

PROBLEMES D'EXHAURE ET STABILITE DES PENTES
DANS LA MINE A CIEL OUVERT DU MARQUESADO

par Streiff, C.* et Ricci, G.*
avec la participation de Lamblin, J. M.** ; Ledoux, E.* ;
Medina Salcedo, F.*** et Mordos, R.*

ABSTRACT : In the open pit-mine of Marquesado (Spain), the iron-ore is extracted out of a lens of limestone, buried under alluvions, the depth of which reaches 200 m, and which contains an aquiferous sheet. Now, the presence of water under the alluvion-slopes is very bad for their stability. The problem which initially was to find practical means of drying the alluvions, lead the authors to build a mathematical model of the aquiferous sheet in a wide field around the pit, and then, to study the stability of the alluvion-slopes in presence of water, to know if it is better, from an economic point of vue, to dry the alluvions at any cost, or to give up drying them, but to reduce the declivity of the slopes accordingly, and to remove more alluvions.

RESUME : Dans la mine à ciel ouvert du Marquesado (Espagne), on extrait le minéral de fer d'une lentille calcaire, enfouie sous des alluvions dont l'épaisseur atteint 200 m, et qui contiennent une nappe phréatique. Or la présence d'eau dans les talus d'alluvions est très défavorable à leur tenue. Le problème posé, qui était au départ de trouver les moyens pratiques de dénoyer les alluvions, a amené les auteurs à construire un modèle mathématique de la nappe sur un vaste domaine autour de la mine, puis à effectuer une étude de la stabilité des parements en présence d'eau, afin de savoir s'il vaut mieux, sur le plan économique, dénoyer les talus quelqu'en soit le prix, ou bien renoncer au dénoyage, mais diminuer la pente des parements en conséquence et transporter plus de stérile.

RESUMEN : En la explotación minera a cielo abierto del Marquesado (España), el hierro se extrae de un lentejón de calizas, situado bajo aluviones cuyo espesor alcanza 200 m, que albergan un acuífero. La presencia de agua en los aluviones es muy desfavorable para la estabilidad de los taludes. Los autores, ante este problema cuya solución, en principio, consiste en encontrar medios prácticos para secar los aluviones, llegaron a la idea de diseñar un modelo matemático del acuífero, sobre un amplio área alrededor de la mina, para efectuar un estudio de estabilidad de los taludes, a fin de saber si es mejor, en el plano económico, secar los aluviones a cualquier precio, o renunciar al drenaje, con la contrapartida de disminuir la pendiente de los parámetros y, en consecuencia, extraer más aluviones.

* Ecole des Mines de Paris, France

** Burgeap, Paris, France

***Compañía Andaluza de Minas, España

SIAMOS-78. Granada (España)

I - PRESENTATION ET HISTORIQUE DU PROBLEME

La compagnie Andalouse des Mines (filiale de la compagnie Mokta, du groupe IMETAL) exploite en découverte, sur le plateau du Marquesado, près de Grenade, un riche gisement de fer. Ce gisement est inclus dans une lentille calcaire, elle-même noyée sous des alluvions; si bien que pour une production annuelle de 3 à 4 Mt de minerai, on doit déplacer près de 20 Mt d'alluvions (10 Mm^3).

Ces alluvions présentent une granulométrie très étalée, qui va du gros bloc de quartzite d'un diamètre de 0,5 m jusqu'à l'argile, ainsi qu'une hétérogénéité très marquée. Les proportions des différents constituants (blocs, cailloux, graviers, sable, limon et argile) sont en effet éminemment variables, aussi bien à l'échelle régionale (affinement de la granulométrie vers l'aval), qu'à l'échelle de la dizaine de mètres, ou même du mètre. En effet, sur une même verticale se superposent, sans transition, des lits à gros grains, des lits limo-argileux, et des niveaux où les deux sont intimement mélangés. Et les variations suivant l'horizontale ne sont pas moins rapides.

Les calcaires, eux, sont les restes d'un ancien karst dans lequel s'est installé le gisement de fer, et ont été passablement métamorphisés (calcaires marmoréens). Leurs caractéristiques essentielles sont : leur grande dureté et leur intense fissuration.

L'ensemble alluvions-calcaires repose sur un substratum de micaschistes imperméables, et contient une nappe phréatique. (Voir figures 1 et 2).

Fig. 1 : Carte géologique simplifiée.

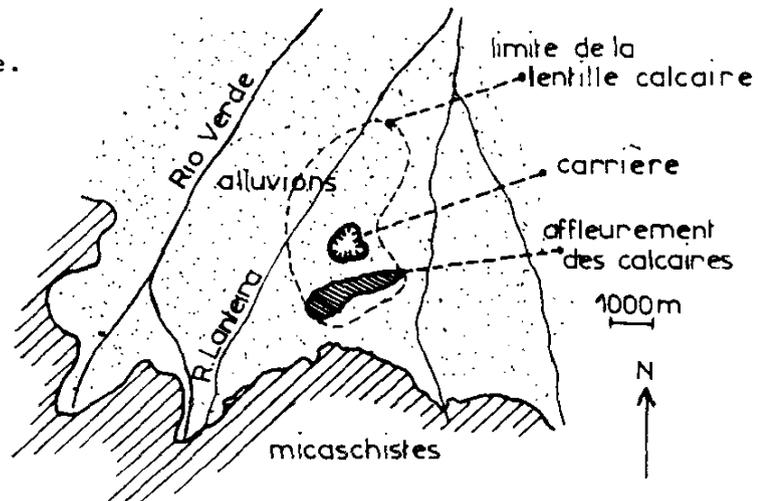
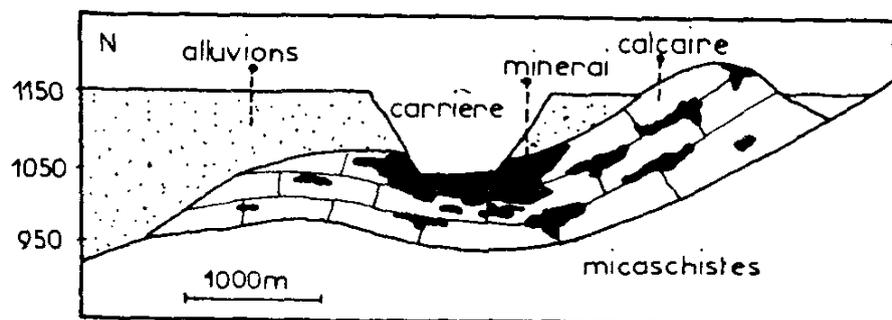


Fig. 2 : Coupe schématique Nord-Sud.



SIAMOS-78. Granada (España)

Depuis 1963, date à laquelle on a commencé à exploiter du minerai sous le niveau naturel de la nappe, on est donc confronté au problème du dénoyage. Au départ, le problème paraissait simple : la forte perméabilité des calcaires (perméabilité de fissures) permettait, au moyen de quelques travaux comme un réseau de galeries ou de puits de faible diamètre, de dénoyer le fond de la carrière. Ceci engendrait par drainance un rabattement de la nappe des alluvions, suffisant pour assécher les talus du même coup. Mais au fur à mesure de l'approfondissement et de l'élargissement de la carrière, on s'aperçut que les rabattements successifs du niveau d'eau dans les calcaires avaient de moins en moins d'influence sur le niveau dans les alluvions. La drainance naturelle ne remplissait pas son rôle, étant considérablement freinée par la présence, au contact entre alluvions et calcaires, d'un matériau argileux, le "rubial", ou de minerai, tous deux très peu perméables ($K \approx 10^{-7}$ à 10^{-8} m/s). De plus, on exploitait des secteurs où les calcaires se trouvent de plus en plus profondément enfouis sous les alluvions, si bien que le rabattement nécessaire dans les alluvions pour assécher le talus devenait de plus en plus grand, et donc de plus en plus difficile. En fait, l'aquifère se scindait progressivement en deux; la nappe des calcaires devenait libre et son niveau baissait régulièrement; celle des alluvions atteignait un état d'équilibre. On aboutissait au schéma suivant : (figure 3)

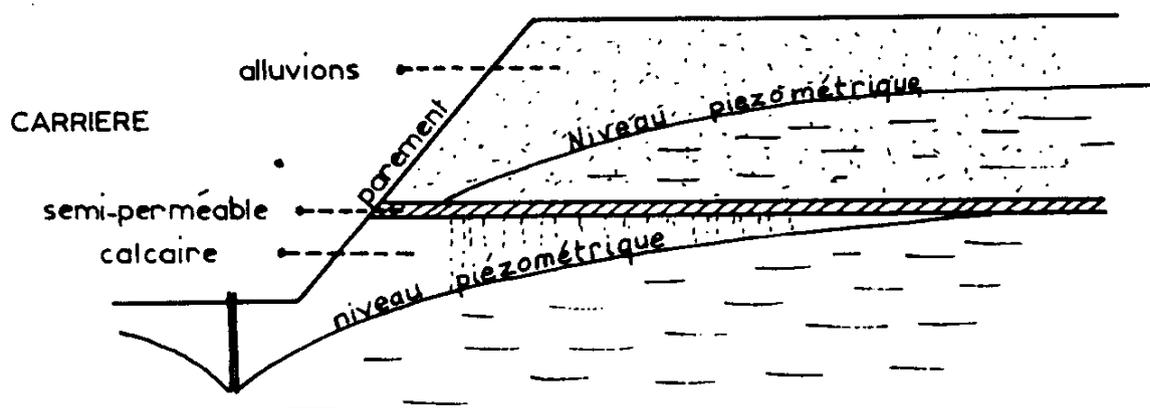


Fig. 3 : Schéma d'un talus montrant le décollement de la nappe des calcaires.

Si bien qu'en 1970, des reconnaissances firent craindre, pour les extensions futures de la carrière, des arrivées d'eau au pied des parements en alluvions.

SIAMOS-78. Granada (España)

Or, et c'est là le deuxième aspect du problème, la présence d'eau dans ces talus est très défavorable à leur tenue. Autrement dit, des parements mouillés demandent, pour être stables, une pente plus faible, ce qui signifie pour l'exploitant un volume d'alluvions plus important à déplacer. (voir figure 4)

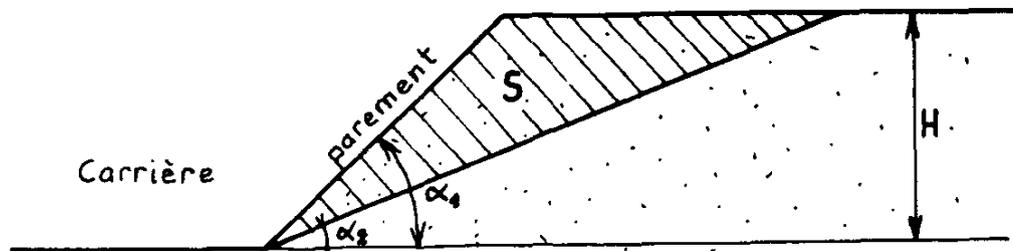


Fig. 4 : Volume supplémentaire d'alluvions à décaper :

$$\Delta V = L \times S = L \cdot \frac{H^2}{2} (\cotg \alpha_2 - \cotg \alpha_1) \quad : \quad (L : \text{longueur du talus}).$$

Se pose alors la question suivante : faut-il dénoyer les talus en alluvions, quelqu'en soit le prix, ou bien au contraire renoncer au dénuyage, mais diminuer la pente des parements en conséquence et transporter plus de stérile ? S'y rajoute le fait que la stabilité de ces talus, lorsqu'ils sont mouillés, n'est guère connue que qualitativement, faute d'expérience et de modèles mathématiques pertinents. D'où, pour la deuxième solution, un risque de glissements de terrain plus élevé.

On a alors décidé de dénoyer le talus, en suppléant la drainance naturelle par l'installation de drains verticaux qui traversent alluvions, rubial et minéral, faisant ainsi jouer aux calcaires le rôle d'une crépine dans laquelle se déverse la nappe des alluvions. (Figure 5) Ce dispositif a résolu provisoirement le problème.

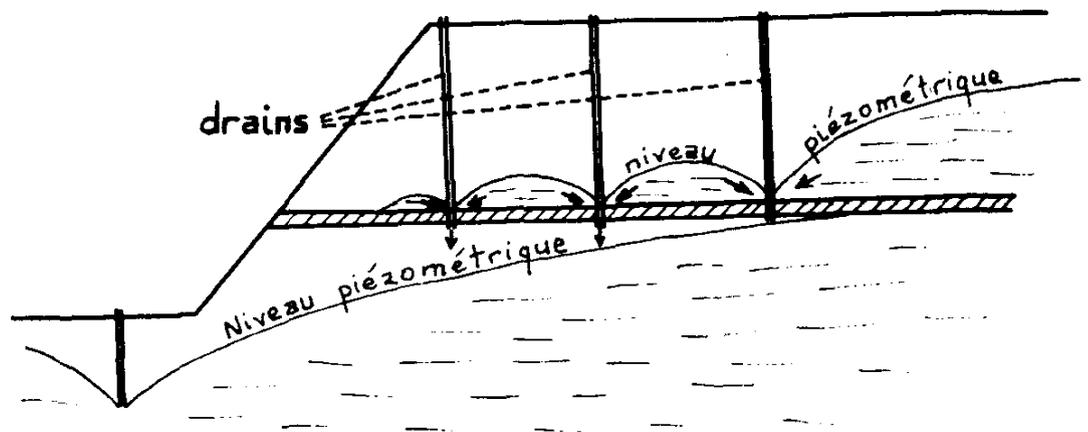


Fig. 5 : Fonctionnement des drains traversant le "rubial"

SIAMOS-78. Granada (Españo)

Mais les prochaines extensions de la carrière portent sur les secteurs où le calcaire est pratiquement inexistant : le système précédent ne s'applique plus, et le problème du dénoyage se repose de façon nouvelle. De même que se repose le choix entre dénoyer et déplacer davantage de stérile. Notre travail a été, précisément, d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

II - LE DENOYAGE A MOYEN ET LONG TERME

1 - L'état initial - Nécessité d'un modèle régional

Pour des raisons liées à l'exploitation, on va prochainement détourner une rivière, la "Rambla de Lanteira", dont on pense que les infiltrations constituent une part importante de l'eau qui arrive derrière les talus. Cette opération aura vraisemblablement un effet non négligeable sur le niveau de la nappe près de la mine. Notre premier problème a donc été de quantifier cet effet, c'est-à-dire de préciser l'état initial, l'état de référence de notre étude du dénoyage à moyen et long terme.

Or, le fait de détourner la rivière dépasse le cadre strict de la mine, et intéresse la nappe à l'échelle régionale; de plus, il est illusoire de vouloir quantifier ses effets en faisant appel à quelques calculs simples ou à des modèles analytiques : l'écart par rapport à la réalité est trop grand pour qu'on puisse en tirer quelque conclusion. La complexité du problème sur le plan géométrique, la multiplicité des apports à la nappe, la nécessité de tenir compte de la drainance entre alluvions et calcaires tout en étudiant la nappe dans le contexte régional, la recherche d'une connaissance précise du niveau piézométrique aux abords de la mine : tout ceci nous amena à traiter le problème de façon numérique, c'est à dire à construire un modèle mathématique rendant compte du fonctionnement de la nappe des alluvions dans la région.

2 - Principe du modèle mathématique

La modélisation consiste à résoudre par discrétisation l'équation de la diffusivité sur un certain domaine, moyennant certaines hypothèses et certaines conditions aux limites. Rappelons tout d'abord l'équation de la diffusivité dans le cas général :

$$(1) \quad \text{div}(\rho \bar{K} \cdot \text{grad } h) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \rho q$$

(ρ : masse volumique ; ω : porosité; q : débit prélevé par unité de volume; \bar{K} : tenseur de perméabilité; h : charge hydraulique).

SIAMOS-78. Granada (España)

- Nous supposons tout d'abord que la verticale est une direction principale du tenseur de perméabilité. Plus précisément, nous supposerons que nos matériaux sont :

$$\text{-soit isotropes : } \bar{\bar{K}} = \begin{pmatrix} K_{00} & & \\ & 0K0 & \\ & & 00K \end{pmatrix}$$

$$\text{-soit orthotropes : } \bar{\bar{K}} = \begin{pmatrix} K_h 00 & & \\ & 0K_h 0 & \\ & & 00K_v \end{pmatrix}$$

- A cela, nous ajoutons l'hypothèse de Dupuit, qui dit que l'écoulement est plan et horizontal ($u_z = 0$, \vec{v} : vitesse d'écoulement), et que les vitesses sont égales sur une même verticale; comme on a $u_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$, on en déduit que la charge est constante sur une verticale. L'équation de la diffusivité s'écrit alors :

$$(2) \quad \frac{\partial}{\partial x} (K_h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h \frac{\partial h}{\partial y}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + q$$

A ce stade, il nous faut distinguer deux cas, selon que la nappe est libre ou captive :

a - Nappe captive

Nous supposons la variation de porosité du milieu proportionnelle à la pression : ($\frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha \frac{\partial P}{\partial t}$, P: pression). L'intégration de l'équation (2) entre substratum et toit de la nappe donne :

$$(3) \quad \frac{\partial}{\partial x} (T \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T \frac{\partial h}{\partial y}) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

(T : transmissivité de la nappe; S : coefficient d'emmagasinement; Q : débit surfacique prélevé).

b - Nappe libre

On considère cette fois la porosité comme constante dans le temps; on obtient :

$$(4) \quad \frac{\partial}{\partial x} (K_h (h-\sigma) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h (h-\sigma) \frac{\partial h}{\partial y}) - Q = \omega \frac{\partial h}{\partial t}$$

(h : cote piézométrique; σ : cote du substratum de la nappe).

- Le système hydraulique est alors schématisé par un ensemble d'aquifères horizontaux superposés, d'où le nom de modèle "multi-couche" séparés ou non par des niveaux semi-perméables, communiquant donc entre eux par drainance, et contenant des nappes qui sont soit libres, soit captives.

- On suppose que l'écoulement dans les niveaux semi-perméables est vertical, ce qui permet d'écrire : $u_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$, et, en régime permanent :

$u_z = -\frac{K}{e} \Delta h$, Δh étant la différence de charge entre les deux aquifères séparés par le semi-perméable.

SIAMOS-78. Granada (España)

Dans notre cas, le schéma utilisé comportera 3 niveaux :

- un niveau aquifère pour les alluvions, où la nappe est libre
- un niveau semi-perméable, représentant l'ensemble du rubial et de la couche supérieure du minéral
- un niveau pour la lentille calcaire, où l'aquifère sera en partie libre, en partie captif. (Figure 6)

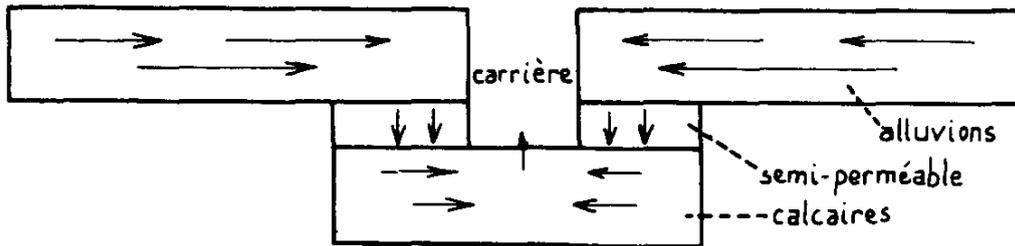


Fig. 6 : Schéma du modèle multicouche

La discrétisation consiste alors à "découper" chaque aquifère en mailles parallélépipédiques et à intégrer les équations (3) et (4), de façon approchée, sur ces volumes. Les premiers membres des équations représentant les débits volumiques entrant dans le volume que l'on considère, et les deuxièmes membres représentent les débits emmagasinés par ces volumes. Prenons l'exemple d'une maille de la nappe supérieure (alluvions) entourée de ses 5 voisines (on n'en a représentées que 4 sur la figure 7)

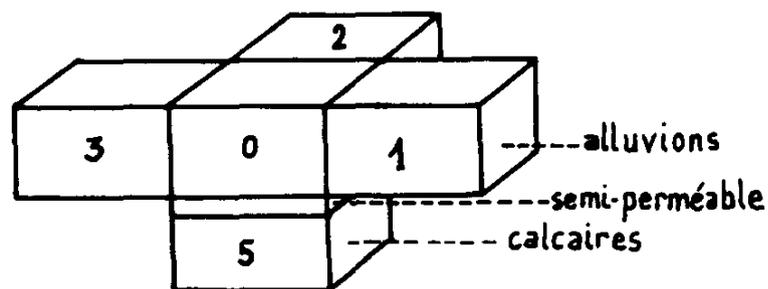


Fig. 7 : Une maille entourée de ses voisines (sauf une).

SIAMOS-78. Granada (España)

Le flux entrant par une des faces est : $\phi = - \iint \vec{u} \cdot \vec{n} \, ds$ (\vec{n} : normale à la face, orientée vers l'extérieur du volume).

$$\phi = \iint_{\text{face}} K \cdot \text{grad } h \cdot \vec{n} \cdot ds = \int_{\text{largeur de la maille}} T \cdot \text{grad } h \cdot \vec{n} \, dl.$$

La discrétisation se fait :

- en approximant la valeur de la transmissivité sur la surface de contact entre les mailles 0 et 1 :

$$T_{oi} = \frac{2 T_o T_i}{T_o + T_i}$$

- en approximant $\text{grad } h \cdot \vec{n}$ par : $\frac{H_i - H_o}{a}$.

- en approximant le flux entrant par la face 0 - 5 par :

$$\phi = K \cdot \frac{H_5 - H_o}{e} \times a^2, \quad K \text{ étant la perméabilité du semi-perméable et } e \text{ son épaisseur.}$$

D'où l'équation de la diffusivité discrétisée :

$$(4) \quad \sum_1^4 T_{oi} (H_i - H_o) + \frac{Ka^2}{e} (H_5 - H_o) - Q = a^2 S \frac{\Delta H_o}{\Delta t}$$

On voit, que dans le cas d'un régime permanent et d'une nappe captive, on est ramené à la résolution d'un système d'équations linéaires, dont les inconnues sont les H_i . Dans le cas d'une nappe libre, la résolution est plus compliquée, du fait que les T_{oi} varient avec les H_i ($T = K(h - \sigma)$).

Dans la pratique, le modèle permet de juxtaposer, outre des mailles de même taille, des mailles de dimension double ou moitié. On pourra par exemple avoir la disposition suivante: (Figure 8).

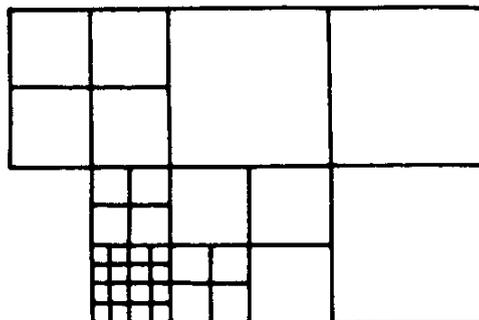


Fig. 8 : Exemple de maillage.

SIAMOS-78. Granada (España)

Dans notre modèle, le plus grand rapport possible entre les extrêmes des dimensions de mailles était de 8 (le coté de la plus grande maille du modèle égale 8 fois celui de la plus petite).

3 - Délimitation du domaine d'étude - Conditions aux limites

La finesse de calcul que nous recherchions aux abords de la mine nous a fait choisir comme dimension des plus petites mailles du modèle : 50 m de côté. Ceci nous interdisait de modéliser l'ensemble de la nappe, et il nous a fallu délimiter un domaine qui soit à la fois :

- assez grand pour pouvoir considérer que le fonctionnement de la nappe aux limites du modèle n'est pas influencé par le pompage dans la mine.
- assez restreint pour que le modèle ne soit pas trop lourd à manipuler.

Le domaine choisi est représenté sur la carte suivante : (Figure 9).

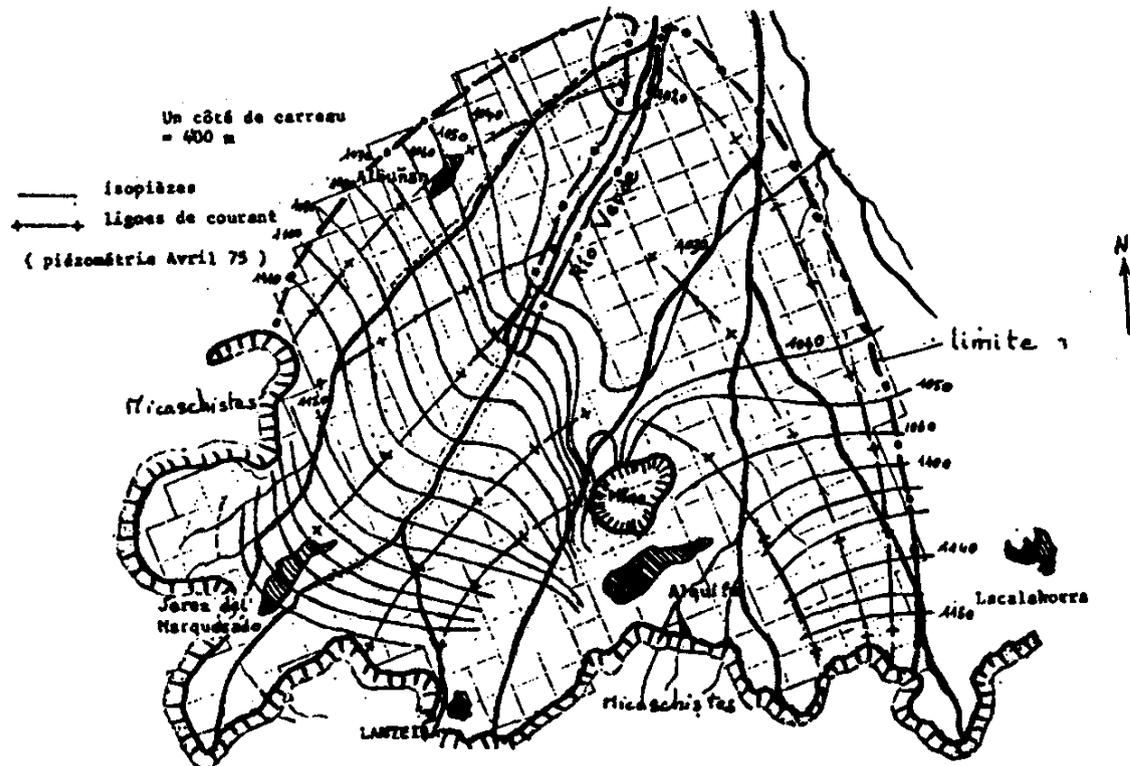


Fig. 9 : Carte du domaine d'étude

Nous sommes en présence de conditions aux limites de deux types :

* des limites à flux nul :

- le long de la limite d'affleurement du substratum imperméable (ce qui est la limite physique de la nappe)

SIAMOS-78. Granada (España)

- le long des limites Est et Ouest, que nous avons tracées perpendiculairement aux lignes isopièzes, en supposant que la direction de ces lignes n'est pas influencée par le pompage dans la mine.

* une limite à potentiel imposé qui figure la drainance entre la nappe des alluvions et la nappe alluviale du Rio Verde, ainsi que les sources qui jalonnent la vallée de cette rivière, l'ensemble constituant l'unique exutoire naturel de la nappe dans notre domaine.

Nous avons donc établi un bilan de la circulation d'eau dans notre domaine, bilan dont nous avons ensuite réparti les différents termes sur les mailles de notre modèle (Figure 10).

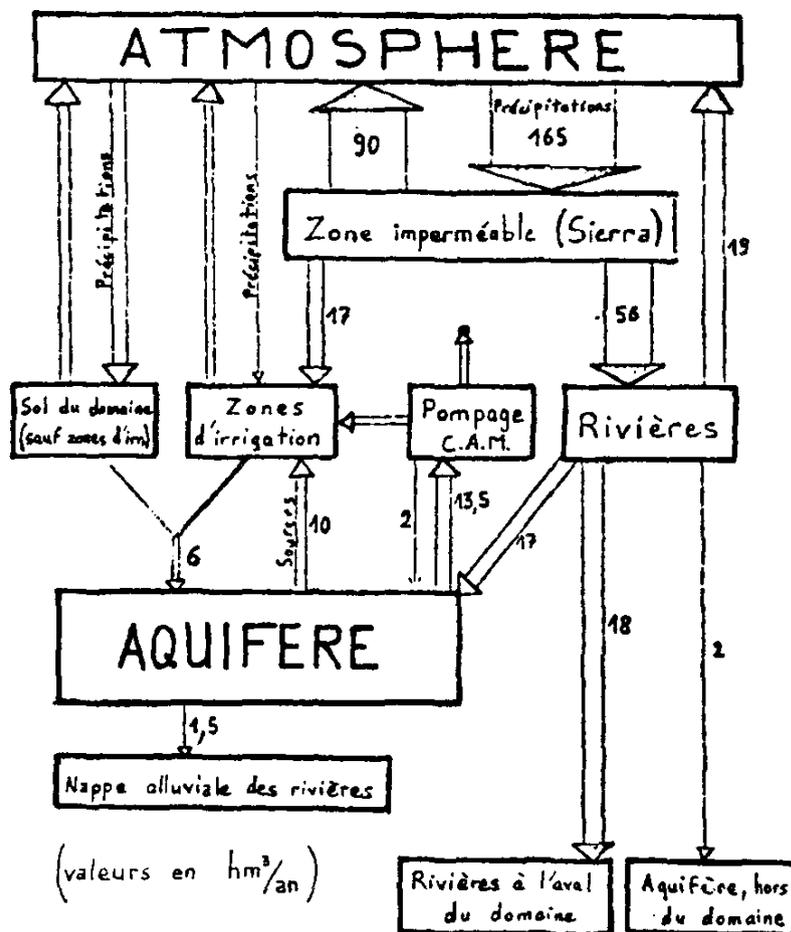


Fig. 10 : Les flux d'eau concernant le domaine choisi.

4 - Calage du modèle - Situation de référence - Solutions

L'étape suivante consistait à "caler" le modèle, c'est-à-dire à trouver les valeurs inconnues des transmissivités de la nappe, en simulant un état de la nappe dont la carte piézométrique ainsi que les débits entrant et sortant sont connus. Ceci se fait "à la main" et est une opération assez longue. Le modèle

SIAMOS-78. Granada (España)

une fois calé, il restait à mettre en place notre état initial, c'est à dire à simuler le détournement de la Rambla de Lanteira en supprimant les apports à la nappe que représentent les infiltrations dans le lit de cette rivière. Il en est ressorti qu'à par un rabattement d'une dizaine de mètres, le détournement aura pour l'effet d'infléchir vers la mine l'écoulement de la nappe et d'y faire converger les infiltrations de zones assez éloignées. (La figure 11 montre cette inflexion des lignes de courant).

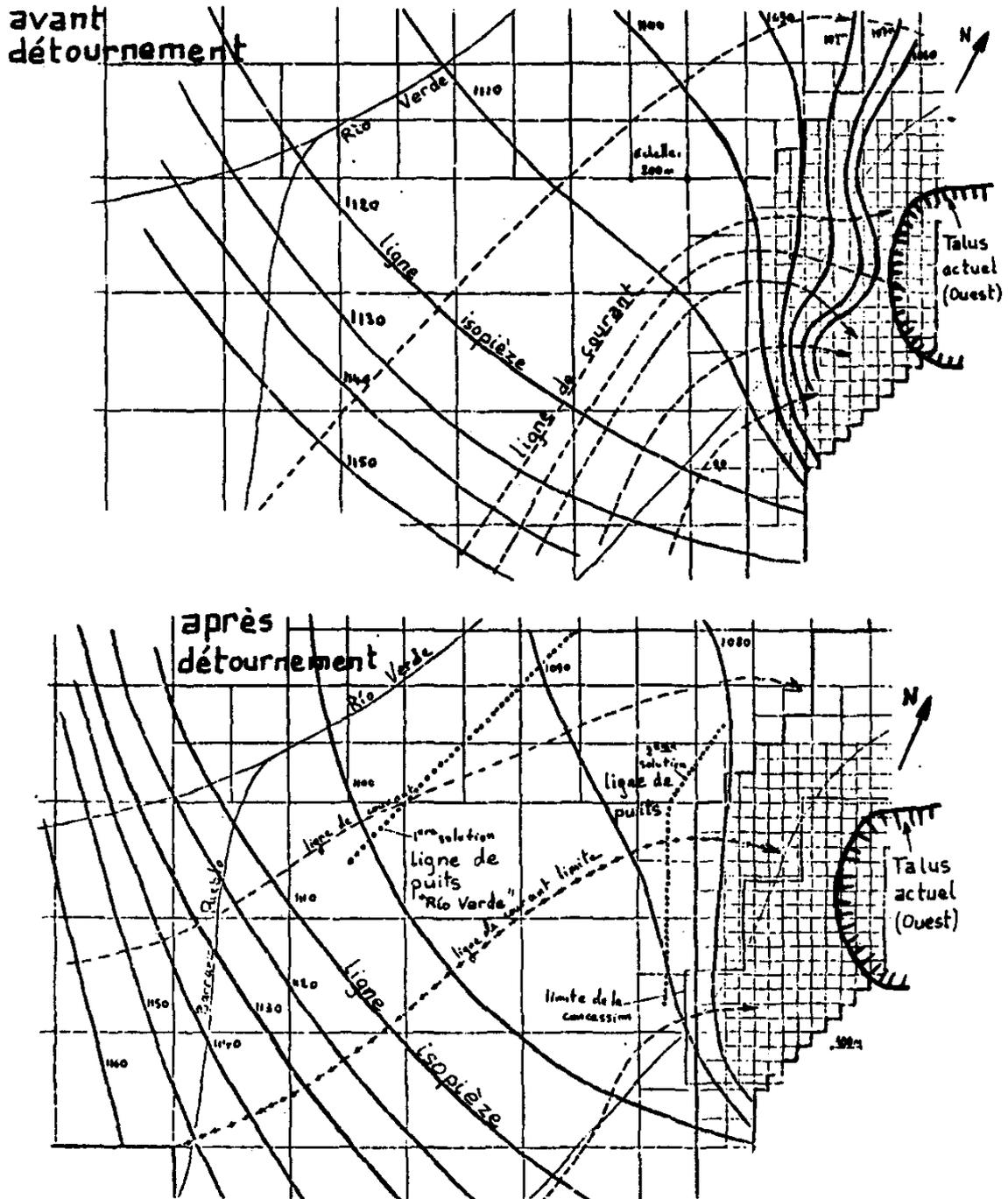


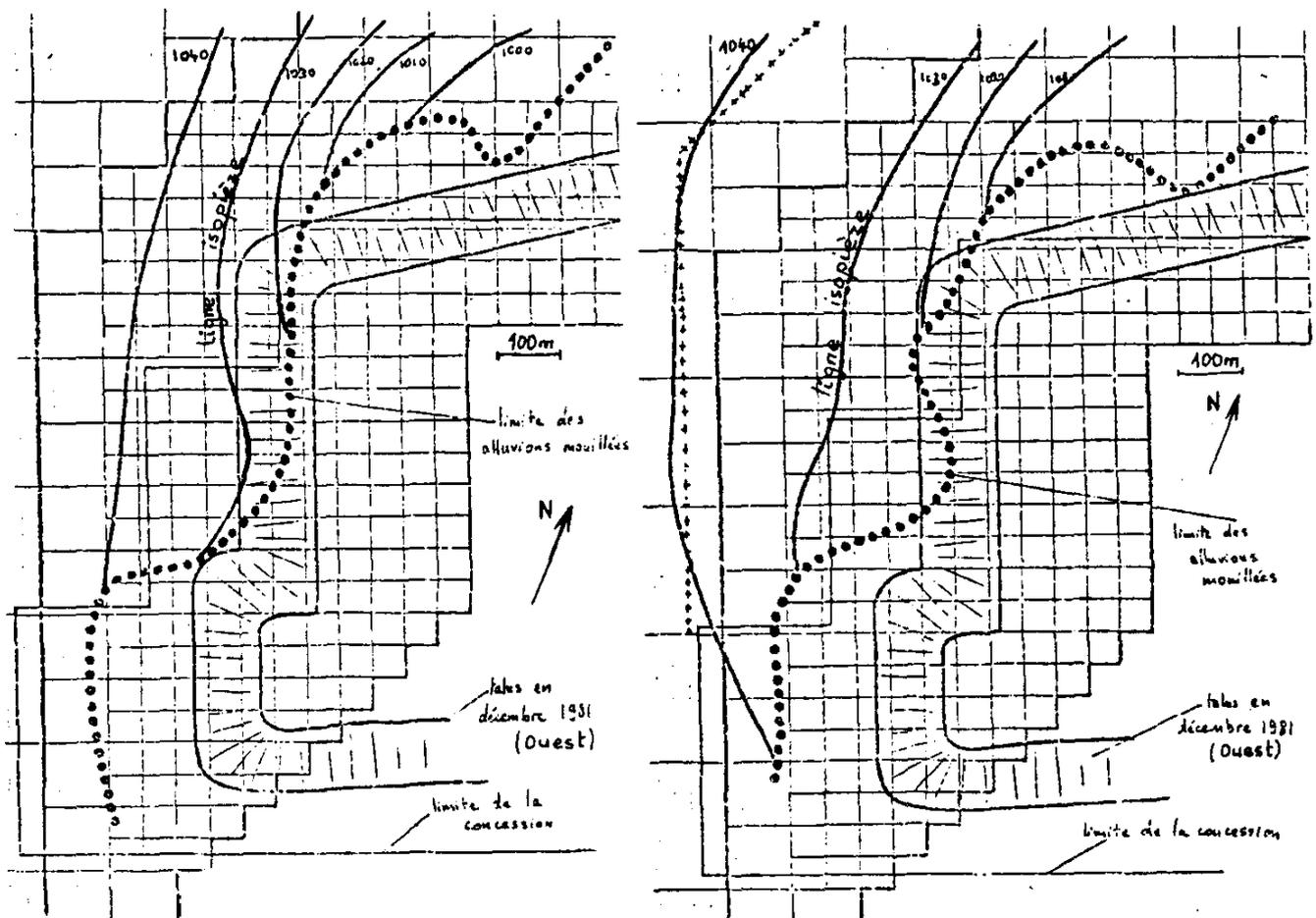
Fig. 11 : Carte piézométrique avant et après détournement.

SIAMOS-78. Granada (España)

D'où deux idées pour la solution de notre problème :

- barrer la route à ces nouveaux apports en rabattant la nappe à la limite de la concession C.A.M., soit avec une série de drains verticaux se déversant dans une galerie, soit avec une ligne de puits équipés d'une pompe.
- rendre à l'écoulement sa direction initiale, en rabattant la nappe sur le chemin initial de ces apports, loin de la carrière, à proximité du Rio Verde par exemple. Pratiquement, cela reviendrait à installer une ligne de puits parallèle au Rio Verde, non loin de son cours.

Notre modèle nous permet de connaître, en fonction du débit retiré de tels ouvrages, l'ampleur du rabattement obtenu dans la zone de la mine, ainsi que la limite des alluvions mouillées. (Figure 12)



Résultat d'une exhaure de 180 l/s près de Rio Verde.

Résultat d'une exhaure de 180 l/s près de la carrière.

Fig. 12 : Deux exemples de résultats donnés par le modèle (Talus Nord-Ouest).

SIAMOS-78. Granada (España)

Nous avons ainsi calculé dans les deux cas les débits nécessaires pour le dénoyage des alluvions à moyen terme (échéance 1982) ainsi qu'à long terme, c'est-à-dire pour dénoyer les alluvions jusqu'à la limite de la concession. L'utilisation du modèle s'arrête ici : il s'agit ensuite de calculer le nombre de puits ou de drains nécessaires pour assurer le dénoyage à moyen et à long terme; d'évaluer le coût (installation, fonctionnement) d'un éventail de dispositifs pratiques afin de trouver l'optimum.

III - LE PROBLEME DE LA TENUE DES PAREMENTS ET LA SYNTHESE ECONOMIQUE

Pour donner à la C.A.M. les moyens d'une décision dans le choix entre dénoyer les alluvions et admettre une pente plus faible pour les talus, il fallait compléter les résultats de l'étude hydraulique par une étude de stabilité et faire une synthèse économique de l'ensemble.

Nous avons cherché à comparer 3 options pour l'exploitant :

- s'imposer de ne jamais exploiter avant d'avoir complètement dénoyé les alluvions, et en supporter les conséquences, tant en ce qui concerne l'avancement de la découverte que les dépenses nécessaires au dénoyage (c'est ce qu'on fait jusqu'à présent) : c'est la "solution 1", qui suppose qu'en fin d'exploitation, on tire de l'ordre de 300 l/s du dispositif d'exhaure.
- renoncer à dénoyer, ne réaliser aucun investissement en ce sens, mais diminuer suffisamment la pente des parements pour qu'ils restent stables malgré la présence d'eau, et décaper de ce fait plus d'alluvions d'ici la fin de l'exploitation : c'est la "solution 0".
- adopter un moyen terme entre ces deux extrêmes, c'est-à-dire laisser 7 à 8 ha non dénoyés dans la concession, avoir à installer un dispositif d'exhaure moins important (220 l/s) que pour la "solution 1", et décaper moins d'alluvions que dans la solution 0 : c'est la "solution 1/2".

Il fallait, dans chaque cas, déterminer l'angle du talus en fin d'exploitation, en tenant compte, pour les solutions 0 et 1/2, de la présence d'eau dans le talus, c'est-à-dire des changements de cohésion et d'angle de frottement entre alluvions sèches et alluvions mouillées, ainsi que des poussées d'écoulement et poussée d'Archimède.

Nous avons fait les calculs sur la base de données géotechniques provenant d'essais réalisés par le bureau d'études INTECSA, par l'école des Mines de Madrid, et par l'école des Mines de Paris, sur alluvions sèches et saturées (essais à la plaque et essais de cisaillement) suivant les 4 méthodes suivantes :

- méthode de Bishop
- méthode de Fellenius
- abaques de Hoek
- méthode des éléments finis, avec un modèle élastoplastique du matériau.

SIAMOS-78. Granada (España)

Ces calculs n'intéressent que d'assez loin ce symposium, et nous ne les exposerons pas. Disons simplement qu'ils nous ont permis de calculer l'angle à donner aux talus dans chacune des trois solutions, et, partant, le volume d'alluvions à décaper : par rapport à la solution 1, les quantités supplémentaires d'alluvions à décaper d'ici la fin de l'exploitation sont :

- pour la solution 1/2 : 10 Mt.
- pour la solution 0 : 50 Mt.

Un point est néanmoins à préciser : le choix d'un angle-limite pour un talus, qu'il soit sec ou mouillé, contient nécessairement une part d'arbitraire. En effet, la démarche est la suivante : on schématise le talus réel par un modèle où on fait les hypothèses simplificatrices (homogénéité, isotropie ...) et où on donne au matériau des caractéristiques déduites d'un petit nombre d'essais; puis on tient compte de l'écart entre modèle et réalité en prenant pour talus-limite, non pas celui où les contraintes calculées égalent les contraintes à la rupture, mais un talus où elles se trouvent à un niveau inférieur. Tout le problème consiste alors à situer ce niveau; or c'est vouloir quantifier ce qui par définition, nous est en partie inconnu; d'où le côté arbitraire de la méthode.

Ces remarques sont particulièrement vraies pour les alluvions mouillées : aux simplifications déjà assez grossières du calcul d'un talus sec :

- homogénéité, alors qu'il s'agit d'un des matériaux les plus hétérogènes qui soient.
- isotropie (Hoek; Fellenius, Bishop) alors que l'hypothèse d'orthotropie paraît bien plus pertinente,

s'en ajoutent d'autres, tout aussi grossières, concernant l'eau :

- écoulement unidirectionnel dans le talus, alors que toutes les expériences montrent une courbure tendant à lui faire tangenter le parement.
(Figure 13).

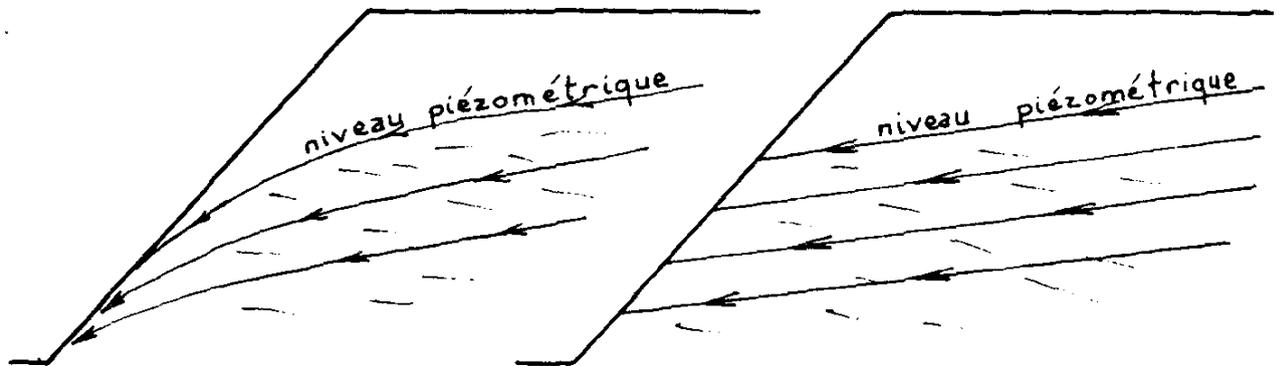


Fig. 13 : Ecoulement réel et modèle pris en compte dans les calculs.

SIAMOS-78. Granada (España)

- écoulement uniforme, alors que, de toute évidence, l'écoulement dans les alluvions suit préférentiellement les lits à gros grains, tend à colmater les lits à granulométrie étalée, etc...
- changement de cohésion (dû à la présence d'eau) uniforme dans le massif, alors que certains lits - argilo-limoneux perdent toute leur cohésion et s'écoulent sous leur propre poids lorsqu'ils sont imbibés d'eau, tandis que pour d'autres la cohésion ne change guère.
- mêmes remarques pour la résistance à la traction.

Pour pallier à cet inconvénient, nous avons envisagé de modéliser le talus par un ensemble de plusieurs matériaux (3 dans notre exemple) disposés en lits horizontaux superposés, aux caractéristiques hydrauliques et géotechniques différentes. Il s'agit alors de distinguer dans le talus 3 (ou n) matériaux-types, aux couches granulométriques bien différenciées, de définir par essais leurs caractéristiques avec et sans eau, ainsi que leur perméabilité verticale et horizontale, d'établir une coupe du talus en rattachant tous les lits trouvés à l'un de ces 3 (ou n) types, afin d'en calculer les proportions respectives et de les introduire dans le modèle. A titre d'exemple, nos 3 matériaux-types avaient les caractéristiques suivantes :

	TERRAIN SEC	TERRAIN SATURE
matériau 1 $\gamma = 2,25 \text{ kg/l}$	$c = 0,5 \text{ bar}$ $\phi = 32^\circ$ $R_T = 0,4 \text{ bar}$	$c' = 0,3 \text{ bar}$ $\phi' = 32^\circ$ $R_T = 0,2 \text{ bar}$
matériau 2 $\gamma = 2,2 \text{ kg/l}$	$c = 0$ $\phi = 30^\circ$ $R_T = 0$	$c' = 0$ $\phi' = 30^\circ$ $R_T = 0$
matériau 3 $\gamma = 1,7 \text{ kg/l}$	$c = 2 \text{ bars}$ $\phi = 20^\circ$ $R_T = 0,5 \text{ bar}$	$c' = 0$ $\phi' = 20^\circ$ $R_T = 0$

Il s'agit d'un modèle plan vertical aux éléments finis qui permet, dans un premier temps, de calculer les caractéristiques de l'écoulement dans le talus ainsi schématisé, d'en déduire les poussées d'écoulement et d'Archimède, et de les introduire dans un calcul de stabilité en élastoplasticité.

Malheureusement, le temps imparti à notre étude ne nous a pas permis de traiter suffisamment d'exemples de cette méthode, qui nous semble néanmoins prometteuse.

SIAMOS-78. Granada (España)

IV - CONCLUSION

Grâce aux résultats de l'étude hydraulique et de l'étude géotechnique, il devint possible d'esquisser une comparaison économique des solutions 0, 1/2 et 1. Elle nous fit retenir la solution 1 (dénoyage à tout prix) et le dispositif suivant, installé à la limite de la concession : (Figure 14)

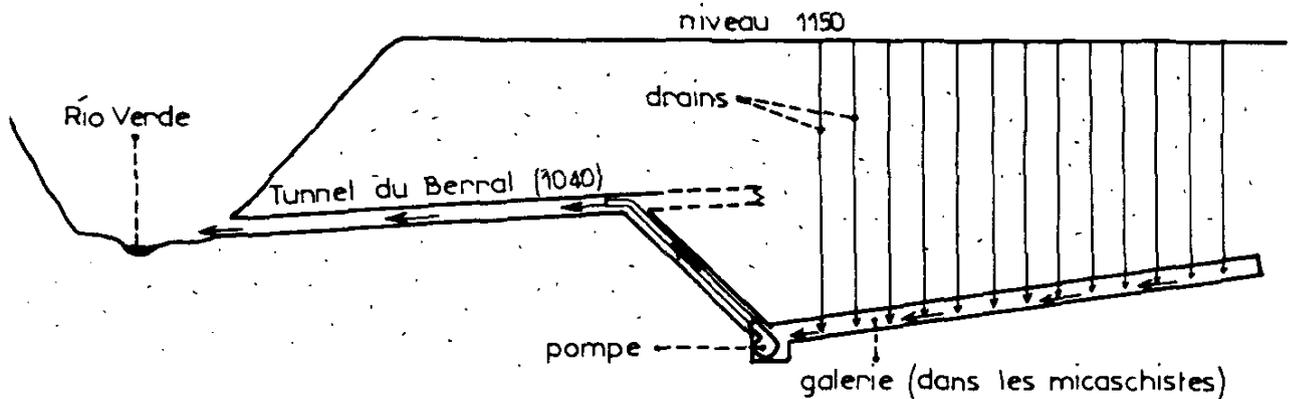


Fig. 14 : Schéma du dispositif d'exhaure préconisé. (Le tunnel du Berral a été construit en 1963 et sert déjà à l'exhaure.)

Le coût de l'opération serait, en ordres de grandeur :

- investissement : 6,5 MF (1976)
- dépenses de fonctionnement : 0,8 MF/an

SIAMOS-78. Granada (España)

BIBLIOGRAPHIE

- de GRENIER F., LEDOUX E. : Programme NAPLIB (calcul d'écoulements plans par éléments finis) 1976. Notice interne Ecole des Mines de Paris
- de MARSILY G., LEDOUX E., LEVASSOR A., POITRINAL D., SALEM A.: Modelling of large multi-layered aquifer systems : theory and applications - 1976, Elsevier, Amsterdam.
- LEDOUX E. : Programme NEWSAM (modélisation d'aquifères multicouches) 1976. Note interne Ecole des Mines de Paris.
- MAILLOT R. : Contribution à l'étude géologique du gisement de fer du Marquesado (Espagne). Mineral Deposita 6, 380-391, 1971 - Springer verlag Berlin.
- STREMSDOERFER P.M. : Résolution par la méthode des éléments finis des problèmes viscoélastiques et élastoplastiques posés par les cavités souterraines - Thèse à l'Université de Paris VI
- STREMSDOERFER P.M. : Programme Plastax. Principe et notice d'emploi - Notice interne Ecole des Mines de Paris.