

Emploi du modèle mathématique en hydrogéologie karstique

G. TILMANT

La recherche d'une méthodologie d'étude des circulations karstiques et son application aux problèmes hydrogéologiques liés aux exploitations minières a été entreprise conjointement par le Centre d'Information Géologique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et la Société Aluminium Pechiney. L'objectif principal est de parvenir, grâce à ces recherches méthodologiques, à disposer de méthodes et d'outils (modèles mathématiques) permettant de prévoir la capacité d'exhaure nécessaire pour les exploitations minières en régime hydrogéologique karstique.

Le problème de base concerne la représentation du karst où une distinction doit être faite entre :

- le terrain proprement dit ou le matériau constituant la matrice ;*
- les failles, fissures et circuits de circulation préférentielle à l'intérieur de cette matrice.*

Au niveau de l'exploitation minière, une distinction doit être faite entre la venue d'eau accidentelle, le coup d'eau et la pointe de crue qui sont les réponses du karst proprement dit et les venues d'eau permanentes qui sont les réponses de la matrice.

Dans la représentation du modèle en régime permanent, un compromis a été réalisé en adoptant une technique de maillage à « mailles variables » et à « éléments finis » permettant de représenter les travaux miniers et les failles au rôle hydrogéologique important.

L'étude de la prévision des crues karstiques ou « coups d'eau » a été entreprise à partir des fonctions transfert débit/temps (méthode de déconvolution) obtenues aux exutoires.

1. INTRODUCTION

Les gisements de bauxite du midi de la France déposés sur substratum carbonaté sont, à quelques exceptions près, par suite de conditions hydrologiques défavorables, soumis à la menace de venue d'eau du fond.

L'origine de celle-ci se trouve, d'une part dans le réservoir d'eau karstique des terrains calcaires et dolomitiques du jurassique supérieur constituant le mur des gisements du Var et de l'Hérault, et d'autre part dans les réservoirs locaux des couches perméables situés au toit (calcaires fuveliens dans les Bouches du Rhône et calcaires santoniens dans le Var).

La recherche d'une méthodologie d'étude des circulations karstiques et son application aux problèmes hydrogéologiques liés aux exploitations minières a été entreprise conjointement

tement par le centre d'Informatique Géologique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et la Société Aluminium Pechiney.

L'objectif principal est de parvenir, grâce à ces recherches méthodologiques, à disposer de méthodes et d'outils (modèles mathématiques) permettant de prévoir la capacité d'exhaure nécessaire pour les exploitations minières en régime hydrogéologique karstique.

L'exposé qui va suivre a pour but de montrer assez brièvement les possibilités d'emploi du modèle mathématique en domaine karstique et son utilisation dans la prévision des exhaures minières.

2. GÉNÉRALITÉS — THÉORIE DU MODÈLE

L'objet d'un modèle mathématique d'écoulement souterrain est de calculer la distribution dans l'espace et éventuellement l'évolution au cours du temps de la fonction potentiel hydraulique représentant le niveau piézométrique de la nappe étudiée.

La modification des paramètres hydrauliques dans le modèle mathématique permet de simuler diverses conditions d'exploitation de la nappe et de prévoir son comportement par l'examen des variations de la fonction potentiel hydraulique.

Sous réserve des hypothèses suivantes :

- lois du milieu continu applicables, en particulier la loi de Darcy;
- écoulements bidimensionnels sur le plan moyen de l'aquifère;
- transmissivités (coefficient dépendant du terrain et caractérisant la facilité avec laquelle l'eau se déplace dans la roche) indépendantes de la valeur du potentiel hydraulique.

L'écoulement en milieu poreux est représenté par l'équation de diffusivité (1):

$$(1) \quad \frac{\delta}{\delta x} \left(T_x(x,y) \frac{\delta h}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} \right) \left(T_y(x,y) \frac{\delta h}{\delta x} \right) = q(x,y)$$

- $h(x,y)$ est la fonction potentiel hydraulique;
- $T_x(x,y)$ et $T_y(x,y)$ les transmissivités de l'aquifère dans les directions Ox et Oy ;
- $q(x,y)$ est le débit algébrique soutiré par unité de surface.

L'équation (1) alors discrétisée suivant une méthode de différences finies sur un réseau de n mailles découpant le plan de l'aquifère en tenant compte des conditions aux limites, conduit au système linéaire de n équations (2):

$$(2) \quad TH = Q$$

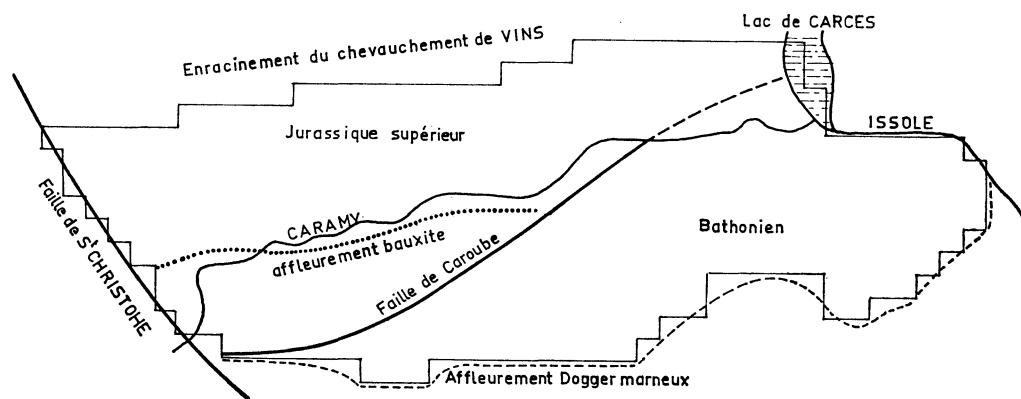
où T est une matrice carrée $n \times n$ construite à partir des valeurs des transmissivités; H est une matrice colonne $n \times 1$ contenant les valeurs de la fonction potentiel hydraulique sur chaque maille;

Q est une matrice colonne $n \times 1$ contenant les valeurs des débits soutirés dans chaque maille.

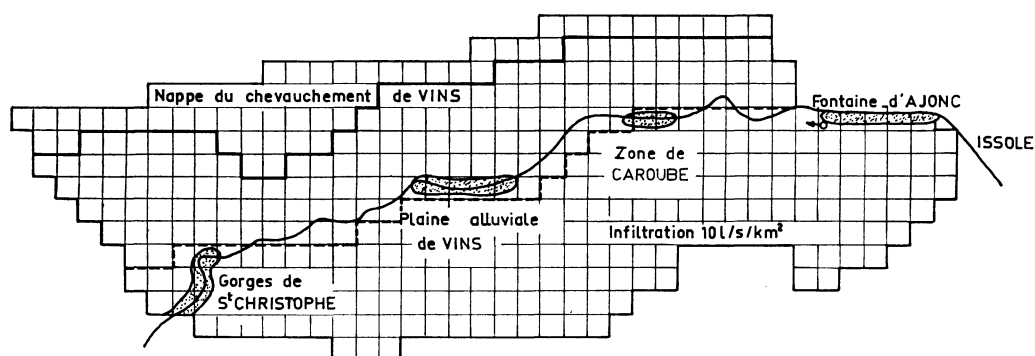
La résolution du système (2) donne les valeurs de la fonction potentiel hydraulique dans l'espace.

Conditions aux limites : des relations hydrauliques entre la nappe simulée et le milieu extérieur, se manifestent sur les limites du domaine. Deux types de conditions entrent généralement en jeu :

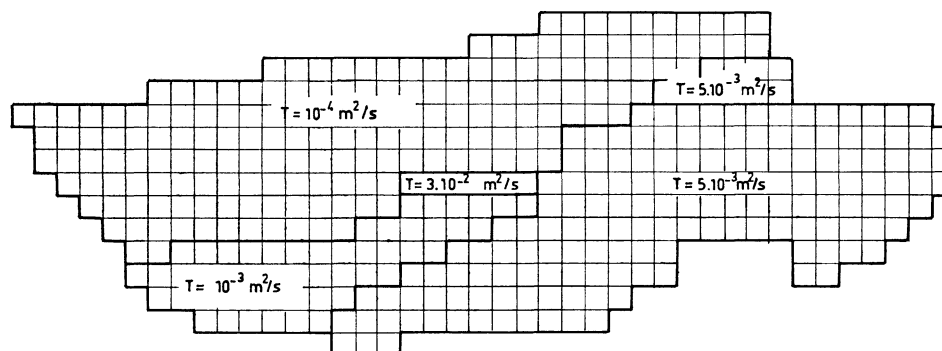
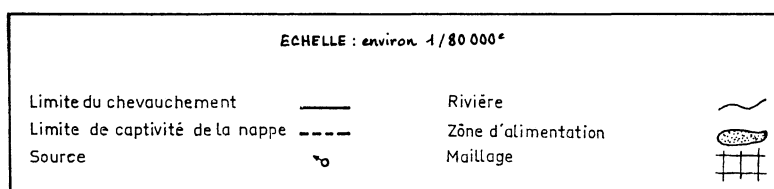
- condition de potentiel imposé : le potentiel hydraulique de la nappe est maintenu à une valeur connue sous l'action du milieu extérieur;
- condition de flux imposé : le débit traversant la frontière est maintenu à une valeur connue.



SCHEMA GEOLOGIQUE



ZONE D'ALIMENTATION et d'EXUTOIRES de la NAPPE du MUR



CARTE DES TRANSMISSIVITES

3. EMPLOI DU MODÈLE EN HYDROGÉOLOGIE KARSTIQUE

Les études ont été entreprises sur les bassins karstiques de la région de Brignoles (Var) et de la région de Villeveyrac (Hérault). Nous nous contenterons de décrire les études effectuées sur la région de Brignoles.

3.1. Cadre géologique et hydrogéologique

La totalité de la bauxite exploitée dans le Var provient de deux zones synclinales au nord et au sud de Brignoles, séparées par un anticlinal est-ouest (voir coupes planche 1).

Bassin hydrogéologique de Mazaugues : le bassin hydrogéologique de Mazaugues (Var) appartient au flanc sud de l'anticlinal orienté est-ouest, intéressant des terrains dont les âges s'étendent du trias au crétacé.

L'ensemble constitue une série monoclinale au pendage d'environ 10% vers le sud qui est par surcroît chevauchée au sud par la série liasique du Massif d'Agnis. Ce chevauchement probablement mis en place sous l'effet de poussées tectoniques venues du sud doit biseauter les terrains sous-jacents et par conséquent limiter au sud la série du bassin de Mazaugues, tout au moins en ce qui concerne ses termes supérieurs. Au nord, le bassin de Mazaugues est limité par une plaine triasique.

Les deux aquifères intéressant l'exploitation de la bauxite se trouvent au niveau des calcaires et dolomies du jurassique supérieur d'une part, et dans un banc calcaire santorien (banc n° 1) d'autre part. Les eaux de ces deux aquifères ne forment qu'une seule et même nappe noyant la couche de bauxite.

Bassin hydrogéologique de Vins : il occupe une position symétrique du bassin de Mazaugues par rapport à l'axe de l'anticlinal.

L'ensemble hydrogéologique s'étend sur environ 25 km² de part et d'autre de la vallée du Caramy, entre St Christophe et le lac de Carcès au nord-est de Brignoles.

On y rencontre des terrains dont l'âge va du trias au crétacé, auxquels il faut ajouter des alluvions récentes, locales mais importantes par leur rôle hydraulique.

La série de Vins présente à l'affleurement une structure monoclinale au pendage d'environ 20 à 30 ° vers le nord; elle est chevauchée au nord par un complexe jurassique très tectonisé, probablement venu du nord, appelé chevauchement de Vins.

La formation aquifère qui retiendra notre attention est contenue dans les dolomies et les calcaires du jurassique supérieur et moyen au mur de la bauxite.

Les études géologiques de terrain, les campagnes de sondages et les études hydrogéologiques ont permis de fournir les données de base pour la confection des modèles mathématiques (structure géologique régionale, limites de l'aquifère, alimentations, relations entre différents aquifères, écoulement des nappes, caractéristiques hydrodynamiques).

3.2. Rôle hydrogéologique de la karstification

Les réservoirs constitués par des formations calcaires et dolomitiques possèdent une perméabilité due à la porosité propre de la roche (cas de la dolomie en particulier qui présente une altération en « poussière ») et à la fissuration fine. Cette propriété explique la présence d'une nappe du mur à laquelle les lois de l'écoulement en milieu continu sont applicables.

A ces écoulements de type laminaire, il convient de superposer des écoulements turbulents dans les conduits karstiques.

Dans la plupart des gisements de bauxite du Var coexistent deux formes de karstification :

— paléokarst en relation avec le dépôt de bauxite dont elle remplit les vides au moins superficiels. Ce karst se trouve en général sous le niveau statique dans la zone de captivité de la nappe. Son rôle hydrodynamique est faible lorsqu'il est colmaté.

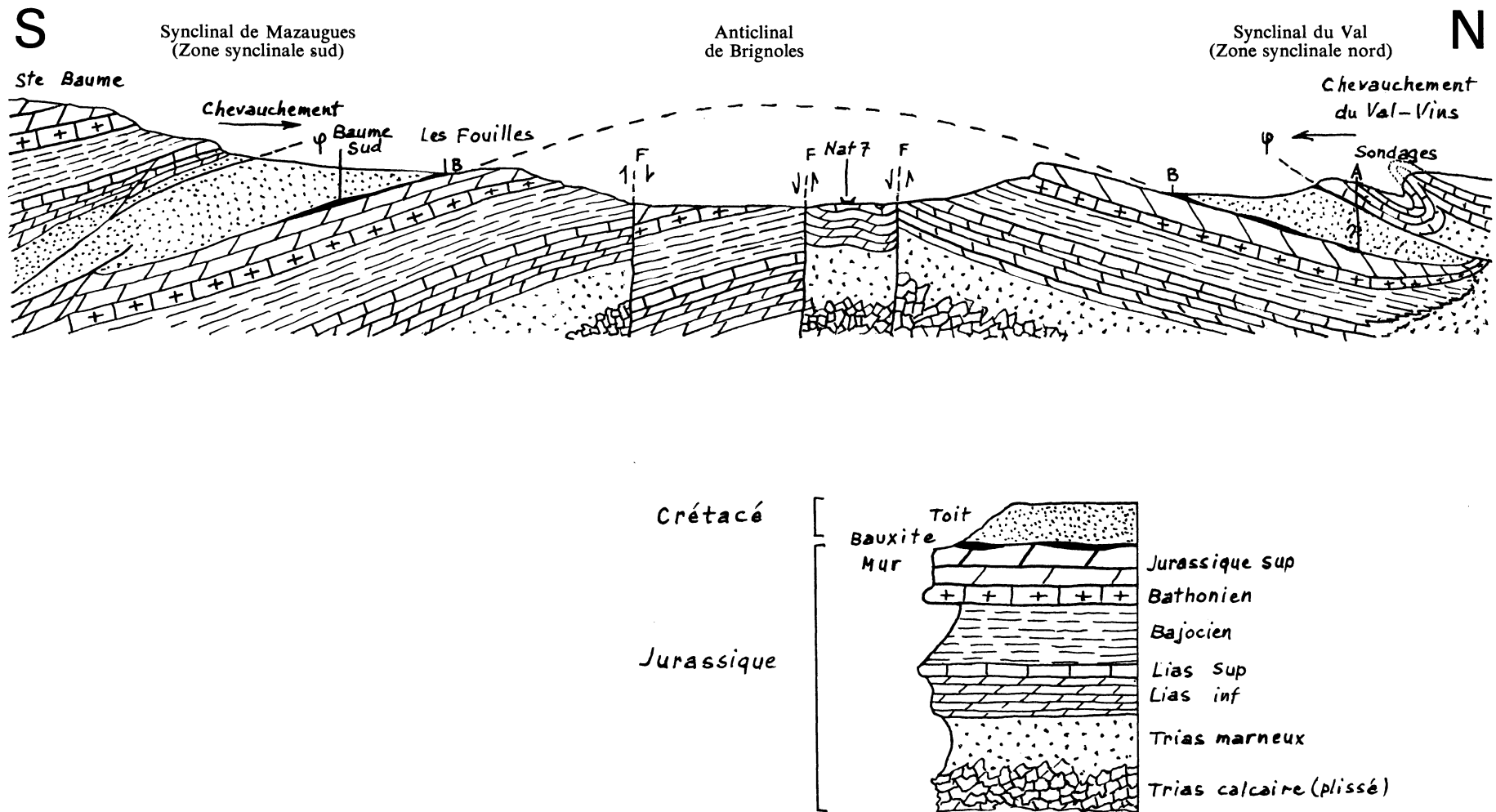


Planche 1. — Position des synclinaux minéralisés nord et sud

— karst actuel, actif, récent ou provenant d'un rajeunissement du paléokarst. Il est en général développé dans la zone de nappe libre.

Le modèle mathématique, en milieu continu, sera incapable de prendre en compte les écoulements dans le karst actif, lorsqu'ils produisent des venues d'eau exceptionnelles que l'on connaît dans certaines mines des bassins de Mazaugues et de Vins.

Par contre, en période d'écoulement normal (en dehors des crues), ce karst réalise un drainage général de la matrice rocheuse. L'intégration de cet écoulement de drainage sur des surfaces de relativement grande étendue, telles que les exploitations minières que l'on étudie, rend tout à fait possible l'application des lois laminaires d'écoulement que suppose le modèle mathématique.

3.3. Modélisation

3.3.1. *Domaine modélisé*

La nappe prise en compte pour le modèle est la nappe du mur de la bauxite, qui occupe soit les calcaires du bathonien, soit les dolomies du jurassique supérieur.

On admet que les écoulements y sont bidimensionnels suivant la direction moyenne des couches géologiques, hypothèse certainement valable dans la zone de nappe captive, mais qui ne constitue qu'une approximation dans la zone de nappe libre.

3.3.2. *Le maillage*

Le maillage adopté est un maillage carré.

Sur le bassin de Mazaugues, deux contraintes contradictoires sont apparues lors de la confection du maillage:

— à l'est, le modèle devait représenter le maximum de détails des écoulements au voisinage des lentilles bauxitiques;

— à l'ouest, les renseignements hydrogéologiques étaient moins précis, il n'y avait pas lieu d'augmenter inutilement la durée des calculs sur ordinateur.

Un compromis a été réalisé en adoptant une technique de maillage dite à « mailles variables », utilisant trois tailles de mailles carrées, dont le principe est le suivant:

— le modèle a d'abord été découpé en grandes mailles de 500 m de côté; puis dans les secteurs où les écoulements devaient être calculés avec précision (lentilles exploitées, zone des exutoires) les mailles ont été redécoupées en carrés de 250 m puis de 125 m de côté (planche 2).

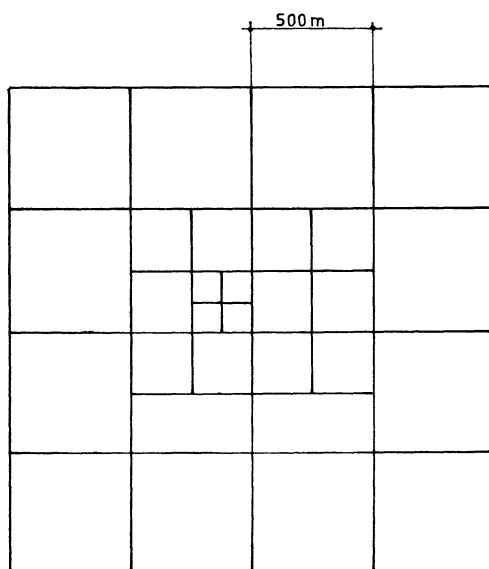


Planche 2. — Principe des mailles variables

Le modèle complet comprend 599 mailles réparties comme suit :

- 265 mailles de 500 m de côté;
- 213 mailles de 250 m de côté;
- 121 mailles de 125 m de côté.

Pour le bassin de Vins dont la superficie totale est d'environ la moitié de celle du bassin de Mazaugues, il a été possible d'utiliser un seul type de maille pour tout le domaine, tout en conservant une finesse suffisante pour la discrétisation.

Le modèle complet comprend 401 mailles carrées de 250 m de côté sur lesquelles la fonction potentiel hydraulique a été calculée.

3.3.3. Modélisation des exploitations minières

Les venues d'eau au fond des mines se manifestent de deux façons :

- par des venues diffuses au mur et au toit ayant l'aspect de suintements sur des zones étendues;
- par des venues ponctuelles qui empruntent des voies de circulation préférentielle à la faveur de fractures.

Ces modes de venue d'eau aboutissent tous deux au même résultat hydraulique qui est d'amener la pression de l'eau dans la nappe au voisinage des zones défilées à la valeur de la pression atmosphérique. Il suffit donc pour simuler une exploitation minière à l'aide du modèle d'imposer la valeur du potentiel hydraulique dans les mailles représentant les secteurs défilés des lentilles bauxitiques à la valeur moyenne de la cote de la couche exploitée (voir planche 3).

Dans le cas d'anciens travaux noyés, les vides probablement partiellement éboulés qu'a laissés l'exploitation se trouvent noyés et créent une zone à forte perméabilité dans la partie supérieure de l'aquifère (ce phénomène se manifeste par une régularisation des niveaux piézométriques sur l'étendue des anciens travaux).

La représentation sur modèle est alors obtenue en affichant des valeurs élevées de la transmissivité dans les mailles correspondantes.

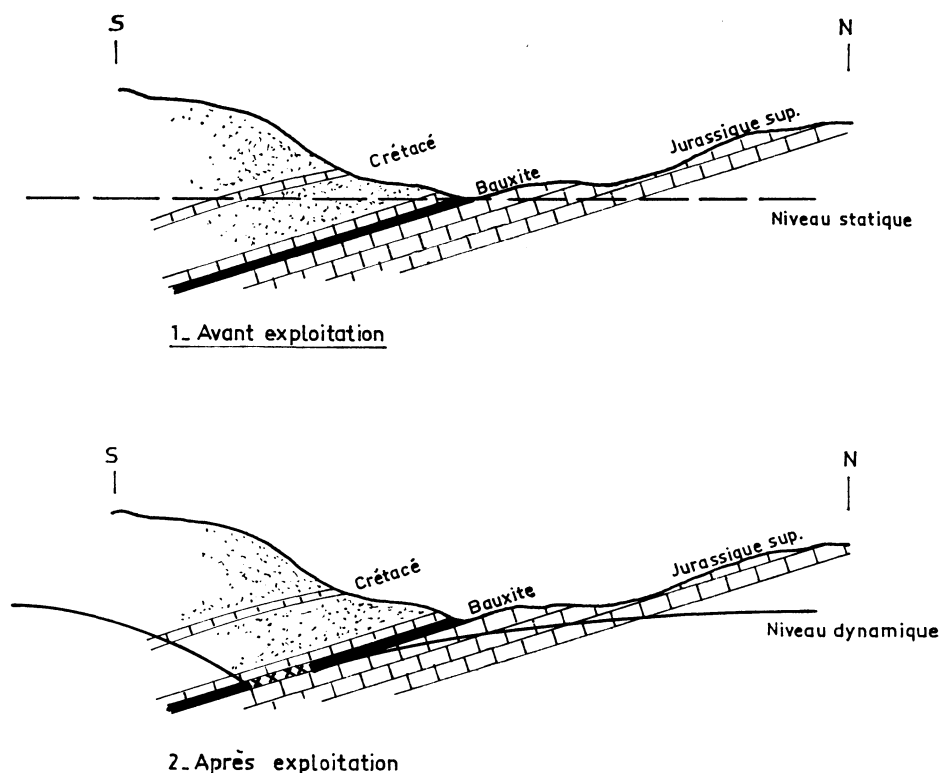


Planche 3. — Influence du défilage sur la piézométrie

3.3.4. Conditions aux limites (voir planche 4)

On s'est efforcé, sur le modèle, de reproduire les conditions aux limites hydrauliques du bassin, décrites par les études géologiques et hydrogéologiques. Les limites contiguës par des systèmes de failles ou des horizons marneux considérés comme imperméables aux écoulements ont été représentés par une condition de flux nul.

Dans les zones où la nappe est en liaison avec une rivière ou lorsqu'il y a débordement au contact d'un niveau imperméable matérialisé par une source, le potentiel hydraulique a été imposé soit à la cote du lit de la rivière, soit à la cote de la source.

Remarque concernant les liaisons hydrauliques avec la rivière; la nappe alluviale et la nappe du chevauchement.

Les débits échangés entre la nappe du mur et la rivière Caramy, sa nappe alluviale ou la nappe du chevauchement ont été représentés à l'aide d'un schéma drain-capacité (schéma de Hantush), la nappe du mur tenant lieu de capacité et le Caramy, sa nappe alluviale où la nappe du chevauchement constituant le drain.

Par hypothèse, le débit entre drain et capacité sur une maille est donné par :

$$Q_2 = T_p (H - H_0)$$

où H est la cote piézométrique de la capacité que l'on calcule;

H_0 la cote piézométrique du drain supposée connue;

T_p est un coefficient de drainance ayant la dimension d'une transmissivité et que l'on détermine par calage des débits.

On peut noter que Q_2 peut changer de signe selon les valeurs relatives de H et de H_0 , on peut donc ainsi simuler une alimentation ou une perte.

Le schéma adopté est valable aussi longtemps que le gradient hydraulique entre le drain et la capacité ne dépasse pas la valeur limite 1 correspondant à un écoulement gravitaire de l'aquifère supérieur vers l'aquifère inférieur. Dans le cas contraire, il peut se produire une déconnection du drain et de la capacité et apparition d'un débit d'échange limite.

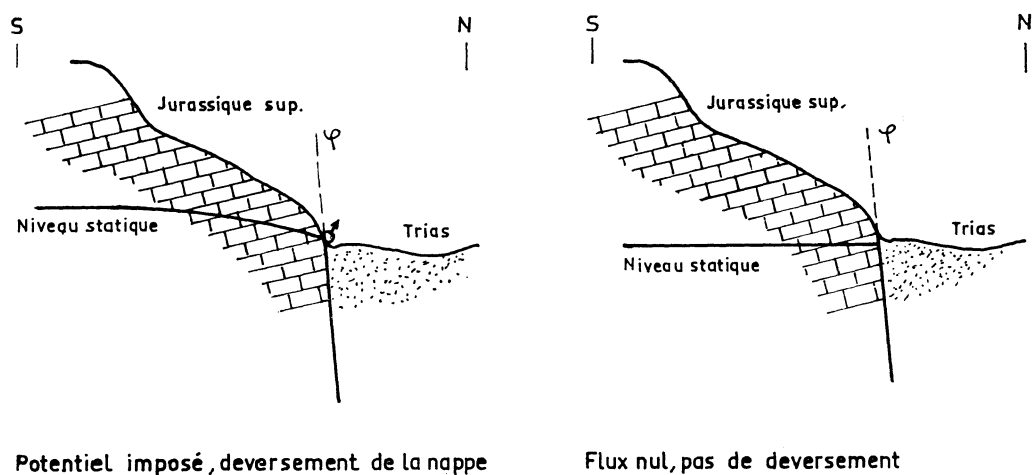


Planche 4 — Conditions aux limites

4. CALAGE DU MODÈLE ET SIMULATIONS EN RÉGIME PERMANENT

L'objet du modèle permanent est d'obtenir une estimation de débit d'exhaure moyen dans les futures mines de bauxite et d'étudier leur influence sur le comportement hydraulique de la nappe.

Le principe du calage d'un modèle est de déterminer la meilleure estimation possible des paramètres manquants en simulant les valeurs des paramètres connus pour différents états d'exploitation de la nappe.

Pour les différentes simulations nécessaires au calage du modèle on disposait :

- d'une historique des débits sur les anciennes exploitations minières;
- de mesures piézométriques sur l'ensemble du bassin hydrogéologique;
- de mesures de débits aux exutoires naturels et de jaugeages différentiels sur le cours du Caramy;
- la transmissivité de l'aquifère était connue en quelques points grâce à l'interprétation de données de pompage.

Certains paramètres tels que les transmissivités locales et les coefficients de drainance définissant les échanges entre nappe du mur et les nappes du chevauchement ou des alluvions ont pu être ajustés à partir des simulations de calage. Après chaque test, les valeurs calculées des débits et des cotes piézométriques ont été comparées avec les valeurs connues par l'expérience.

Les périodes de référence choisies pour les simulations de calage sont des périodes stables pendant lesquelles on peut considérer que l'écoulement du karst actif est laminaire et que par conséquent l'application de la loi de Darcy est possible :

- nappe d'étiage observée sur les bassins hydrogéologiques;
- état de régime permanent de la nappe après stabilisation du niveau de l'eau à la suite de pompages miniers.

Le modèle une fois calé peut servir à l'étude prévisionnelle des exhaures moyens aux futures mines de bauxite et permet d'étudier en fonction de ces exhaures le comportement hydraulique de l'aquifère.

Ces études ont été réalisées pour les bassins de Mazaugues et de Vins et ont permis de mieux saisir la complexité des phénomènes hydrauliques qui existent dans ces bassins.

5. ÉTUDE DES CRUES KARSTIQUES

L'étude des crues karstiques et notamment de la prévision des coups d'eau au fond des mines est actuellement en cours. Cette étude est entreprise à partir des fonctions transfert débit/temps obtenues aux exutoires (méthode de déconvolution). La méthode consiste à étudier la réponse du karst actif à une pluie unitaire.

CONCLUSIONS

En dehors des études ponctuelles sur le karst actif et sous réserve d'être dans des conditions hydrauliques telles que les lois du milieu continu soient applicables, en particulier la loi de Darcy, l'emploi du modèle mathématique est possible en hydrogéologie karstique; les études entreprises dans le Var et dans l'Hérault le prouvent.

Le modèle n'est pas une fin en soi mais un outil mis à la disposition de l'hydrogéologue, lui permettant de pouvoir mieux comprendre et mieux saisir des problèmes complexes comme ceux posés par les gisements de bauxite exploités sous un niveau aquifère.

Il ne faut pas perdre de vue que *chaque bassin karstique est un cas particulier* et que, si dans certains, les conditions hydrauliques sont telles que des lois mathématiques peuvent être appliquées, dans d'autres, les études classiques de terrains et les méthodes empiriques seront les seules valables.

BIBLIOGRAPHIE

- Etude sur modèle mathématique des écoulements souterrains du bassin de Mazaugues (Var). Rapport Ecole des Mines: LHM/R/72/17.
- Etude sur modèle mathématique des écoulements souterrains du bassin de Vins (Var). Rapport Ecole des Mines: LHM/R72/23.
- Etudes stratigraphiques, tectoniques et hydrogéologiques entreprises par Service Gisement Aluminium Pechiney.

*Société Aluminium Pechiney, Division Bauxite
avenue Dreo, 13290 Brignoles (France)*