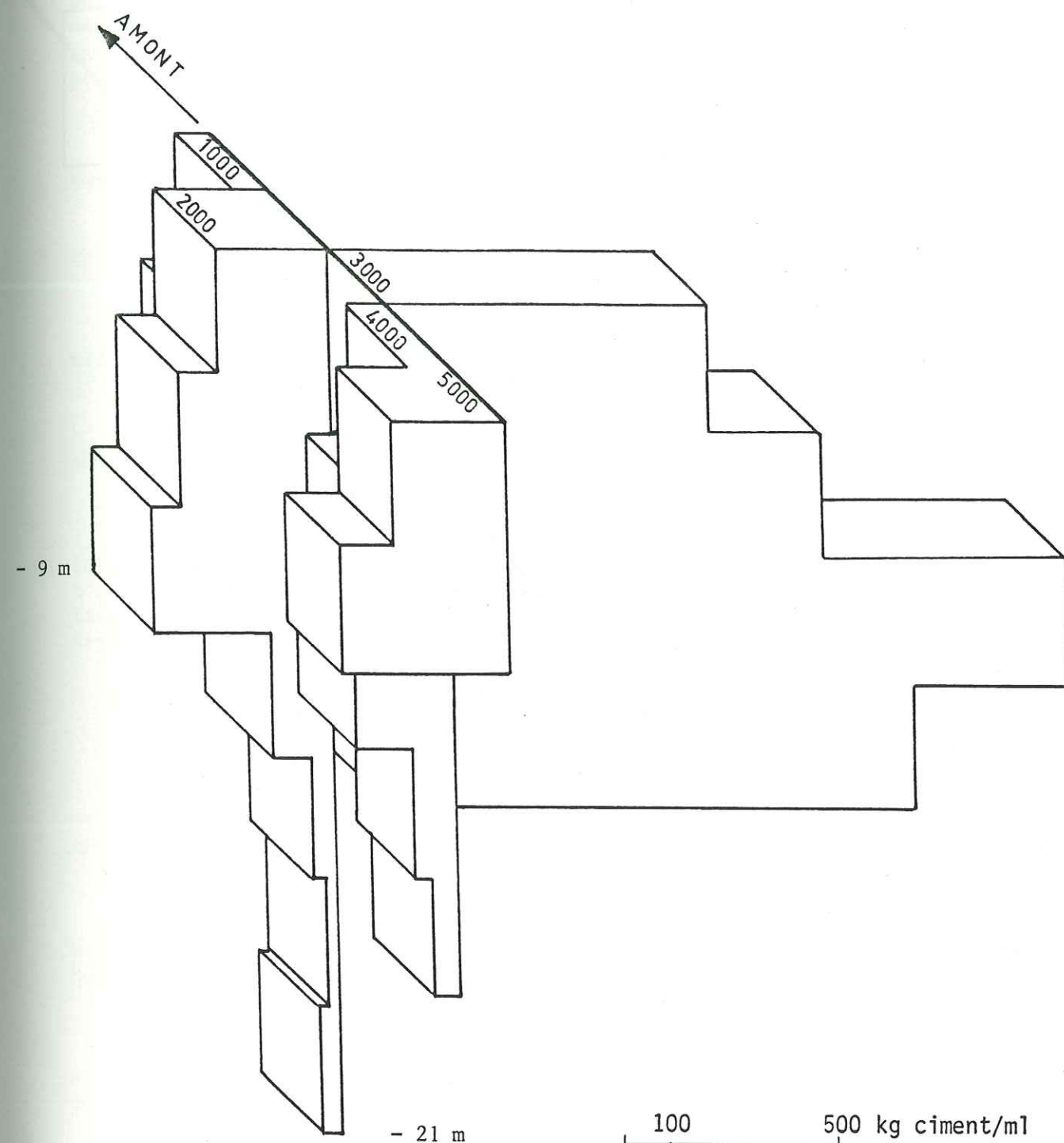
6.3.1 - Perméabilités avant injection

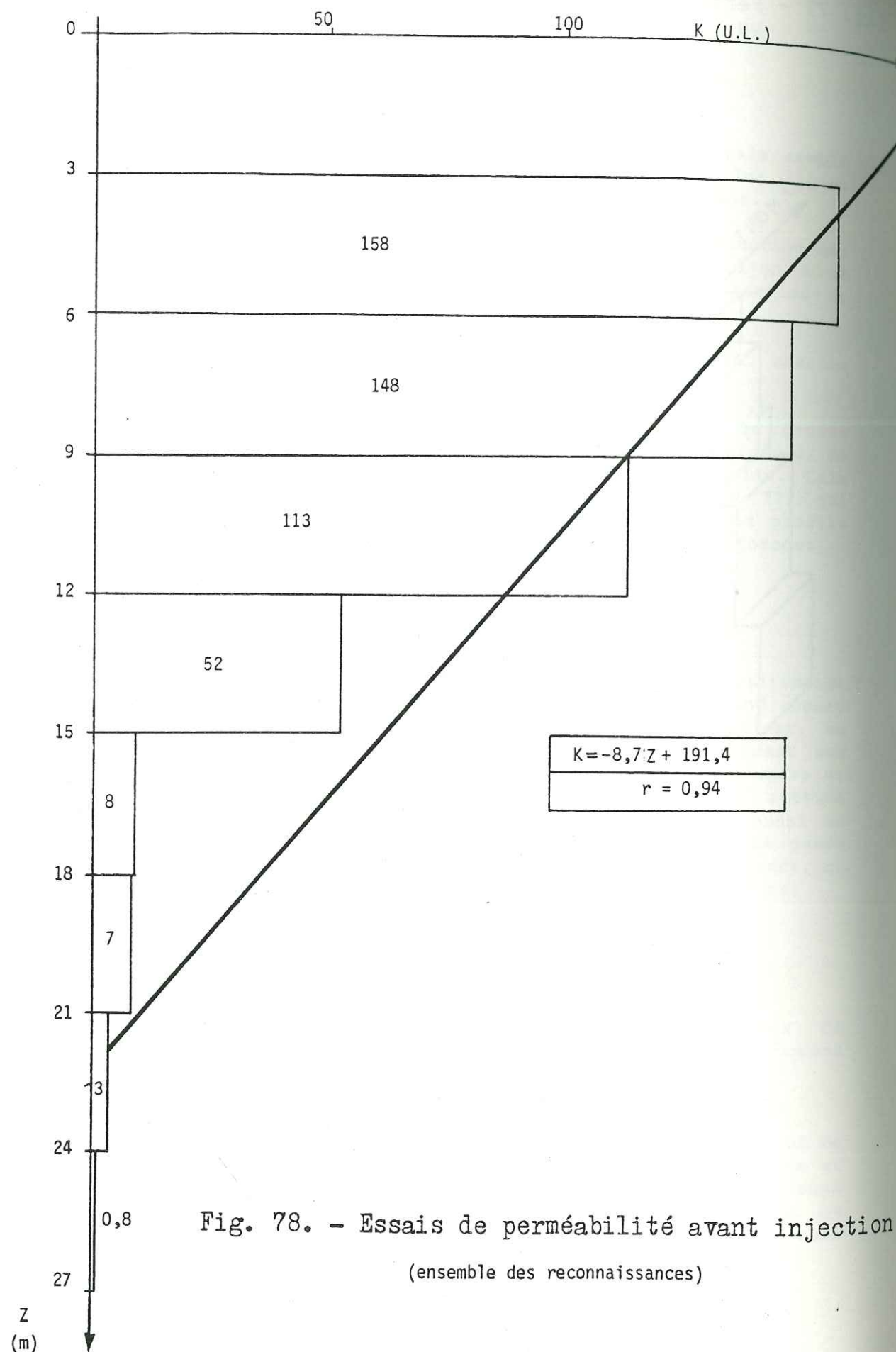
Elles ont été mesurées sur 21 sondages ou forages de reconnaissance répartis sur le site du barrage et réalisés, soit au moment des études, soit pendant les travaux (fig. 78).

Il apparaît nettement une très forte perméabilité s'abaissant de 150 à 50 U.L. de 0 à 15 m de profondeur. Au-delà, elle chute assez vite et reste comprise entre 0,5 et 8 U.L., ce qui est conforme avec la coupe géologique de la fig. 67. On constate, en effet, qu'à cette profondeur, on pénètre, à de rares exceptions près (profil P18), dans le granite sain fissuré (G2) et le granite sain (G3).

Fig. 77 - Perspective des volumes injectés entre les profils P9 et P10 + 25

(bas de R.G.)





En outre, nous avons trouvé un coefficient de corrélation assez bon, de 0,94, entre la perméabilité en U.L. et la profondeur des essais en mètres. Cette corrélation suppose que l'altération (et la fissuration) diminue de façon régulière avec la profondeur, et que la plupart des joints de la roche saine se referment rapidement.

Une telle corrélation est assez rare et il existe de nombreux exemples contraires.

6.3.2 - Perméabilités après injection

La figure 79 montre nettement l'amélioration apportée par le traitement du terrain à partir des résultats de 18 sondages de contrôle.

Les perméabilités moyennes résiduelles sont comprises entre 0,4 et 5,7 U.L. Elles décroissent faiblement avec la profondeur.

Pour les tranches de 0 à 12 m, la perméabilité a été divisée par 30 ou 40, ce qui est un résultat global très satisfaisant, compte tenu de l'hétérogénéité du terrain. Il semble donc que le traitement mixte, par tube à manchettes dans l'altération et classique dans le rocher proprement dit, ait été bien adapté. Ceci confirme les résultats du plot d'essais A.

6.4 - CORRELATIONS ESSAIS D'EAU-INJECTIONS

Nous avons vu précédemment que des corrélations absorption (d'eau ou de ciment) et profondeur semblaient confirmées, ce qui en somme est assez logique.

Néanmoins, il est apparu intéressant de vérifier s'il existait une relation entre l'absorption d'eau et de ciment pour une profondeur donnée.

Le graphique de la figure 80 montre que les 2 droites de régression linéaire sont assez proches l'une de l'autre et qu'elles sont de la forme :

$$K = 0,63 Q - 41,6$$

$$Q = 1,36 K + 81$$

$$r = 0,94$$

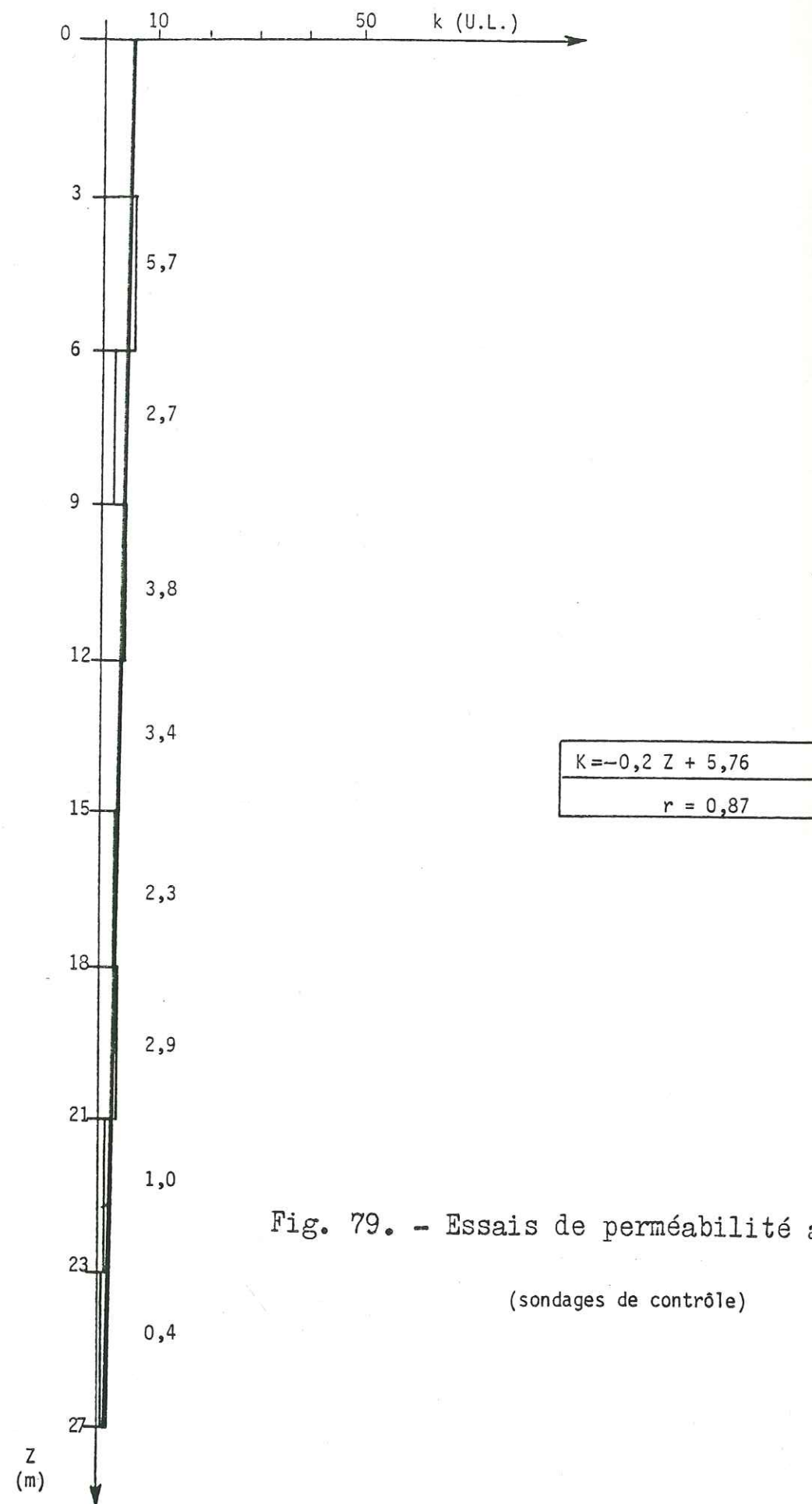
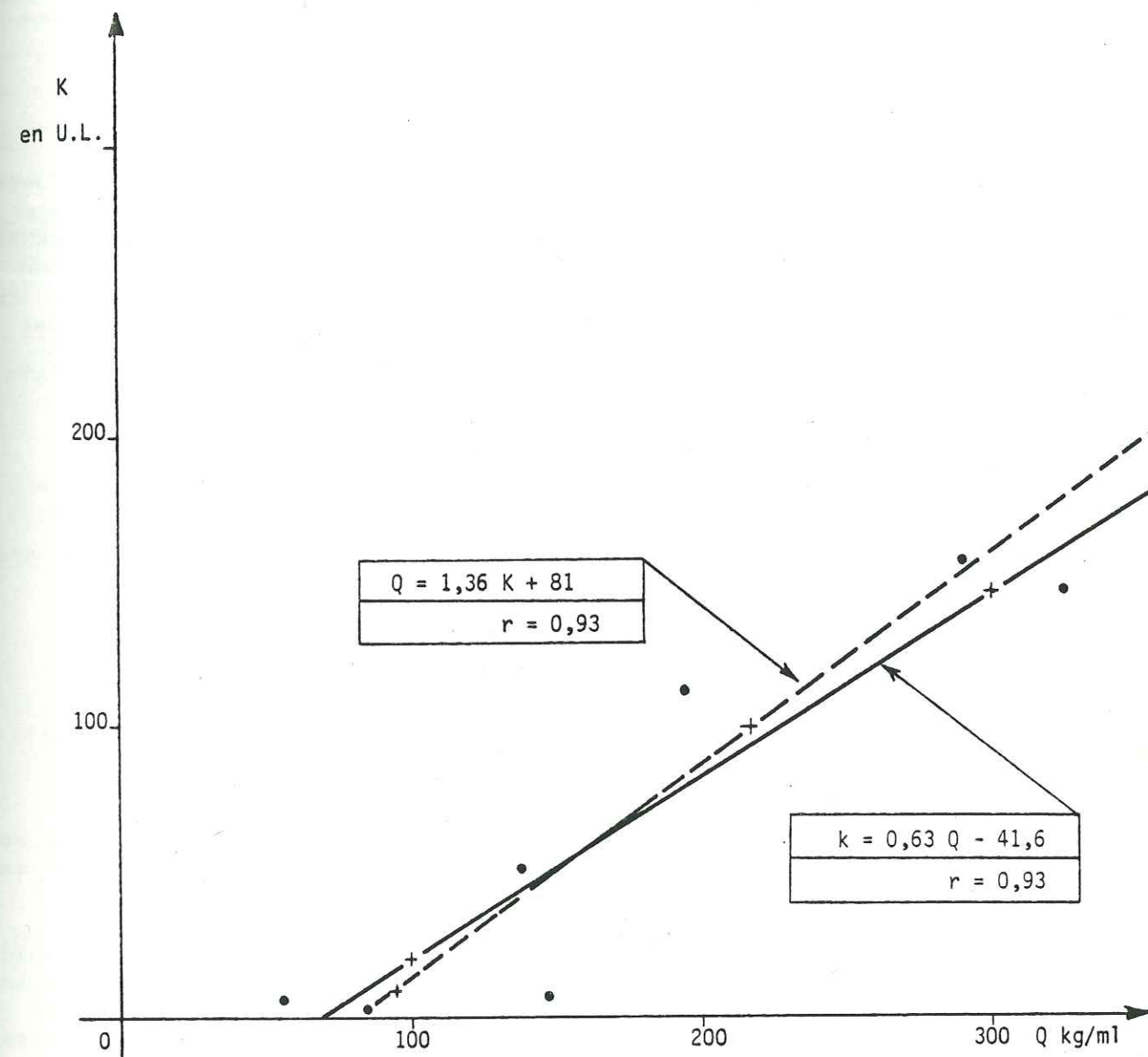


Fig. 80. - Corrélation absorption d'eau - absorption de ciment à une profondeur donnée (voile total)



avec :

K = absorption d'eau en unités Lugeon,
Q = absorption de ciment en kg/ml,
r = coefficient de corrélation linéaire.

Le coefficient de corrélation trouvé par le calcul est bon.

Une telle corrélation permettrait donc d'estimer dans d'autres sondages assortis d'essais d'eau, la quantité de ciment qu'ils risquent de consommer. Il y aurait donc là un côté prévisionnel intéressant (BRUNEL, 1979). Il est bien évident que cela ne peut être applicable que sur un même site. L'extrapolation à d'autres ouvrages serait, sans doute, très aléatoire du fait de la grande variété des conditions géologiques et surtout des conditions d'essais.

7 - RESULTATS PONCTUELS SUIVANT LA NATURE DU TERRAIN

Sur un site où la lithologie varie aussi souvent, nous avons choisi 2 zones types :

- une zone à faibles absorptions entre P14 et P16,
- une zone à fortes absorptions entre P12 et P14

Ces panneaux ont respectivement 60 et 80 m de long.

- Le premier se trouve au-dessus de la galerie, en R.D. dans une zone où la coupe géologique montre une importante ride de granite sain pratiquement pas altéré (G3).
- Le second se trouve au-dessous de la galerie, entre cette dernière et le grand sillon d'altération du thalweg. La géologie montre tous les types de granites avec leurs différents degrés d'altération (G0 à G3), le tout étant recoupé par de nombreuses cassures ou diaclases.

7.1 - ABSORPTIONS MOYENNES PAR LIGNES

Les caractéristiques de ces panneaux sont résumées dans le tableau ci-après.

LIGNES	1 000		2 000		3 000		4 000		5 000	
	P12-14	P14-16	P12-14	P14-16	P12-14	P14-16	P12-14	P14-16	P12-14	P14-16
Nombre de forages	38	32	37	30	38	37	38	24	36	30
ml inject.	228	192	780	645	447	219	648	360	216	180
m3 coulis	182,998	23,301	706,429	12,233	907,904	15,959	673,103	8,6	350,123	10,142
m3 coulis/ml	0,803	0,121	0,906	0,02	2,03	0,073	1,04	0,024	1,62	0,056
T.E.C.	74,113	5,766	259,16	3,005	224,716	4,482	249,095	2,131	141,8	2,51
Kg ciment/ml	325	30	332	4,6	503	20	384	6	656	14

Ces résultats confirment l'énorme différence qu'il y a entre l'injection d'un milieu rocheux (P14-P16) et celle d'un milieu pulvérulent (P12-P14).

Les quantités de ciment absorbées par ml sont de 11 à 72 fois plus importantes lorsque l'on a affaire à de la roche plus altérée, le plus gros écart étant de 332 kg/ml d'un côté et 4,6 kg/ml de l'autre.

7.2 - ABSORPTIONS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

Elles sont détaillées sur les figures 81 et 82, pour lesquelles il a fallu changer l'échelle des abscisses (absorption) d'une zone à l'autre.

7.2.1 - P14 à P16

Dans la zone rocheuse, il y a une forte différence entre les passes 0-6 m et les passes profondes, les premières absorbant entre 3,2 et 3,5 fois plus que les secondes. Dès 6 m de profondeur, l'absorption diminue nettement, sans qu'il y ait de variations notables au-delà.

On retrouve donc bien ici la distinction entre un voile de peau classique et un voile profond.

Il faut souligner que les valeurs les plus fortes (35 kg/ml sur la passe de 3 à 6 m de la ligne 1000) restent extrêmement faibles et que cette "ride" P14-P16 est constituée d'un rocher de bonne qualité, très peu fissuré.

7.2.2 - P12 à P14

Ici, le voile de peau "théorique" 0-6 m a plutôt fait place à un voile de peau "pratique" que l'on constate jusqu'à 9 m de profondeur, car ce n'est qu'à partir de là que les absorptions diminuent sensiblement. De plus, les quantités de ciment continuent à croître avec la profondeur sur les 3 passes de 0 à 9 m. En valeur absolue, les chiffres sont très forts avec 944 kg/ml de 6 à 9 m sur la ligne 2000.

Au-dessous, on peut parler de voile profond avec diminution progressive des quantités de 9 à 21 m.

Au-delà, de 21 à 24 m, la roche s'améliore rapidement puisque le terrain n'est pratiquement plus injecté. Enfin l'encagement de la ligne 3000 par les autres n'a pas pour autant limité les quantités de produits de cette dernière.

8 - PAROIS MOULEES

Rappelons seulement que ce type de traitement a été utilisé dans les parties arénisées du sillon central et du sillon de rive droite, là où l'on a jugé que les injections étaient mal adaptées (terrains trop "meubles").

Le détail du traitement est donné sur le tableau 1.

Si l'exécution n'a pas posé de problèmes particuliers, il est apparu rapidement des défauts de prise des coulis autodurcissables à la paroi de fond de vallée.

8.1 - PAROI INITIALE

Le coulis utilisé avait la composition suivante :

- ciment CLK	93 kg
- cendres volantes	93 kg
- bentonite	32 kg
- Actisol	9 kg
- eau	910 l

En partie centrale de la vallée (P11+20) cette paroi a pu atteindre 23 m de profondeur par rapport au sommet du remblai, haut de 6 m environ.

Après réalisation, la paroi devait être élargie en tête (de 0,8 à 1,2 m d'épaisseur) de façon à pouvoir y raccorder une éventuelle paroi à exécuter dans le noyau de la digue, si l'étanchéité du corps de l'ouvrage s'était montrée insuffisante.

Au début des travaux d'élargissement, on a constaté que la prise du coulis n'était pas complète et qu'il existait sur toute la paroi du fond de vallée des zones sans cohésion.

L'analyse d'échantillons relevés par sondage montra que les dosages étaient ceux prévus mais que le laitier du ciment ne s'hydratait pas.

Par contre un tel phénomène n'apparaissait pas dans les rives.

D'autres analyses ont mis en cause le terrain de fondation qui, mélangé au coulis à raison de 400 kg/m³, empêchait la prise d'échantillons au laboratoire.

De plus, un apport de ciment dans ces mauvais coulis permettait à la prise de se faire.

Reforer une nouvelle paroi sur l'ancienne devait donc éviter un nouveau mélange avec le terrain. Après des panneaux d'essai satisfaisants, cette solution fut adoptée.

8.2 - PAROI FINALE

Le nouveau coulis était le suivant :

- ciment CLK	107 kg
- cendres volantes	107 kg
- bentonite	28 kg
- Actisol	8 kg
- eau	899 l

La seconde exécution n'a pas posé de problèmes particuliers excepté un retard de prise important. Plusieurs mois après les travaux, quelque vingt sondages de contrôle furent réalisés pour vérifier la qualité de la dernière paroi qui s'est révélée satisfaisante.

8.3 - CAUSES DE L'ANOMALIE

De nombreuses études très spécifiques furent simultanément entreprises.

A partir des divers résultats obtenus sur la 2ème paroi, le laboratoire GEATEC a été amené à proposer le schéma de destruction suivant qui se déroule en 3 étapes :

- incorporation de gore, qui retarde la prise,
- échanges ioniques avec l'eau de la nappe, qui favorisent le retard de durcissement,
- lessivage dû à la mise en charge de la paroi par la remontée de la nappe à l'amont de l'écran, qui stoppe pratiquement la prise.

Les mêmes essais sur la seconde paroi n'ont pas mis en évidence d'anomalies particulières, excepté le retard de prise signalé.

Des analyses très approfondies, faites dans de nombreux laboratoires, ont recherché l'agent perturbateur du durcissement, mais aucun résultat probant n'est apparu.

Il n'a donc pas été possible de conclure quant à la cause première de cette anomalie.

9 - CONCLUSION

Le traitement des fondations du barrage de Laprade nous a permis de faire différentes constatations et de tirer un certain nombre d'enseignements :

- la structure d'ensemble du site avait été assez bien expliquée lors des reconnaissances d'avant-projet, mais elle s'est révélée beaucoup plus complexe dans le détail qu'on ne pouvait l'imaginer, et seul un programme très lourd de reconnaissances a permis de caler au mieux les organes d'étanchéité ;
- le traitement mixte, parois moulées plus injection (classique et par tube à manchettes) semble satisfaisant, puisqu'à l'heure actuelle aucune fuite importante n'est apparue dans la fondation et que l'examen de la piézométrie à l'aval de l'ouvrage ne signale pas de sous-pressions anormales ;
- les injections globales ont donné des résultats conformes à d'autres sites en terrain granitique, avec une consommation moyenne d'équivalent ciment de 225 kg/ml ;

- les terrains altérés et très fissurés ont joué un grand rôle dans les quantités absorbées, comme on a pu le constater sur les 2 zones témoins ;
- les fortes absorptions concernent le voile de peau (59 % des produits injectés) et la première passe de 6 à 9 m du voile profond, qui a été la "frange" sensible des injections ;
- l'effet d'encagement par des lignes extérieures n'a pas été observé pour la ligne 3000, qui a toujours consommé beaucoup de coulis bien qu'elle ait été réalisée en dernier ;
- une corrélation absorption d'eau - absorption de ciment à une profondeur donnée semble avoir été établie ;
- les essais de contrôle de perméabilité du voile après injections ont confirmé l'efficacité de ces dernières ;
- un minage préalable et très précis des boules compactes contenues dans les sillons d'altération a permis de creuser normalement la paroi sans utiliser de trépanage ;
- enfin, la réalisation de la paroi moulée centrale dans le sillon arénisé a montré que, pour la première fois, le mélange du terrain au coulis de paroi, qui est habituel, pouvait interdire le durcissement de cette dernière. Il est cependant regrettable que l'agent "inhibiteur de prise" n'ait pu être identifié.

Le site de Laprade est un site difficile de par son hétérogénéité lithologique puisque l'on y trouve un substratum granitique ayant un comportement rocheux ou un comportement de sol selon son degré d'altération, avec toutes les conséquences que de telles dispositions peuvent avoir sur le type d'étanchéité, d'injection, de pression, de coulis.

Seules des reconnaissances très précises et nombreuses, au moment des travaux, ont permis de faire du "sur mesures" et de choisir, à tout moment, le dispositif le mieux adapté à la réalité du terrain. L'enregistrement des paramètres de forage a été, dans ce cas, d'une très grande efficacité.

II - ETUDES GEOLOGIQUES D'AUSCULTATION

Après la construction d'un barrage, il est normal de distinguer deux périodes bien précises :

- la première mise en eau ;
- l'auscultation ultérieure systématique.

Dans les deux cas, le géologue peut intervenir de façon plus ou moins approfondie.

A - PREMIERE MISE EN EAU

C'est sans doute l'étape la plus importante, puisqu'à ce moment-là "vont se vérifier le bien-fondé des hypothèses et la validité des calculs" (ANTOINE et FABRE, 1980).

A ce niveau, le géologue est surtout consulté sur deux points essentiels :

- la stabilité des berges de la retenue et des appuis du barrage,
- le contrôle des drains et des piézomètres.

1 - Stabilité des berges et des appuis

Elle nécessite le parcours attentif des berges du plan d'eau, à terre ou en bateau. Cette deuxième méthode est plus aisée quand les pentes sont fortes et surtout elle permet de voir de face l'éventuel travail de sape que peut produire le batillage du lac.

En terrain meuble, ceci peut avoir plus ou moins d'importance. Nous avons effectivement eu de petits désordres sur des berges tendres, en gale et arène granitique (barrage de Laprade), dans lesquelles et très rapidement, le plan d'eau avait creusé de véritables boyaux dans les zones les plus fragiles et des phénomènes de sous-cavage non négligeables. Il en résultait, malgré la faible pente, un basculement des berges et des arbres les recouvrant vers la retenue. Bien que sans danger, ce phénomène "grignotait" la berge et l'on pouvait atteindre assez rapidement les limites de propriété autour du lac. Une protection locale en gabions réglerait facilement le problème.

2 - Contrôle des drains et des piézomètres

Le plus souvent, l'implantation et le dimensionnement des drains et des piézomètres sollicitant la fondation du barrage ont été déterminés par le géologue en accord avec l'ingénieur projeteur.

Lors de la première mise en eau, il est obligatoire de répertorier tous les écoulements et suintements qui peuvent se produire, qu'ils proviennent soit du terrain naturel, soit des drains et piézomètres. Ces écoulements seront mesurés en tenant compte de la montée du plan d'eau et de la pluviométrie. Des relevés fréquents devront permettre d'en suivre l'évolution d'une visite à l'autre. Mais il sera indispensable, en cas d'anomalie, d'essayer d'en expliquer l'origine et la genèse pour pouvoir appliquer, le cas échéant, des traitements correctifs. C'est à ce moment-là que les levés de fouilles précis, effectués lors de la construction, pourront être exploités avec profit.

A la fin de la mise en eau, toutes les observations seront consignées dans un rapport complet, transmis pour information au Comité Technique Permanent des Barrages.

B - AUSCULTATION ULTERIEURE SYSTEMATIQUE

Après la première mise en eau, le barrage va "vivre" au gré de l'exploitation de la retenue. Quand il a la chance de suivre la vie d'un barrage, le géologue est amené, de façon périodique, à examiner les réseaux de drains et de piézomètres, et à établir une synthèse annuelle des observations pour apprécier l'évolution de l'ensemble du système. Cette étude sera rattachée à toutes les autres informations (topographie, capteurs de pression, etc.) qui ne sont plus directement du domaine de la géologie mais en dépendent étroitement.

Le suivi de l'ouvrage sera ponctué, selon les conclusions, par des travaux d'entretien ou correctifs (nettoyage de drains, exécution de piézomètres supplémentaires, reprises locales d'injection, etc.).

C - EXEMPLE D'ETUDE

Pour illustrer cette démarche, nous avons choisi l'exemple du barrage du Salagou dans le département de l'Hérault.

BARRAGE DU SALAGOU (Hérault)

EVOLUTION DU SYSTEME DE CONTROLE DE 1969 à 1975

Le barrage du Salagou, achevé en 1968, se situe à environ 10 km au Sud de Lodève. C'est une digue en enrochements basaltiques, à masque amont et haute de 63,2 mètres. Elle retient à la cote 139 un volume d'eau de 125 Hm³. Tout l'aménagement s'inscrit dans les terrains péliques du Permien moyen.

1 - RAPPEL DU SYSTEME DE CONTROLE

L'ensemble du système de contrôle est représenté sur la figure 83 (d'après AIRAULT, CHEYLAN, 1970).

Il est composé de cinq sortes d'ouvrages :

- des drains galerie et des drains murettes dont l'exutoire se trouve dans la galerie de pied amont,
- des drains ovoïdes donnant dans la galerie ovoïde,
- des drains extérieurs et des piézomètres situés en aval de l'emprise du barrage.

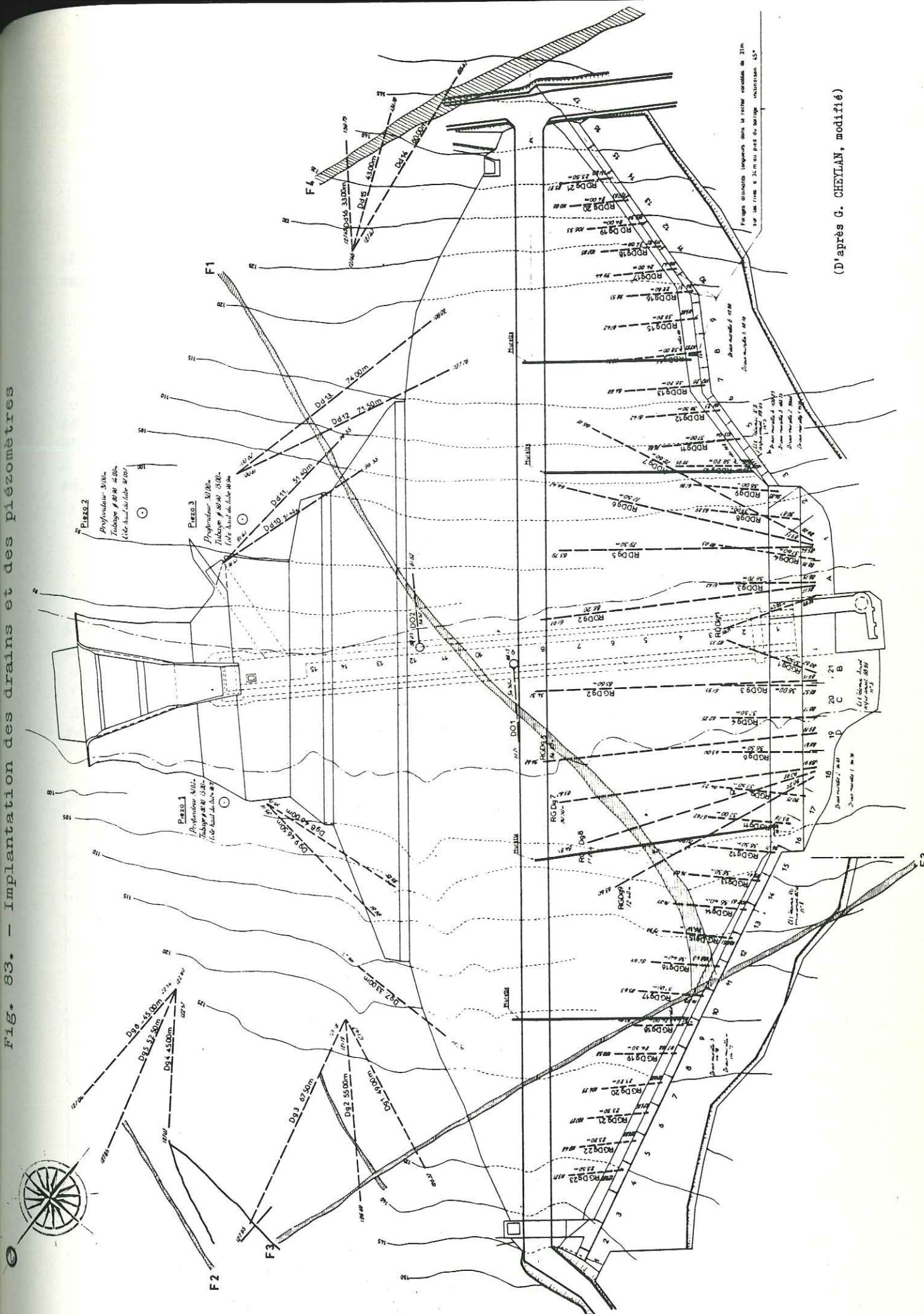
1.1 - DRAINS GALERIE

Ils comptent 44 sondages : 23 en rive gauche (R.G. Dg1 à Dg23) et 21 en rive droite (R.D. Dg1 à Dg21). Les R.G. Dg2, 5, 7, 8 et 9 et R.D. Dg2, 5, 6, 7 ont entre 72,4 m et 86,2 m de long avec un plongement de 15° vers l'aval. Plus courts et plus inclinés sont les autres avec 22,6 m à 28,0 m et 45°.

1.2 - DRAINS MURETTES

Ils doivent leur appellation au fait qu'ils sont constitués par de petits murs posés sur le substratum et d'une hauteur variant de 1,0 à 1,5 m, allant de la galerie de pied amont jusqu'au droit de l'axe de l'ouvrage. Leur rôle est de collecter les venues d'eau sous les enrochements amont. Ils sont jaugés au moyen de 2 ou 4 sorties tubées à l'intérieur de la galerie de pied amont. On a alors 2 drains murettes en rive gauche et 2 en rive droite. Les premiers à la cote 98,0 (DM. R.G. 1 + 2) et à la cote 115 (DM. R.G. 3 + 4), les seconds à la cote 102 (DM. R.D. 1 à 4) et à la cote 115 (DM. R.D. 5 + 6).

Fig. 83. - Implantation des drains et des piézomètres



(D'après G. CHEYLAN, modifié)

1.3 - DRAINS OVOIDES

Ils ont pour fonction de drainer la faille F1 de chaque côté de la galerie ovoïde dans laquelle ils débouchent. Ils ont 30 m de longueur et sont inclinés sous l'horizontale de 50°. Il y en a 2 : D0 1 et D0 2.

1.4 - DRAINS EXTERIEURS

Ils sont remontants. Sur les 16 existants, 9 sont en rive gauche (Dg1 à Dg9) et 7 en rive droite (Dd10 à Dd16). Ils ont pour vocation de drainer les failles F3 (Dg1 à 3), F2 (Dg4 à 6), F1 (Dd10 à 13), F4 (Dd14 à 16). Quant aux drains Dg7 à 9, ils collectent théoriquement les eaux de la base de la rive gauche.

1.5 - PIEZOMETRES

Ils sont verticaux, d'environ 30 m de profondeur, et implantés à l'aval du barrage. Il y en a 1 en rive gauche (P1) et deux en rive droite (P2 et P3).

Les dates de mise en service et des premières mesures sont mentionnées dans le tableau ci-après (AIRAULT, 1970).

DRAINS	MISE EN SERVICE	PREMIERE MESURE
Dg 1 à Dg 9 Dg 10 à Dg 16	mars-avril 1967 mai-juin 1967	janvier 1968 " "
R.G. Dg 1 à R.G. Dg 23 R.D. Dg 1 à R.D. Dg 21	juin-juillet 1967 avril-juillet 1967	déc. 1968 - janvier 1969 " "
DM. R.G. et DM. R.D.	juillet 66-juin 1967	mai 1969
DO	mai 1967	n'ont jamais débité
P	avril-mai 1967	janvier 1968

2 - DOCUMENTS REALISES

Les relevés effectués par le gardien du barrage (mesures de débit, niveaux d'eau, etc.) ont été synthétisés sur les figures 84 à 95.

En particulier pour les drains, nous avons reporté en fonction du temps le débit maximal et le débit minimal observés au cours d'un mois et cela mois par mois, de 1969 à 1975. Un drain est donc caractérisé par une sorte de "fuseau" d'épaisseur variable.

L'échelle choisie permet rapidement de voir quelle est la tendance prise par chaque drain et par l'ensemble des drains, puisque toutes les mesures sont rassemblées sur un même format.

D'autre part, les mesures futures pourront être reportées à la suite et l'on pourra ainsi suivre de façon aisée l'évolution du système.

Enfin signalons que toutes ces données sont comparables entre elles puisqu'aucune modification n'a été faite sur le système de contrôle (drains et piézomètres) depuis sa mise en service. Cette comparaison est d'autant plus facile que le plan d'eau a gardé une cote pratiquement constante, aux environs de 139 N.G.F., depuis avril 1971.

3 - DRAINS GALERIE

Les drains galerie sont au nombre de 44, mais seulement 15 débitent ou ont débité dont 8 en rive gauche (fig. 84 et 85) et 7 en rive droite (fig. 86 et 87).

3.1 - DRAINS GALERIE RIVE GAUCHE

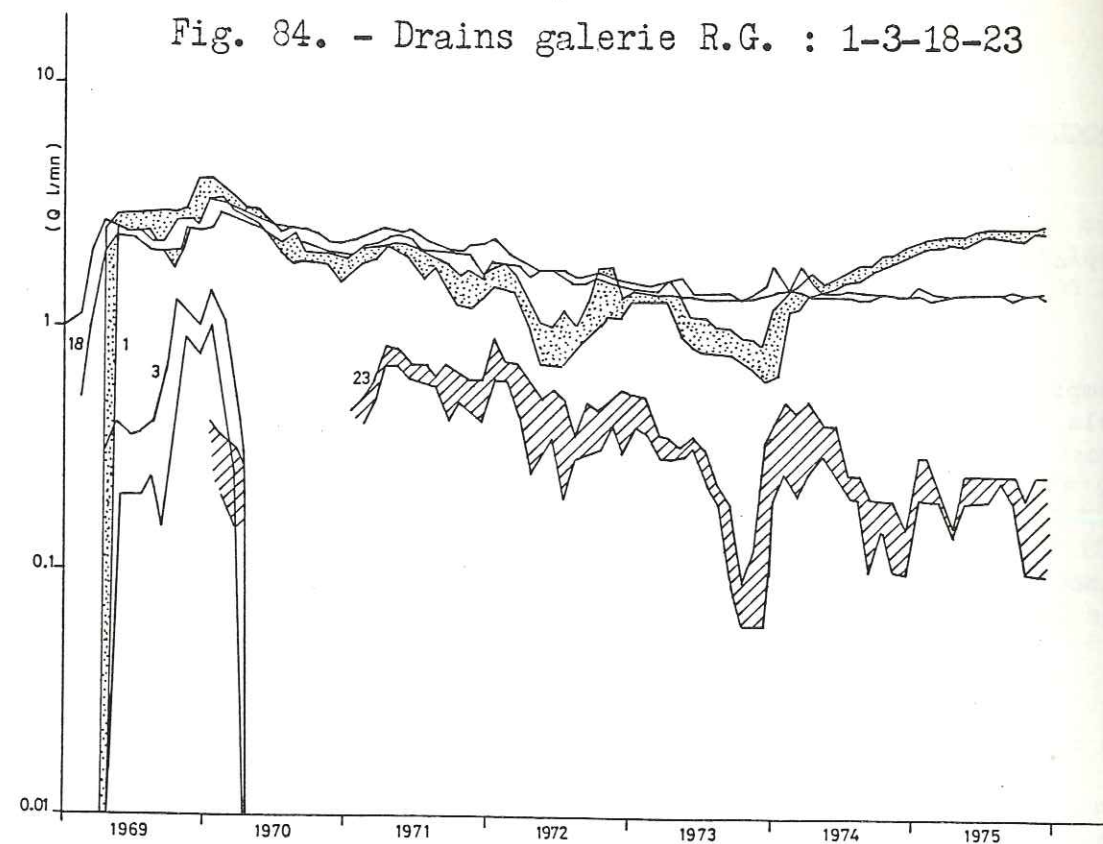
Actuellement 7 drains débitent (le R.G. Dg3 n'a débité que jusqu'en avril 1970).

Les précipitations influencent de façon plus nette certains drains, en particulier le R.G. Dg 20, le R.G. Dg 22 et le R.G. Dg 23.

Parmi ces drains, les graphiques obtenus permettent de faire trois distinctions :

- les drains à débit stationnaire dans le temps,

Fig. 84. - Drains galerie R.G. : 1-3-18-23



- les drains à débit diminuant dans le temps,
- les drains à débit augmentant dans le temps.

3.1.1 - Drains à débit stationnaire

Ce sont les drains : R.G. Dg 19 et R.G. Dg 22.

- le R.G. Dg 19 a un débit compris entre 1,4 et 1,8 l/mn de novembre 1969 à avril 1973. Puis il augmente légèrement et garde des valeurs comprises entre 1,6 et 1,9 l/mn et reste à ces niveaux ;
- le R.G. Dg 22 conserve un débit moyen aux alentours de 0,6 l/mn.

3.1.2 - Drains à débit dominant

Ce sont les drains R.G. Dg 18, R.G. Dg 20, R.G. Dg 21 et R.G. Dg 23.

On observe que leur débit diminue régulièrement et de manière assez homogène.

Ainsi pour le R.G. Dg 21 par exemple les débits maximaux passent de 3,6 l/mn en janvier 1970 et 2,2 l/mn en novembre 1972 puis à 1,4 l/mn en novembre 1975.

3.1.3 - Drains à débit augmentant

Il n'y en a qu'un pour les drains galerie de rive gauche, c'est le R.G. Dg 1.

Son débit décroît comme pour les autres de décembre 1969 (4 l/mn) à décembre 1973 (0,85 l/mn), date à partir de laquelle il augmente de façon régulière atteignant près de 3 l/mn fin 1975.

3.2 - DRAINS GALERIE RIVE DROITE

La pluie influence de façon plus nette les drains 15 et 16.

Comme pour les drains galerie de rive gauche, on distinguera trois types de drains.

Fig. 85. - Drains galerie R.G. : 19-20-21-22

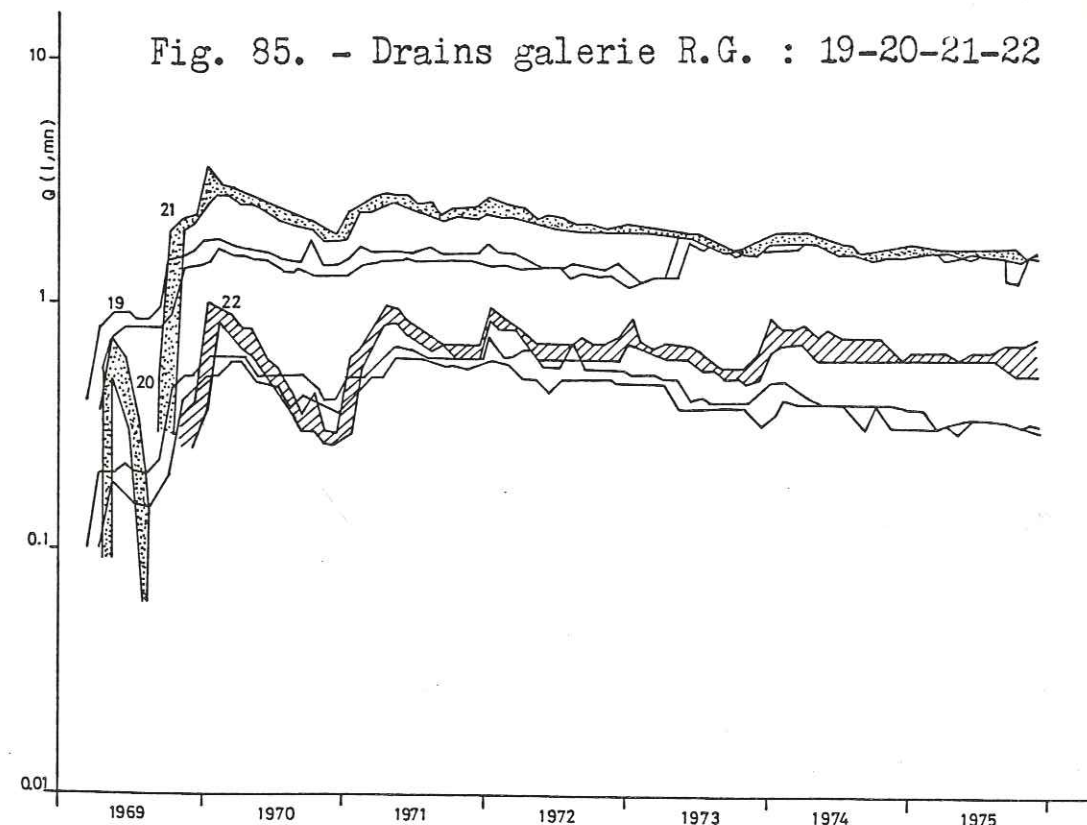


Fig. 86. - Drains galerie R.D. : 1-3-14-16

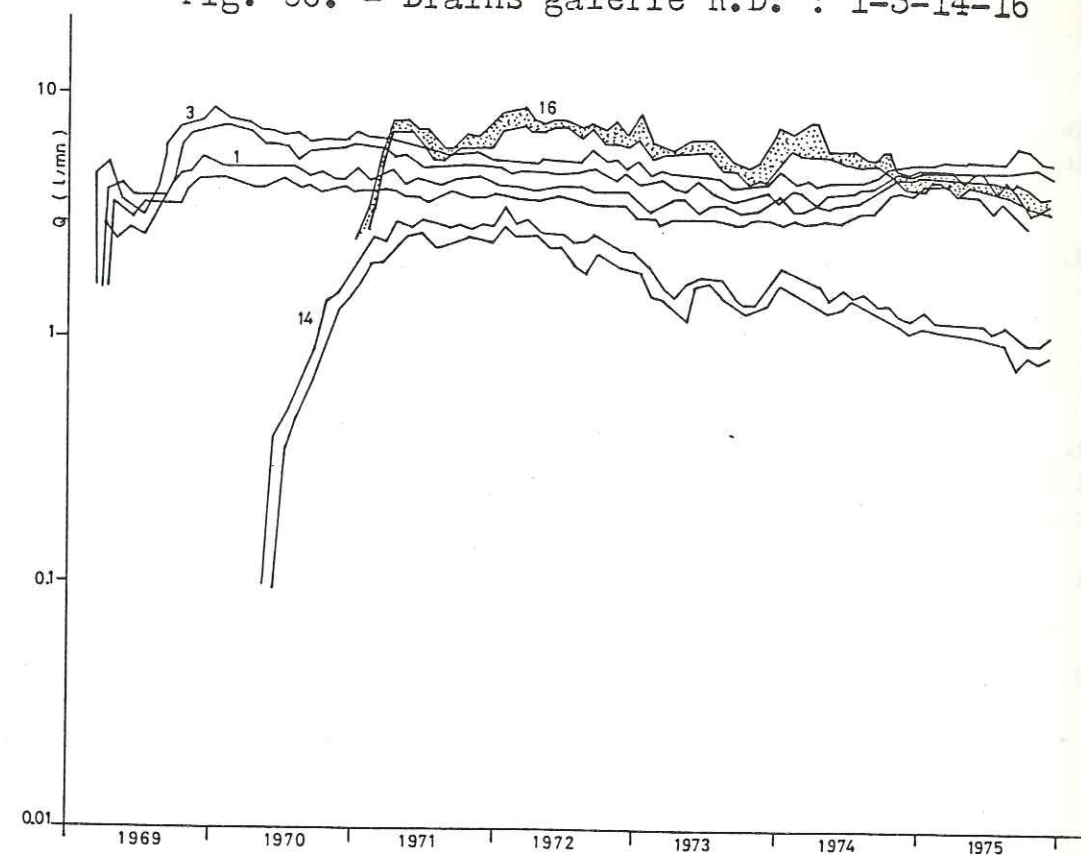
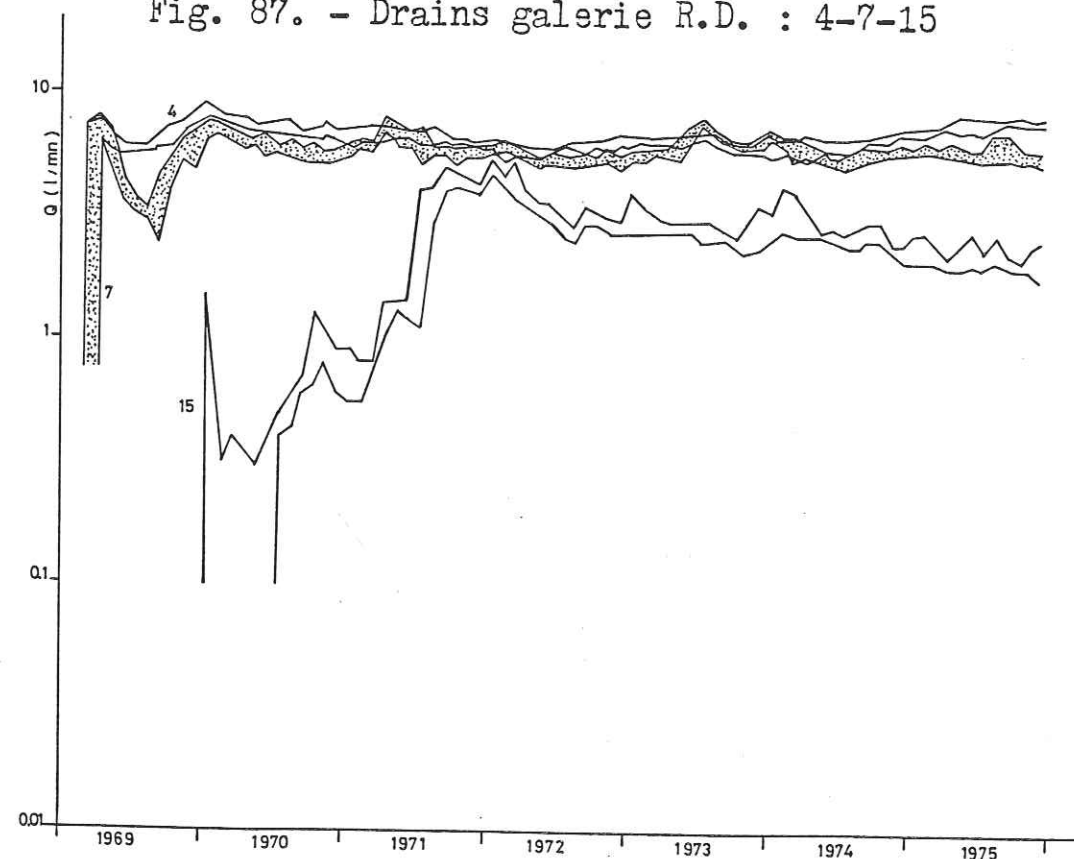


Fig. 87. - Drains galerie R.D. : 4-7-15



3.2.1 - Drains à débit stationnaire

Un seul drain conserve au cours du temps un débit stationnaire. Il s'agit du R.D. Dg 7 qui varie aux alentours de 6 l/mn (max 8 l/mn et min. 5 l/mn) à partir de 1970.

3.2.2 - Drains à débit diminuant

Il y en a trois, le R.D. Dg 14, R.D. Dg 15 et R.D. Dg 16 :

- le premier voit son débit maximal passer de 3,5 l/mn en janvier 1972 à 1,1 l/mn en décembre 1975 ;
- le second a atteint son maximum en janvier 1972 également, avec 5,5 l/mn pour ne restituer en décembre 1972 que 2,7 l/mn ;
- le troisième a débité 9 l/mn en mars 1972 et seulement 3,9 l/mn en décembre 1975 ;
- un quatrième drain, le R.D. Dg 1 montre une courbe plus irrégulière avec une remontée de février 1974 à décembre 1974, date à partir de laquelle son débit est à nouveau décroissant.

3.2.3 - Drains à débit augmentant

On en observe deux : le R.D. Dg 3 et le R.D. Dg 4.

Entre janvier 1970 (9 l/mn) et avril 1974 (4,3 l/mn) le R.D. Dg3 a d'abord connu une diminution de son débit maximal, mais à partir de cette dernière date, son débit remonte pour atteindre 6,3 l/mn en septembre 1975.

Le R.D. Dg4 a eu une augmentation régulière de son débit depuis juin 1972 avec 6 l/mn jusqu'à 8 l/mn en décembre 1975.

4 - DRAINS MURETTES

On examinera le débit global de tous les orifices de chaque drain plutôt que celui de chaque orifice en particulier.

Il y a rappelons-le 4 drains murettes : 2 en rive gauche, 2 en rive droite. Sur chaque rive on peut distinguer par leurs cotes (cf. 1) un drain murette supérieur et un drain murette inférieur.

L'examen des courbes de la fig. 88 permet de dire que les drains murettes supérieurs (DM R.D. 5-6 et DM R.G. 3-4) sont très sensibles aux précipitations alors que les drains inférieurs ne leur semblent pas liés.

4.1 - DRAINS MURETTES SUPERIEURS

On constate une diminution globale de leur débit avec le temps à partir de janvier 1971.

- Pour le DM R.G. 3-4, le débit maximal passe de 10 l/mn à cette date, à 2,3 l/mn en décembre 1975. Le débit minimal décroît de 1 l/mn en octobre 1971 à 0,5 l/mn en octobre 1975.
- Pour le DM R.D. 5-6, les écarts entre janvier 1971 (26 l/mn) et décembre 1975 (0,06 l/mn) sont considérables, le drain ne débitant pratiquement plus. Ce drain ne semble réagir qu'à la pluie.

4.2 - DRAINS MURETTES INFERIEURS

En rive gauche, le DM R.G. 1-2 a un débit pratiquement stationnaire variant autour de 5 l/mn (max. 9 l/mn en mai 1970, min. 1,8 l/mn en septembre 1970). Les écarts entre débit maximal et débit minimal tendent à s'amortir avec le temps.

En rive droite, le DM R.G. 1-2-3-4 voit son débit maximal diminuer considérablement : 95 l/mn en août 1970, 6,3 l/mn en novembre 1975.

Cette décroissance est assez régulière : 95 l/mn août 1970, 50 l/mn mai 1971, 25 l/mn octobre 1972, 19 l/mn novembre 1973, remontée à 30 l/mn août 1974, et 6,3 l/mn en novembre 1975.

5 - DRAINS OVOIDES

Depuis leur mise en service en mai 1967, ils n'ont jamais débité.

6 - DRAINS EXTERIEURS

6.1 - DRAINS EXTERIEURS - RIVE GAUCHE (fig. 89 et 90)

Le faisceau de drains Dg 1, 2 et 3 qui intéresse la faille F3 a un débit stationnaire depuis fin 1970. Ces drains sont liés à la pluviométrie et leur débit cumulé oscille entre 3 et 25 l/mn.

Fig. 88. - Drains murettes R.D. - R.G.

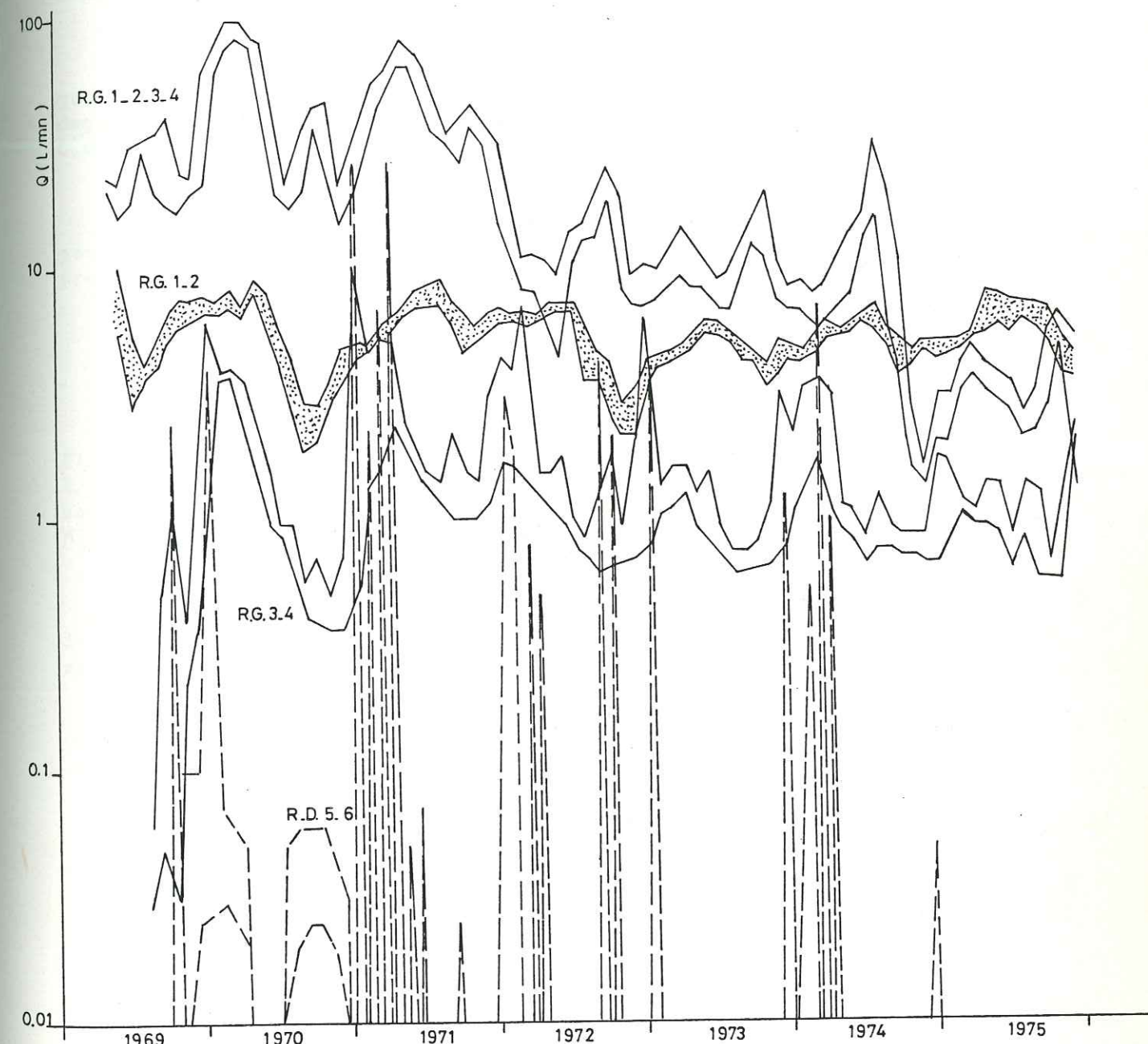


Fig. 89. - Drains extérieurs R.G. : 1-2-3 et 7

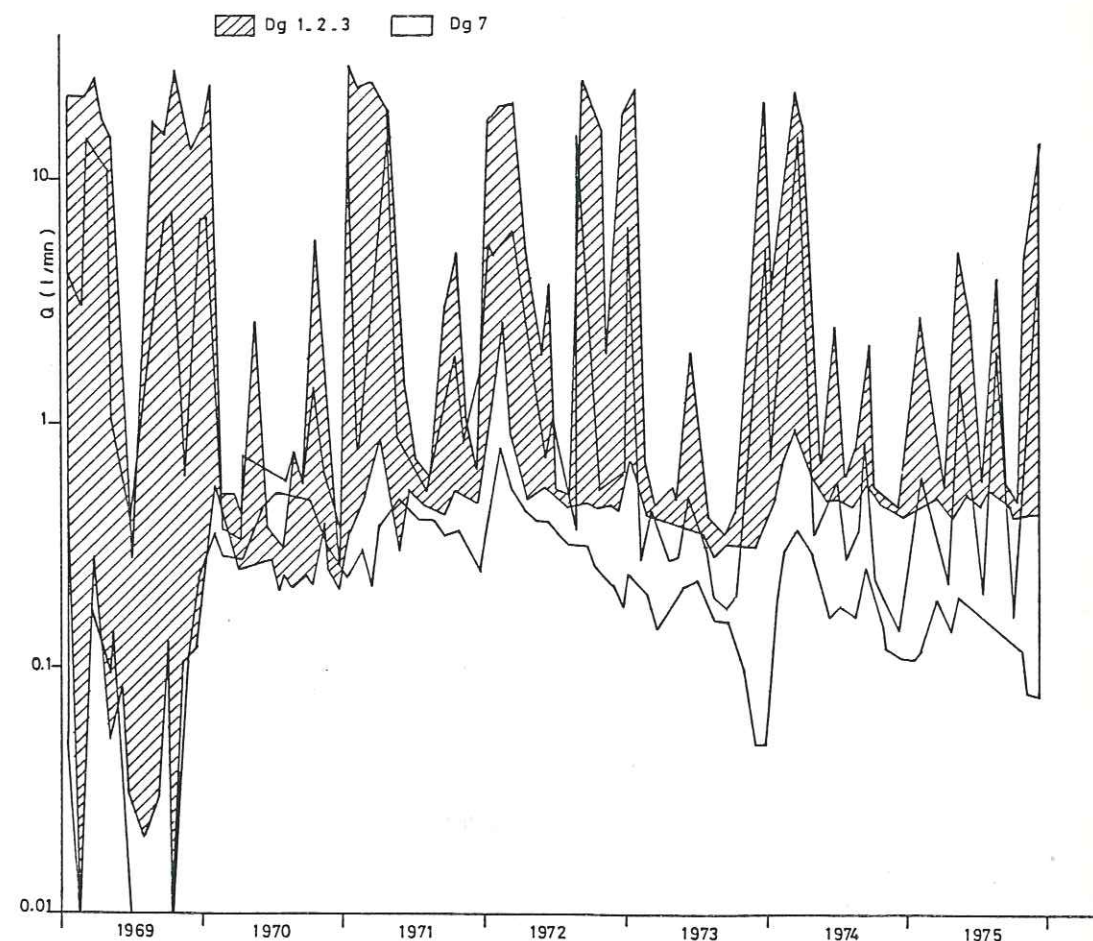
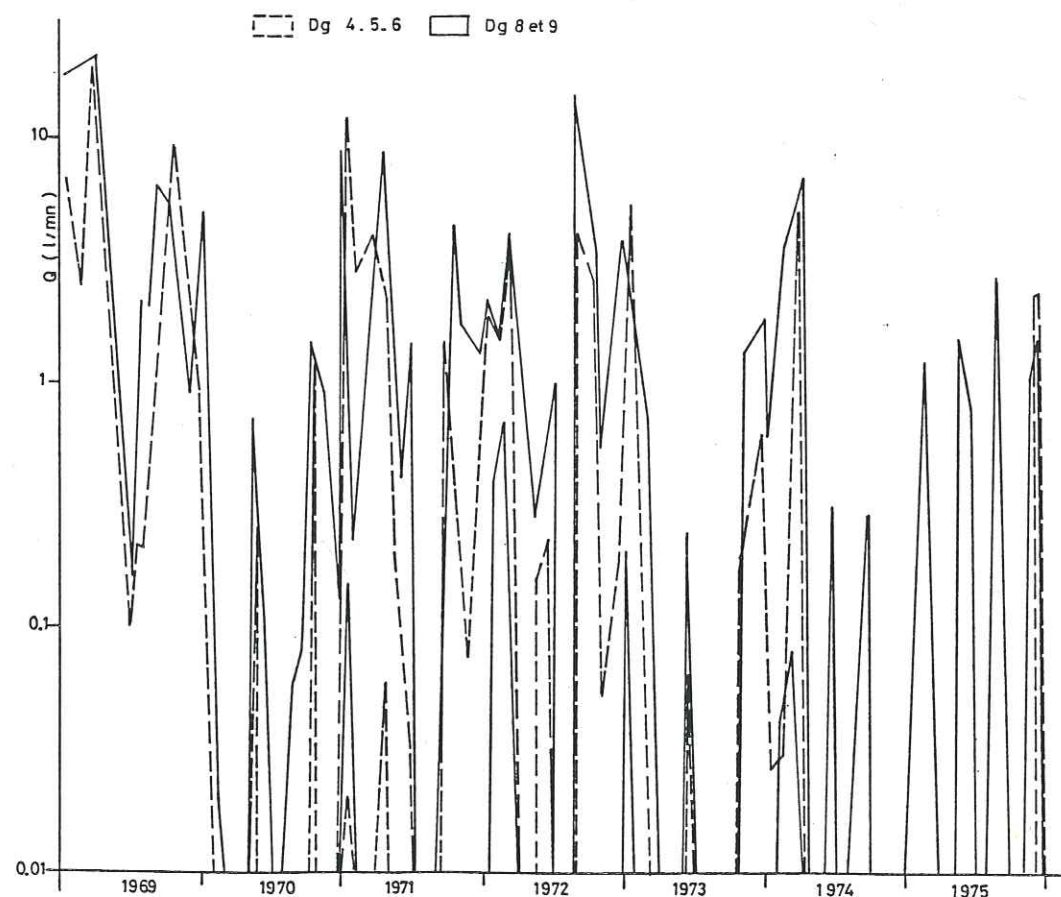


Fig. 90. - Drains extérieurs R.G. : 4-5-6 et 8-9



Il n'en est pas de même pour les drains Dg 4, 5 et 6 qui drainent la faille F2 ; ceux-ci ne débitent en effet qu'à l'occasion des pluies.

Les débits maximaux peuvent atteindre 15 à 20 l/mn (avril 1969 - septembre 1972).

Le drain Dg 7 qui, en principe, assainit le bas de la rive gauche, a un débit assez régulier mais qui semble décroître légèrement depuis 1971. Les débits minimaux passent de 0,2 l/mn (mars 1971) à 0,08 l/mn.

Le faisceau DG 8 - DG 9 récupérant les eaux du bas de la rive gauche a un comportement identique à DG 4, 5 et 6 dont on a parlé précédemment.

6.2 - DRAINS EXTERIEURS RIVE DROITE (fig. 91 et 92)

Les faisceaux de drains Dd 10-11 et Dd 12-13 drainant la faille F1 ont des débits assez réguliers, liés aux pluies, oscillant entre 1,3 l/mn et 10 l/mn pour le premier cité et entre 0,4 et 13 l/mn pour le second. Le graphique de ce dernier marque une légère tendance à une diminution générale de son débit dans le temps.

L'ensemble Dd 14, 15 et 16 assainissant F4 a un débit irrégulier, dont les pics sont assez décalés par rapport aux pluies. Ils ne débitent pas pendant les périodes sèches.

7 - PIEZOMETRES (fig. 93)

Trois piézomètres existent 90 m à l'aval de l'axe de l'ouvrage.

7.1 - PIEZOMETRE 1 (rive gauche)

Il est stabilisé aux environs de la cote 85,8 et n'a eu aucune réaction à la montée du plan d'eau. Quelques petites pointes marquent les fortes pluies.

Fig. 91. - Drains extérieurs R.D. : 10-11 et 14-15-16

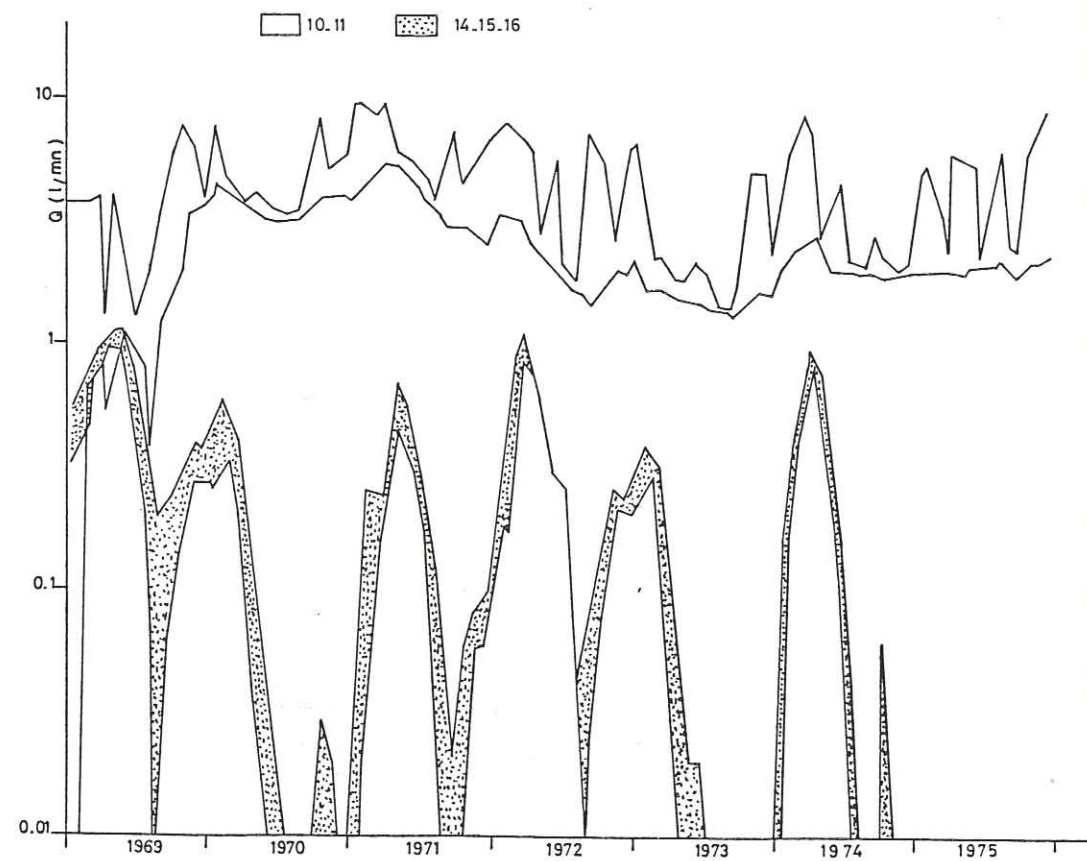


Fig. 92. - Drains extérieurs R.D. : 12 et 13

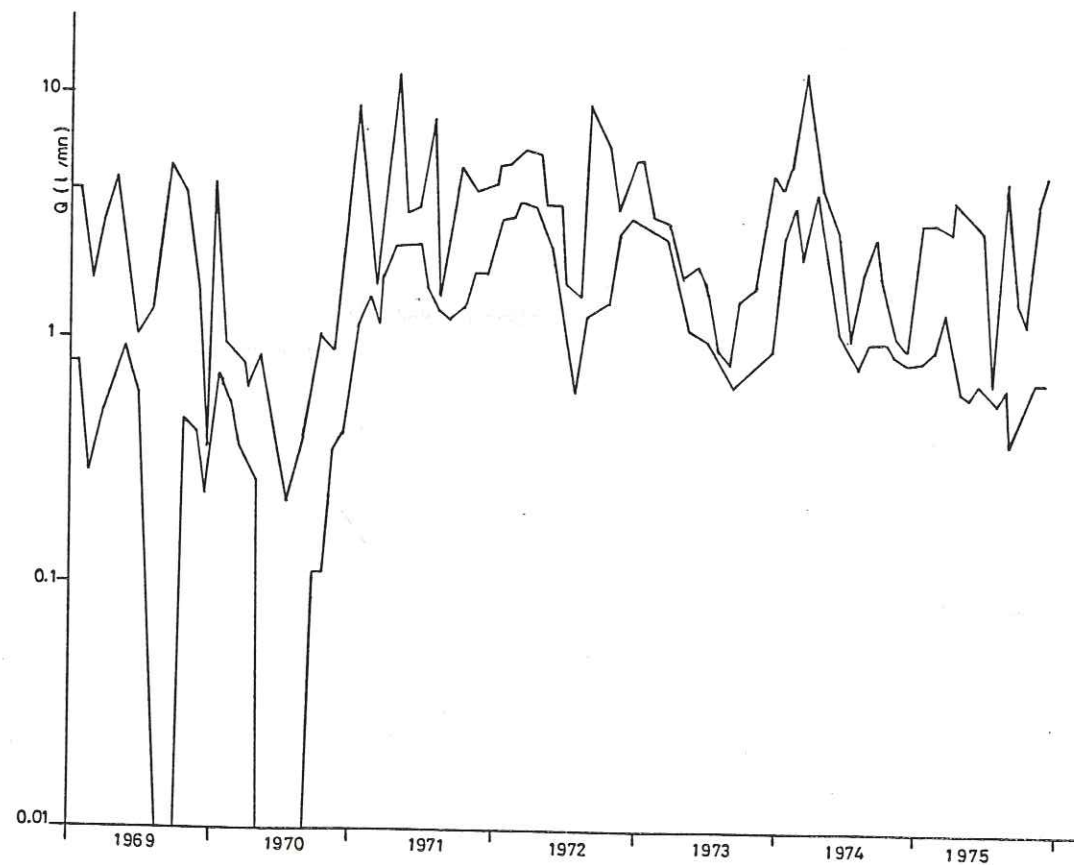


Fig. 94. - Pluviométrie

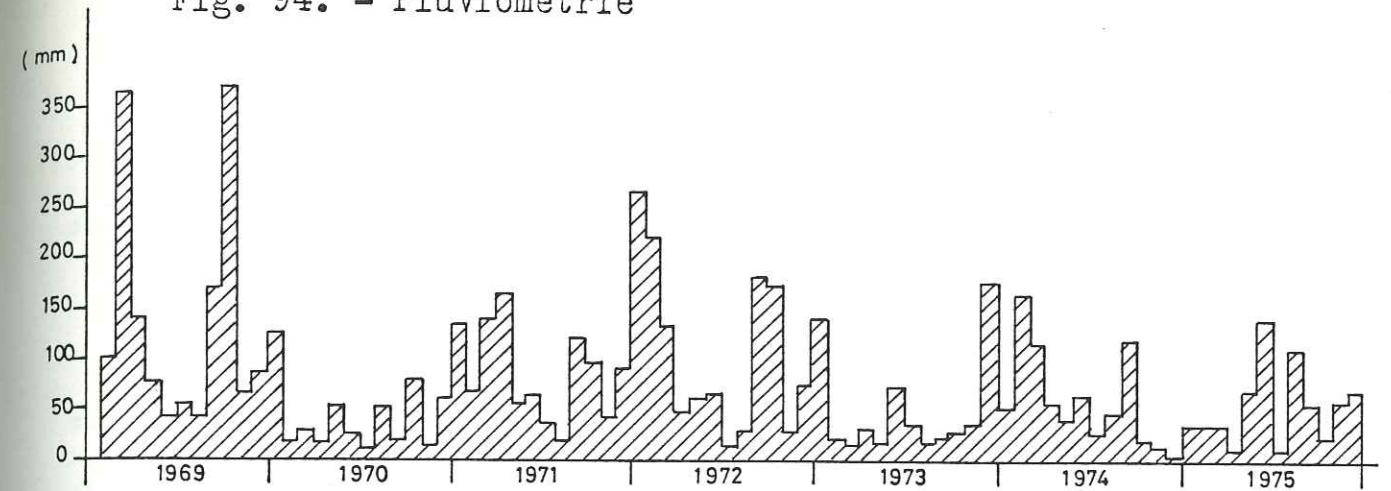


Fig. 95. - Cote du plan d'eau

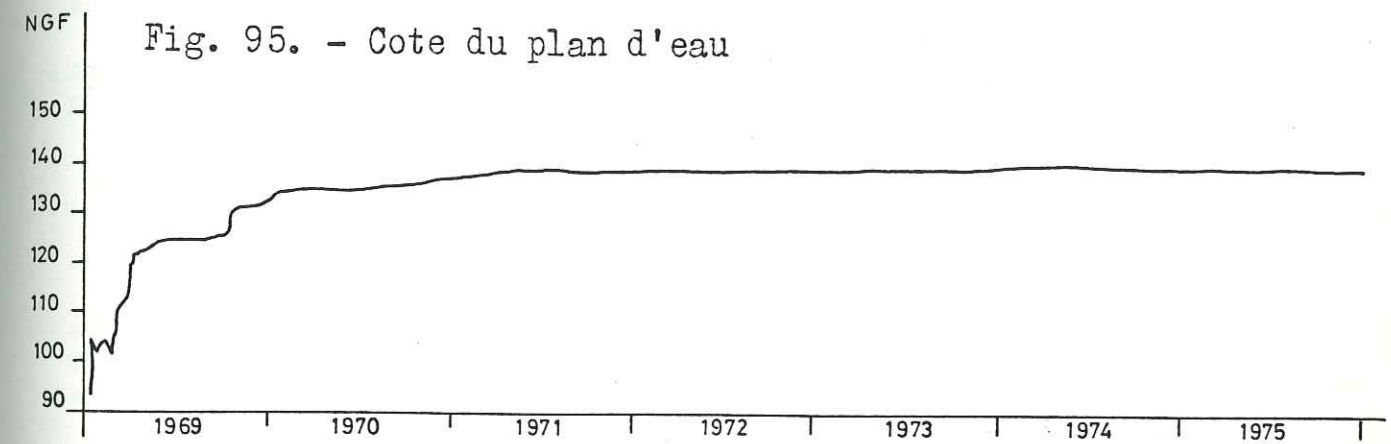
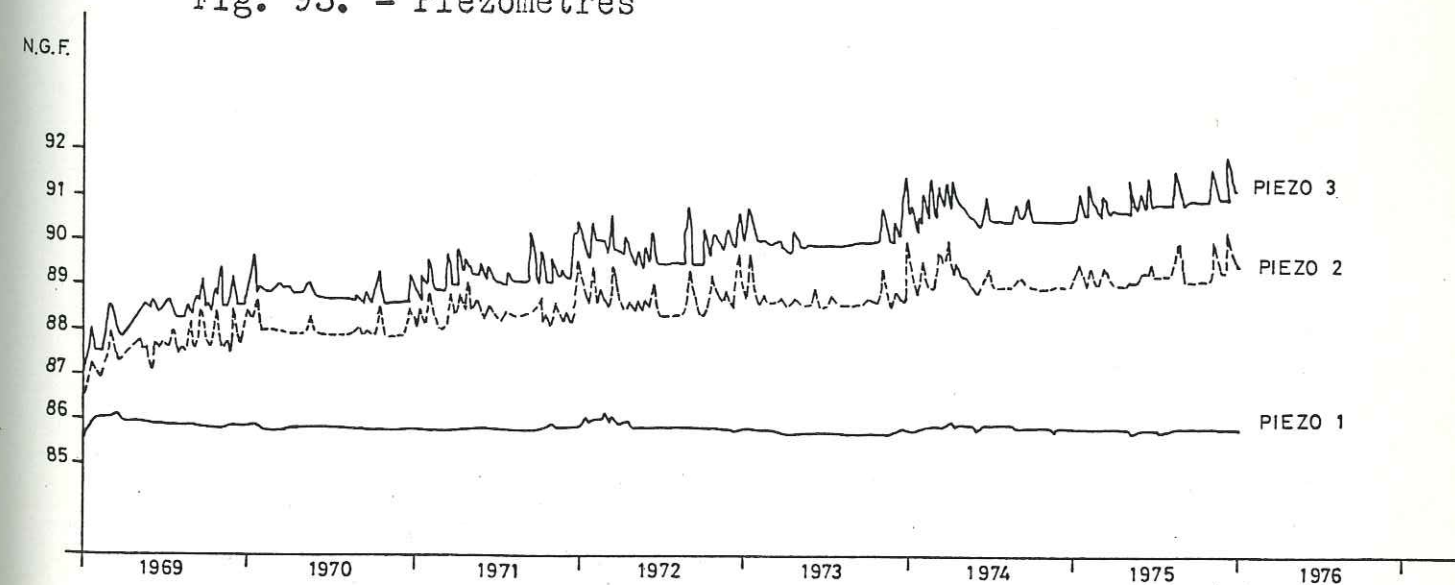


Fig. 93. - Piézomètres



7.2 - PIEZOMETRES 2 ET 3 (rive droite)

Ils ont accusé la montée du plan d'eau en 1969 et se sont stabilisés en avril 1970.

On peut faire 3 observations intéressantes à leur sujet :

- ils sont influencés par les précipitations qui peuvent parfois provoquer des battements de 1,5 m environ (fig. 94) ;
- après la stabilisation du plan d'eau à la cote 139 en avril 1971, ils ont continué à "monter" et cela de façon régulière pour tous les deux. La pluviométrie se superpose à cette montée qui ne lui est pas liée comme on peut le constater sur la figure 95 ;
- depuis avril 1971 jusqu'à décembre 1975, le piézomètre n° 2 est remonté de 1,0 m (88,4 à 89,4 N.G.F.) et le piézomètre n° 3 de 2,0 m (89,0 et 91,0 N.G.F.).

8 - TABLEAU COMPARATIF DE L'EVOLUTION DES DEBITS DANS LE TEMPS

Dans le tableau comparatif ci-dessous, nous allons voir les différences sur le débit total des drains par catégorie. Un débit global ne signifierait rien du fait des fortes différences existant entre les divers types de drains.

Drains galerie	Débit max. l/mn Avril 1971	Débit max. l/mn Décembre 1975	Diminution en %
R.G. Dg 1 + 18 + 19 + 20 + 21 + 22 + 23	11,9	8,9	25,2
R.G. Dg 1 + 3 + 4 + 7 + 14 + 15 + 16	39,3	31,1	20,9
TOTAL R.G. + R.D.	51,2	40,0	21,8
Drains murettes			
Supérieurs DM R.G. 3 - 4 DM R.D. 5 - 6	32,0	2,3	92,8
Inférieurs DM R.G. 1 - 2 DM R.D. 1-2-3-4	69,3	9,2	86,7
TOTAL Supérieurs + Inférieurs	101,3	11,5	88,6

9 - INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Après ce qui a été observé précédemment, on peut faire les remarques suivantes :

9.1 - DRAINS GALERIE

Pour la plupart on constate une diminution de leur débit. Mais l'absence de piézomètres associés à ces drains empêche de conclure de façon certaine. En effet deux cas peuvent se présenter et l'on peut avoir :

- soit un colmatage amont de la cuvette, du terrain ou du voile (si l'on pouvait prouver que les sous-pressions diminuent) ce qui est une hypothèse favorable,
- soit une perte d'efficacité des drains (si l'on pouvait prouver que les sous-pressions augmentent) ce qui peut alors être dangereux.

Le fonçage de piézomètres pourrait permettre de répondre à cette question.

Le débit de quelques drains est en augmentation, à savoir le R.G. Dg 1 surtout, le R.D. Dg 3 et le R.D. Dg 4. Ces augmentations bien que faibles marquent une "tendance". Il faudra particulièrement suivre leur évolution dans l'avenir. En effet, une augmentation progressive des débits à charge constante (le plan d'eau ne varie pas) peut résulter localement d'une perte d'étanchéité du voile d'injection ou bien du terrain. Dans le premier cas il pourrait y avoir entraînement des composants du voile, dans le deuxième cas un entraînement des pélites, ou une ouverture des fissures.

L'analyse des eaux (nature des particules transportées) devrait permettre de préciser ce phénomène.

Les débits totaux de fuites restent faibles et ont diminué d'environ 22 % en 5 ans.

9.2 - DRAINS MURETTES

- Les drains murettes supérieurs ont des débits qui diminuent dans le temps mais qui restent très liés aux précipitations (fig. 94) dont ils semblent uniquement dépendre (surtout DM R.D. 5-6). La diminution des débits (fig. 88) s'explique bien par la baisse de la pluviométrie.

- Les drains murettes inférieurs ont un comportement assez différent et ne sont plus liés à la pluviométrie seule. Le DM R.G. 1-2 a une évolution stationnaire, alors qu'en rive droite, le DM R.D. 1-2-3-4 voit son débit considérablement diminuer. On peut envisager qu'il se produit un resserrement des fissures dans les pélites au niveau de la zone de collage, ce qui va dans le sens de la sécurité.

9.3 - DRAINS EXTERIEURS

Ils réagissent de façon égale depuis que le plan d'eau est stabilisé à la cote 139 (fin 1970). Leurs débits sont essentiellement fonction de la pluie.

Le faisceau Dd 14-15-16 est le seul qui ne réagisse pas immédiatement aux pluies. Le cheminement assez long des eaux le long de la faille F4 explique ce décalage.

9.4 - PIEZOMETRES

En rive gauche, le piézomètre n° 1 n'a pas réagi à la montée du plan d'eau en 1969-1970.

La pluie semble d'autre part très faiblement l'influencer. Peut-être est-il colmaté et de ce fait devenu inutilisable ?

En rive droite, les piézomètres n° 2 et 3 effectuent une montée très régulière.

Etant donné que les drains ont des débits qui, de manière générale diminuent, cela semblerait vouloir dire que ceux-ci perdent un peu de leur pouvoir.

Il ne semble pourtant pas que cela soit alarmant, le terrain naturel étant aux environs de la cote 97 N.G.F. alors que les piézomètres indiquent des niveaux à 88,5 et 91.

Il faut cependant suivre ce phénomène de près car toute accélération de ce processus aurait un caractère dangereux.

10 - CONCLUSION

- L'ensemble des phénomènes observés pendant ces 8 années permet de dire que tout le système de contrôle fonctionne bien et que l'on assiste à une diminution générale du débit des drains. Un "nettoyage" de ceux-ci serait souhaitable pour qu'ils conservent toute leur efficacité.

Les débits de fuite observés sont très acceptables compte tenu de l'importance d'un ouvrage comme le Salagou. Cependant quelques drains galerie (cf. 9.1) devront faire l'objet d'une surveillance particulière car l'on a observé une augmentation continue de leurs débits.

L'attention est attirée également par la montée régulière des deux piézomètres de rive droite qui pourrait prouver une perte d'efficacité de certains drains (drains extérieurs rive droite ?) ou bien le fait que la nappe n'a pas encore atteint son nouvel équilibre.

Des piézomètres supplémentaires permettraient de préciser la topographie de la nappe entre le plan d'eau et l'aval du barrage, ce qui n'est pas possible actuellement.

- Il nous avait été suggéré de mettre en place un signal d'alarme basé sur une mesure du débit des drains. Pour cela il faudrait collecter les drains existants situés dans les galeries de pied, le signal fonctionnant quand un certain débit serait dépassé.

Il ne semble pas qu'une telle méthode globale serait concluante pour plusieurs raisons :

- un drain à faible débit peut voir celui-ci augmenter de façon importante, et ce phénomène se trouver masqué par une légère diminution d'un drain à fort débit, l'un compensant l'autre. La sécurité de l'ouvrage pourrait alors diminuer sans que l'on s'en aperçoive ;
- certains drains ont des débits importants, liés simplement à la pluie. Une très forte pluie pourrait alors déclencher l'alarme sans qu'il y ait risque pour l'ouvrage.

Aussi la meilleure solution semble de suivre méthodiquement l'évolution des courbes de débit des drains (et des piézomètres) dans le temps, ainsi que toutes variations brutales de ceux-ci, variations qui ne seraient pas liées à de fortes précipitations, ou à un changement brusque de la cote du plan d'eau.

III - ETUDES GEOLOGIQUES DE REFECTION D'OUVRAGES ANCIENS

Aujourd'hui, de nombreux ouvrages ont vieilli et le géologue est parfois appelé à donner son avis sur des désordres plus ou moins graves qui apparaissent peu à peu. Ceci est fréquent pour les barrages qui ne font pas l'objet d'une surveillance rigoureuse (ouvrages privés) et qui, un beau jour, inquiètent leur propriétaire.

La plupart du temps, l'ingénieur-conseil est obligé de faire une approche en trois temps :

- récupération de la documentation existante,
- travaux de reconnaissance,
- travaux de confortement.

A - RECUPERATION DE LA DOCUMENTATION

Celle-ci est le plus souvent inexistante en ce qui concerne la géologie. Parfois, l'entreprise (souvent locale) qui a édifié le barrage a disparu et avec elle ses archives. Il en est évidemment de même pour ce qui concerne les caisses de carottes quand des sondages de reconnaissance ont eu lieu.

Quand la documentation est retrouvée, elle est parfois très fragmentaire et combien apparaît alors important le manque d'indications sur certains plans : date d'exécution, cotes, niveaux d'études, travaux réellement exécutés !

B - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Devant le problème posé, géologues et ingénieurs sont obligés de redéfinir un programme de travaux de reconnaissance pour apprécier le niveau de fondation atteint, vérifier si des injections ont été faites, examiner la nature du contact béton-rocher, ausculter l'ouvrage en réalisant de simples piézomètres, etc. Cette phase est parfois difficile à faire admettre au client, car elle n'est pas corrective et souvent coûteuse.

C - TRAVAUX DE CONFORTEMENT

Ce n'est qu'après l'acquisition d'une nouvelle connaissance de l'ouvrage que des réparations plus ou moins complexes et onéreuses seront proposées (exécution de voiles d'étanchéité, d'injection de collage, de voile de drainage, etc.).

Le géologue, pour ce qui le concerne, se retrouve alors au stade des travaux, dans un contexte cependant différent puisqu'il travaille avec quelques milliers ou millions de mètres cubes d'eau derrière lui.

IV - TABLEAUX DE SYNTHESE (Chapitre IV)

Au terme de ce chapitre, les études géologiques pendant et après les travaux sont, dans leurs grandes lignes, synthétisées dans le tableau ci-dessous.

Contenu des études	Niveau d'étude	EXECUTION (TRAVAUX)	AUSCULTATION APRES MISE EN EAU	REFECTION
Levés géol. des fouilles (plans de récolement)				
- décapage		1/500 à 1/100		
- galeries		1/200 à 1/100		
- bassin de dissip.		1/500		
- évacuateur de crues		1/200 à 1/100		
Définition et suivi des organes d'étan- chéité		- Plots d'essai - Géométrie - Profondeur - Espacement forages et lignes - Nature des coulis - Inclinaison - Pression		
Définition et suivi des réseaux de drains et piézomètres		- Implantation - Nombre - Profondeur		
Contrôle de la stabi- lité des berges			Visites périodiques	
Contrôle des drains et piézomètres (mesures)			Synthèse annuelle	
Récupération docum. existante			Dépouillement	Dépouillement
Travaux reconnaissance				Contrôle de l'état du site
Travaux de confor- tement				Injections d'étanchéité, collage, drainage
Exemples proposés				
- Type d'ouvrage		B. de Laprade (Aude)	B. du Salagou (Hérault)	
- Hauteur		Digue en gore 27 m	Digue enroch. 63 m	
- Volume stocké		8,8 Hm3	125 Hm3	
- Etude spécifique		Dépouillement des injections	Suivi drains- piézo. sur 7 ans	

Dans le tableau suivant sont également résumées les principales caractéristiques concernant le traitement par injections du barrage de Laprade (Aude).

BARRAGE	LAPRADE (Aude)		
Hauteur	27 m		
Longueur	620 m		
Volume digue	590000 m3		
Volume stocké	8,8 Hm3 (utile)		
<u>Lithologie</u> et <u>Vitesse</u> <u>sismique</u> m/s	Arène et gore	G0]	
	Granite altéré	] 700-1700	
	à très altéré	G1]	
	Granite sain fissuré	G2	3100-3750
	Granite sain peu ou pas fissuré	G3	4000-5550
<u>Ecran d'injection</u>			
Trait. de peau	TM 0-6 m	5 lignes ou parois	
Trait. profond	C ou TM 6-15/24	2 lignes + parois	
	C ou TM 6-15/21	3 lignes	
Espacement sondages	2,0 m		
Ecartement lignes	1,1 m		
<u>Coulis</u>	C/E 0,25	C/E 0,5	C/E 0,15 (paroi)
Ciment	165 kg	270 kg	93 kg
Cendres	165 kg	270 kg	93 kg
Bentonite	30 kg	28 kg	32 kg
Activant	11 kg	16	9
Eau	850 l	764 l	910 l
<u>Exécution</u>			
Nombre forages	1367 (voile normal seul)		
Perforation	14439 m	"	"
Ciment ou T.E.C.	3258 T.E.C.	"	"
Absorp. ciment	225 kg/ml	"	"
Perméabilité après injection			
- peau	5,7 U.L. (0-6 m)		
- profond	2,4 U.L.		
<u>Observations</u>			
C	= Traitement classique injection par trou ouvert		
TM	= Traitement par tube à manchettes		
U.L.	= Unité Lugeon		
C/E	= kg équivalent - ciment/eau en litres		

CHAPITRE V

REFLEXIONS SUR LES MOYENS D'ETUDE

Dans ce chapitre, nous allons essayer de montrer les avantages et les inconvénients que l'on rencontre suivant les moyens d'étude mis en oeuvre dans les projets de barrages.

Les principaux thèmes de réflexion concernent :

- les études géologiques de terrain sensu stricto,
- l'adaptation des reconnaissances au contexte géologique,
- l'évolution observée dans les différents moyens de reconnaissances,
- les reconnaissances mal conçues.

I - ETUDES GEOLOGIQUES DE TERRAIN

Examinons tout d'abord le contenu de ces interventions, ensuite les quelques recommandations souhaitables pour une bonne exécution.

A - CONTENU DES ETUDES

Ce travail initial devra permettre :

- de parcourir en détail le périmètre de l'aménagement,
- de dresser une carte géologique,
- de poser les problèmes du site,
- de choisir et implanter les reconnaissances optimales.

1 - Parcours de l'aménagement

Quel que soit le contexte géographique, un parcours plus ou moins détaillé de toute la zone de l'aménagement est indispensable afin de s'imprégner du contexte géologique et de pouvoir réaliser si nécessaire une carte géologique convenable. Ce point, qui peut apparaître comme une évidence, est pourtant bien souvent réduit à sa plus simple expression, surtout en ce qui concerne les barrages de faible hauteur, pour lesquels un document géologique n'a pas de caractère obligatoire ni réglementaire.

Il est en effet assez courant de retrouver dans les dossiers des photocopies, d'échelles variées, de cartes géologiques régulières.

Même si les documents utilisés sont de bonne qualité, ils n'ont en réalité que la précision d'une carte au 1/50000, dans le meilleur des cas.

Mais surtout, le "cartographe généraliste" n'aura pas noté sur de tels documents les petites informations, anodines à ses yeux, mais qui peuvent présenter un intérêt primordial pour le projet lorsqu'on en fait une synthèse.

Or, si ce travail de complément, d'ajustement, voire de correction géologique, n'est pas fait dès le début des études, il sera tout simplement laissé de côté puisque les phases ultérieures vont voir le géologue se concentrer sur des surfaces de plus en plus réduites, avec des plans de plus en plus précis.

Il est certain que les réalités et les impératifs de la géologie professionnelle font que, bien souvent, l'on ne peut pas, pour des raisons de planning ou contractuelles, effectuer ce travail de terrain à la période la plus propice, comme peuvent le faire certains géologues pour qui le temps ne compte pas. Et ce manque de "confort", qui parfois est extrême selon le pays ou la saison, explique la facilité avec laquelle quelques-uns se laissent aller à la reproduction in extenso de documents existants.

2 - Cartographie géologique

Dans les études de barrages, la cartographie géologique est souvent de valeur très inégale et varie selon les pays et les conditions d'observation rencontrées. Cela est d'ailleurs d'autant plus marqué que la précision des études augmente.

a - Cartographie générale

En France, le support topographique régulier au 1/25000 permet, la plupart du temps, d'aborder tous les problèmes d'inventaire, de diagnostic et d'études préliminaires. En effet, la qualité des cartes éditées par l'Institut Géographique National est telle qu'elles supportent facilement un agrandissement au 1/10000 ou 1/5000. Avec cela, le géologue reconnaît aisément un site, et la précision de ses levés est amplement suffisante pour le but poursuivi. D'autre part, ces documents existent aujourd'hui partout et sont peu coûteux.

Les nouvelles séries bleues sont pratiques et de présentation agréable. Cependant, un perfectionnement pourrait être apporté dans leur utilisation : il serait intéressant d'avoir un recouvrement suffisant des cartes les unes par rapport aux autres, afin de supprimer l'inconvénient que présentent les projets "à cheval" sur 2, 3 ou 4 coupures dans les cas les plus défavorables. Cela oblige parfois à des manipulations fastidieuses ou à des découpages plus ou moins heureux.

Quant aux cartes géologiques régulières au 1/5000, elles sont un moyen d'étude précieux qui permet au géologue d'entrer rapidement dans le vif du sujet en lui offrant, au moindre coût, le contexte géologique régional de son étude. Cependant ces cartes pèchent au niveau de la représentation des terrains de couverture, volontairement omis, par opposition au substratum rocheux. Bien souvent, il faut donc retracer les contours exacts des affleurements et "désinterpréter" la carte existante, ce qui, parfois, peut amener à réinterpréter certaines structures cachées avec beaucoup plus de recul (le pays est souvent neuf pour le géologue du génie civil) que n'en avait l'auteur de la carte initiale.

Ce réajustement d'un travail existant est d'un grand intérêt puisqu'il permet un contrôle des données, une analyse de leur interprétation, pour finalement aboutir à un document représentant de façon plus concrète la réalité du terrain, qui seule compte pour l'ingénieur projeteur.

A l'étranger, surtout dans les pays en voie de développement, l'approche reste parfois plus "traditionnelle" car, d'une manière générale, les documents géographiques réguliers sont moins précis et les cartes géologiques trop souvent inexistantes ; on en revient donc là un peu au stade de la "découverte" et des méthodes classiques qui, si elles sont plus intéressantes, demandent un investissement intellectuel plus lourd en journées de terrain et peuvent augmenter considérablement le prix de revient des études et du support logistique d'une mission (nécessité de prises de vues aériennes par exemple).

Quoi qu'il en soit, l'établissement d'une carte géologique générale à petite échelle reste le moyen d'étude de base, et cela même si les renseignements récoltés sont très réduits. C'est une étape obligée, hélas trop souvent négligée, car elle nécessite la mise en place de budgets parfois importants. Dès le départ, la prise de conscience d'un aménagement dans son cadre géologique général reste la garantie optimale d'une bonne logique d'intervention dans les stades d'études ultérieurs.

b - Cartographie de détail

Elle ne se justifie qu'au niveau des avant-projets. Nous avons défini les échelles souhaitables dans le chapitre II et nous n'y reviendrons pas.

Lorsque les conditions d'affleurement sont satisfaisantes, il est avantageux de faire réaliser un fond topographique par photorestitution en prenant soin, avant les prises de vues, de matérialiser au sol par des cocardes certains points singuliers si nécessaire.

Ce qui compte en effet dans ce type de document, c'est la précision des levés. L'ingénieur qui va bâtir son projet doit disposer d'un support topographique puis géologique le plus fiable possible pour affiner ses métrés.

Toutes les reconnaissances effectuées seront rattachées à cette topographie de façon systématique. On rencontre trop d'études où les sondages sont implantés "à peu près" et il en résulte parfois des pertes importantes d'information, surtout quand le site est séparé du bureau par des centaines voire des milliers de kilomètres.

Dans ce type de travail, nous attachons également une grande importance dans un premier temps, à la cartographie géologique "brute", c'est-à-dire sans interprétation et offrant un "état des lieux" le plus complet possible. Il devra montrer, objectivement, à partir de quels documents initiaux les interprétations ultérieures ont pu être menées (cf. barrage de Montbel, carte géologique de la cuvette). Cela permet d'apprécier la confiance que l'on peut alors accorder aux synthèses.

Enfin, pour ces levés de détail, la représentation graphique devra mettre en avant les observations majeures par rapport aux informations mineures. Trop souvent, des reports d'accidents régionaux peuvent être confondus, sur les cartes, avec des cassures de deuxième ordre.

En plus de ces levés, le géologue complètera sa prestation par l'utilisation des techniques qui lui sont propres, à savoir analyse structurale, sédimentologie, pétrographie détaillée, etc.

Précisons toutefois qu'il faudra garder les pieds sur terre et avoir à l'esprit que les techniques de construction restent assez grossières.

Quoi de plus désagréable pour l'ingénieur de génie civil que l'emploi de termes pétrographiques, très précis certes, mais pratiquement incompréhensibles ? Mieux vaut parler, quand on le peut, de basalte noir que d'ankaramite, même si le microscope permet cette précision. Là encore, une certaine modestie dans le choix des termes avec une légende de la carte plus accessible facilitera le dialogue.

3 - Poser les problèmes du site

Plus les seules études de terrain permettront de poser rapidement les problèmes d'un aménagement, plus la crédibilité du géologue y gagnera, et plus il apparaîtra comme le seul capable de débrouiller cet écheveau que peuvent constituer les données naturelles d'un site.

C'est pour cette raison que nous considérons les études géologiques préliminaires comme très importantes dans les études de barrages. Elles sont une pré-faisabilité de l'avant-projet sommaire, puisque dans de nombreux cas elles peuvent permettre de conserver ou de rejeter des aménagements.

Pour étayer cela, nous avons rassemblé dans les tableaux 1, 2 et 3 ci-après les diagnostics et résultats que nous avons obtenus sur 36 sites de grands barrages et 135 sites de barrages collinaires. Ces tableaux précisent :

- le nom du barrage (ou le nombre de sites dans le département ou le pays),
- le département ou pays,
- la lithologie du site,
- la lithologie de la cuvette,
- l'avis géologique sur la valeur de l'aménagement, à savoir :
 - . favorable,
 - . défavorable,
 - . réserves sur le diagnostic,
- les conditions géologiques rédhibitoires ou à vérifier,
- la hauteur du barrage,
- le volume stocké,
- le type d'ouvrage possible,
- la nécessité de réaliser d'emblée des tranchées de reconnaissance (observations de surface insuffisantes).

L'examen de ces tableaux permet de faire les remarques suivantes :

a - Valeur du site

Le diagnostic géologique pour les grands barrages est favorable dans 47 % des cas, alors que pour les petits ouvrages le pourcentage tombe à 19 % seulement. Ceci s'explique naturellement par le fait qu'au niveau préliminaire la recherche de grands sites est plus précise dès le départ, et qu'il y a bien souvent une première approche plus réaliste que pour les autres.

Il faut voir également que, pour les barrages de faible hauteur, on est plus enclin à un diagnostic du "tout ou rien", certains "défauts" d'un site ne pouvant être corrigés sans des moyens techniques hors de proportion avec la nature de ces aménagements. Ceci nous a conduit à faire une catégorie "peu favorable" pour ces derniers. Nous incluons ici tous les sites qui présentent de trop nombreuses réserves sur leur faisabilité géologique et pour lesquels seuls des besoins impérieux pourraient justifier une poursuite de l'étude.

TABLEAU 1 - DIAGNOSTIC APRES GEOLOGIE DE SURFACE - BARRAGES SUPERIEURS A 20 M

NOM DU SITE	DEPART. ou PAYS	LITHOLOGIE SITE	LITHOLOGIE CUVETTE	AVIS APRES ETUDE SURFACE	CONDITION GEOLOGIQUE REDHIBITOIRE OU A VERIFIER	H BARRAGE (m)	V STOCKE (Mm3)	TYPE OUVRAGE POSSIBLE	Tranch. des étude surf.
LA VOULTE	HERAULT	Schiste	Schiste	F		35		Enroc. ou béton	
ST-MARTIN DES PUIITS	AUDE	Conglomérat	Congl., calcaire, marne, schiste	R	ES	43	19	Enroc. masque	
MONTJOI AMONT	AUDE	Schiste	Schiste, cong.	R	EC (370)	62	27	Enrochements	
TOUCHE POUPARD	DEUX-SEVRES	Amphibolite	Amphibolite, schiste	F		27	6	Enroc. ou béton	
PAILLERY	ARDECHE	Gneiss	Gneiss, granite	R	EC	65	25		
RANC DE COURPATEYRE	ARDECHE	Gneiss	Micaschiste, gneiss	F		70	52,5	Voute épaisse	
GORGES DE LA LIGNE	ARDECHE	Calcaire, marne	Calcaire, marne	F		39	13,8	Contreforts	
TAURIERS	ARDECHE	Granite	Micasch., gneiss, granite	F		64	22		
THUEYTS	ARDECHE	Gneiss, basalte	Gneiss, basalte	R	ES et SC	54	21,2	Voute multip.	
ECHELLE DU ROI	ARDECHE	Gneiss, basalte	Gneiss, basalte	D	ESC	68	18,2		
TRAS LES BEAUMES	ARDECHE	Granite	Granite, grès	F		44	12,2	Voute épaisse	
ST ARNAC	P.-O.	Gneiss	Marne, calc., granite gneiss	R	EC (230)	49	19,9	Enroc. masque	
ANSIGNAN	P.-O.	Granite	Gran., gneiss, calc. marne	F		83	38,5	Enroc. ou béton	
REDOUDSE	P.-O.	Schiste	Schiste	F	(EC)	54	14,1	Enroc. masque	
CHAUVET	DROME	Marne, grès, sable	Marne, grès, sable	R	ES	26	31	Terre	
UBRIEUX	DROME	Calc., calc. marneux	Marne	R	ES et SC (420)	29	3,8	Enroc. masque	
REMUZAT	DROME	Marne	Marne	D	SC			Terre	
MOULIN TEMPS	DROME	Calc. marneux, marne	Marne	F		41	50	Enroc. masque	
ST-MARTIN DE VILLEREGLAN	AUDE	Grès, marne, poudingue	Grès, marne, poudingue	R	SS	39	108	Terre	
AURIBEAU	ALPES-MAR.	Gneiss	Gneiss, pegmatite	F		36	5,9	Poids béton	
CIPIERES	ALPES-MAR.	Calc. argileux, gypse	Marne-calc., dolomie	D	ES	50	8,6		
BUFFET	DROME	Calc. gréseux, grès	Marne, Calc. gréseux	R	ES	58	41,2	Enroc. masque	
CURNIER	DROME	Calc. et marne	Calcaire, marne	R	ES	60	38,8	Terre masque	
STE JALLES	DROME	Calc. marneux, marne	Marne	F		66	150	Enroc. masque	
PAS DES ONDES	DROME	Calcaire, marne	Marne	R	SC (535)	30	9,3	Poids béton	
VALENTINS	DROME	Calcaire, marne	Calc. marn., marne	F		50	41	Terre ou enro.	
SIRAILLOT	DROME	Marne, grès	Marne, calcaire, grès	R	ESC (280)	25	4	Terre ou enro.	
GUISAND	DROME	Calc. marneux,	Marne	D	SS	40	7	Enro. ou terre	
BOIS SEC	DROME	Calcaire	Marne, calcaire, grès	R	ESC	36	12,4	Enrochements	
ST-GERAUD	TARN	Micaschiste, gneiss	Micaschiste, gneiss	F		45	15	Enro. noyau	
MONTBEL	ARIEGE	Marnes, conglo.	Marne, grès, conglo.	F		35	60	Terre	x
BOURDIC	GARD	Marne, grès, calc.	Marne, grès, sable, argile	R	ESC	23	3,2	Terre	
LEUCAMP	CANTAL	Gneiss-micaschiste	Micaschiste, schiste	F		60	40	Enr. ou poids béton	
ST JULIEN DE BRIOLA	AUDE	Marne, grès, sable	Marne, grès, sable	R	ES	36	34		x
LA BORIE	GARD	Gneiss	Gneiss, micaschiste	F		51	18	Enro. ou poids béton	
LES OLIVETTES	HERAULT	Schiste	Schiste	F		36	6,7	Enrochements	

F = Favorable
D = Défavorable
R = Réserves (> 20 m) ou PF = Peu favorable (< 20 m)
ES = Etanchéité site

EC = Etanchéité cuvette
SS = Stabilité des versants du site
SC = Stabilité des versants de la cuvette
M = Matériaux
(230) = Cote à partir de laquelle l'étanchéité n'est plus assurée

TABLEAU 2 - DIAGNOSTIC APRES GEOLOGIE DE SURFACE - BARRAGES INFERIEURS A 20 M

NOM DU SITE	DEPART. ou PAYS	LITHOLOGIE SITE	LITHOLOGIE CUVETTE	AVIS APRES ETUDE SURFACE	CONDITION GEOLOGIQUE REDHIBITOIRE OU A VERIFIER	H BARRAGE (m)	V STOCKE (Mm3)	TYPE OUVRAGE POSSIBLE	Tranch. des étude surf.
COCUMONT	LOT et GAR.	Marne, grès, sable	Marne, grès, sable	PF	ESC	13	1,0	Terre	x
MAS DE LONDRES	HERAULT	Calcaire	Calcaire	D	ESC	11	0,2		
ECOUTE S'IL PLEUT	LOT	Calcaire	Calcaire	D	ESC	8	0,09	Enrochements	
MAURRIN SUD	LANDES	Marne, grès	Marne, grès	PF	ESC	8	0,8	Terre	x
BIRAC	GIRONDE	Marne, calc. gréseux	Marne, calc. gréseux	D	ESC	13	2,3	Terre	x
BAZUS	Hte GARONNE	Marne, sable	Marne, sable	PF	ES	15	0,75	Terre	x
RICONE	LOT et GAR.	Marne, grès, sable	Marne, grès, sable	PF	ESC	10	0,5	Terre	x
ALOS	TARN	Marne, calcaire	Marne, calcaire	PF	ES	7			x
ST-LEON	Hte GARONNE	Marne, sable	Marne, sable	PF	EC	10	0,2	Terre	x
TAMNIES	DORDOGNE	Calcaire	Calcaire	D	EC et M	3	0,08	Terre	x
MARCILLAC	DORDOGNE	Calcaire	Calcaire	D	EC et M	3	0,09	Terre	x
ST-GENIES	DORDOGNE	Calcaire, sable	Calcaire, sable	D	ESC et SS	11	0,6	Terre	x
LA MARTINIE	CORREZE	Marne	Marne	D	SC	8	0,01	Terre	x
BALERME	Hte GARONNE	Marne, grès	Marne, grès	PF	ESC	16	2,5	Terre	x
FAJANE	ARIEGE	Marne, sable, grès	Marne, grès, sable	PF	ESC	19	3,0	Terre	x
MAS RIGAUD	HERAULT	Marne-calcaire	Marne-calcaire	D	EC				
ST JEAN DE CUCULLES	HERAULT	Grès, marne	Marne, marne-calc.	F		10	1,0	Terre	
SUQUET	HERAULT	Calcaire	Calcaire	D	ESC				
ASSAS	HERAULT	Marne-calcaire	Calcaire, marne, arg.	D	EC				
ST JEAN DE BRUEL	AVEYRON	Schiste	Schiste	PF	ES et M	6			
ESTAGNOL	AUDE	Marne, grès, sable	Marne, grès, sable	PF	ES	3		Terre	x
CLARET (n° 7)	HERAULT	Marne-calcaire	Marne-calcaire	F		11	0,09	Terre	
SETTAT	MAROC	Marne, calcaire	Marne, calcaire	F		10	2,0	Terre	
BARAQUEVILLE	AVEYRON	Micaschiste, gneiss	Micaschiste, gneiss	F		10	0,2	Terre	x
LA JASSE AMONT	HERAULT	Conglomérat, marne	Conglo, marne, calc.	PF	EC	10	0,2	Terre	
LA JASSE AVAL	HERAULT	Conglomérat, marne	Conglo, marne	D	ES				
FONT DU ROC	HERAULT	Calcaire, marne	Marne-calcaire	D	ES				
BROUQUEYRAN	GIRONDE	Marne, grès, sable	Marne, grès, sable	PF	ES et SS	7	0,5	Terre	x
GARB (23 sites)	MAROC	Marne, sable	Marne, sable	12D, 5PF 6F	6SS, 1SC, 10ES 3EC, 3Divers				
AUDE (53 sites)	AUDE	Molasse, gneiss, schiste, granite	Molasse, gneiss schiste, granite	37D, 5PF 11F	4SS, 31ES, 10EC 11M				53x
BUEGE (7 sites)	HERAULT	Marne, calcaire	Marne, calcaire	4D, 1PF 2F	2SS, 4ES, 2EC				
ST MARTIN (8 sites)	HERAULT	Marne, calc., conglo.	Marne, calc., conglo.		2SS, 1SC, 5ES, 7EC				
CHENON	CHARENTE	Calcaire	Calcaire	PF	ESC	5		Terre	
ARNEDE	HERAULT	Calcaire	Calcaire	D	SC	10			
CASIER 5 (13 sites)	HERAULT	Marne, calc., grès	Marne, calc., grès	6D, 5PF, 2F	1SS, 5ES, 3EC				2x
CEILHES	HERAULT	Schiste, granite	Schiste	F		6		Béton	

F = Favorable
D = Défavorable
R = Réserves (> 20 m) ou PF = Peu favorable (< 20 m)
ES = Etanchéité site

EC = Etanchéité cuvette
SS = Stabilité des versants du site
SC = Stabilité des versants de la cuvette
M = Matériaux
(230) = Cote à partir de laquelle l'étanchéité n'est plus assurée

TABLEAU 3 - RESULTATS DES ETUDES GEOLOGIQUES PRELIMINAIRES

	Grands barrages (>20 m) (36 sites)	Petits barrages (<20 m) (135 sites)
<u>VALEUR DU SITE</u>		
- Sites favorables	17	26
- Sites défavorables	4	80
- Sites avec réserves/ou peu favorables	15	29
<u>NATURE GEOLOGIQUE DU SITE</u>		
- Roches sédimentaires	19	119
- Roches métamorphiques	14	5
- Roches éruptives	3	11
<u>NATURE GEOLOGIQUE DE LA CUVETTE</u>		
- Roches sédimentaires	18	119
- Roches métamorphiques	10	5
- Roches éruptives	0	11
- Plusieurs types de roches	8	0
<u>CONDITIONS GEOLOGIQUES REDHIBITOIRES</u>		
- Etanchéité du site	2	67
- Etanchéité de la cuvette	1	35
- Stabilité des appuis du site et valeur de la fondation	1	16
- Stabilité des versants de la cuvette	1	3
- Absence de matériaux	0	13
<u>CONDITIONS GEOLOGIQUES ENTRAINANT DES RESERVES</u>		
- Etanchéité du site	10	15
- Etanchéité de la cuvette	6	3
- Stabilité des appuis du site et valeur de la fondation	1	6
- Stabilité des versants de la cuvette	3	1
- Absence de matériaux	0	3
<u>AUTRES CONDITIONS REDHIBITOIRES OU RESERVES</u>		
- Topographie	0	6
- Eau ou terrains salés	0	3
<u>TRANCHEES NECESSAIRES POUR L'ETUDE DE SURFACE</u>	2	72

On voit donc l'importance de bien juger un aménagement en tirant parti, au maximum, de toutes les informations "naturellement" disponibles.

b - Nature géologique du site et de la cuvette

L'échantillonnage que nous avons retenu touche des types de roches assez variés, avec cependant une prédominance pour les roches sédimentaires (marnes, grès, calcaires). En effet, selon la catégorie de barrages envisagée, ces dernières représentent 52 % (> 20 m) et 88 % (< 20 m) de l'ensemble des formations rencontrées.

De nombreux petits sites ont été étudiés dans le Tertiaire du Sud - Sud-Ouest de la France, alors que les autres étaient mieux répartis dans les zones de bordure plus "montagneuses" et géologiquement plus variées.

c - Conditions géologiques rédhibitoires ou entraînant des réserves

- Pour les grands barrages, ce sont les problèmes d'étanchéité qui dominent, aussi bien au niveau du site que pour la cuvette de retenue. Ils apparaissent comme cause de non-faisabilité dans 8 % des cas et dans 44 % des exemples étudiés, l'étanchéité douteuse des aménagements oblige à faire des réserves plus ou moins sérieuses. L'instabilité des versants du site (et la valeur de la fondation), ainsi que celle de la cuvette, n'interviennent que pour 5,5 % des cas rédhibitoires et sont la cause de 11 % des réserves formulées.

Enfin, il est intéressant de noter que, pour les barrages supérieurs à 20 m, la topographie ou les matériaux nécessaires à la construction n'ont jamais été des éléments pouvant remettre en cause un projet.

- Pour les petits barrages, les conditions d'étanchéité du site et de la cuvette interviennent dans 75 % des cas comme un empêchement absolu à la réalisation et dans 13 % des cas rendent le site peu favorable.

Les problèmes de stabilité sont en cause respectivement dans 14 % et 5 % des défauts majeurs ou des réserves importantes.

Par contre, le problème posé par l'absence de matériaux (qualité et/ou quantité) prend une place notable dans cette catégorie d'ouvrages puisqu'il peut conduire à 10 % des rejets définitifs de sites (tout au moins dans les exemples choisis). Il est évident que les matériaux doivent être impérativement trouvés dans la cuvette, pour des raisons économiques et foncières.

Signalons enfin que la topographie et la teneur en sel des terrains peuvent présenter des conditions défavorables dans 7 % des projets au niveau des études préliminaires.

d - Tranchées nécessaires dès l'étude de surface

Là encore, une nette différence existe entre les deux classes de barrages.

- Pour les grands, dans seulement 5,5 % des cas il a fallu recourir à l'exécution de tranchées pour se prononcer sur la qualité d'un aménagement. Cela ne s'est produit que pour les sites implantés dans les molasses de l'Helvétien du Lauragais, où les affleurements sont très rares.

- Pour les petits, l'usage d'une pelle hydraulique dès la première visite est indispensable dans 64 % des cas que nous avons rencontrés en France (les 23 sites du Gharb n'ont pas été pris en compte). Il est en effet primordial d'évaluer rapidement les relations terrains de couverture/substratum (épaisseur, nature, position, profondeur) qui conditionnent la réalisation de l'organe d'étanchéité dans la fondation. Quand on ne peut trouver de solutions simples (la plupart du temps, une clef d'ancrage coupant les circulations sous l'ouvrage, ou un tapis amont), beaucoup de projets sont abandonnés. C'est donc une inconnue qu'il faut lever au plus tôt. De plus, simultanément, on peut tester les zones d'emprunt (volumes) et réaliser quelques essais d'identification sur les matériaux disponibles. Rappelons qu'une à deux journées de pelle sont alors suffisantes.

Néanmoins, dans certains pays où les conditions d'affleurement sont exceptionnelles (Afrique du Nord), une équipe de géologues a pu faire des diagnostics à partir d'un simple examen géologique de surface : sur 179 sites étudiés dans l'ensemble du royaume du Maroc, 46 ont été considérés comme favorables, 17 sont apparus peu favorables et 116 ont été rejetés (ces sites n'ont pas été pris en compte dans le tableau 2).

4 - Choix et implantation optimaux des reconnaissances

Il ne doit pas y avoir de travaux de reconnaissance systématique, mais des travaux permettant de répondre à des questions posées. Ce n'est donc qu'à partir des résultats d'une étude de surface bien conduite que seront définies la nature et la quantité de ces reconnaissances.

Le géologue ne devra pas quitter le site sans avoir défini son programme. L'établissement de ce dernier fait partie intégrante des études géologiques de terrain.

Si, pour les grands barrages, l'exécution de sondages est toujours un passage obligé, pour les collinaires il n'en est souvent pas de même. Ces campagnes sont chères par rapport au projet, aussi le géologue ne devra-t-il utiliser ce moyen qu'à bon escient.

Nous verrons par la suite la façon d'adapter au mieux les reconnaissances selon le contexte géologique du projet.

B - RECOMMANDATIONS

Pour en terminer avec les études de surface qui ne font appel qu'à la science du géologue, et sans vouloir être exhaustif, il nous semble essentiel d'attirer l'attention sur deux points :

- le caractère systématique de la géologie de terrain,
- l'intervention, si possible, d'un même géologue durant la totalité des études.

Le premier point est en effet souvent négligé ; la consultation d'un géologue doit se faire à l'amont des autres interventions et cela même s'il ne semble pas y avoir de problèmes particuliers. Le proverbe "mieux vaut prévenir que guérir" s'applique exactement à la géologie, surtout au niveau de la sécurité d'une part, du prix de revient final d'une opération d'autre part.

Le second point, qui concerne plutôt la conduite du travail, est également primordial. Il apparaît en fait que, si des géologues différents se succèdent sur une même affaire pendant les études de terrain, il se produit un phénomène de lissage des observations qui rend le travail moins précis.

Il est très difficile de faire sentir des impressions et des sentiments qui sont le résultat de nombreuses journées passées sur un site et qui dépendent de l'accumulation d'une quantité de détails. Le successeur "débarque" sans cet acquis précieux, considérant comme résolus les problèmes étudiés avant son arrivée. Si j'attire l'attention sur ce point, c'est que le géologue de barrages est la plupart du temps associé à un ingénieur de génie civil, dont la spécialité permet plus aisément d'éventuelles permutations ou changements de personnel. Autant les éviter dans le domaine particulier des sciences naturelles.

II - ADAPTATION DES RECONNAISSANCES AU CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'adaptation des reconnaissances dépend essentiellement de la nature géologique du site, à savoir des différents types de roches représentés, de l'importance relative des terrains durs ou tendres et d'autres conditions géologiques spécifiques telles que glissements de terrains, fractures, sillons alluviaux, karsts, etc.

Cette fois encore, sans prétendre être complet, nous nous livrerons à quelques réflexions à partir de cas vécus.

A - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE ET TYPES DE ROCHES

Il est nécessaire de distinguer les substratums "durs" des substratums "tendres".

1 - Substratum dur

C'est un cas très classique. L'éternel problème posé au géologue est la définition et le choix du niveau de fondation pour le type d'ouvrage retenu.

Dans le cas du barrage des Olivettes, que nous avons évoqué précédemment, la première solution envisagée était une digue en enrochements. Le seul problème à résoudre était celui de l'épaisseur des terrains de couverture et de la roche très altérée. On y répond facilement par la géophysique couplée avec tranchées et sondages. En revanche, pour la variante en béton compacté, le problème a été complètement différent. Si les sondages et la géophysique ont donné une idée du niveau de fondation acceptable (terrains à 2500 m/s), encore fallait-il que celui-ci puisse être repéré et contrôlé facilement lors de la construction. Aussi, une reconnaissance en vraie grandeur est-elle apparue souhaitable. Une importante fouille a donc été réalisée en pied de rive gauche, dans les conditions de l'exécution, et a été arrêtée quand les vitesses sismiques du fond, représentant le bon terrain, ont été retrouvées. Seule une telle approche, lourde sur le plan technique et onéreuse, a permis de définir avec certitude la cote pour asseoir l'ouvrage de façon satisfaisante. L'augmentation du coût était très sensible puisque le décapage d'un mètre augmentait les dépenses d'un million de francs environ.

2 - Substratum tendre

Dans ce cas, les tranchées prennent la première place dans l'ordre des reconnaissances. R. BARBIER et P. ANTOINE (1973) en ont montré l'intérêt par le passé.

En ce qui concerne le barrage de Montbel, nous avons vu l'importance d'une telle campagne. L'axe du barrage, ainsi que la base des futurs parements de l'ouvrage ont été reconnus par des tranchées continues dans un substratum marneux coupé de 2 gros bancs durs. La longueur totale de ces fouilles était de 680 m avec une profondeur atteignant parfois 6 m.

Elles ont ainsi permis et à moindres frais (2 semaines de travail) de se faire une idée extrêmement précise de la structure du site et pratiquement de définir l'importance du voile d'étanchéité. De plus, l'anomalie de la rive droite a immédiatement été mise en évidence, ce que des sondages réalisés quelques années auparavant n'avaient pu déceler nettement.

Dans ce contexte, seule cette approche était adaptée et a permis de sérier les problèmes.

B - CONDITIONS GEOLOGIQUES PARTICULIERES

Il arrive parfois, qu'au-delà des méthodes courantes, le géologue soit obligé d'adapter des techniques particulières à la réalité du terrain. Nous en examinerons deux exemples, l'un pris en terrains karstiques, l'autre dans un massif fracturé.

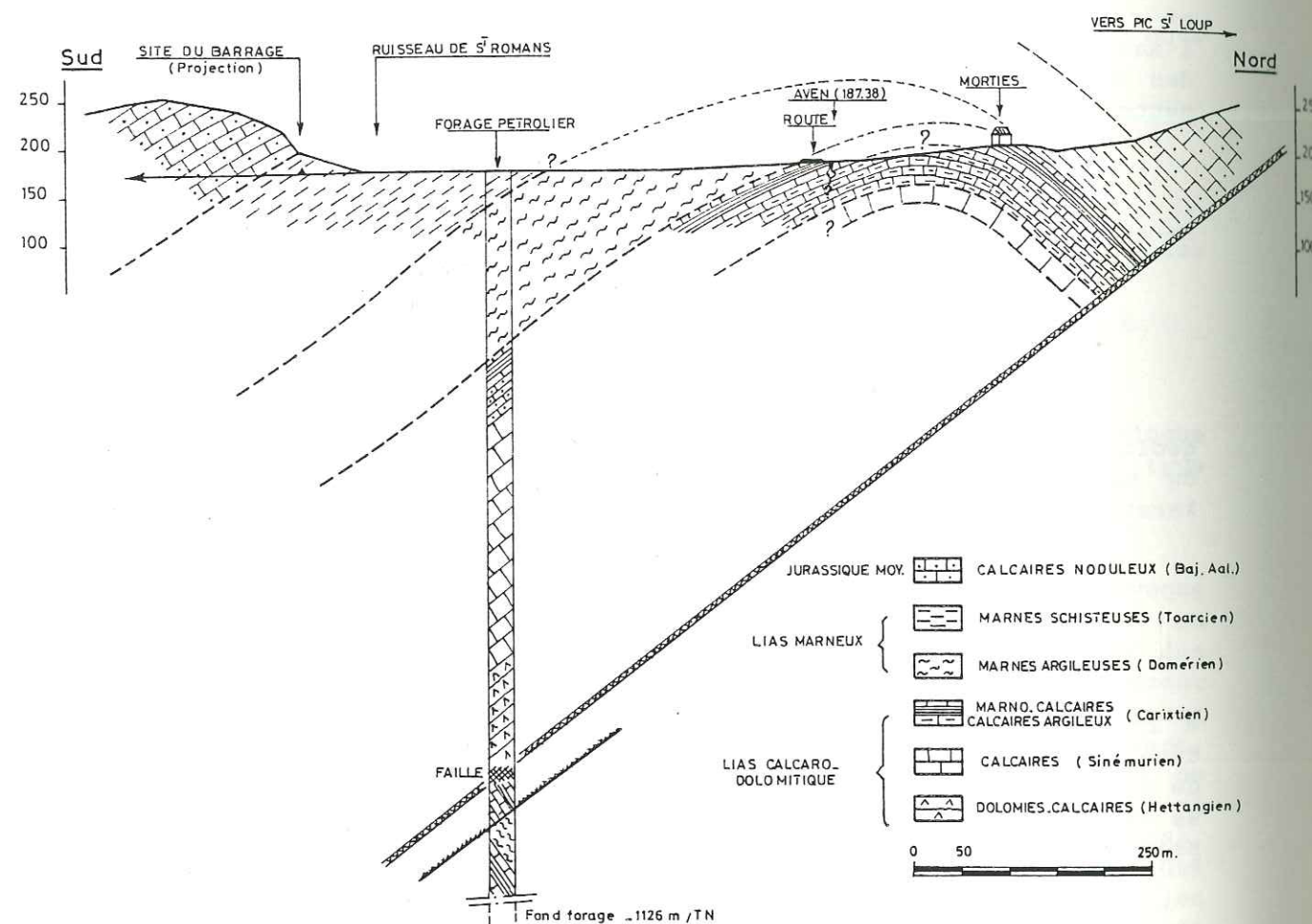
1 - Terrains karstiques

Le site de barrage de Saint-Jean-de-Cuculles (Hérault) se trouve à 18 km au Nord de Montpellier. La cuvette de cet aménagement devrait se développer sur le flanc sud d'un anticlinal marneux du Lias. Or, au coeur de cet anticlinal, apparaissent des terrains plus calcaires, dans lesquels se développe un aven vertical (cote 187) d'une quinzaine de mètres de profondeur (fig. 96).

Afin d'apprécier les conséquences de cette anomalie sur la faisabilité d'un barrage de stockage, différentes reconnaissances ont été jugées nécessaires, en particulier la réalisation d'un essai d'eau complété par une opération de traçage. Cet essai avait pour but de contrôler la capacité d'absorption de l'aven, qui est sec en permanence.

Avec l'appui technique des pompiers de l'Hérault et du Spéléo-Club de Teyran, nous avons pu y descendre (cote 172) et injecter deux citernes de 1800 litres en 6 minutes, soit un débit apparent d'absorption de 10 l/s. De ce fait, toute immersion de l'aven par un plan d'eau entraînerait des pertes considérables si une résurgence existe en dehors de la retenue.

Fig. 96. - Coupe géologique de la cuvette



Dans un deuxième temps, une opération de traçage a semblé nécessaire pour vérifier si les pertes rejoignent l'important réseau karstique régional d'où est issue la source du Lez ou bien si ces pertes ne sont cantonnées qu'à des phénomènes de sub-surface dus à de simples cassures de distension (crevasses tectoniques) observées dans les zones tendues des coeurs anticlinaux. On pourrait alors voir des résurgences "rapprochées" dans la cuvette elle-même et moins défavorables.

On a donc injecté dans l'aven 10 kg de fluorescéine poussés par 6000 litres d'eau. Des prélèvements ont été effectués sur 5 résurgences karstiques, dans un rayon de 6 km, et dont la source du Lez était le point le plus bas (cote 64). Des échantillons d'eau ont été prélevés régulièrement pendant 40 jours et ont été analysés au spectrofluorimètre de la Faculté de Pharmacie de Grenoble (L. SOMMERIA, 1985). Quatre sources ont donné des traçages positifs, qui ont mis en évidence de faibles concentrations (1 à 6.10^{-10}) témoignant de fortes dilution et dispersion, et des vitesses de circulation de l'ordre de 10 m/h, proches de celles observées dans les nappes fissurées. La relation aven de Mortières - réseau du Lez était donc prouvée. On pouvait dès lors affirmer que :

- en aucun cas, la future retenue ne devait atteindre l'aven ni ses alentours immédiats,
- il semblait raisonnable de fixer le plan d'eau à la cote 182, puisqu'à ce niveau l'épaisseur des marnes est d'environ 90 m et constitue alors une couverture suffisante pour assurer l'étanchéité de l'aménagement.

2 - Terrains fracturés

L'exemple examiné se trouve dans le Gard, à 3 km au Nord de Saint-Jean-du-Gard. L'ouvrage prévu est un barrage poids en béton de 46 m de haut et stockant environ 18 Hm³. Il s'inscrit dans l'épaisse série des schistes des Cévennes, plus ou moins métamorphisée par des massifs granitiques.

Lors de la foration des sondages de reconnaissance sur l'axe du barrage, le dernier exécuté en fond de vallée (S 15), a montré sous 34 m de gneiss, une zone sableuse entre 34,1 m et 49,0 m de profondeur.

Le sondeur n'a rien prélevé dans son carottier, et le sondage est devenu artésien, le courant d'eau ascendant remontant des particules sableuses.

Entre 45,65 m et 49,0 m, ce sont des débris de quartz laiteux, légèrement émoussés, qui ont été récupérés. A partir de 49,0 m, on a retrouvé un substratum très altéré, fracturé, brisé. La foration a été arrêtée à 51,6 m.

a - Analyses et mesures

Suite à cet incident, nous avons fait exécuter différentes analyses :

- une analyse sédimentologique des sables du sondage S 15 ainsi que de ceux trouvés dans le lit du Gardon et dans des filons d'aplite altérée du versant R.D. (rapports du laboratoire de Sédimentologie de l'Université de Grenoble, 17 mai et 10 juin 1982) ;
- une analyse chimique des eaux du sondage et des eaux du Gardon ;
- une mesure des teneurs en tritium de ces deux eaux ;
- des mesures de débits.

Les principaux résultats sont résumés ci-après :

Analyses sédimentologiques

ANALYSES	Sable Gardon	Sable S 15	Sable aplice (arène)
1 - Paramètres granulométriques	(mm)	(mm)	(mm)
- Médiane	0,420	0,160	0,630
- Q d p h i (Krumbein)	0,6	0,6	1,45
- Hétérométrie (Cailleux)	0,5	0,5	1,4
- Sorting Index (Trask)	1,5	1,0	2,7
- Asymétrie	1,0	0,9	1,0
2 - Examen binoculaire			
- Usure des fines (Krumbein-Sloss)	2 à 4	2 à 4	1
- Usure des grossiers (Krumbein-Sloss)	1 à 2	1 à 4	0

De ces résultats, il apparaît que les sables du Gardon et ceux trouvés dans le sondage S 15 sont très semblables et qu'ils devraient correspondre à un type fluviatile ou torrentiel long. Ils n'ont par contre rien à voir avec le sable d'altération des micro-granites.

Analyses chimiques

Les eaux du Gardon et les eaux artésiennes du sondage S 15 ont été comparées.

Excepté un écart sur le Ph, ces eaux semblent avoir des compositions qualitatives assez voisines. Ceci semble normal du fait de la grande homogénéité lithologique du bassin versant qui conditionne leur qualité chimique. Cependant cela ne prouve pas qu'elles aient la même origine.

Teneurs en tritium

Les analyses effectuées par le Centre de recherches géodynamiques de Thonon-les-Bains ont montré des teneurs de :

- 13 U.T. pour l'eau du sondage,
- 41 U.T. pour l'eau du Gardon.

Ces valeurs indiquent de façon nette que les eaux sont d'origines différentes, l'eau du sondage étant assez ancienne. (Avant les premières expériences nucléaires de 1952, les teneurs étaient de 10 U.T.).

Débit du sondage S 15

- le 31 mars 1982, lorsque le forage a atteint le sable, le débit était de 3 l/mn ;
- le 1er avril 1982 à 12h30, 7,5 l/mn. A 14 h, le sondage ne coulait plus. Les jours suivants, le sondage a été reforé en plus gros diamètre et équipé en piézomètre ;
- le 1er juin 1982, le débit était de 1,5 l/mn ;
- à l'étiage (septembre 1982), le piézomètre est en charge de 0,4 m environ par rapport au T.N. ;
- enfin, après de fortes pluies, on a constaté que le débit du sondage augmentait rapidement (juin et septembre 1982), ce qui laisserait supposer une alimentation amont mais sans mélange, avec seulement une transmission de pression de l'eau récente (Gardon) sur l'eau ancienne qui circule très lentement.

b - Hypothèses sur la nature de cette anomalie

Un certain nombre d'hypothèses ont été envisagées :

- présence d'un sillon alluvial que le sondage S 15 aurait recoupé dans sa partie basse ;
- écaille de gneiss provenant d'un glissement général de l'un des versants ;
- zone de faille ou de cassure en liaison avec les alluvions actuelles.

Examinons séparément chacun de ces cas.

Sillon alluvial

La présence d'un sillon supposerait un surcreusement de la vallée aux environs de la cote 143 N.G.F., ce qui est peu probable puisqu'à 0,9 km à vol d'oiseau, à l'aval du site, on a un seuil rocheux en travers du lit mineur à la cote 195 N.G.F. et à 2,1 km, un autre seuil à la cote 179.

Ceci ne serait d'ailleurs pas en accord avec l'histoire géologique régionale (pas de glaciation récente comme dans les Alpes).

Glissement de versant

Là encore, il faut un important creusement de la rivière dont les alluvions auraient été recouvertes par une masse glissée, puis la sédimentation reprenant, les gneiss éboulés se retrouveraient masqués par les alluvions récentes. On est donc ramené au cas précédent, peu probable.

Zone de faille

C'est la seule explication pour le moment considérée comme réaliste.

Cette cassure aurait pu être nettoyée par les eaux du Gardon dont les sables se seraient substitués au remplissage initial.

- Des reconnaitances géophysiques complémentaires, comprenant 11 profils sismiques précis (espacement des géophones 1 m) et 2 dispositifs électriques, ont ausculté la zone du sondage S 15 entre les affleurements de la rive droite et le bas de la rive gauche. Ils n'ont pas montré de "sillon" alluvial.

Par contre, certains ont confirmé des zones de perte de temps au pied du versant rive gauche. On pourrait donc avoir des cassures grosso modo NW-SE, parallèles au lit du Gardon, qui passeraient par ces discontinuités sismiques.

Ces éventuelles cassures ont été recherchées au large du site, partout où la roche affleurerait. Leur trace n'a pas été retrouvée.

Enfin, les dispositifs électriques ont repéré une baisse des résistivités à partir de 35 m de profondeur, qui peut être attribuée à une roche plus humide, ce qui serait en accord avec l'artésianisme.

- Des tranchées ont été ouvertes au pied de la rive gauche. Elles ont montré quelques zones plus altérées et très oxydées dans les gneiss, avec de petites venues d'eau. La fracture que l'on cherche pourrait éventuellement se rattacher à ces zones, d'autant plus que les teneurs en tritium de l'eau qui s'en écoule sont de 16 U.T. donc d'une eau ancienne semblable à S 15.

c - Géométrie de l'anomalie

Il est prévu d'effectuer autour de S 15 quatre forages destructifs dans lesquels seront réalisées des mesures sismiques (type panneaux sismiques), afin de rechercher l'ampleur et la géométrie de cette anomalie, de manière à voir de quelle façon il sera nécessaire de la traiter lors de l'exécution du voile d'étanchéité.

Espérons que les nouveaux travaux seront bien adaptés à ce cas très particulier, qui montre bien les difficultés que peut rencontrer le géologue dans l'interprétation de la structure d'un site, et la variété des techniques qu'il est amené à mettre en oeuvre.

III - EVOLUTION DES MOYENS DE RECONNAISSANCE

Nous ne pouvons évidemment pas traiter ici, de façon complète, cette rubrique. Examinons seulement quelques points sur lesquels il nous paraît important d'insister concernant les sondages et la géophysique.

A - RECONNAISSANCES PAR SONDAGES

La première constatation est qu'il y a eu peu de progrès récents en matière de sondages et que de très nombreuses entreprises utilisent un matériel ancien, ce qui n'est d'ailleurs pas nécessairement un handicap.

En effet, en ce qui concerne le sondage carotté, nous avons une prédilection pour les machines "sensitives" avec lesquelles l'homme doit faire corps. Elles ne peuvent, bien entendu, être maniées que par un sondeur expérimenté, qui devra en interpréter les moindres soubresauts et les "conduire" avec discernement. Bien souvent, la réussite d'une campagne de sondages dépend beaucoup plus de l'intelligence du sondeur que des performances du matériel. Combien sont précieuses toutes les informations relevées à bon escient pendant la foration !

Aujourd'hui cependant, l'apparition des méthodes d'enregistrement de paramètres de foration dont nous avons parlé aux chapitres III et IV, a beaucoup apporté à l'utilisation des forages destructifs et à leur interprétation. Nous avons vu, avec l'exemple du barrage de Laprade, le bon usage qui pouvait être fait de ces données récoltées en continu. Néanmoins, les entreprises ont tendance à préconiser l'utilisation de ce produit, sans trop tenir compte du contexte lithologique. Il reviendra au géologue d'apprécier la nécessité de ce type de mesures dont le dépouillement, parfois délicat, ne pourra d'ailleurs se faire qu'avec son appui.

Soulignons enfin que ces méthodes ne peuvent en aucun cas dispenser de l'exécution de sondages carottés, sur lesquels elles doivent impérativement être calées.

En ce qui concerne l'essai Lugeon, nous n'entrerons pas dans le débat technique sur sa validité. De nombreuses publications en ont parlé (SABARLY, 1968). Il reste un essai rustique, peu scientifique, mais il est le seul disponible sur le marché pour tester, de façon plus qualitative que quantitative, la perméabilité d'un massif rocheux. Il a surtout l'avantage de permettre des comparaisons sur un même site ou sur des sites différents. Il ne supporte pas la médiocrité dans le choix du matériel (pompes suffisantes, étalonnage, obturateurs appropriés) et devra être effectué avec des gammes de pressions adaptées à la fois au terrain et à l'importance de l'ouvrage prévu. Les fameux 10 bars qui définissent l'unité Lugeon ne doivent pas être le but systématiquement recherché. Pour des barrages de faible hauteur, 3 à 5 bars de pression peuvent suffire à l'interprétation des qualités hydrauliques d'un massif (ANTOINE et BARBIER, 1973).

De plus, nous semble devoir être proscrite l'extrapolation arithmétique de l'absorption à 10 b quand cette pression n'a pas été atteinte. Elle ne correspond pas, la plupart du temps, à une réalité physique. Nous lui préférons de beaucoup l'absorption en l/m/mn (et non en U.L.) à la pression la plus élevée obtenue, plus exacte et représentative.

B - RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES

Dans le domaine de la géologie des barrages, nous avons plus utilisé les méthodes sismiques que les méthodes électriques et en particulier la sismique réfraction.

Elle est devenue l'un des principaux moyens de reconnaissance des sites et elle a acquis ces dernières années une assez grande fiabilité. En effet, avec l'apparition d'une électronique évoluée, les appareils se sont remarquablement perfectionnés.

Les trains d'onde sont enregistrés immédiatement sur des films qui permettent d'apprécier rapidement la qualité de l'essai et de le recommencer si cela se révélait nécessaire.

En outre, certains appareils peuvent être utilisés sans l'emploi d'explosifs puisqu'ils cumulent l'énergie fournie par un ébranlement mécanique (dame, mouton). Ceci évite les tracasseries administratives inévitables qui jalonnent le déroulement des travaux. L'usage en est grandement facilité, surtout à l'étranger.

Ces méthodes d'investigation indirectes seront, elles aussi, calées sur des sondages. Cependant nous conseillerons, dans la chronologie des interventions, de commencer systématiquement par la géophysique. Les mesures sismiques sont en effet très globales et fournissent rapidement les grandes lignes de la structure du site.

Quand une zone de site est auscultée par différents profils, cela permet quelquefois de déceler un axe apparemment plus favorable à l'édification de l'ouvrage, comme ce fut confirmé récemment par une étude que nous menons au Sri Lanka.

Pour des raisons de planning, géophysique et sondages devaient être menés simultanément. Or les sondeurs ont pris un retard considérable, ce qui fait que nous avons pu disposer des résultats de la sismique avant la fin du premier trou. Les trois profils transversaux qui reconnaissaient la vallée ont montré que, sur le plus amont, les terrains altérés étaient moins développés et que l'on atteignait rapidement un substratum à vitesses rapides.

La campagne de sondages prévue sur l'axe central a alors été déplacée sur l'amont "géophysiquement" plus intéressant.

Cette évolution vers une géophysique précoce devrait avoir tendance à se généraliser, d'autant plus que ces mesures sont de moins en moins onéreuses par rapport aux sondages et que les temps d'exécution, de l'ordre d'une à deux semaines pour un avant-projet sommaire, sont très courts.

IV - ABSENCE DE RECONNAISSANCES ET RECONNAISSANCES MAL CONÇUES

S'il est assez rare de rencontrer un projet où il y a pléthore d'études et d'interventions complémentaires, les cas où elles font totalement défaut ou bien sont inadaptées restent assez fréquents. Et c'est tout naturellement dans la catégorie des petits aménagements que les plus grosses lacunes sont observées.

Nous examinerons quelques cas typiques que nous avons rencontrés en France.

A - MANQUE DE RECONNAISSANCES

C'est le cas extrême, mais encore trop courant, car les conséquences peuvent être des plus fâcheuses, comme nous allons le constater dans l'exemple ci-après.

1 - Introduction

Le barrage collinaire de la Martinie est sis à 15 km au Sud-Est de Brive-la-Gaillarde, dans le département de la Corrèze. Réalisé en 1980, l'ouvrage a une hauteur de 8 m et une longueur en crête de 130 m environ. Créé pour irriguer un domaine agricole, il a une faible capacité de stockage, de l'ordre de 15000 m³.

Peu de temps après sa réalisation, deux problèmes majeurs sont apparus, compromettant son exploitation (B. COUTURIER, 1986) :

- l'instabilité des berges de la retenue,
- la non-étanchéité de la cuvette.

Une étude géologique de surface et des tranchées de reconnaissance creusées à la pelle hydraulique ont été pratiquées pour préciser l'origine et les causes des désordres observés.

2 - Cadre géologique de l'aménagement (fig. 97)

La digue et la cuvette du barrage se trouvent dans la partie inférieure d'un niveau de marnes du Charmouthien moyen, compris entre deux niveaux calcaires du Charmouthien supérieur et inférieur.

- Les calcaires supérieurs forment le couronnement des deux buttes au pied desquelles se développe la digue. C'est un calcaire gréseux roux, avec à sa base de nombreuses intercalations marneuses dont l'épaisseur est de 10 à 20 m. On y observe aussi quelques petites venues d'eau.
- Les calcaires inférieurs affleurent à environ 600 m à l'aval du barrage, au Nord du hameau de la Martinie, le long du talus de la route. Ce sont des calcaires jaunâtres, durs, grenus, fracturés et karstifiés dans leur partie supérieure. Ils ont 10 à 30 m de puissance.
- Les marnes comprises entre ces deux formations sont assez argileuses, de couleur gris sombre et ont une quarantaine de mètres d'épaisseur.

Au point de vue structural, l'ensemble de ces formations est subhorizontal avec peut-être un léger pendage vers le Nord (aval de la retenue).

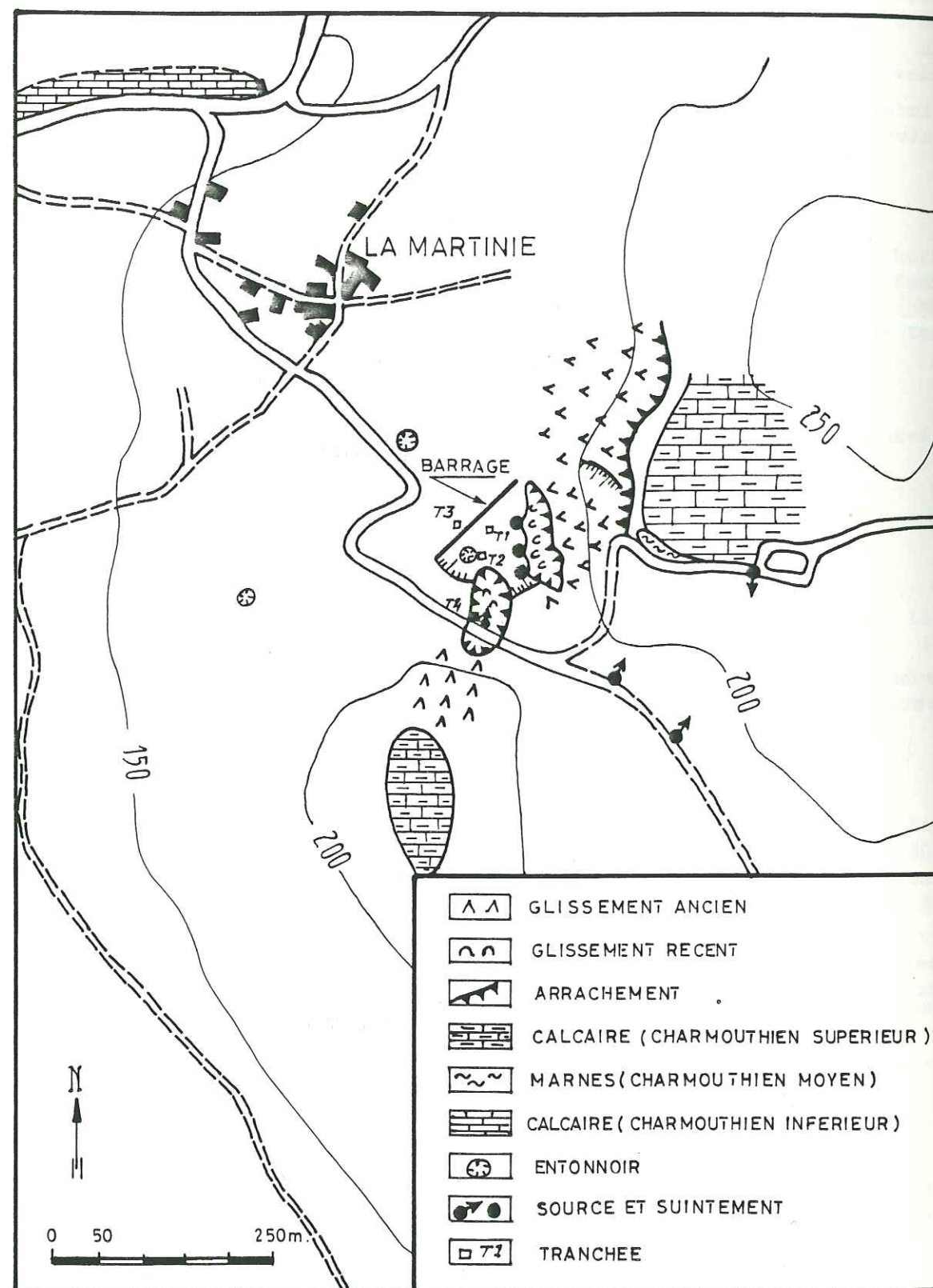
3 - Instabilité des versants

a - Observations

Une étude morphologique des versants qui entourent la cuvette a permis de distinguer l'existence de deux catégories de mouvements gravitaires :

- des glissements anciens et stabilisés, qui se sont produits sous les deux buttes précitées et qui remontent assez haut vers les calcaires supérieurs ;
- des glissements récents, qui affectent le pourtour immédiat de la cuvette, constituant deux zones instables :
 - . l'une de 3000 m² environ, le long du bord Est de la cuvette ;
 - . l'autre de 5000 m² environ, qui a emporté le chemin communal et qui apparaît au Sud de la retenue.

Fig. 97. - Carte géologique de l'aménagement



b - Interprétation

Les mouvements récents sont dus au déblaiement du pied des versants sur le pourtour de la cuvette, les matériaux prélevés ici ayant servi à l'édification de la digue. Les talus résultants étaient beaucoup trop abrupts, ce qui a mis en mouvement des berges déjà naturellement instables. Le plan d'eau n'ayant jamais atteint la cote du pied de ce talus, il n'a en aucun cas favorisé sa mise en mouvement.

La tranchée T4 a été faite sous la route emportée (actuellement remise en état). Cette tranchée a mis en évidence que la zone glissée avait une épaisseur d'environ 2 m pouvant correspondre à la tranche altérée des marnes, ce qui aurait favorisé le glissement "marne altérée sur marne saine". Cette zone a été drainée, mais certaines venues d'eau apparaissent encore près de T4.

Quant aux mouvements anciens, on peut les attribuer à un glissement de la couverture meuble sur les marnes saines (comme au niveau de la route), phénomène favorisé par les petites venues d'eau provenant des calcaires sus-jacents.

c - Remèdes

Les remèdes à apporter pour essayer de stabiliser l'ensemble de ces glissements peuvent se résumer ainsi :

- retaluter les berges de la cuvette en donnant à celles-ci une pente plus douce (voisine de la pente initiale) ;
- recharger le pourtour de la cuvette par des enrochements grossiers et perméables qui "caleront" le pied de versant et le protégeront des battements du plan d'eau ;
- drainer l'ensemble des zones instables ;
- réengazonner les terrains mis à nu ;
- capter les venues d'eau au pied des calcaires.

4 - ETANCHEITE DE LA CUVETTE

a - Observations

Dès la première mise en eau, des fuites sont apparues dans la cuvette du barrage. Le niveau de l'eau n'a, paraît-il, jamais dépassé 1 m au-dessus de la vidange de fond. L'eau infiltrée dans la cuvette n'est pas réapparue à l'aval de l'ouvrage.

Nous avons pu observer au fond de la cuvette vide une petite dépression circulaire d'un diamètre de 0,5 m et d'environ 0,2 m de profondeur. Si l'on remplit d'eau cette petite dépression, elle se vide en une dizaine de secondes. L'expérience a été renouvelée plusieurs fois avec le même résultat.

Une tranchée (T2) a été creusée au droit de cette anomalie. Elle a montré, sous 2,6 m d'éluvions (marne altérée), des marnes grises compactes avec débris végétaux jusqu'à 5 m de profondeur. Une autre tranchée (T1) avait montré une coupe à peu près identique, mais plus complète avec, à partir de 6 m de profondeur, la présence d'un niveau dur, calcaire, qui doit correspondre au Charmouthien inférieur.

A l'aplomb de cette dépression, les éluvions marneuses étaient parcourues de nombreux "canalicules", d'un diamètre pouvant atteindre 1 à 2 cm, plus ou moins reliés entre eux et dans lesquels l'eau s'infiltrait rapidement et laissait localement des dépôts fins.

Dans les marnes saines, nous n'avons observé que de très fins canalicules que nous n'avons hélas pas vu fonctionner.

Une tranchée (T3) réalisée en pied aval de la digue (donc 4 à 5 m en contre-bas des précédentes), a permis de retrouver sous un mètre de marne les niveaux plus calcaires touchés en T1 et qui sont en fait une alternance marne-calcaire (bancs de 0,2 m) dans leur partie supérieure.

b - Interprétation

La seule explication plausible aux fuites de la cuvette est que l'eau, par l'intermédiaire de ces canalicules (ou de petites fractures de dessiccation) a la possibilité de s'infiltrer à travers les marnes jusqu'aux calcaires situés au-dessous, qui jouent alors le rôle de niveau drainant.

Ceci pourrait se confirmer par la présence "d'entonnoirs d'ablation" observés à quelques centaines de mètres à l'aval de la digue, entonnoirs qui se sont produits dans les éluvions de couverture recouvrant logiquement les calcaires, et qui attestent ici d'infiltrations dans les terrains de couverture vers le substratum.

c - Mesures à prendre

Dans l'état actuel des choses, on pourrait envisager de vérifier cette hypothèse en recherchant, après coloration à la fluorescéine des eaux de la cuvette lors d'un remplissage temporaire, l'exutoire de ces dernières. Cela nécessitera une surveillance des ruisseaux alentour en période de hautes eaux, à l'aval du barrage (la Martinie) et même hors du bassin versant topographique (aval de la Bénéchie).

Le seul remède à envisager pour lutter contre ces infiltrations vers les calcaires est la confection d'un tapis étanche dans le fond de la retenue, constitué par exemple de matériaux très bien compactés sur une épaisseur suffisante. Toute autre solution serait trop onéreuse et non en rapport avec l'aménagement réalisé ici.

5 - CONCLUSION

Bien que de très petite taille, cet aménagement a connu des désordres graves. Les fuites apparues dans la cuvette du barrage sont dues à des phénomènes géologiques peu communs, à savoir la présence de vides dans les éluvions très argileuses et surtout dans un substratum marneux compact et épais de plusieurs mètres.

Si ce site avait fait l'objet d'un diagnostic géologique, le problème de l'instabilité des versants aurait sans doute été mis en évidence et reconnu comme une condition rédhibitoire pour cet aménagement. Par contre, la non-étanchéité de la cuvette n'aurait certainement pas été décelée. En effet, même si l'on avait creusé des tranchées sur l'axe, il est fort peu probable que des risques de fuite aient été pris en compte :

- la probabilité de tomber sur les canalicules est infime à cause du lissage par la pelle des parois des tranchées ;
- l'épaisseur des marnes sur les calcaires, suffisante en temps normal, aurait fait conclure à l'étanchéité de la cuvette.

Cet exemple, particulier, nous montre l'importance d'une étude géologique préalable, mais également nous conduit à beaucoup de modestie en ce qui concerne la fiabilité des diagnostics prononcés.

B - INADAPTATION OU EXCES DES RECONNAISSANCES

Il est également fréquent que des reconnaissances soient peu adaptées aux projets étudiés. Ceci est essentiellement dû au fait que des maîtres d'ouvrages ou des conducteurs d'opérations, peu au courant des études de barrage, ont été abusés par des bureaux d'études ou des entreprises peu scrupuleux qui ont voulu, à tout prix, vendre leur savoir-faire.

Le premier exemple que nous avons retenu se situe dans le Massif Central. Lors de l'étude d'un barrage de quelques mètres de hauteur, qui ne nécessitait, ni plus ni moins, que la reconnaissance du niveau de fondation, le bureau d'étude consulté procéda à une analyse structurale statistique de la fracturation avec traitement informatisé des données, analyse qu'il se proposa même de poursuivre par des mesures complémentaires. Les appuis d'un barrage-voûte de 100 m de haut n'auraient pas été mieux reconnus à ce niveau ! Que penser d'une telle disproportion, qui n'apporte rien à la connaissance pratique du site ? Par contre, dans le rapport, l'épaisseur des terrains de couverture, donc le décapage nécessaire pour asseoir la digue, n'était pas même mentionnée. Une telle approche montre une méconnaissance totale de l'utilisation de la géologie en matière de barrages.

Le deuxième exemple met en évidence la volonté d'une entreprise de faire exécuter des mesures d'enregistrement de paramètres de forage pour la reconnaissance des fondations d'un grand barrage. Hélas, la nature assez homogène du bed-rock ne se prêtait absolument pas à de telles investigations. D'avance on voyait, avec un peu d'expérience, qu'elles n'ajoutaient rien à la connaissance du site. Des essais, relativement nombreux, ont été pratiqués malgré les réserves formulées. Les résultats, très logiquement, sont tombés dans l'oubli.

Mentionnons, dans la catégorie des essais non adaptés, ce que nous évoquions précédemment, à savoir les essais Lugeon poussés à 10 bars pour des ouvrages de 10 m de hauteur ; ils sont légion !

Rappelons aussi "les études géologiques de bureau", où les documents cartographiques ne sont qu'un agrandissement de la carte géologique régulière au 1/50000, et le texte l'accompagnant fortement inspiré de la notice de cette dernière. Si cela peut se concevoir au niveau d'un inventaire général (cf. chap. I), il est bien certain qu'une telle manière de procéder est inadaptée dès que l'on veut faire un choix.

Aucun document géologique général, si bien fait soit-il, ne dispense d'une étude sur le terrain pour étayer cette "géologie à l'échelle du mètre" indispensable aux reconnaissances de sites de barrages.

C - PERTE DE DONNEES

Pour de nombreux ouvrages, anciens ou récents, il arrive que des travaux de confortement soient nécessaires en cours d'exploitation. La recherche des documents d'étude devient parfois un véritable casse-tête et leur localisation quasi impossible. Un gros effort est à faire de la part des maîtres d'ouvrages pour conserver les dossiers d'études et d'exécution complets et accessibles, en particulier l'archivage des données concernant les travaux de reconnaissance. Trop souvent nous sommes obligés de repartir à zéro. Il ne subsiste rien, les caisses de sondages ont évidemment été dispersées. A ce propos, il nous paraît indispensable de faire systématiquement réaliser un album photographique regroupant : les campagnes de sondage, l'exécution des fouilles et les différentes phases de construction du barrage. Ce témoin objectif peu onéreux permettra par la suite d'intervenir beaucoup plus efficacement si des problèmes venaient à se poser.

Nous avons eu l'occasion de souffrir de la perte des dossiers de reconnaissances effectuées sur un barrage-voûte d'une vingtaine de mètres de haut dont l'étanchéité devenait défectueuse. L'entreprise n'existant plus, personne ne connaissait le niveau de fondation de l'ouvrage déjà ancien, ni ne savait si des injections avaient été effectuées dans le substratum. Des reconnaissances longues et coûteuses ont alors été décidées pour se faire une idée des conditions dans lesquelles le barrage avait été construit, reconnaissances d'autant plus lourdes que le maître d'ouvrage était un petit syndicat intercommunal.

CONCLUSION GENERALE

Le grand nombre d'aménagements que nous avons étudiés depuis plus de treize ans, tant en France qu'au Maroc, nous a confronté aux problèmes géologiques qu'ils posaient dans des cas extrêmement divers, aussi bien pour de grands barrages que pour des ouvrages plus modestes.

Pour ces derniers, il nous est apparu que les études géologiques, trop souvent réduites à leur plus simple expression, étaient en réalité capitales. De fait, il paraît évident que pour les ouvrages dits collinaires, les complications géologiques sont pratiquement du même type que celles rencontrées pour les grands barrages. Par contre, les moyens mis en oeuvre lors de leur réalisation sont beaucoup moins importants, pour des raisons de coût. En conséquence, on ne peut pratiquement pas corriger les défauts d'un site qui apparaîtraient à l'ouverture des fouilles.

De ces multiples expériences, nous avons progressivement dégagé un certain nombre d'enseignements concernant les phases d'intervention du géologue : avant, pendant et aussi après les travaux. La logique de ces interventions n'étant pas toujours respectée, il nous a semblé utile de décrire la façon dont de telles études devaient être conduites ; ceci à la lumière des études correctement menées, mais aussi d'après les leçons tirées d'études incomplètes ou de travaux mal réalisés par mésestimation de l'importance de données géologiques précises et définies à un stade suffisamment précoce.

Dans tous les cas, l'enchaînement suivant devrait être scrupuleusement respecté :

- études géologiques de base : reconnaissance impérative de terrain et établissement de documents géologiques adaptés au stade d'étude traité, permettant de poser les problèmes du site ;
- mise au point d'un programme de travaux de reconnaissance "sur mesure", établi à partir des données précédentes et non selon des "standards" comme on le voit trop souvent, permettant d'évaluer les caractéristiques physiques principales du massif de fondation ;
- rapports de synthèse, rédigés pour des ingénieurs de génie civil, avec non seulement un vocabulaire accessible, mais surtout une image aussi précise et parlante que possible, donc parfois schématique, des structures géologiques dont ils auront à tenir compte ;

- vérification et ajustement pendant les travaux des hypothèses formulées au cours des études, par un suivi attentif de toutes les phases de la construction, mais en premier lieu, établissement indispensable des plans de récolement géologique, de façon à conserver en archives un document de référence qui autorise aussi bien l'analyse rapide des anomalies qui surgiraient en cours d'exploitation que des comparaisons profitables avec d'autres sites.

Il va de soi que les budgets d'étude correspondants devront consacrer au poste Géologie une part assez confortable pour faire face aux nombreux aléas que réserve bien souvent le milieu naturel.

Ce qui précède intéresse l'aspect méthodologique de notre travail.

En ce qui concerne l'aspect recherche appliquée, la variété des cas étudiés nous a permis l'accumulation de très nombreuses données et surtout la possibilité d'utiles comparaisons. A partir d'une analyse statistique des études préliminaires, nous avons en effet constaté que, pour les barrages de toutes tailles et pour ceux de faible hauteur en particulier, ce sont les conditions d'étanchéité qui sont le plus souvent rédhibitoires. Si quelques litres secondes de fuites sont tolérables sur la plupart des grandes réalisations, ils deviennent inacceptables pour de petits aménagements où les apports sont faibles, voire nuls en période sèche. Par ailleurs, sur le plan de la sécurité de l'ouvrage, il ne faut pas oublier que, vis-à-vis des gradients hydrauliques, petits et grands barrages sont semblables. La qualité du diagnostic géologique revêt ici toute son importance.

Nous avons aussi axé notre réflexion sur la réalité du traitement d'étanchéité d'un grand barrage, d'après un cas traité dans le détail pendant la construction. En général, les résultats bruts d'injection sont simplement archivés puis oubliés. Les seuls enseignements se limitent alors à la valeur de la consommation globale de ciment par mètre linéaire de forage ou par mètre carré de voile d'injection.

Cette façon de procéder, dont l'unique avantage est la rapidité, ne prend évidemment pas en compte la réalité géologique du terrain ; elle en fait même complètement abstraction, puisque diviser la quantité totale de ciment par le nombre de mètres injectés revient à considérer que le substratum est, en quelque sorte, un solide homogène et isotrope dans tout le volume de la zone traitée. Or, nous avons pu montrer :

- qu'il fallait faire la part des choses en fonction de la profondeur de la tranche injectée, de la nature de la roche et de son degré de fracturation et d'altération ;

- que dans l'exemple de Laprade, le traditionnel effet d'encagement de la ligne centrale par les lignes extérieures du voile n'était pas évident ;
- que les fortes absorptions concernent le "voile de peau", malgré son injection à faible pression, et que c'est donc à lui qu'il faut apporter le plus de soin ;
- enfin nous avons pu établir une corrélation absorption d'eau - absorption de ciment, et attirer l'attention sur l'intérêt prévisionnel que l'on pouvait en attendre, au moins pour le site considéré.

Sans entrer dans un excès de détails, nous pensons que la généralisation des dépouillements de ce type de données rendra plus intelligibles les "pourquoi" et les "comment" de cette "alchimie moderne" qu'est le traitement des sols par injections, et fournira des comparaisons intéressantes entre sites équivalents, au grand bénéfice des utilisateurs.

Un telle recherche relève d'une géologie courante, concrète, celle que nous pratiquons quotidiennement depuis de longues années.

La rédaction de ce mémoire a été aussi motivée par une constatation : depuis le 1er Congrès international des grands barrages de Stockholm en 1933, et au cours des quinze congrès suivants jusqu'à celui de Lausanne en 1985, 59 questions furent traitées ; le mot géologie n'est apparu qu'une seule fois, à Rio de Janeiro en 1982, avec la question 53 : "Influence de la géologie et de la géotechnique sur la conception des barrages".

Notre discipline tomberait-elle dans l'oubli ? Ou n'aurait-elle plus à jouer qu'un rôle secondaire ?

En fait, depuis plusieurs années, nous observons dans les bureaux d'études français un certain désintérêt envers la géologie appliquée, associée sans discernement à la géotechnique ou à la mécanique des sols, alors qu'elle est en plein essor à l'étranger (plus de 40 géologues ont été vus sur un même site durant la construction d'un barrage en Chine !).

Notre pratique nous permet d'affirmer que c'est une grave erreur que de vouloir faire un amalgame de ces disciplines, voisines certes mais complémentaires (ce que les géologues et mécaniciens grenoblois ont bien compris en créant, il y a quelques années, l'Institut de recherches interdisciplinaires de géologie et de mécanique). Eluder le maillon géologique, c'est fermer les yeux sur la complexité de notre environnement

naturel et s'interdire ainsi une possibilité de modélisation réaliste du site étudié ; on peut trop souvent adresser ce reproche à certains géotechniciens actuels.

Enfin, l'efficacité des méthodes basées sur un diagnostic géologique précis et rapide ne se traduira par des économies et un gain de temps que dans la mesure où ce diagnostic sera reconnu par tous.

C'est donc en connaissance de cause que nous avons essayé de définir l'approche géologique sensu stricto, sa chronologie lors des interventions et son importance dans le scénario des études de barrages.

Nous espérons que ce mémoire, fruit de l'expérience, pourra guider utilement ceux qui, géologues et ingénieurs, auront à collaborer à cette aventure passionnante qu'est la réalisation de ce type d'aménagements hydrauliques.

BIBLIOGRAPHIE

Abréviations

A.I.G.I.	: Association internationale de géologie de l'ingénieur
B.R.G.M.	: Bureau de recherches géologiques et minières
C.E.B.T.P.	: Centre d'études du bâtiment et des travaux publics
C.E.M.A.G.R.E.F.	: Centre d'études du machinisme agricole, du Génie rural, des Eaux et des Forêts
C.G.I.	: Congrès géologique international
C.I.G.B.	: Congrès international des grands barrages
C.T.G.R.E.F.	: Centre technique du Génie rural des Eaux et des Forêts
C.N.A.R.B.R.L.	: Compagnie nationale d'aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc
E.N.P.C.	: Ecole nationale des Ponts et Chaussées
G.E.R.S.A.R.	: Groupement d'études et de réalisations des sociétés d'aménagement régional
G.T.C.F.G.B.	: Groupe de travail du Comité français des grands barrages
I.T.B.T.P.	: Institut technique du bâtiment et des travaux publics
L.C.P.C.	: Laboratoire central des Ponts et Chaussées
L.R.P.C.	: Laboratoire régional des Ponts et Chaussées
S.C.P.	: Société du canal de Provence
S.E.G.G.	: Société d'études géophysiques et géotechniques
S.R.A.E.	: Service régional d'aménagement des eaux
T.L.G.	: Travaux du laboratoire de Géologie de l'Université de Grenoble.

- ABSI E. (1979).- Manuel pratique de mécanique des sols et des fondations.- Annales I.T.B.T.P., série sols et fondations, n° 373, p. 142-179, 98 fig.
- AGENCE DE BASSIN ADOUR-GARONNE (1974).- Barrage réservoir de Montbel.- Etude géologique, rapport inédit, 13 p., 9 pl.
- AIRAULT S. (1970).- Barrage du Salagou. Contrôle des drains et des piézomètres, janvier 1968 - juillet 1970.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.
- ALLARD P. (1980).- Méthode d'investigation pour une estimation prévisionnelle de production d'enrochements.- 26e C.G.I., Paris, vol. III, section 16, p. 1174.
- ALONSO E. (1979).- Barrage de Montbel. Etude géotechnique préliminaire des matériaux. Rapport partiel.- C.T.G.R.E.F., Bordeaux, rapport inédit.
- ALONSO E. (1985).- Remblais et barrage en marne. Barrage de Montbel.- Thèse Univ. de Bordeaux I, 100 p.
- ANTOINE P. et BARBIER R. (1973).- Les problèmes géologiques posés par les barrages de faible hauteur.- Ann. I.T.B.T.P., série sols et fondations, S.A. le Bâtiment éd., supp. au n° 312, p. 27-46.
- ANTOINE P. et FABRE D. (1979).- Réflexions sur le rôle de l'orientation des études de fracturation pour la fondation d'un barrage en béton.- Symposium "Problèmes de géologie de l'ingénieur dans la construction hydrotechnique", Tbilissi. - Bull. de l'A.I.G.I. n° 20, thème 1, p. 40-44, 6 fig.
- ANTOINE P. et FABRE D. (1980).- Géologie appliquée au génie civil.- Paris, Masson, 291 p., 126 fig.
- BACHY (1976).- Barrage collinaire de Cocumont. Pré-étude sommaire des travaux d'étanchement.- Rapport inédit.
- BARBIER R. (1971).- Géologie et mécanique des roches dans l'étude des fondations de barrage.- Revue de l'Industrie minière, n° spécial, juil. 1971, p. 104-109.
- BARBIER R. (1974).- La géologie au service des grands travaux.- Centenaire de la Soc. géologique de Belgique.- Colloque géol. de l'ingénieur, Liège, p. 77-111.
- BARBIER R. (1985).- Avis sur les conditions géologiques du projet de barrage de Saint-Jean-de-Cuculles (Hérault).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.
- BAUZIL V. (1978).- Vulnérabilité des barrages. Dispositions prises pour assurer leur sécurité.- Travaux, p. 11-24, 7 fig., 7 tabl.
- BEC Entreprise (1985).- Barrage des Olivettes. Tir d'essais en carrière.- Rapport inédit.

- BERTRANOU R., PALMA A. et GONZALEZ L. (1976).- Essais méthodologiques pour l'évaluation rapide de lieu d'emplacement des barrages.- 12e C.I.G.B., Mexico, Q. 46, R. 45, p. 699-708.
- BESSET F. (1980).- Reconnaissance géologique de surface de sites de barrage dans la vallée de l'Hérault.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.
- BILLORE J. (1971).- Le comportement mécanique des fondations de barrage.- Revue de l'Industrie minière, cahier 3 du Comité français de mécanique des roches, n° spécial, juil. 1971, p. 110-122, 16 fig.
- BONTE A. (1969).- Le rôle de la géologie dans les travaux de génie civil.- Ann. Ponts et Chaussées, p. 77-103.
- BORDET C. (1959).- Les modes de circulation de l'eau dans les terrains cristallins. Barrages et bassins de retenues.- Cong. et coll. de l'Univ. de Liège, vol. 14, p. 61-94.
- BORDET C. (1979).- Problèmes de mouvements de masses ; construction et mise en oeuvre des barrages et des réservoirs.- Symposium "Problèmes de géologie de l'ingénieur dans la construction hydrotechnique", Tbilissi.- Bull. de l'A.I.G.I., n° 20, rapport général, thème 4, p. 132-138.
- BORDET C. et DELETIE P. (1979).- La stabilité des versants d'une grande retenue des Alpes françaises. Phénomènes géologiques. Surveillance des évolutions. Symposium "Problèmes de géologie de l'ingénieur dans la construction hydrotechnique", Tbilissi. - Bull. de l'A.I.G.I. n° 20, rapport général, thème 4, p. 168-172, 4 fig.
- BRETH H. (1967).- The dynamics of a landslide produced by filling a reservoir.- 9e C.I.G.B., Instambul, Q. 32, R.3, p. 37-45.
- BRUNEL P. (1979).- Quelques problèmes posés par les barrages en terrains granitiques.- D.E.A. Univ. de Grenoble, 30 p.
- CAMBEFORT H. (1957).- Forages et sondages. Leur emploi dans les travaux publics.- Paris, Dunod.
- CAMBEFORT H. (1957).- Injection des sols. Principes et méthodes.- Paris, Dunod, t. I.
- CARON C. et CHEYLAN G. (1970).- Injection de terrains fissurés.- 10e C.I.G.B., Montréal, Q. 37, R. 24, p. 413-428.
- Carte géologique Brive (1968), 1/50000, n° 31-35, 3e édit.
- Carte géologique Castelnaudary (1975), 1/50000, n° 22-45.
- Carte géologique Dieulefit (1969), 1/50000, n° 31-38.
- Carte géologique Foix (1976), 1/80000, n° 253, 3e édit.

Carte géologique Lodève (1982), 1/50000, n° 26-43.

Carte géologique Nice-Pont St-Louis (1965), 1/80000, n° 225, 3e édit.

Carte géologique Nyons (1975), 1/50000, n° 31-39.

Carte géologique Pézenas (1981), 1/50000, n° 26-44.

Carte géologique Quillan (1967), 1/80000, n° 254, 3e édit.

CAVAILLE A. (1976).- Notice de la carte géologique Mirepoix à 1/50000, n° XXII-46, 17 p.

C.E.B.T.P. (1986).- Barrage des Olivettes. Essais de compression et de traction.- Dossier n° 3382-7-6221, inédit.

CHESSSEL S. (1982).- Barrage de la Borie. Analyses de teneurs en tritium.- Univ. P. et M. Curie, Centre de recherches géodynamiques de Thonon-les-Bains, rapport inédit.

C.E.T.E. (1978).- Barrage de Montbel. Mesure des densités apparentes au banc de gamma densimétrie.- Laboratoire de Toulouse, rapport inédit.

CHEYLAN G. (1966).- Etudes géologiques des aménagements hydrauliques de la Compagnie du Bas-Rhône-Languedoc.- T.L.G., Grenoble, 343 p., 117 fig., 2 pl. h.t., 19 photos.

CHEYLAN G. (1969).- Etanchéité de barrages en Yougoslavie.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit, 21 p.

CHEYLAN G. (1970).- Projet du barrage d'Ansignan sur la Desix. Note géologique préliminaire.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

CHEYLAN G. (1970).- Barrage du Salagou. Contrôle des drains et des piézomètres, 2e semestre 1970.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

CHEYLAN G. (1978).- Barrage de Laprade sur la Dure. Etude géologique de synthèse.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

CHEYLAN G. (1982).- Note sur les injections du barrage du Drennec.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

CHEYLAN G. et MICHEL G. (1977).- Etudes géologiques et géotechniques de sites de petits barrages dans des massifs granitiques ou gneissiques anciens.- Conf. regio. europ. de la Com. intern. irrig. et drainage, Rome, sous-thème 3, 8 p. 4 fig.

C.I.G.B. Istamboul (1967).- Sécurité des barrages du point de vue de la fondation et stabilité des versants de la retenue.- Q. 32, vol. I, 1159 p.

C.I.G.B. Montréal (1970).- Progrès récents dans l'étude et la construction des barrages et des réservoirs situés sur des alluvions profondes, sur des terrains karstiques ou des terrains difficiles.- Q. 37, vol. II, 1193 p.

C.I.G.B. Mexico (1976).- Etudes préliminaires d'aménagement de barrages.- Q. 46, vol. III, p. 1-718.

C.I.G.B. New Delhi (1979).- Problèmes de raccordement dans les barrages.- Q. 48, vol. I, 1236 p.

C.I.G.B. Rio de Janeiro (1982).- Influence de la géologie et de la géotechnique sur la conception des barrages.- Q. 53, vol. II, 1114 p.

C.I.G.B. Lausanne (1985).- Traitement des fondations en relation avec les infiltrations.- Q. 58, vol. III, 1584 p.

COLAS des FRANCS E. et GANDAIS M. (1980).- Traitement d'étanchéité et de consolidation des terrains de fondation.- E.N.P.C., formation continue, session "les injections", mars 1980, 110 p.

CORROY G. (1952).- Etude géologique d'un projet d'adduction d'eau sur la commune de Cipières (Alpes-Maritimes).- Rapport inédit.

CORROY G. (1952).- Etude géologique concernant l'aménagement du captage alimentant le "canal du Foulon" et la fixation d'un périmètre de protection.- Rapport inédit.

COUTURIER B. (1975).- Site de barrage collinaire de Cocumont (Lot-et-Garonne). Interprétation des travaux de reconnaissance.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1975).- Etude géologique du barrage d'Ansignan (Pyrénées-Orientales).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1975).- Barrage collinaire de Cocumont (Lot-et-Garonne). Etude géologique.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1977).- Etude géologique préliminaire du barrage de Cipières sur le Loup (Alpes-Mmes).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1977).- Barrage du Salagou (Hérault). Contrôle des drains et des piézomètres. Evolution du système de contrôle de 1969 à 1975.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1978).- Etude géologique préliminaire du barrage du Pas des Ondes sur l'Oule.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1979).- Etudes géologiques de retenues collinaires dans le département de l'Aude.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1979).- Barrage de Montbel sur le ruisseau de Trière (Ariège). Etude géologique de synthèse. Barrage principal. Cuvette de retenue. Dignes de cols.- C.T.G.R.E.F., rapport inédit.

COUTURIER B. (1979).- Problème de faisabilité de retenues collinaires pour l'irrigation. Fichier documentaire "Agronomie des régions chaudes".- FICHARC. Drainage et irrigation P 12 - 1 (codification F.A.O.).

COUTURIER B. (1980).- Reconnaissance géologique de la carrière de Mireval. Aménagement de Montbel (Ariège).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1980).- Reconnaissance géologique de la carrière de Serre de Pourtel. Aménagement du barrage de Montbel (Ariège).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1981).- Barrage de la Martinie (Corrèze). Examen géologique des problèmes de stabilité des versants et d'étanchéité de la cuvette.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1982).- Prospection géologique de sites de barrages collinaires dans le périmètre du Gharb (Maroc).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1983).- Barrage de la Borie. Dossier préliminaire. Etude géologique de synthèse.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1984).- Diagnostic géologique sur 6 sites de barrages collinaires, vallée du Lez (Hérault), commune de Vailhauquès.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1984).- Etude géologique d'avant-projet sommaire du barrage des Olivettes (Hérault).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1985).- Barrage de Saint-Jean-de-Cuculles (Hérault). Etude géologique de synthèse.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1985).- Etude géologique d'avant-projet détaillé du barrage des Olivettes sur la Peyne (Hérault).- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1985).- Géologie des barrages collinaires.- Bull. de l'A.I.G.I. c/o L.C.P.C., Paris, n° 31.

COUTURIER B. (1986).- Barrage des Olivettes (Hérault). Variante béton compacté au rouleau. Etude géologique complémentaire.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

COUTURIER B. (1986).- Problèmes de stabilité de versants et d'étanchéité de cuvette dans une retenue collinaire.- 5e Congrès intern. de l'A.I.G.I., Buenos Aires, p. 1241-1244, 1 fig.

COUTURIER B. (1986).- Note sur les injections de barrages en terrain granitique.- Ministère de l'Agriculture, Service spécial d'aménagement hydraulique de la région du Bas-Rhône-Languedoc, rapport inédit, 72 p., 33 fig.

COUTURIER B. et G.T.C.F.G.B. (1982).- La reconnaissance des sites de barrages. Difficultés rencontrées.- 14e C.I.G.B., Rio de Janeiro, Q. 53, R. 55, p. 877-897, 5 fig.

COUTURIER et G.T.C.F.G.B. (1985).- Reconnaissance du terrain de fondation et conception des ouvrages d'étanchement de quelques barrages français.- 15e C.I.G.B., Lausanne, Q. 58, R. 72, p. 1203-1225, 9 fig.

COUTURIER et G.T.C.F.G.B. (1985).- Réalisation des ouvrages d'étanchement et de drainage. Problèmes d'exécution et exemples de solution.- 15e G.I.C.B., Lausanne, Q. 58, R. 73, p. 1227-1250, 9 fig.

CROSNIER-LECONTE J. (1959).- Note sur l'organisation des reconnaissances géologiques à l'Electricité de France. Barrages et bassins de retenues.- Cong. et Coll. Univ. de Liège, vol. 14, p. 7-28.

C.T.G.R.E.F. (1979).- Dosage des sels solubles dans les carottes de sondage du barrage de Montbel.- Rapports inédits.

C.T.G.R.E.F. (1979).- Barrage de Montbel. Etude géotechnique préliminaire des matériaux.- Rapport partiel, inédit.

DEBAILLE G. et GHISTE S. (1968).- Influence des facteurs géologiques sur les propriétés mécaniques des sols de fondation.- C.R. 23e Congrès intern. de géologie, Prague, sect. 12, p. 29-39.

DEERE D. (1967).- Design of surface and near surface construction in rocks.- 8e symposium de mécanique des roches, Univ. du Minnesota, U.S.A.

FARRAN J. et THENOZ B. (1965).- L'altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision.- Ann. I.T.B.T.P. 215, p. 1535-1547.

FLOTTE J.-P. (1975).- Etude géotechnique de la région Vence-Cagnes (Alpes-Mmes). Aptitude à l'aménagement régional.- Thèse 3e cycle Univ. de Nice.

FONDASOL (1984).- Barrage des Olivettes. Sondages en carrières.- Rapport n° 284157.

FONTAILLES M. (1970).- Géologie des terrains métamorphiques et granitiques du massif hercynien de l'Agly (Pyrénées-Orientales).- Bull. B.R.G.M., section IV, n° 3, p. 21-72, 1 carte.

GEATEC (1983 à 1985).- Notes techniques sur le durcissement du coulis de paroi de Laprade.- Rapports inédits.

GEZE B. (1979).- Languedoc Méditerranéen, Montagne Noire - Guide géologique régional.- Paris, Masson, 191 p., 91 fig., 8 pl.

GIGNOUX M. et BARBIER R. (1955).- Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques.- Paris, Masson, 344 p., 176 fig., 28 pl.

GIRAUD A. (1974).- Etudes géologiques sur quelques sites de barrage.- Thèse 3e cycle Univ. de Grenoble I, 114 p., 24 fig.

GIRAUD A. (1986).- Caractérisation géotechnique des massifs rocheux par étude structurale et essais in situ. Application aux sites de barrages.- Thèse d'Etat Univ. de Grenoble I, 204 p.

GOUNON A., MENEROUD J.P. et REY J.C. (1973).- Stabilité des versants dans l'arrière pays niçois.- Symposium "Sol et sous-sol et sécurité des constructions", Cannes.- B.R.G.M., t.1, p. 148-160.

GOUVERNAT G., GUIEU G. et ROUSSET C. (1971).- Guides géologiques régionaux : Provence.- Paris, Masson, 229 p., 120 fig., 8 pl. photos hors-texte.

Groupe de travail "Agua y energia electrica" (1982).- Les étapes de la recherche géologique et géotechnique dans la conception des barrages.- 14e C.I.G.B., Rio de Janeiro, Q. 53, R. 31, p. 531-536.

Groupe de travail du Comité français des grands barrages (1979).- Raccordement du barrage avec ses surfaces d'appui.- 13e C.I.G.B., New Delhi, Q. 48, R. 20, p. 339-364, 14 fig.

GUILLAUD M. (1980).- Plots d'essais d'injection de terrains alluvionnaires. Evaluation des résultats. Evolution des moyens de contrôle d'efficacité. - E.N.P.C., formation continue, session "les injections", mars 1980, 18 p.

GUILLAUD M. (1980).- Les injections en milieu rocheux.- E.N.P.C., formation continue, session "les injections", mars 1980, 15 p.

GUILLAUD M. (1980).- Les injections en milieu pulvérulent.- E.N.P.C., formation continue, session "les injections", mars 1980, 7 p.

JAFFREZO M. (1977).- Pyrénées-Orientales - Corbières - Guide géologique régional.- Paris, Masson, 191 p. 117 fig., 3 pl.

Japanese national Committee of the International Commission on large dams (1978).- Standards for geological investigation of dam foundations.- Meeting of committee. Cape Town. 38 p., 10 fig.

JOHN K.W. (1974).- Geologists and civil engineers in the design of rock foundation of dams.- 2e Congrès A.I.G.I., Sao Paulo.

LAKSHMANAN J. (1970).- Application de la géophysique aux grands ouvrages d'art et aux aménagements hydrauliques.- Compagnie de prospection géophysique française, rapport inédit.

LAUTRIN D. (1979).- Barrage de Montbel. Etude géotechnique des sols de fondations. Barrage principal. Dignes de cols.- C.T.G.R.E.F., rapport inédit.

LAUVIN F. (1986).- Barrage de Laprade sur la Dure. Rapport sur l'exécution des travaux.- C.N.A.R.B.R.L., rapport inédit.

LETOURNEUR J. et MICHEL R. (1971).- Géologie du génie civil.- Paris, A. Colin, 728 p., 8 pl. coul.

LEVEQUE P. (1965).- Résultats d'observations géologiques et de quelques mesures géotechniques sur les séries gypseuses de l'Atlas marocain et du Rif.- Colloque intern. sur les travaux publics en terrains gypseux, Madrid-Saragosse-Séville - Thème 2, communication 6.2.9, t. II, p. 191-236.

L'HERITEAU G. et MICHEL G. (1974).- Aménagement du bassin du Balikh ; région de Bir Al Hashim. Comportement du terrain gypseux et disposition à prévoir.- République arabe syrienne, Ministère de l'Euphrate.- G.E.R.S.A.R., rapport inédit.

LONDE P. (1970).- Progrès récents dans l'étude et la construction des barrages et des réservoirs situés sur des alluvions profondes, sur des terrains karstiques ou des terrains difficiles.- 10e C.I.G.B., Montréal, R.G., Q. 37, p. 61-142.

LUGEON M. (1933).- Barrages et géologie.- Paris, Dunod, 136 p., 41 fig., 63 photos.

MICHEL R. (1961).- Le glissement de terrain de La Motte-Chalancon (Drôme).- T.L.G., Grenoble, 37, p. 121-127.

MIEUSSENS C. (1978).- Barrage de Montbel. Mesures de densité apparente au banc de gammadensimétrie.- L.R.P.C., Toulouse, rapport inédit.

NORBERT J. (1974).- Cours de géologie technique.- Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, inédit, 92 p.

OULIANOFF N. (1959).- Enseignements géologiques et hydrogéologiques résultant de l'étude de récents barrages en Suisse.- Barrages et bassins de retenue, Cong. et coll. Univ. de Liège, vol. 14, p. 48-59.

PANET M. et coll. (1979).- La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil.- Coll. de la formation continue de l'Ecole nat. des Ponts et Chaussées.- Paris, imp. Rosay, 235 p., 216 fig.

POUPELLOZ B. (1979).- Traitement des terrains par injection.- E.N.P.C., formation continue, session "les injections", mars 1980, 82 p.

RAMPON A. (1982).- Géophysique appliquée à l'étude des petits barrages. Principes des méthodes et quelques exemples.- Ministère de l'Agriculture.- CEMAGREF, mémoire n° 16, 82 p., 21 pl., 14 tabl.

ROUIRE J. et ROUSSET C. (1973).- Causses-Cévennes-Aubrac - Guide géologique régional.- Paris, Masson, 183 p., 92 fig., 6 pl.

SABARLY F. (1968).- Les injections et les drainages de fondations des barrages en roches peu perméables.- Géotechnique 18, p. 229-249, 20 fig.

SABARLY F. (1971).- Le rôle de l'eau dans les fondations de barrages.- Revue de l'Industrie minière, cahier 3 du Comité français de mécanique des roches, n° spécial, juil. 1971, p. 124-133, 16 fig.

SCHNEIDER B. (1967).- Contribution à l'étude des massifs de fondation de barrages.- T.L.G., Grenoble, mémoire n° 7, 241 p., 142 fig., 14 tabl.

SCHNEIDER B. (1979).- Reconnaissance des massifs rocheux par la petite sismique.- Symposium "Problèmes de géologie de l'ingénieur dans la construction hydrotechnique", Tbilissi.- Bull. de l'A.I.G.I., n° 20, thème 3, p. 121-123, 3 fig.

S.C.P. (1974).- Petits barrages en terre. Recommandations pour le projet.- Ministère de l'Agriculture, 135 p.

S.C.P. (1985).- Barrage des Olivettes. Essais sur les basaltes.- Rapport n° R.T.L.L. 41 850548, inédit.

S.E.G.G. (1984).- Barrage des Olivettes. Reconnaissance par méthode sismique réfraction de la zone d'implantation du futur barrage.- Rapport inédit n° 3119.

S.E.G.G. (1986).- Barrage des Olivettes. Etude microsismique pour la fondation de l'ouvrage.- Rapport inédit n° 3175.

SOGEO (1975).- Barrage collinaire de Cocumont (Lot-et-Garonne). Reconnaissance géotechnique.- Rapport inédit.

SOLETANCHE (1982).- Barrage de Laprade. Travaux d'étanchéité. Note technique générale.- Rapport 110194-44, inédit.

SOLETANCHE (1982).- Barrage de Laprade. Travaux d'étanchéité. Note technique complémentaire concernant les travaux de pétardage avant réalisation de la paroi.- Rapport 110194-42, inédit.

SOLETANCHE (1985).- Barrage des Olivettes. Campagne de reconnaissance.- Rapport S0 151753, inédit.

S.R.A.E., Provence Côte-d'Azur (1977).- Mesures de débit sur le captage du Foulon (Alpes-Maritimes), inédit.

THEROND R. (1973).- Recherche sur l'étanchéité de lacs de barrage en pays karstique.- Collection du Centre de recherche et essais de Chatou.- Paris, Dunod.

TRASK P.D. (1959).- Geological problems of dams in the United States.- Barrages et bassins de retenues, Cong. et coll. Univ. de Liège, vol. 14, p. 29-42.

USELLE J.P. (1982).- Barrage de la Borie. Analyse d'échantillons de sable.- Univ. de Grenoble, rapport inédit.

VERDIER J. et RONDO F. (1979).- Influence du degré de connaissance de la structure d'un site sur un projet de barrage et l'exécution des ouvrages.- Symposium "Problèmes de géologie de l'ingénieur dans la construction hydrotechnique", Tbilissi.- Bull. de l'A.I.G.I. n° 20, thème 4, p. 162-168, 15 fig., 1 tabl.

WAHLSTROM E. (1974).- Dams, dam foundations and reservoir sites.- Developments in geotechnical engineering, vol. 6.- Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 278 p.

WALTERS R. (1962).- Dam Geology.- Londres, Butterworth, 335 p., 253 fig.

WEGERMANN W., GUERRA J.R. et CARDOSO H.P. (1964).- Le traitement des failles géologiques dans les fondations des barrages.- C.R. du 8e C.I.G.B., Edimbourg, Q. 48, R. 49.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures dans le texte

	Pages
Fig. 1 - Plan de situation des exemples cités.....	6
Fig. 2 - Coupe géologique schématique (barrage de Vailhauquès).....	25
Fig. 3 - Coupe géologique schématique (barrage de l'Oued Chabet)...	29
Fig. 4 - Coupe géologique schématique (barrage de la Palanqué).....	33
Fig. 5 - Plan de situation (barrage de Cipières).....	41
Fig. 6 - Courbes hauteurs-volumes/surfaces (barrage de Cipières)...	42
Fig. 7 - Esquisse structurale régionale (barrage de Cipières).....	43
Fig. 9 - Coupe géologique amont-aval du site (barrage de Cipières)..	50
Fig. 10 - Coupe géologique sur l'axe du site (barrage de Cipières)..	50
Fig. 11 - Plan de situation (barrage d'Ansignan).....	57
Fig. 12 - Courbes hauteurs-volumes/surfaces (barrage d'Ansignan)....	58
Fig. 13 - Schéma structural de la partie ouest du massif hercynien de l'Agly (barrage d'Ansignan).....	59
Fig. 15 - Plan de situation (barrage du Pas des Ondes).....	69
Fig. 16 - Courbes hauteurs-volumes/surfaces (barrage du Pas des Ondes).....	70
Fig. 18 - Schéma structural (barrage du Pas des Ondes).....	75
Fig. 19 - Coupe géologique en rive droite de l'Oule (barrage du Pas des Ondes).....	78
Fig. 20 - Risques de fuites selon la position du barrage (barrage du Pas des Ondes).....	80
Fig. 21 - Plan de situation (barrage de Montbel).....	103

Fig. 22 - Cadre géologique général (barrage de Montbel).....	104
Fig. 23 - Courbes hauteurs-volumes/surfaces (barrage de Montbel)....	106
Fig. 27 - Implantation des tranchées et des coupes géologiques interprétatives au col 402 (barrage de Montbel).....	115
Fig. 28 - Coupes géologiques interprétatives au col 402 (barrage de Montbel).....	116
Fig. 29 - Carte géologique interprétative du site (barrage de Montbel).....	122
Fig. 31 - Hypothèse glissement de versant (barrage de Montbel).....	130
Fig. 32 - Hypothèse gouttière d'érosion (barrage de Montbel).....	130
Fig. 35 - Plan d'implantation des travaux de reconnaissance en cuvette (barrage de Montbel).....	140
Fig. 40 - Implantation des travaux de reconnaissance (barrage de Cocumont).....	154
Fig. 41 - Coupes des tranchées rive gauche et thalweg (barrage de Cocumont).....	155
Fig. 42 - Coupes des tranchées rive droite (barrage de Cocumont)....	156
Fig. 45 - Coupe schématique de la tranchée H (barrage de Cocumont)..	165
Fig. 46 - Plan de situation (barrage des Olivettes).....	175
Fig. 59 - Représentation polaire des plans de fractures le long de la route R.G. et schistosité du versant R.G. (barrage des Olivettes).....	203
Fig. 60 - Plans de fractures le long de la route R.G. et schistosité du versant R.G. (barrage des Olivettes).....	204
Fig. 61 - Représentation polaire des plans de fractures et de la schistosité dans la fouille en pied de versant R.G. (barrages des Olivettes).....	205
Fig. 62 - Plans de fractures et schistosité dans la fouille en pied de versant R.G. (barrage des Olivettes).....	206
Fig. 63 - Plans de failles avec joints argileux dans la fouille en pied de versant R.G. (barrage des Olivettes).....	207
Fig. 65 - Plan de situation (barrage de Laprade).....	223
Fig. 66 - Perméabilité des terrains avant et après injection sur les plots A et B (barrage de Laprade).....	227

Fig. 68 - Dispositif de pétardage (barrage de Laprade).....	230
Fig. 69 - Etanchéité mixte injection et paroi moulée (barrage de Laprade).....	232
Fig. 70 - Etanchéité en rocher sain fissuré (barrage de Laprade)....	233
Fig. 71 - Etanchéité en rocher d'altéré à sain fissuré (barrage de Laprade).....	234
Fig. 72 - Pressions théoriques d'injection (barrage de Laprade).....	241
Fig. 73 - Absorption de ciment au mètre linéaire sur le total du voile (barrage de Laprade).....	244
Fig. 74 - Absorption de ciment sur le total du voile (barrage de Laprade).....	245
Fig. 75 - Absorption de ciment par ligne (barrage de Laprade).....	247
Fig. 76 - Variation des absorptions par ligne avec la profondeur (barrage de Laprade).....	249
Fig. 77 - Perspective des volumes injectés entre les profils P9 et P10 + 25 (barrage de Laprade).....	251
Fig. 78 - Essais de perméabilité avant injection (barrage de Laprade).....	252
Fig. 79 - Essais de perméabilité après injection (barrage de Laprade).....	254
Fig. 80 - Corrélation absorption d'eau - absorption de ciment à une profondeur donnée (barrage de Laprade).....	255
Fig. 81 - Absorptions dans la zone entre les profils P12 à P14 (barrage de Laprade).....	258
Fig. 82 - Absorptions dans la zone entre les profils P14 à P16 (barrage de Laprade).....	259
Fig. 83 - Implantation des drains et des piézomètres (barrage du Salagou).....	269
Fig. 84 - Drains galerie R.G. : 1-3-18-23 (barrage du Salagou).....	272
Fig. 85 - Drains galerie R.G. : 19-20-21-22 (barrage du Salagou)....	272
Fig. 86 - Drains galerie R.D. : 1-3-14-16 (barrage du Salagou).....	274
Fig. 87 - Drains galerie R.D. : 4-7-15 (barrage du Salagou).....	274
Fig. 88 - Drains murettes R.D. - R.G. (barrage du Salagou).....	277

Fig. 89 - Drains extérieurs R.G. : 1-2-3 et 7 (barrage du Salagou)...	278
Fig. 90 - Drains extérieurs R.G. : 4-5-6 et 8-9 (barrage du Salagou)	278
Fig. 91 - Drains extérieurs R.D. : 10-11 et 14-15-16 (barrage du Salagou).....	280
Fig. 92 - Drains extérieurs R.D. : 12 et 13 (barrage du Salagou)....	280
Fig. 93 - Piézomètres (barrage du Salagou).....	281
Fig. 94 - Pluviométrie (barrage du Salagou).....	281
Fig. 95 - Cote du plan d'eau (barrage du Salagou).....	281
Fig. 96 - Coupe géologique de la cuvette (barrage de Saint-Jean- de Cuculles).....	304
Fig. 97 - Carte géologique de l'aménagement (barrage de la Martinie)	314

Figures hors-texte

Avant les pages

Fig. 8 - Carte géologique (barrage de Cipières).....	45
Fig. 14 - Carte géologique (barrage d'Ansignan).....	61
Fig. 17 - Carte géologique (barrage du Pas des Ondes).....	71
Fig. 24 - Carte géologique des affleurements (barrage de Montbel)...	109
Fig. 25 - Carte géologique interprétative (barrage de Montbel).....	109
Fig. 26 - Coupe géologique interprétative amont-aval de la cuvette (barrage de Montbel).....	111
Fig. 30 - Coupes géologiques du site (barrage de Montbel).....	123
Fig. 33 - Coupes des teneurs en eau sous l'ouvrage (barrage de Montbel).....	133
Fig. 34 - Coupes des perméabilités sous l'ouvrage (barrage de Montbel).....	137
Fig. 36 - Plan d'implantation des tranchées de reconnaissance et des sondages aux cols 390 et 396 (barrage de Montbel).....	143

Fig. 37 - Coupes géologiques et perméabilités au col 390 (barrage de Montbel).....	143
Fig. 38 - Coupes géologiques et perméabilités au col 396 (barrage de Montbel).....	149
Fig. 39 - Carte géologique du site et de la retenue (barrage de Cocumont).....	153
Fig. 43 - Coupe géologique interprétative (barrage de Cocumont).....	161
Fig. 44 - Essais d'eau et pourcentage de carottes (barrage de Cocumont).....	161
Fig. 47 - Carte géologique de la cuvette (barrage des Olivettes)....	177
Fig. 48 - Carte géologique du site (barrage des Olivettes).....	181
Fig. 49 - Plan de situation des travaux de reconnaissance (barrage des Olivettes).....	183
Fig. 50 - Coupe lithologique au droit du site, axe barrage (barrage des Olivettes).....	185
Fig. 51 - Coupe lithologique au droit du site, pied amont (barrage des Olivettes).....	185
Fig. 52 - Coupe de la fracturation au droit du site, axe barrage (barrage des Olivettes).....	185
Fig. 53 - Coupe de la fracturation au droit du site, pied amont (barrage des Olivettes).....	185
Fig. 54 - Coupe des perméabilités au droit du site, axe barrage (barrage des Olivettes).....	187
Fig. 55 - Coupe des perméabilités au droit du site, pied amont (barrage des Olivettes).....	187
Fig. 56 - Coupe lithologique sur l'axe de la galerie et du bassin de dissipation (barrage des Olivettes).....	193
Fig. 57 - Plan de situation des travaux de reconnaissance de la carrière (barrage des Olivettes).....	194
Fig. 58 - Levé géologique de la fouille rive gauche (barrage des Olivettes).....	203
Fig. 64 - Limite théorique du fond de fouilles (barrage des Olivettes).....	209
Fig. 67 - Coupe géologique au droit du voile d'étanchéité (ligne 4000) et de la paroi (barrage de Laprade).....	229

TABLE DES MATIERES

	Pages
AVANT-PROPOS	
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : DEFINITION DES ETUDES PRESENTEES.....	3
I - CADRE GEOGRAPHIQUE.....	5
A - Variétés géographiques.....	5
B - Variétés des besoins.....	7
II - CADRE GEOLOGIQUE.....	7
A - Ensembles lithologiques rencontrés.....	7
B - Cadres structuraux.....	8
C - Contextes hydrogéologiques.....	8
III - NATURE DES ETUDES.....	9
A - Géologie régionale.....	9
B - Géologie de l'aménagement.....	9
C - Travaux de reconnaissance.....	10
D - Exécution des projets.....	10
IV - PHASES D'ETUDES GEOLOGIQUES.....	10
Géologie préliminaire. Géologie de l'avant-projet.	
Géologie pendant et après les travaux. Réflexions sur	
les moyens d'étude	
CHAPITRE II : GEOLOGIE PRELIMINAIRE.....	11
I - INVENTAIRE DES SITES.....	13
A - Cartes géologiques.....	13
1 - Zones favorables.....	14
2 - Zones défavorables.....	14
3 - Zones douteuses.....	14
4 - Conclusion.....	15
B - Moyens topographiques.....	15
C - Photographies aériennes.....	15
D - Classement des sites.....	16

II - DIAGNOSTIC GEOLOGIQUE.....	16
A - Etude de terrain.....	16
1 - Etude de surface permettant de renseigner une coupe géologique.....	17
a/ Lithologie et structure.....	17
b/ Valeur de la fondation.....	18
c/ Stabilité des appuis (site) et des versants (cuvette).....	18
d/ Etanchéité (site et cuvette).....	18
e/ Matériaux.....	19
f/ Programme de travaux de reconnaissance.....	19
g/ Coupes géologiques.....	20
2 - Etude de surface ne permettant pas de renseigner une coupe géologique.....	20
B - Conclusion sur la valeur du site.....	21
C - Exemples d'études.....	21
- Site du stade de Vailhauquès (Hérault).....	23
- Site de l'Oued Chabet el Anatra (Maroc).....	27
- Site de la Palanqué (Aude).....	31
III - ETUDE GEOLOGIQUE PRELIMINAIRE.....	35
A - Etude de terrain.....	35
1 - Support topographique.....	35
2 - Rubriques d'étude.....	35
3 - Les travaux de "renseignement".....	35
B - Programme de travaux de reconnaissance.....	36
C - Conclusion sur la valeur du site.....	36
D - Exemples d'études.....	37
- Barrage de Capières (Alpes-Maritimes).....	39
- Barrage d'Ansignan (Pyrénées-Orientales).....	55
- Barrage du Pas des Ondes (Drôme).....	67
IV - TABLEAU DE SYNTHESE (Chapitre II).....	87
CHAPITRE III : GEOLOGIE DE L'AVANT-PROJET.....	89
I - ETUDES GEOLOGIQUES D'AVANT-PROJET SOMMAIRE.....	91
A - Topographie.....	92
B - Etudes géologiques de terrain.....	93
C - Travaux de reconnaissance.....	93
1 - Tranchées et puits.....	94
2 - Prospection géophysique.....	94
3 - Forages ou sondages.....	95
a/ Implantation.....	95
b/ Nombre et longueur des sondages.....	96
c/ Informations fournies par les sondages.....	96
d/ Etude des matériaux.....	97
D - Conclusion.....	98
E - Exemples d'études.....	99
- Barrage de Montbel (Ariège).....	101
- Barrage de Cocumont (Lot-et-Garonne).....	151

II - ETUDES GEOLOGIQUES D'AVANT-PROJET DETAILLE.....	168
A - Reconnaissances complémentaires au niveau de l'A.P.D.....	168
1 - Site du barrage.....	168
a/ ouvrages annexes.....	168
b/ voile d'étanchéité.....	169
c/ qualité de la fondation.....	170
2 - Cuvette de retenue.....	170
3 - Carrières et matériaux.....	170
4 - Conclusion.....	171
B - Exemple d'étude.....	171
- Barrage des Olivettes (Hérault).....	173
III - TABLEAU DE SYNTHESE (Chapitre III).....	215
CHAPITRE IV : GEOLOGIE PENDANT ET APRES LES TRAVAUX.....	217
I - ETUDES GEOLOGIQUES D'EXECUTION.....	219
A - Levé géologique des fouilles.....	219
B - Suivi de la réalisation des organes d'étanchéité.....	220
C - Définition du réseau de drains et de piézomètres.....	220
D - Exemple d'étude.....	220
- Barrage de Laprade (Aude).....	221
II - ETUDES GEOLOGIQUES D'AUSCULTATION.....	264
A - Première mise en eau.....	264
1 - Stabilité des berges et des appuis.....	264
2 - Contrôle des drains et des piézomètres.....	265
B - Auscultation ultérieure systématique.....	265
C - Exemple d'étude.....	265
- Barrage du Salagou (Hérault).....	267
III - ETUDES GEOLOGIQUES DE REFECTION D'OUVRAGES ANCIENS.....	286
A - Récupération de la documentation.....	286
B - Travaux de reconnaissance.....	286
C - Travaux de confortement.....	286
IV - TABLEAUX DE SYNTHESE (Chapitre IV).....	287
CHAPITRE V : REFLEXIONS SUR LES MOYENS D'ETUDE.....	289
I - ETUDES GEOLOGIQUES DE TERRAIN.....	291
A - Contenu des études.....	291
1 - Parcours de l'aménagement.....	291
2 - Cartographie géologique.....	292
a/ Cartographie générale.....	292
b/ Cartographie de détail.....	293
3 - Poser les problèmes du site.....	294
a/ Valeur du site.....	295
b/ Nature géologique du site et de la cuvette....	299

c/ Conditions géologiques rédhitoires ou entraînant des réserves.....	299
d/ Tranchées nécessaires dès l'étude de surface.....	300
4 - Choix et implantation optimaux des reconnaitances.....	300
B - Recommandations.....	301
II - ADAPTATION DES RECONNAISSANCES AU CONTEXTE GEOLOGIQUE....	302
A - Travaux de reconnaissance et types de roches.....	302
1 - Substratum dur (barrage des Olivettes, Hérault).....	302
2 - Substratum tendre (barrage de Montbel, Ariège).....	302
B - Conditions géologiques particulières.....	303
1 - Terrains karstiques (barrage de Saint-Jean-de- Cuculles, Hérault).....	303
2 - Terrains fracturés (barrage de la Borie, Gard)...	305
III - EVOLUTION DES MOYENS DE RECONNAISSANCE.....	309
A - Reconnaissances par sondages.....	309
B - Reconnaissances géophysiques.....	311
IV - ABSENCE DE RECONNAISSANCES ET RECONNAISSANCES MAL CONCUES.....	312
A - Manque de reconnaissances (barrage de la Martinie, Corrèze).....	312
B - Inadaptation ou excès des reconnaissances.....	318
C - Perte des données.....	319
CONCLUSION GENERALE.....	321
BIBLIOGRAPHIE.....	327
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	339
TABLE DES MATIERES.....	345
RESUME FRANCAIS-ANGLAIS. MOTS CLEFS.....	349

LES ETUDES GEOLOGIQUES DANS LES PROJETS DE BARRAGES

RESUME

Les modalités d'intervention du géologue aux différents stades d'études des grands et petits barrages (étude préliminaire, avant-projets, pendant et après la construction) sont décrites en s'appuyant sur de nombreux exemples vécus en France et à l'étranger.

Le cas particulier d'un barrage en terrain granitique est analysé dans le détail afin de montrer la réalité du traitement par injection de sa fondation rocheuse, à la fois très altérée et saine, et les informations prévisionnelles que l'on pouvait en tirer.

Enfin, à partir d'interventions géologiques faites sur 36 grands barrages et 135 ouvrages collinaires, l'auteur a essayé de classer les causes géologiques responsables de l'abandon de certains sites ou entraînant le plus de réserves sur leur faisabilité et mettre ainsi en valeur l'importance du diagnostic géologique pour ce type d'aménagements hydrauliques.

MOTS CLEFS

Méthodologie	Diagnostic	Injection des granites
Etudes géologiques	Avant-projet	Reconnaissance des fondations
Barrages	Construction	

GEOLOGICAL STUDIES IN DAM PROJECTS

ABSTRACT

The ways in which the geologist is involved at the various stages of work on large and small dams (preliminary surveys, draft designs, during and after construction) are described with reference to numerous examples of experience in France and abroad.

The special case of dam in a granitic formation is analysed in detail in order to show the reality of treatment by grouting of its rocky foundation, which is both very weathered and solid, together with the information which could be estimated from this.

Lastly, on the basis of geological operations carried out in connection with 36 large dams and 135 hill dams, the author has attempted to classify the geological factors responsible for the abandonment of certain sites, or giving rise to the largest number of reservations concerning their feasibility, thus demonstrating the importance of a geological assessment for this type of hydraulic scheme.

KEY WORDS

Methodology	Geological assessment	Granite grouting
Geological studies	Draft design	Subsoil investigations
Dams	Construction	

Atelier de reprographie
C.N.A.R.B.R.L.
Nîmes (Gard)
4^e trimestre 1987

LES ÉTUDES GÉOLOGIQUES DANS LES PROJETS DE BARRAGES

RÉSUMÉ

Les modalités d'intervention du géologue aux différents stades d'études des grands et petits barrages (étude préliminaire, avant-projets, pendant et après la construction) sont décrites en s'appuyant sur de nombreux exemples vécus en France et à l'étranger.

Le cas particulier d'un barrage en terrain granitique est analysé dans le détail afin de montrer la réalité du traitement par injection de sa fondation rocheuse, à la fois très altérée et saine, et les informations prévisionnelles que l'on pouvait en tirer.

Enfin, à partir d'interventions géologiques faites sur 36 grands barrages et 135 ouvrages collinaires, l'auteur a essayé de classer les causes géologiques responsables de l'abandon de certains sites ou entraînant le plus de réserves sur leur faisabilité et mettre ainsi en valeur l'importance du diagnostic géologique pour ce type d'aménagements hydrauliques.

MOTS CLEFS

Méthodologie
Études géologiques
Barrages

Diagnostic
Avant-projet
Construction

Injection des granites
Reconnaissance
des fondations