N° D'ORDRE 1133

THESE

Présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE

EN GEOLOGIE APPLIQUEE (HYDROGEOLOGIE)

Par

ERICK CARLIER

*

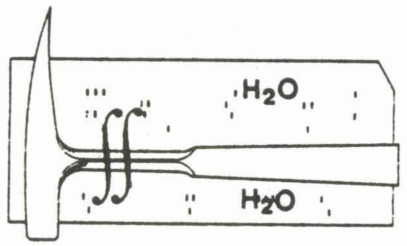
INFLUENCE DE LA FRACTURATION SUR LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE ET HYDRODISPERSIF DES CALCAIRES PALEOZOIQUES DE L'AVESNOIS (NORD)

*

Soutenue le 8 décembre 1983 devant le Jury

MM	J. PAQUET	président
	N. CRAMPON	rapporteur
	CL.DROGUE	examinateurs
	L. KIRALY	
	JP.COLBEAUX	
	M. RAZACK	
	JL.PELLETIER	

* A MILLETEKE *



AVANT-PROPOS

La réalisation d'une thèse nécessite les conseils de nombreuses personnes qu'il m'est ici très agréable de remercier.

Tout d'abord, je remercie Monsieur le Professeur PAQUET d'avoir accepté de présider le jury d'examen et d'avoir bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur CRAMPON, mon directeur de recherche, qui m'a toujours accordé sa confiance en me laissant une grande liberté dans le travail. Ses avis pertinents, ses remarques constructives ont été essentiels pour la réalisation de ce sujet.

C'est à Monsieur COLBEAUX que je dois mon initiation aux méthodes d'étude de la fracturation dont la connaissance a permis de mener à bien ce travail. Qu'il sache que je n'oublierai jamais la part importante qu'il a eue dans l'aboutissement de cette thèse.

Monsieur le Professeur DROGUE et Monsieur RAZACK ont bien voulu relire mon manuscrit et m'ont fait l'honneur de faire partie du jury. Je les remercie vivement.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur KIRALY dont les travaux sur l'hydrogéologie en milieu fissuré m'ont beaucoup aidé. Je lui suis gré d'avoir accepté de faire partie du jury.

Les entretiens que j'ai eus avec Monsieur PELLETIER m'ont fait apprécier son esprit critique et son profond sens humain. Je le remercie vivement pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

J'ai toujours trouvé auprès de Monsieur le Professeur MANIA conseils et encouragements, je le remercie sincèrement.

Que Monsieur MAILLOT soit remercié de la confiance qu'il m'a faite en me faisant participer aux travaux de deux de ses étudiants.

Monsieur FIEVET m'a fait découvrir certains aspects cachés de l'Avesnois ; qu'il sache que j'ai beaucoup apprécié sa collaboration.

Que Monsieur LETHIERS sache que j'ai toujours apprécié les trop brèves discussions que nous avons eues ensemble.

Messieurs MILLER, LEDOIGT, FAURE et ROHAN m'ont permis d'accéder aux stations de pompages d'eaux souterraines, leur aide m'a été très précieuse.

Je remercie Monsieur et Madame CUVELIER, ainsi que leurs enfants, pour l'accueil chaleureux qu'il m'ont fait lors de mon travail sur le terrain.

Que Messieurs BLANC et GEORGE sachent que j'ai toujours apprécié l'intérêt qu'ils ont porté à cette étude.

J'exprime toute mon amitié à B. DROZ, G. POREL, C. PREAUX, M. VREULX, R. LEMPEREUR, J.P. SOLEAU... dont la présence m'a permis de travailler dans la bonne humeur.

Je voudrais remercier Mesdemoiselles FONTAINE et MULIER qui ont eu la lourde charge de déchiffrer ce manuscrit et d'en assurer la dactylographie.

Je tiens à remercier Madame PAILLARD dont la gentillesse est très appréciée au laboratoire.

J'exprime mes remerciements aux Professeurs, Maîtres-Assistants et Assistants de l'U. E. R. qui m'ont fait découvrir les divers aspects de la Géologie.

Je remercie la D. G. R. S. T. pour l'aide financière accordée pendant deux ans.

Enfin, c'est à CAROLE que je dédie cette thèse.

- SOMMAIRE -

- LISTE DES FIGURES -

- LISTE DES TABLEAUX -

- LISTE DES SYMBOLES LATINS -

a : ouverture de la fissure (L).

A : section de la colonne de sable (L^2).

C : concentration (ML^{-3}).

C_{max} : concentration maximale du traceur dans l'eau (ML^{-3}).

C' : coeffecient de rugosité de la fissure.

C'' : constante de Chezy ($L^{0,5}\ T^{-1}$).

d : coefficient de diffusion moléculaire ($L^2\ T^{-1}$).

d_i : diamètre du conduit cylindrique i (L).

d_h : diamètre hydraulique de la fissure (L).

D_L : coefficient de dispersion longitudinale ($L^2\ T^{-1}$).

D_T : coefficient de dispersion latérale ($L^2\ T^{-1}$).

$\underline{\underline{D}}_m$: tenseur de dispersion ($L^2\ T^{-1}$).

$\bar{\bar{D}} = \underline{\underline{D}}_m + d$: tenseur de dispersion apparent ou équivalent ($L^2\ T^{-1}$).

e : épaisseur d'aquifère (L).

f : fréquence des fissures (L^{-1}) ou des conduits cylindriques (L^{-2}).

F : degré de séparation de la fissure.

g : accélération due à la pesanteur (LT^{-2}).

h : charge hydraulique (L).

$\vec{i}$: gradient hydraulique.

i : module du gradient hydraulique.

$\vec{i}_p$: projection du gradient hydraulique sur le plan de fissure ou sur l'axe du conduit cylindrique.

I : matrice unité $\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$

$\vec{j}$: gradient hydraulique unitaire.

K : perméabilité(LT^{-1}).

$\bar{\bar{K}}$: tenseur de perméabilité(LT^{-1})

K_x, K_y, K_z : perméabilité selon les directions O_x, O_y, O_z dans un repère direct (O, X, Y, Z) (LT^{-1}).

l : longueur du tronçon i (L).

$\vec{m}$: direction du conduit cylindrique.

M : masse de traceur injectée (M).

$\vec{n}$: normale au plan de fracture.

P : nombre de Peclet.

P_m : périmètre mouillé (L).

Q : débit ($L^3\ T^{-1}$).

r : distance au puits (L).

R_e : nombre de Reynolds.

R : coefficient de retard.

S : surface mouillée (L^2).

S_e : coefficient d'emmagasinement.

S_s : coefficient d'emmagasinement spécifique.

t : temps (T).

T : transmissivité ($L^2\ T^{-1}$).

t_a : temps d'arrivée du traceur (T).

t_c : temps de transfert par convection pure (T).

$t_c max$: temps relatif à la concentration maximale (T) (temps modal).

t_R : temps réduit ($\frac{t}{t_c}$).

$\vec{V}$: vecteur vitesse de Darcy.

V : module du vecteur vitesse de Darcy (LT^{-1}).

V_e : vitesse effective (LT^{-1}).

$V_c max$: vitesse correspondant à $t_c max$ (LT^{-1}) (vitesse modale).

V_{max} : vitesse maximale (LT^{-1}).

$\vec{v}$: vecteur vitesse unitaire.

x : distance entre point d'injection et point de surveillance (L).

x, y, z : coordonnées dans le repère (o, x, y, z).

- LISTE DES SYMBOLES GRECS -

α_t : dispersivité longitudinale (L).

α_T : dispersivité latérale (L).

α' : angle entre gradient hydraulique et écoulement souterrain.

β : angle entre la vitesse et la plus grande perméabilité principale.

γ : rapport entre l'aire des plans de fissures et le volume du milieu (L^{-1}).

Δ_L : longueur de la colonne de sable (L).

Δ_t : pas de temps (T).

Δ_x : côté de la maille (L).

ε : hauteur des protubérances de la fissure ou du conduit (L).

θ : angle entre gradient hydraulique et la plus grande perméabilité principale.

ν : viscosité cinématique ($L^2\ T^{-1}$).

ϕ : potentiel hydraulique (cf. h) (L).

$\phi_{d'm}$: masse échangée par unité de surface de contact entre eau et solide ($ML^{-2}\ T^{-1}$) et par unité de temps.

ω : porosité totale.

ω_c : porosité cinématique.

ω_e : porosité efficace.

ω_m : porosité de la matrice.

ω' : fraction d'eau immobile ou teneur en eau immobile.

- RESUME -

Les formations primaires de l'Avesnois (Nord de la France) étant essentiellement constituées de calcaires compacts fissurés, leur comportement hydraulique est loin d'obéir aux lois qui régissent les écoulements en milieu poreux isotrope; en effet, le domaine de validité de la loi de Darcy est très limité pour le milieu fissuré. La première partie rappelle les différentes lois d'écoulement en milieu fissuré avec leur domaine de définition ; expose une méthode de représentation d'un milieu fissuré quelconque par un milieu, à géométrie simple, constitué de fissures et de conduits cylindriques dans l'hypothèse où la dimension des blocs fracturés est négligeable devant celle des secteurs étudiés ; présente une détermination algébrique des vecteurs gradient hydraulique et vitesse en milieu anisotrope et, enfin, traite le problème des variations piézométriques au sein d'une fissure pour les différents types d'écoulement.

La deuxième partie porte sur l'étude de la fracturation permettant de déterminer le tenseur de perméabilité ; afin de généraliser l'étude à des secteurs où l'absence d'affleurement ne permettait pas d'obtenir ce tenseur, une étude corrélative à été effectuée entre traits morphologiques et fracturation, étude de laquelle ont pu être tirées des lois de régression qui ont permis de quantifier la fracturation non visible. La connaissance du gradient hydraulique et du tenseur de perméabilité a permis de déterminer la direction du vecteur vitesse d'écoulement, non colinéaire au vecteur gradient hydraulique, et, donc, de déterminer les zones d'alimentation des captages. Des traçages ont permis de vérifier la validité de ces zones ; de plus, ils ont été étudiés dans différentes hypothèses d'écoulement et il s'est avéré que l'écoulement laminaire parallèle ne rendait pas compte des faits expérimentaux. Le site expérimental de Moranrieux a permis d'analyser deux pompages d'essai dont les résultats aberrants dans l'hypothèse du régime laminaire parallèle s'expliquent dans l'hypothèse de changement et de superposition de régimes d'écoulement ; l'analyse des traçages effectués sur ce site a permis d'élaborer un modèle mathématique qui rend compte de façon acceptable du transfert de traceur en écoulement convergent.

- ABSTRACT -

Avesnois'paleozoïc formations (North of France) are mostly made of cracked and compact limestones ; their hydraulic behavious are enough distant of Darcy's laws one etablished for isotropic porous media. The first part reminds the different flow laws in cracked media with their validity domain ; shows how to represent any sort of cracked media by a simple geometrical cracked one with the hypothesis where the block size is neglectable compared to the studied districts"one, points out an algebric determination of hydraulic gradient and specific discharge vectors in anisotropic media, and treats variation piezometric levels in a crack for the different flow kinds.

The second part is about cracked state enables to compute hydraulic conductivity tensor ; in order to extend the study to districts where the outcrop absence didn't enable to get the tensor, a correlation between cracks and geomorphology has been studied ; this study enabled to get regression equations which enabled to quantify invisible cracked state. The hydraulic gradient and hydraulic conductivity tensor knowledge enables to get specific discharge vector direction and, then, to get catch water alimentation zones. Uranine injections enabled to verify zones validity ; these injections have been studied in different flow hypothesis, and it appeared that the Darcy's flow hypothesis didn't agree with the experimental facts. The experimental site of Moranrieux enabled to analyse two pumping tests data which the results, erroneous in Darcy's flow hypothesis, are explicable in the change and superposition flow kinds hypothesis ; the analyse of injection done on this site enabled to work out mathematical model which acceptably simulates the mass transfert in convergent flow.

PREMIERE PARTIE

ASPECT FONDAMENTAL DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DONNEES HYDRODISPERSIVES EN MILIEU FISSURE

I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'HYDRODYNAMIQUE EN MILIEU FISSURE

1-1 Loi de DARCY

En 1856, DARCY réalise une série d'expériences sur colonnes de sables en vue d'étudier les lois d'écoulements en milieu poreux et il en déduit la loi suivante :

$$Q = - KA \frac{\phi_1 - \phi_2}{\Delta L}$$

Q : débit filtrant (L^3T^{-1})

K : perméabilité (LT^{-1})

A : section de la colonne de sable (L^2)

ΔL : longueur de la colonne de sable

$\phi_1 - \phi_2$: différence de potentiel hydraulique entre les deux niveaux d'eau, exprimé en unité de longueur.

La vitesse de filtration ou vitesse de DARCY est :

$$V = - K \frac{\phi_1 - \phi_2}{\Delta L} = \frac{Q}{A} \ (LT^{-1})$$

Si l'on considère un milieu anisotrope, la perméabilité varie selon les directions de l'espace et la loi de DARCY se généralise de la manière suivante :

$$\vec{V} = K \ \overrightarrow{\text{grad}} \ \phi$$

$$\vec{V} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \Bigg/ \begin{cases} V_x = - K_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial \phi}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ V_y = - K_{yx} \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ V_z = - K_{zx} \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial \phi}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{cases}$$

On est donc amené à utiliser la notion de tenseur pour exprimer le paramètre perméabilité :

$$\overline{\overline{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yz} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix}$$

$\overline{\overline{K}}$ est un tenseur symétrique, défini positif :

$$K_{i,j} = K_{j,i}$$

$$(\overline{\overline{K}} \, . \, \vec{X}) \, . \, \vec{X} \geqslant 0 \Longleftrightarrow \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \, CR^{+3}$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ étant les valeurs propres du tenseur.

1-2 Porosité

La notion de porosité est liée à la notion de vide dans la roche ; on définit plusieurs porosités :

porosité totale : $\omega = \dfrac{\text{volume des vides}}{\text{volume total de la roche}}$

porosité efficace : ω_e = fraction d'eau mobile d'un milieu saturé se désaturant par drainage.

porosité cinématique : $\omega_c = \dfrac{\text{vitesse de DARCY}}{\text{vitesse effective}}$

La vitesse de DARCY est égale au débit rapporté à la section totale, solide et vide du matériau. Elle est encore désignée sous le nom de vitesse apparente ou de filtration. En réalité, les eaux souterraines circulent uniquement à travers les vides ; la section d'écoulement est donc limitée aux vides et plus exactement à la section libre des vides (l'eau piégée dans les pores fermés et l'eau liée par force électrostatique aux parois n'interviennent pas dans la circulation). Conceptuellement, la porosité cinématique et la porosité efficace sont très proches, mais elles ne doivent pas être confondues : l'une étant définie comme un rapport de vitesses, l'autre comme un rapport de volumes.

Certains auteurs donnent une définition qui semble être la meilleure : ω_e et ω_c sont toutes deux définies comme étant le rapport du volume des vides où l'eau circule et du volume total de la roche ; mais ω_c représente la fraction d'eau mobile en milieu saturé alors que ω_e représente la fraction d'eau mobile d'un milieu saturé se désaturant par drainage.

En milieu poreux, la porosité est une porosité d'interstice alors qu'en milieu fissuré, la porosité est une porosité de fissure, à laquelle s'ajoute une porosité d'interstice si la matrice est poreuse.

1-3 Limites de validité de la loi de DARCY pour son emploi en milieu fissuré à matrice de bloc imperméable

La loi de DARCY indique une relation linéaire entre la vitesse de filtration et le gradient hydraulique. Rechercher la validité de la loi de DARCY revient donc à examiner si cette relation linéaire est vérifiée.

C. LOUIS (1968) cité par A. MANGIN (1975) estime qu'en terrains fissurés aquifères, l'écoulement peut être considéré comme cylindrique ; ce qui conduit à étudier les limites de la linéarité des pertes de charge (gradient hydraulique) en fonction du régime d'écoulement défini à partir du nombre de Reynolds.

$$R_e = \frac{Vd}{\nu}$$

V : vitesse moyenne dans le conduit (LT^{-1})

d : diamètre du tube (L)

ν : viscosité cinématique (l^2T^{-1})

Pour une fissure, le nombre de Reynolds s'exprime en fonction du diamètre hydraulique de la fissure défini par le rapport entre la surface de la section perpendiculaire à l'écoulement et son périmètre. Pour une fissure de hauteur unité et d'ouverture a

$$d_h = \frac{a}{2(1+a)}$$

Lorsque la largeur de la fissure peut être négligée devant la hauteur, alors $d_h = \frac{a}{2}$

Si l'on compare une fissure d'ouverture a et un conduit cylindrique de diamètre d ayant même diamètre hydraulique, on en déduit la relation suivante : d = 2a ; on peut donc introduire le paramètre a dans l'expression du nombre de Reynolds : $R_e = \frac{2aV}{\nu}$

C. LOUIS (1967) définit les domaines de validité des lois d'écoulements dans les fissures ou les conduits, en étudiant la fonction : $\frac{\varepsilon}{d_h} = f\ (R_e)$

où ε est la hauteur des protubérances auxquelles est liée la rugosité ou la sinuosité des parois, par rapport à un plan de référence sur lequel est défini d_h (figure 1) :

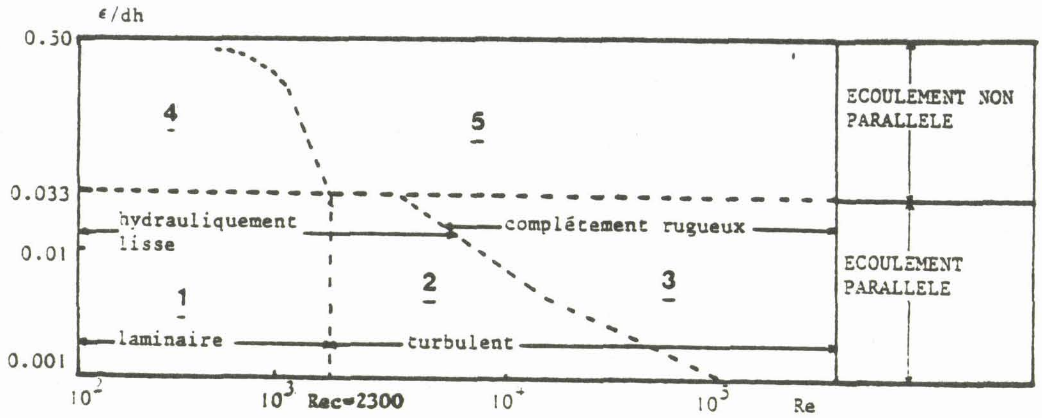


figure 1-DOMAINES DE VALIDITE DES LOIS D'ECOULEMENT DANS LES FISSURES OU LES CONDUITS CYLINDRIQUES (d'après C LOUIS)-

Tout d'abord a été défini le nombre de Reynolds critique séparant le régime laminaire du régime turbulent. LOUIS propose Rec = 2300 pour des fissures lisses.

pour $\varepsilon/dh \leqslant 0{,}033$ l'écoulement est dit parallèle, Rec = 2300

pour $\varepsilon/dh > 0{,}033$ l'écoulement est dit non parallèle, Rec diminue.

<u>Domaine 1</u> : $V = + \frac{ga^2}{12\nu}\ i$

<u>Domaine 2</u> : $V = + \left[\frac{g}{0{,}079} \left(\frac{2}{\nu}\right)^{0{,}25} a^{5/4}\right]^{4/7} i^{4/7}$

<u>Domaine 3</u> : $V = + 4\ \sqrt{ga}\ \left(\log \frac{3{,}7}{\varepsilon/dh}\right) \sqrt{i}$

<u>Domaine 4</u> : $V = + \frac{ga^2}{12\nu\left[1+8{,}8\left(\frac{\varepsilon}{dh}\right)^{1{,}5}\right]}\ i$

<u>Domaine 5</u> : $V = + 4\ \sqrt{ga}\ \log\left(\frac{1{,}9}{\varepsilon/dh}\right) . \sqrt{i}$

Il apparaît donc qu'il n'y a linéarité que pour l'écoulement laminaire. L'écoulement devient turbulent pour des valeurs de vitesse dites vitesses critiques. De l'expression du nombre de Reynolds, on en tire l'expression de la vitesse de filtration,

$$V = \frac{R_e\ \nu}{2a}$$

En écoulement parallèle, pour que l'écoulement soit laminaire, il faut donc que la vitesse de filtration soit inférieure à $\frac{\nu x2300}{2a}$,

en écoulement non parallèle la vitesse de filtration doit être inférieure à $\frac{\nu x300}{2a}$.

Les résultats des travaux de G. CHAUVETEAU (1965) cité par A. MANGIN sur le milieu poreux restreignent encore plus le domaine de validité de la loi de DARCY :

$R_e < 1$: écoulement laminaire à perte de charge linéaire

$1 < R_e < 80$: écoulement laminaire à perte de charge non linéaire

$80 < R_e < 180$: écoulement mixte laminaire et turbulent

$R_e > 180$: écoulement totalement turbulent.

A l'instar des vitesses critiques qui séparent le régime laminaire et le régime turbulent, on est amené à définir une vitesse qui sépare le régime laminaire à perte de charge linéaire et le régime laminaire à perte de charge non linéaire : $V = \frac{\nu}{2a}$.

En conclusion, on pourra retenir, en vertu des travaux des auteurs cités précédemment, que le régime laminaire passe au régime turbulent pour un nombre de Reynolds supérieur à 180, en écoulement parallèle ; qu'en écoulement non parallèle, le nombre de Reynolds critique diminue en fonction de la rugosité, et que l'écoulement parallèle passe à l'écoulement non parallèle pour un coefficient de rugosité $\frac{\varepsilon}{dh}$ supérieur à 0,033.

1-4 Perméabilités relatives aux conduits cylindriques et aux fissures

J. BEAR (1972) présente, dans son traité "Dynamics of fluids in porous média", les connaissances acquises sur les perméabilités relatives aux conduits cylindriques et aux fissures. En résumant cet auteur, on distinguera :

1-41 Les conduits cylindriques

Le débit issu de l'écoulement de l'eau dans un tube a pour expression :

$$Q = \frac{\Pi d^4}{128\nu} gi$$

L'expression de la vitesse moyenne est donc: $V_e = \frac{4Q}{\Pi d^2} = + \frac{d^2 g}{32\nu} i$

La conductivité hydraulique, dans un tube, relative à un écoulement laminaire parallèle est donc :

$$K = \frac{gd^2}{32\nu}$$

Au niveau du front d'avancée du fluide dans le tube, l'enveloppe des vitesses est un paraboloïde, dont la vitesse maximum se situe au centre du tube. L'expression de cette vitesse est :

$$V_{Max} = \frac{gd^2}{16\nu}\, i.$$

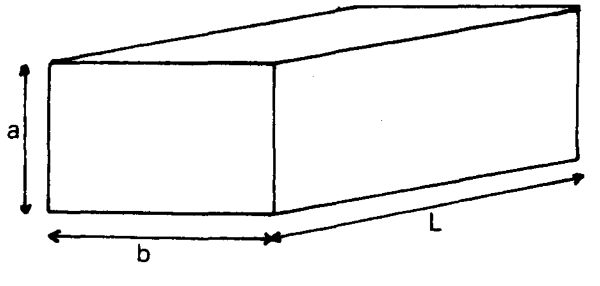
Pour une famille, constituée de n tubes parallèles, de même diamètre, l'expression de la vitesse de DARCY est :

$$V = + \frac{f\Pi d^4}{128\nu}\, gi \quad \text{où} \quad f : \text{fréquence des tubes } (L^{-2})$$

La perméabilité est donc : $K = \dfrac{f\Pi d^4 g}{128\nu}$

Si l'on veut exprimer K en fonction de la porosité ω, on peut écrire :

$$\omega = \frac{n\,\frac{\Pi d^2}{4} \times L}{a \times b \times L} = f\,\frac{\Pi d^2}{4} \Longrightarrow K = \omega\frac{d^2 g}{32\nu}$$



En divisant la vitesse de DARCY par ω, assimilée à la porosité cinématique, on obtient la vitesse effective :

$$V_e = + \frac{d^2 g}{32\nu}\, i$$

Pour n tubes, parallèles et de même diamètre, on pourra retenir les vitesses suivantes :

$$\begin{cases} \text{vitesse moyenne ou vitesse de DARCY} : V = + \dfrac{f\Pi d^4}{12\nu}\, gi \\ \text{vitesse effective} : V_e = + \dfrac{d^2 g}{32\nu}\, i \\ \text{vitesse maximum} : V_{Max} = + \dfrac{d^2 g}{16\nu}\, i \end{cases}$$

Si le diamètre   varie, la perméabilité devient :

$$K = \sum_{i=1}^{m} fi \frac{\Pi di^4}{128\nu} g$$

1-42 Les fissures

L'expression de la vitesse moyenne pour une fissure est :

$$V = + \frac{a^2 g}{12\nu} i$$

pour n fissures parallèles et de même ouverture :

$$V = + \frac{fa^3 g}{12\nu} i = + \frac{\omega a^2 g}{12\nu} i$$

On peut retenir les expressions de trois vitesses principales :

$$\begin{cases} V \text{ DARCY} = + \dfrac{fa^3 g}{12\nu} i \\ V \text{ effective} = + \dfrac{a^2 g}{12\nu} i \\ V \text{ maximum} = + \dfrac{a^2 g}{8\nu} i \end{cases}$$

si l'ouverture des fissures varie, $K = \sum_{i=1}^{m} \frac{fi\, ai^3 g}{12\nu}$

C. LOUIS (1974), propose une autre expression de la perméabilité d'une fissure :

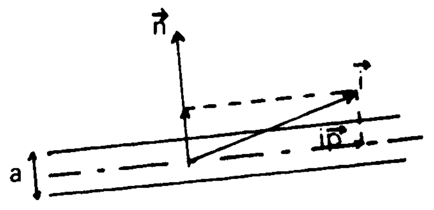
$$K_F = \frac{F.g.a^2}{12\nu C'}$$ où F : degré de séparation de la fissure
C': coefficient de rugosité de la fissure

Mais il convient de souligner qu'il est très difficile d'appréhender, sur le terrain, les coefficients F et C'.

1-5 Perméabilité en milieu anisotrope

Une des conséquences principales de l'anisotropie est la non-colinéarité, sauf cas particulier, entre le vecteur vitesse et le vecteur gradient ; ce qui revient à dire que les lignes de courant et les équipotentielles ne sont pas orthogonales.
L. KIRALY, à partir de la géométrie et de l'orientation des fissures et des conduits, introduit un tenseur de perméabilité (la notion de tenseur sous-entend que la dimension des blocs élémentaires est négligeable devant le domaine étudié).

Fissure

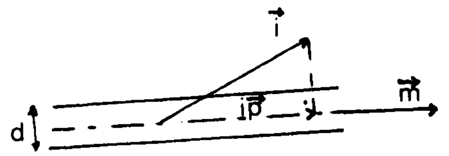


Pour une fissure : $\overrightarrow{ip} = \vec{i} - (\vec{i}.\vec{n}) \;.\; \vec{n} \Longrightarrow \overline{\overline{K}} = \frac{g}{12\nu}\, a^2 \;(I - \vec{n} \otimes \vec{n})$

Pour n fissures parallèles et de même ouverture : $\overline{\overline{K}} = \frac{fg}{12\nu}\, a^3 \;(I - \vec{n} \otimes \vec{n})$

Si l'on a m familles de fissures : $\overline{\overline{K}} = \frac{g}{12\nu} \sum_{i=1}^{m} fiai^3 \;(I - \overrightarrow{ni} \otimes \overrightarrow{ni})$

Conduit



Pour un conduit : $\overrightarrow{ip} = (\vec{i} \;.\; \vec{m}) \;.\; \vec{m} \Longrightarrow \overline{\overline{K}} = \frac{gd^2}{32\nu} \;(\vec{m} \otimes \vec{m})$

Pour n conduits parallèles, de même ouverture : $\overline{\overline{K}} = \frac{fg\Pi d^4}{128\nu} (\vec{m} \otimes \vec{m})$

Si l'on a m familles de conduits : $\overline{\overline{K}} = \frac{\Pi g}{128\nu} \sum_{i=1}^{m} fidi^4 \;(\overrightarrow{mi} \otimes \overrightarrow{mi})$

N.B. : Si $\vec{n}$ est un vecteur de coordonnées x,y,z :

$$\vec{n} \otimes \vec{n} = \begin{pmatrix} x^2 & xy & xz \\ yx & y^2 & yz \\ zx & zy & z^2 \end{pmatrix}$$

Les tenseurs de perméabilité sont des matrices symétriques, définies positives.

Les vecteurs propres (directions principales d'anisotropie) sont donc orthogonaux.

Les valeurs propres (valeur de la perméabilité selon ces directions) sont positives.

L'expression du tenseur de perméabilité, exprimé dans la base de ses vecteurs propres est :

$$\begin{pmatrix} K_y & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_y \end{pmatrix}$$

SCHNEBELLI (1966) donne la relation entre les débits dans le milieu anisotrope et le milieu isotrope :
en partant de l'équation de diffusivité :

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

en en posant : $x' = \sqrt{\frac{K}{K_x}}\, x,\ y' = \sqrt{\frac{K}{K_y}}\, y,\ z' = \sqrt{\frac{K}{K_z}}\, z$

on obtient l'équation suivante : $K \frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial y'^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial z'^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$

S_s : coefficient d'emmagasinement spécifique.

Le flux Q' de la composante $V'_x = - K \frac{\partial h}{\partial x'}$ à travers la surface Σ',

normale à V'_x est exprimé par : $Q' = V'_x \, d_{y'} \, d_{z'} = - K \frac{\partial h}{\partial x'} d_{y'} \, d_{z'}$

Le flux q de la composante V_x à travers la surface Σ, normale à V_x est exprimé par : $q = V_x \, d_y \, d_z = - K \frac{\partial h}{\partial x'} \sqrt{\frac{K_y K_x K_z}{K^3}}$

soit : $Q = Q' \sqrt{\frac{K_y K_z K_x}{K^3}}$

si $K = \sqrt[3]{K_y K_z K_x}$ alors $Q = Q'$

K est la perméabilité du milieu isotrope équivalent.

Le vecteur vitesse et le vecteur gradient n'étant pas colinéaires, on est amené à se poser deux problèmes :

1) La détermination du vecteur gradient, connaissant le vecteur vitesse.
2) La détermination du vecteur vitesse, connaissant le vecteur gradient.

J. BEAR (1972) traite ces deux problèmes.

Problème 1 : Détermination du vecteur gradient connaissant le vecteur vitesse.

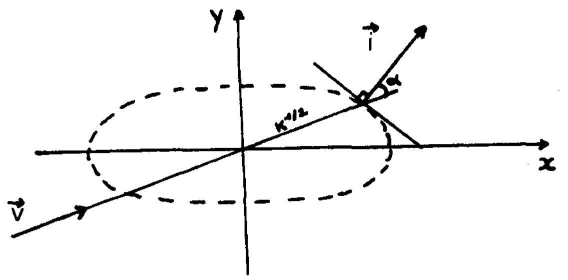
L'expression de la perméabilité selon $\vec{V}$ s'écrit :

$$K = \frac{|\vec{V}|}{|\vec{i}|\cos\alpha}$$

On peut construire un ellipsoïde à partir des trois axes d'anisotropie dont l'équation est :

$$\frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} = 1$$

Les demi-axes de l'ellipsoïde sont : $K_x^{1/2}$, $K_y^{1/2}$, $K_z^{1/2}$. Dans l'espace à deux dimensions $\{\vec{x}, \vec{y}\}$, on obtient une ellipse : $\frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} = 1$.
L'ellipsoïde (ou l'ellipse) permet d'obtenir, selon la direction du vecteur vitesse, la valeur de la perméabilité dans cette direction, et l'orientation du vecteur gradient :



<u>Problème 2</u> : Détermination du vecteur vitesse connaissant le vecteur gradient.

L'expression de la perméabilité selon $\vec{V}$ est :

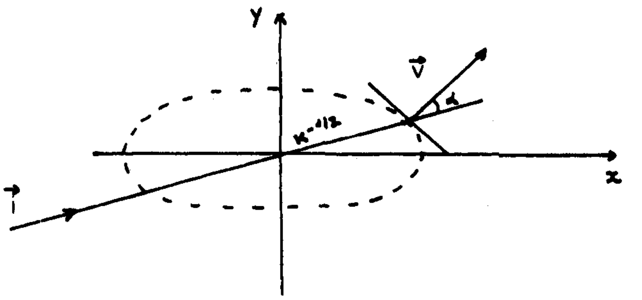
$$K = \frac{|\vec{V}|\cos\alpha}{|\vec{i}|}$$

Nous cherchons à connaître la perméabilité selon le vecteur gradient, et à déterminer le vecteur vitesse.
J. BEAR montre que l'on est amené à construire l'ellipsoïde d'équation :

$$\frac{x^2}{1/K_x} + \frac{y^2}{1/K_y} + \frac{z^2}{1/K_z} = 1$$

Les demi-axes de l'ellipsoïde sont : $K_x^{-\frac{1}{2}}$, $K_y^{-\frac{1}{2}}$, $K_z^{-\frac{1}{2}}$.

A partir de cette ellipsoïde (ou ellipse en dimension 2), on peut déterminer le vecteur vitesse, et la perméabilité selon le vecteur gradient :



1-6 Ecoulement transitoire en milieu fissuré

Jusqu'à présent, seul le cas de l'écoulement permanent a été considéré.
Si l'on fait intervenir des écoulements transitoires, une des propriétés fondamentales des milieux fissurés apparaît : la double porosité. Dans le cas général, le milieu fissuré peut être considéré comme la coexistence de deux systèmes de vides (les fissures et la porosité intergranulaire des blocs) ; en régime transitoire, on conçoit bien que la transmission des variations de pression soit beaucoup plus rapide dans les fissures que dans la matrice des blocs. On est donc amené à définir, dans un volume représentatif élémentaire, l'existence de deux pressions différentes, l'une dans les fissures et l'autre dans la matrice, accompagnée d'un terme d'échange de masse entre la porosité intergranulaire et la porosité de fissure.
On est donc amené à adopter une loi de DARCY particulière qui dépend du temps et de l'intensité du transfert entre blocs et fissures.

1-7 Conclusion

D'après les travaux et synthèses d'A. MANGIN (1975), C. LOUIS (1968) et CHAUVETEAU (1965), il apparaît que la plage de validité de la loi de DARCY est très restreinte pour le milieu fissuré. Cette loi, utilisée comme équation de l'impulsion, néglige les forces d'inertie ; or ces forces apparaissent non négligeables pour un nombre de Reynolds supérieur à 1 en écoulement laminaire. La non-linéarité des pertes de charge rend pratiquement impossibles les solutions analytiques. Dans sa synthèse sur les lois de l'écoulement en milieu karstique, A. MANGIN (1975) montre que la loi de DARCY reste essentiellement valable pour des fissures d'ouverture inférieure à 100μ, pour une hauteur mouillée de 1 m. Il convient donc d'être extrêmement prudent quant à l'utilisation des solutions analytiques pour le milieu fissuré.

II. EXPRESSION DU TENSEUR DE PERMEABILITE D'UN MILIEU A FISSURES ET A CONDUITS CYLINDRIQUES

Si l'on considère un milieu constitué de n familles de fissures et de m conduits cylindriques, on peut exprimer le tenseur de perméabilité de la façon suivante :

$$\overline{\overline{K}} = \frac{g}{12\nu} \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^{\,3} \,(I-\overrightarrow{n_i} \otimes \overrightarrow{n_i}) + \frac{g\Pi}{128\nu} \sum_{k=1}^{m} F_k \, d_k^{\,4} \,(\overrightarrow{m_k} \otimes \overrightarrow{m_k})$$

a_i = ouverture des fissures de la famille i

d_k = diamètre des conduits de la famille k

soit :

$$\overline{\overline{K}} = \frac{g}{12\nu} \left[\sum_{i=1}^{m} f_i a_i^3 \,(I-\overrightarrow{n_i} \otimes \overrightarrow{n_i}) + 0{,}295 \sum_{K=1}^{m} F_k \, d_k^{\,4} \,(\vec{m_k} \otimes \vec{m_k}) \right]$$

Si l'on reprend l'hypothèse de L. KIRALY (1969) selon laquelle l'écoulement s'effectue essentiellement au niveau des intersections de fissures assimilées à des conduits cylindriques, on peut écrire :

$$\begin{cases} m_k = \dfrac{\overrightarrow{n_i} \wedge \overrightarrow{n_j}}{|\overrightarrow{n_i} \wedge \overrightarrow{n_j}|} \\ \\ F_k = fi \times fj \times \sin\,(\overrightarrow{n_i}, \overrightarrow{n_j}) \end{cases}$$

L'assimilation des intersections à des conduits cylindriques reste très discutable de part leur différence géométrique ; il convient donc de souligner que cette assimilation n'est, en fait, qu'une approximation. Le diamètre hydraulique de l'intersection est :

$$dh = \frac{a_i \times a_j}{2(a_i + a_j)} = \frac{\Pi d^2}{4\Pi d} = \frac{d}{4}$$

Le conduit équivalent à l'intersection (même diamètre hydraulique) a pour diamètre :

$$d = 4dh = 2\,\frac{a_i \times a_j}{(a_i + a_j)}$$

Dans cette hypothèse, l'expression du tenseur de perméabilité pour une famille de conduits a pour expression :

$$\overline{\overline{K_k}} = \frac{0{,}125\Pi g}{\nu} \; \frac{f_i \times f_j}{|\overrightarrow{n_I} \wedge \overrightarrow{n_j}|} \left[(\overrightarrow{n_i} \wedge \overrightarrow{n_j}) \otimes (\overrightarrow{n_i} \wedge \overrightarrow{n_j}) \right] \left(\frac{a_i \times a_j}{a_i + a_j}\right)^4$$

pour $P = C_n^2$ famille de conduits, $\overline{\overline{K}} = \sum_{i=1}^{p} \overline{\overline{K_i}}$

III. MILIEUX EQUIVALENT A GEOMETRIE SIMPLE

3-1 Introduction

Dans son cours d'hydrogéologie, G. DE MARSILY (1980) met en évidence l'équivalence entre milieux anisotropes et milieux isotropes. Dans la suite de ce chapitre, on s'intéressera à la recherche de milieux équivalents, cette fois anisotrope mais de représentation géométrique simple, à des milieux anisotropes à géométrie complexe. Les conditions initiales seront les suivantes :

- le milieu est saturé
- l'écoulement est laminaire parallèle
- les fissures et conduits sont continus et lisses
- la dimension des blocs élémentaires est négligeable devant le domaine étudié.

On est donc dans le domaine de définition de la loi de DARCY.

3-2 Cas de N familles de fissures, à ouvertures et fréquences différentes

L'expression du tenseur de perméabilité est (L. KIRALY 1969) :

$$\overline{\overline{K}} = \frac{g}{12\nu} \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 \left(I - \overrightarrow{n_i} \otimes \overrightarrow{n_i}\right)$$

g : accélération due à la gravité : 9,81 ms^{-2}

ν : viscosité cinématique du fluide : 10^{-6} $m^2 s^{-1}$

a : ouverture des fissures (m)

f : fréquence des fissures (m^{-1})

I : matrice identité : $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

$\overrightarrow{ni}$: vecteur orthonormé de la famille de fissures i

$\otimes$: produit tensoriel définit par :

$$\vec{n} \otimes \vec{n} = \begin{pmatrix} x^2 & xy & xz \\ yx & y^2 & yz \\ zx & zy & z^2 \end{pmatrix} , \quad \vec{n}\ (x,y,z)$$

$\vec{n} \otimes \vec{n}$ est une matrice, symétrique, définie positive. Elle possède donc trois valeurs propres positives et trois vecteurs propres orthogonaux.

Posons $\overline{\overline{A}} = \sum_{i=1}^{n} f_i a_i \quad (I - \overrightarrow{n_i} \otimes \overrightarrow{n_i})$

$\overline{\overline{A}}$ est la matrice de l'application f : $(x_1,x_2,x_3) \in R^3 \quad (y_1,y_2,y_3) \in R^3$

de l'espace vectoriel rapporté à la base $\left\{\overrightarrow{NORD}, \overrightarrow{OUEST}, \vec{H} = \dfrac{\overrightarrow{NORD} \wedge \overrightarrow{OUEST}}{|\overrightarrow{NORD} \wedge \overrightarrow{OUEST}|}\right\}$:

$$\begin{cases} Y_1 = \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 (1-x_i^2)X_1 - \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 x_i y_i X_2 - \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 x_i z_i X_3 \\ Y_2 = - \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 x_i y_i X_1 + \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 (1-y_i^2)X_2 - \sum_{i=1}^{n} f_i a_i\, y_i z_i X_3 \\ Y_3 = - \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 z_i x_i X_1 - \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 z_i y_i X_2 + \sum_{i=1}^{n} f_i a_i^3 (1-z_i^2)X_3 \end{cases}$$

Soit $\{Z_1,Z_2,Z_3\}$ la base constituée par les vecteurs propres de $\overline{\overline{A}}$,
soient $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$ les valeurs propres de $\overline{\overline{A}}$.

La matrice $\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}$ est la matrice de f dans la base $\{\overrightarrow{Z_1},\overrightarrow{Z_2},\overrightarrow{Z_3}\}$.

Les vecteurs $\overrightarrow{Z_i}$ ont pour coordonnées $(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i)$ dans la base $\{\overrightarrow{NORD}, \overrightarrow{OUEST}, \vec{H}\}$

Soit le gradient hydraulique $\overrightarrow{grad}\, h \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ défini dans la base

$\{\overrightarrow{NORD}, \overrightarrow{OUEST}, \vec{H}\}$

Exprimons ce gradient dans la base $\{\overrightarrow{Z_1},\overrightarrow{Z_2},\overrightarrow{Z_3}\}$

$$\begin{cases} \overrightarrow{Z_1} = \alpha_1\vec{N} + \beta_1\vec{W} + \gamma_1\vec{H} \\ \overrightarrow{Z_2} = \alpha_2\vec{N} + \beta_2\vec{W} + \gamma_2\vec{H} \\ \overrightarrow{Z_3} = \alpha_3\vec{N} + \beta_3\vec{W} + \gamma_3\vec{H} \end{cases}$$

Dans le base $\{\overrightarrow{Z_1},\overrightarrow{Z_2},\overrightarrow{Z_3}\}$ $\overrightarrow{grad}$ h a pour coordonnées (x,y,z)

$$\overrightarrow{grad}\, h = X\, \overrightarrow{z_1} + Y\, \overrightarrow{z_2} + Z\, \overrightarrow{z_3}$$

On en déduit que :

$$\begin{cases} x = \alpha_1 X + \alpha_2 Y + \alpha_3 Z \\ y = \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 Z \\ z = \gamma_1 X + \gamma_2 Y + \gamma_3 Z \end{cases} \qquad \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

La matrice $\begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{pmatrix}$ est la matrice de passage entre la base $\{\vec{N},\vec{W},\vec{H}\}$ et la base $\{\overrightarrow{Z_1},\overrightarrow{Z_2},\overrightarrow{Z_3}\}$

L'expression de la vitesse d'écoulement est, selon DARCY :

$$\vec{V} = \overline{\overline{K}}\ \overrightarrow{\text{grad}}\ h$$

dans la base $\{\vec{N},\vec{W},\vec{H}\}$: $\overline{\overline{K}} = \overline{\overline{A}}$

$\overrightarrow{\text{grad}}\ h\ (x,y,z)$

$\vec{V}\ (a,b,c)$

dans la base $\{\overrightarrow{Z_1},\overrightarrow{Z_2},\overrightarrow{Z_3}\}$: $\Longrightarrow$ $\overline{\overline{K}} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}$

$\overrightarrow{\text{grad}}\ h\ (X,Y,Z)$

$\vec{V}\ (a',b',c')$

$$\begin{aligned} a^2 &= (\alpha_1 a' + \alpha_2 b' + \alpha_3 c')^2 \\ b^2 &= (\beta_1 a' + \beta_2 b' + \beta_3 c')^2 \quad (1) \\ c^2 &= (\gamma_1 a' + \gamma_2 b' + \gamma_3 c')^2 \end{aligned}$$

$\overrightarrow{Z_1}$, $\overrightarrow{Z_2}$, $\overrightarrow{Z_3}$ étant normés et orthogonaux, on a :

$$\begin{cases} \alpha_1^2 + \beta_1^2 + \gamma_1^2 = 1 \\ \alpha_2^2 + \beta_2^2 + \gamma_2^2 = 1 \\ \alpha_3^2 + \beta_3^2 + \gamma_3^2 = 1 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \alpha_1\alpha_2 + \beta_1\beta_2 + \gamma_1\gamma_2 = 0 \\ \alpha_1\alpha_3 + \beta_1\beta_3 + \gamma_1\gamma_3 = 0 \\ \alpha_2\alpha_3 + \beta_2\beta_3 + \gamma_2\gamma_3 = 0 \end{cases}$$

En résolvant le système (1), on obtient :

$$a^2 + b^2 + c^2 = a'^2 + b'^2 + c'^2 \quad \text{soit} \quad |\vec{V}\ \{\vec{N},\vec{W},\vec{H}\}| = |\vec{V}\ \{\overrightarrow{Z_1},\overrightarrow{Z_2},\overrightarrow{Z_3}\}|$$

Les coordonnées de $\overrightarrow{Z_1}$, $\overrightarrow{Z_2}$, $\overrightarrow{Z_3}$ dans la base $\{\overrightarrow{Z_1},\overrightarrow{Z_2},\overrightarrow{Z_3}\}$sont :

$\overrightarrow{Z_1}\ (1,0,0)$

$\overrightarrow{Z_2}\ (0,1,0)$

$\overrightarrow{Z_3}\ (0,0,1)$

$$I - \overrightarrow{Z_1} \otimes \overrightarrow{Z_1} = \begin{pmatrix} 0&0&0 \\ 0&1&0 \\ 0&0&1 \end{pmatrix}$$

$$I - \overrightarrow{Z_2} \otimes \overrightarrow{Z_2} = \begin{pmatrix} 1&0&0 \\ 0&0&0 \\ 0&0&1 \end{pmatrix}$$

$$I - \overrightarrow{Z_3} \otimes \overrightarrow{Z_3} = \begin{pmatrix} 1&0&0 \\ 0&1&0 \\ 0&0&0 \end{pmatrix}$$

Posons l'égalité $\frac{g}{12\nu} \begin{pmatrix} \lambda_1&0&0 \\ 0&\lambda_2&0 \\ 0&0&\lambda_3 \end{pmatrix} = \frac{g}{12\nu} \left[f_1 a_1^3 \begin{pmatrix} 0&0&0 \\ 0&1&0 \\ 0&0&1 \end{pmatrix} + f_2 a_2^3 \begin{pmatrix} 1&0&0 \\ 0&0&0 \\ 0&0&1 \end{pmatrix} + f_3 a_3^3 \begin{pmatrix} 1&0&0 \\ 0&1&0 \\ 0&0&0 \end{pmatrix} \right]$

On en déduit que :

$$\begin{cases} \lambda_1 = f_2 a_2^3 + f_3 a_3^3 \\ \lambda_2 = f_1 a_1^3 + f_3 a_3^3 \\ \lambda_3 = f_1 a_1^3 + f_2 a_2^3 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} f_1 a_1^3 = \dfrac{\lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1}{2} \\ f_2 a_2^3 = \dfrac{\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2}{2} \\ f_3 a_3^3 = \dfrac{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3}{2} \end{cases}$$

Les paramètres f et a étant toujours définis positifs, il s'ensuit :

$$\begin{cases} \lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1 > 0 \\ \lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2 > 0 \\ \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 > 0 \end{cases}$$

Le milieu équivalent sera donc caractérisé dans la base $\{\vec{Z_1},\vec{Z_2},\vec{Z_3}\}$ par :

$$\vec{n_1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad f_1 a_1{}^3 = \frac{\lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1}{2}$$

$$\vec{n_2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad f_2 a_2{}^3 = \frac{\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2}{2}$$

$$\vec{n_3} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad f_3 a_3{}^3 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3}{2}$$

Considérons l'hypothèse suivante : $\lambda_2 + \lambda_1 - \lambda_3 = 0$

$$\begin{cases} \lambda_1 = f_2 a_2{}^3 \\ \lambda_2 = f_1 a_1{}^3 \\ \lambda_3 = f_1 a_1{}^3 + f_2 a_3{}^3 \end{cases}$$

Le milieu équivalent sera caractérisé, dans la base $\{\vec{Z_1},\vec{Z_2},\vec{Z_3}\}$ par :

$$\begin{cases} \vec{n_1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad f_1 a_1{}^3 = \lambda_2 \\ \\ \vec{n_2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad f_2 a_2{}^3 = \lambda_1 \\ \\ \vec{n_3} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad f_3 a_3{}^3 = \lambda_1 + \lambda_2 \end{cases}$$

3-21 Conclusion 1

Si la dimension des blocs élémentaires est négligeable devant le domaine étudié, tout milieu fissuré pourra être caractérisé par un milieu équivalent, constitué par trois familles de fissures selon les directions principales d'anisotropie (vecteurs propres) si les conditions suivantes sont respectées :

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 \geqslant 0 \\ \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1 \geqslant 0 \\ \lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2 \geqslant 0 \end{cases}$$

Cherchons maintenant s'il est possible de caractériser un milieu fissuré par un milieu à conduit cylindrique.

Posons l'égalité :

$$\frac{g}{12\nu}\begin{pmatrix}\lambda_1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3\end{pmatrix} = \frac{\Pi g}{128\nu}\left[f_1 d_1^4(\overrightarrow{Z_1} \otimes \overrightarrow{Z_1}) + f_2 d_2^4(\overrightarrow{Z_2} \otimes \overrightarrow{Z_2}) + f_3 d_3^4(\overrightarrow{Z_3} \otimes \overrightarrow{Z_3})\right]$$

On en déduit :

$$\begin{cases} f_1 d_1^4 = 3{,}395\ \lambda_1 \\ f_2 d_2^4 = 3{,}395\ \lambda_2 \\ f_3 d_3^4 = 3{,}395\ \lambda_3 \end{cases}$$

3-22 Conclusion 2

Si la dimension des blocs élémentaires est négligeable devant le domaine étudié, tout milieu fissuré pourra être caractérisé par un milieu équivalent, constitué par trois familles de conduits cylindriques selon les directions principales d'anisotropie.

3-3 Cas de N familles de conduits cylindriques, à diamètres et fréquences différents

Dans la base des vecteurs propres, l'expression du tenseur de perméabilité est :

$$\overline{\overline{K}} = \frac{\Pi g}{128\nu}\begin{pmatrix}\lambda_1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3\end{pmatrix}$$

On peut écrire :

$$\overline{\overline{K}} = \frac{\Pi g}{128\nu}\left[f_1 d_1^4(\overrightarrow{Z_1} \otimes \overrightarrow{Z_1}) + f_2 d_2^4(\overrightarrow{Z_2} \otimes \overrightarrow{Z_2}) + f_3 d_3^4(\overrightarrow{Z_3} \otimes \overrightarrow{Z_3})\right]$$

d'où :

$$\begin{cases} f_1 d_1^4 = \lambda_1 \\ f_2 d_2^4 = \lambda_2 \\ f_3 d_3^4 = \lambda_3 \end{cases}$$

3-31 Conclusion 3

Si la dimension des blocs élémentaires est négligeable devant le domaine étudié, tout milieu constitué de N familles de conduits cylindriques peut être caractérisé par un milieu équivalent, constitué de trois familles de conduits selon les directions principales d'anisotropie.

Posons l'égalité :

$$\frac{\Pi g}{128\nu}\begin{pmatrix}\lambda_1 0 0\\ 0\lambda_2 0\\ 0 0\lambda_3\end{pmatrix} = \frac{g}{12\nu}\left[f_1 a_1{}^3(I-\overrightarrow{Z_1}\otimes\overrightarrow{Z_1}) + f_2 a_2{}^3(I-\overrightarrow{Z_2}\otimes\overrightarrow{Z_2}) + f_3 a_3{}^3(I-\overrightarrow{Z_3}\otimes\overrightarrow{Z_3})\right]$$

On en déduit :

$$\begin{cases} f_1 a_1{}^3 = 0,147\ (\lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1) \\ f_2 a_2{}^3 = 0,147\ (\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2) \\ f_3 a_3{}^3 = 0,147\ (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3) \end{cases}$$

3-32 Conclusion 4

Si la dimension des blocs élémentaires est négligeable devant le domaine étudié, tout milieu constitué de conduits cylindriques pourra être caractérisé par un milieu équivalent, constitué de trois familles de fissures selon les directions principales d'anisotropie, si les conditions suivantes sont respectées :

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 > 0 \\ \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1 > 0 \\ \lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2 > 0 \end{cases}$$

De la même façon, on démontre que tout milieu constitué de fissures et de conduits cylindriques pourra être caractérisé par un milieu à trois familles de conduits cylindriques et, sous certaines conditions, par trois familles de fissures selon les directions principales d'anisotropie.

3-4 Choix des facteurs fréquence et ouverture

Conduits cylindriques

Si l'inégalité (1) : $0 < n \times \frac{\Pi d^2}{4} < S$ n'est pas vérifiée, la surface de terrain considérée n'est constituée que de vide.

d : diamètre du conduit

n : nombre de conduit

s : surface du terrain

(1) $0 < f\ \frac{\Pi d^2}{4} < 1$ avec $f = \frac{n}{S}$: fréquence des conduits (L^{-2}) (2).

(2) $0 < fd^2 < \frac{4}{\Pi} \Longrightarrow 0 < X < \frac{4d^2}{\Pi}$ avec $X = fd^4$

Posons $d = \alpha X$ (3)

(3) $\qquad f = \frac{1}{\alpha^4 X^3}$

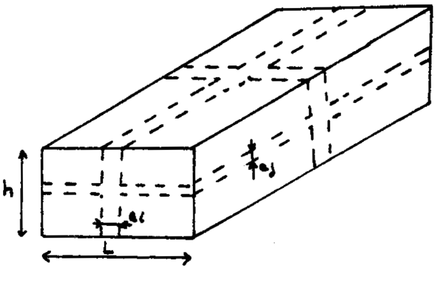
$X < \frac{4\alpha^2 \; X^2}{\Pi} \qquad \alpha > \sqrt{\frac{\Pi}{4X}}$

donc :
$$\begin{cases} fd^4 = X \\ d = \alpha X \\ f = \frac{1}{\alpha^2 X^3} \\ \\ \alpha > \sqrt{\frac{\Pi}{4X}} \end{cases}$$

On peut choisir α tel que $\alpha = ct_e \sqrt{\frac{\Pi}{4X}}$ $ct_e \in \left]1,+\infty\right[$

Fissures

Sur chaque face du volume représentatif élémentaire du terrain apparaissent deux familles de fissures orthogonales.



$$n_i \times a_i \times L + n_j \times a_j \times L - (a_i \times a_j \times C^2{}_{(n_i+n_j)} \leq (h \times L) \quad (4)$$

Prenons comme conditions : $n_i \times a_i \times L + n_j \times a_j \times L < (h \times L)$ (5)

On voit que (5) $\Longrightarrow$ (4) car $\left[C^2{}_{(n_i + n_j)} \times (a_i \times a_j)\right] > 0$

car

(5) $\Longrightarrow f_i a_i + f_j a_j < 1$ (6)

Posons
$$\begin{cases} X_i = f_i a_i{}^3 \\ X_j = f_j a_j{}^3 \\ a_i = \alpha X_i \\ a_j = \alpha X_j \\ f_i = \frac{1}{\alpha^3 X_i{}^2} \\ f_j = \frac{1}{\alpha^3 X_j{}^3} \end{cases}$$

$$(6) \Longrightarrow \alpha > \sqrt{\frac{X_i + X_j}{X_i^2 + X_j^2}}$$

On peut choisir α tel que $\alpha = Ct_e \times \sqrt{\frac{X_i + X_j}{X_i^2 + X_j^2}}$, $Ct_e \in \left]1, +\infty\right[$

IV. CALCUL DES PERMEABILITES DIRECTIONNELLES, DES VITESSES ET DES GRADIENTS HYDRAULIQUES EN MILIEU ANISOTROPE - PROGRAMME CPVGRHMA

4-1 Calcul des perméabilités directionnelles

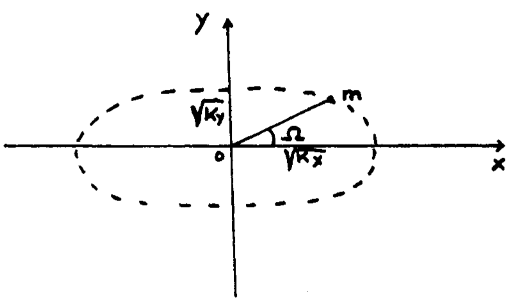
Hypothèses :

- Les perméabilités principales sont connues.
- L'espace vectoriel est de dimension deux et est rapporté à la base constituée par les vecteurs propres de la matrice des perméabilités (directions principales d'anisotropie).

Le tenseur de perméabilité étant une matrice symétrique, définie positive, sa représentation géométrique, en deux dimensions, est une ellipse d'équation, dans la base des vecteurs propres :

$$\frac{X^2}{K_x} + \frac{Y^2}{K_y} = 1$$

K_x et K_y représentent les valeurs propres du tenseur (perméabilités principales).



Le problème à résoudre est de connaître la perméabilité dans une direction quelconque, faisant un angle Ω avec K_x.

Soit le point m, intersection de la direction choisie avec l'ellipse. Les coordonnées du point m doivent vérifier le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{X^2}{K_x} + \dfrac{Y^2}{K_y} = 1 & (1) \\ \\ \dfrac{Y}{X} = t_g\ \Omega & (2) \end{cases}$$

La résolution de ce système conduit aux résultats suivants :

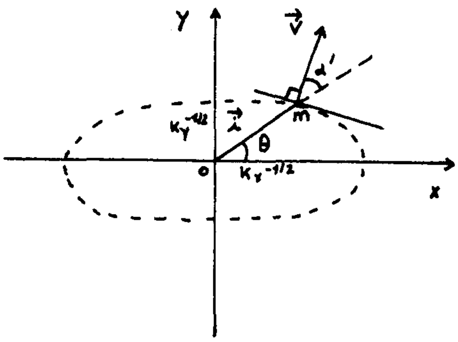
$$m\ (x,y)\ /\ x = \frac{\sqrt{K_x\ K_y}}{\sqrt{K_y + K_x\ t_g^2\ \Omega}}\ ,\quad y = \frac{\sqrt{K_x\ K_y}\ t_g\ \Omega}{\sqrt{K_y + K_x\ t_g^2\ \Omega}} \qquad (3)$$

Valeur de la perméabilité selon $\overrightarrow{om}$: $K = |\overrightarrow{om}|^2 = K_x\, K_y \dfrac{1+t_g^2\, \Omega}{K_y + K_x\, t_g^2\, \Omega}$ (4)

4-2 Calcul des vitesses

Les hypothèses sont les mêmes que dans le cas du calcul des perméabilités directionnelles. En milieu anisotrope, le vecteur vitesse et le vecteur gradient sont, en général, non colinéaires. Le problème à résoudre est de déterminer le vecteur vitesse (direction et module) connaissant le vecteur gradient.

J. BEAR (1972) propose la solution graphique suivante :



En construisant l'ellipse sur les demi-axes $K_x^{-\frac{1}{2}}$, $K_y^{-\frac{1}{2}}$, on détermine la direction du vecteur vitesse ($\vec{V}$) en traçant la tangente au point d'intersection entre l'ellipse et le vecteur gradient ($\vec{i}$), et en prenant la normale à la tangente.

La résolution algébrique du problème peut s'effectuer de la façon suivante :

le point m a ses coordonnées qui vérifient le système :

$$\begin{cases} K_x\, X^2 + K_y\, Y^2 = 1 & (5) \\ \dfrac{Y}{X} = t_g\, \Theta & (6) \end{cases}$$

La dérivée de (5) a pour expression :

$$2X\, K_x\, dX + 2Y\, K_y\, dY = 0 \Longleftrightarrow \frac{dY}{dX} = -\frac{K_x}{K_y}\frac{X}{Y} \qquad (7)$$

$\dfrac{dY}{dX}$ est la pente de la tangente. L'équation de la tangente au point m est donc : $Y = \dfrac{-K_x}{K_y\ tg\ \Theta}\, x + b$.

Le vecteur normal à la tangente est : $\vec{V} \begin{pmatrix} \dfrac{K_x}{K_y\ tg\ \Theta} \\ 1 \end{pmatrix}$. Il représente la direction du vecteur vitesse.

Le vecteur unitaire, colinéaire à $\vec{V}$ est : $\vec{v}\begin{pmatrix} \dfrac{K_x}{K_y\, t_g\,\theta\sqrt{1+\dfrac{K_x^2}{K_y^2 t_g^2\,\theta}}} \\ \dfrac{1}{\sqrt{1+\dfrac{K_x^2}{K_y^2 t_g^2\,\theta}}} \end{pmatrix}$ (8)

Le vecteur unitaire, colinéaire au vecteur gradient est :

$$\vec{j}\begin{pmatrix}\cos\theta \\ \sin\theta\end{pmatrix} \qquad (9)$$

Le produit scalaire des deux vecteurs unitaires est égal au cosinus de l'angle qu'ils font entre eux :

$$\cos\alpha' = \vec{v}\,.\,\vec{j} = \frac{K_x\cos\theta + K_y\sin\theta\; t_g\,\theta}{\sqrt{K_y^2 tg^2\theta + K_x^2}} \qquad (10)$$

L'angle entre la vitesse et le gradient hydraulique est donc :

$$\alpha = \mathrm{ARCOS}\left[\frac{K_x\cos\theta + K_y\sin\theta\; t_g\,\theta}{\sqrt{K_y^2 t_g^2\theta + K_x^2}}\right] \qquad (11)$$

L'angle entre la vitesse et K_x est :

$$\beta = \mathrm{ARCOS}\left[\frac{K_x}{t_g\,\theta\,\sqrt{(K_y^2 tg^2\theta + K_x^2)/t_g^2\theta}}\right] \qquad (12)$$

En effet $\cos\beta = \vec{v} \times \vec{X}$ ou $\vec{X}$ a pour coordonnées : (1,0).

Le module du vecteur vitesse est :

$$V = K\, i\, \cos\alpha'$$

où K est, d'après (4) : $K_x K_y \dfrac{1 + t_g^2\,\beta}{K_y + K_x\, t_g^2\,\beta}$ (perméabilité selon le vecteur vitesse) **(13)**

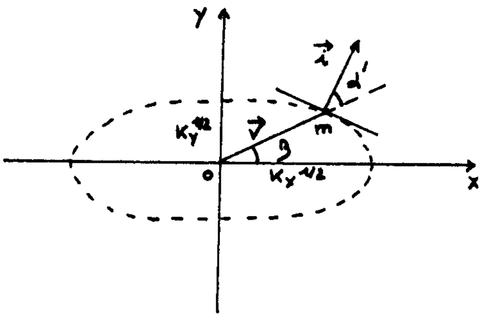
donc :

$$V = K_x K_y \frac{1 + t_g^2\,\beta}{K_y + K_x\, t_g^2\,\beta} \times \frac{(K_x\cos\theta + K_y\sin\theta\; t_g\,\theta)}{\sqrt{K_y^2 t_g^2\theta + K_x^2}} \times i \qquad (14)$$

4-3 Calcul des gradients hydrauliques

Les hypothèses sont les mêmes que dans le cas du calcul des perméabilités directionnelles.

De la même façon que pour les vitesses, on peut déterminer la direction du gradient connaissant la direction de la vitesse par la méthode graphique suivante (d'après J. BEAR (1972)) :



En construisant l'ellipse de demi-axes $\sqrt{K_x}$, $\sqrt{K_y}$, on détermine la direction du vecteur gradient en traçant la tangente au point m et en prenant la normale à la tangente.

La résolution algébrique du problème peut s'effectuer comme suit :

les coordonnées du point m doivent vérifier le système :

$$\begin{cases} \dfrac{X^2}{K_x} + \dfrac{Y^2}{K_y} = 1 & (15) \\ \\ \dfrac{Y}{X} = t_g\ \beta & (16) \end{cases}$$

L'équation de la tangente est : $\dfrac{dY}{dX} = - \dfrac{K_y}{K_x\ t_g\ \beta}\ x + b$ (17)

La direction du gradient est donnée par le vecteur $\vec{J}\ (\dfrac{K_y}{K_x\ t_g\ \beta}$ (18)

de la même façon que dans le cas des vitesses, on détermine :

l'angle entre gradient et vitesse : $\alpha = \text{ARCOS} \left[\dfrac{K_y \cos\beta + K_x \sin\beta\ tg\ \beta}{t_g\beta \sqrt{(K_x{}^2 t_g{}^2\beta + K_y{}^2)/t_g{}^2\beta}} \right]$ (19)

l'angle entre gradient et K_x : $\theta = \text{ARCOS} \left[\dfrac{K_y}{t_g\ \beta\ \sqrt{(K_x{}^2 t_g{}^2 \beta + K_y{}^2) t_g{}^2\ \beta}} \right]$ (20)

le module du vecteur gradient : $i = \dfrac{V}{K_x K_y}\ \dfrac{K_y + K_x\ t_g{}^2\ \beta}{1 + t_g{}^2\ \beta} \times \dfrac{1}{\cos\alpha}$ (21)

4-4 Programme CPVGRHMA

Ce programme a pour fonction le calcul des perméabilités directionnelles, des vitesses et des gradients hydrauliques en milieu anisotrope.

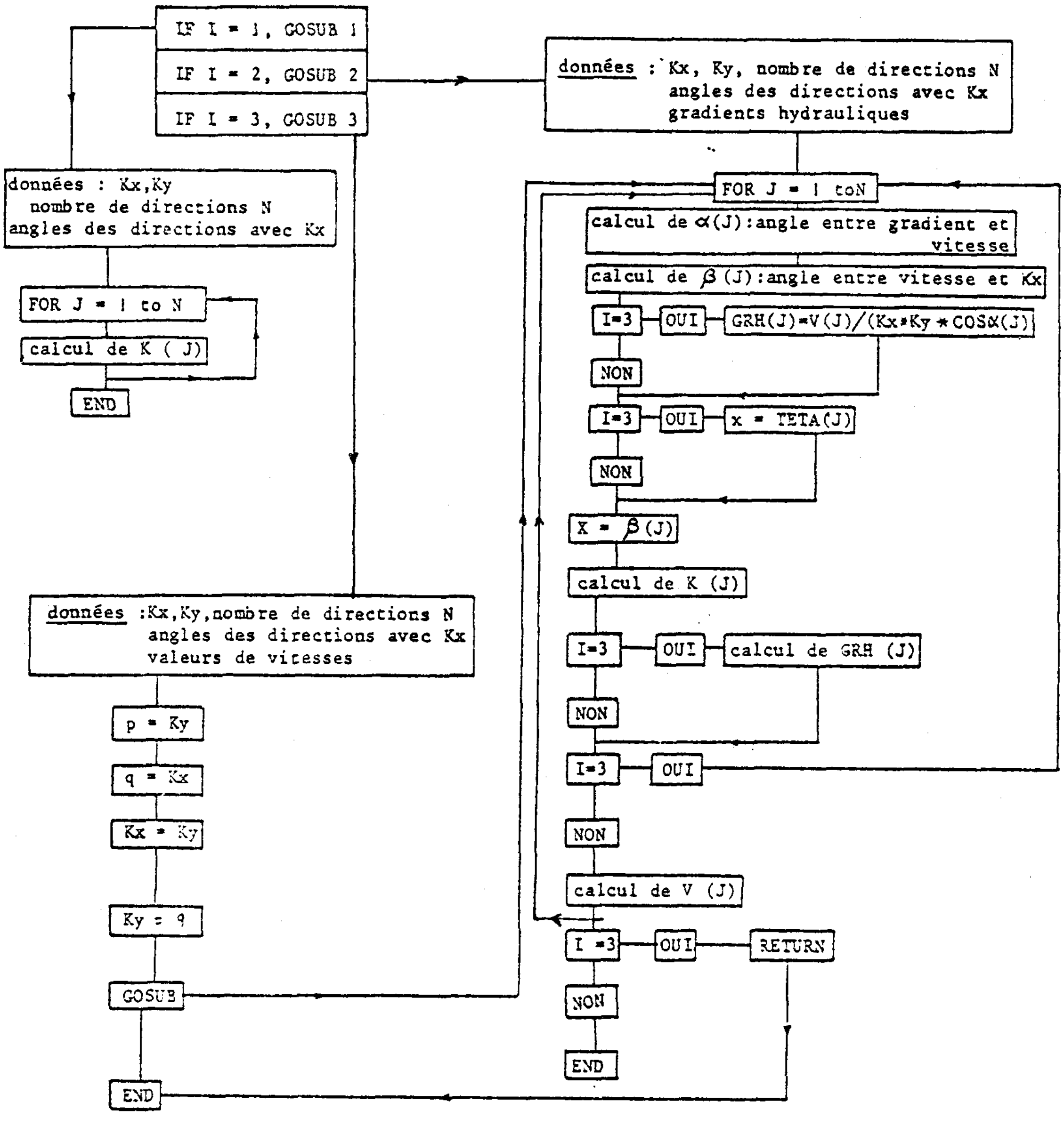
Il est constitué de trois sous-programmes :

sous-programme 1 : calcul des perméabilités directionnelles

sous-programme 2 : calcul des vitesses

sous-programme 3 : calcul des gradients hydrauliques.

Il a été écrit en langage BASIC III et est opérationnel sur CBM COMMODORE.



V. PROGRAMMES TENFY - TENCY

5-1 Introduction

J. MANIA a élaboré en 1976 le programme TENSEUR qui permet l'obtention des conductivités hydrauliques directionnelles du milieu poreux anisotrope équivalent à un milieu fissuré ; de plus, ce programme calcule les vitesses de DARCY pour chaque famille de fissures et la conductivité hydraulique du milieu poreux isotrope équivalent. Ce programme a été le point de départ de l'élaboration des programmes TENFY et TENCY.

5-2 Programme TENFY

5-21 Fonction

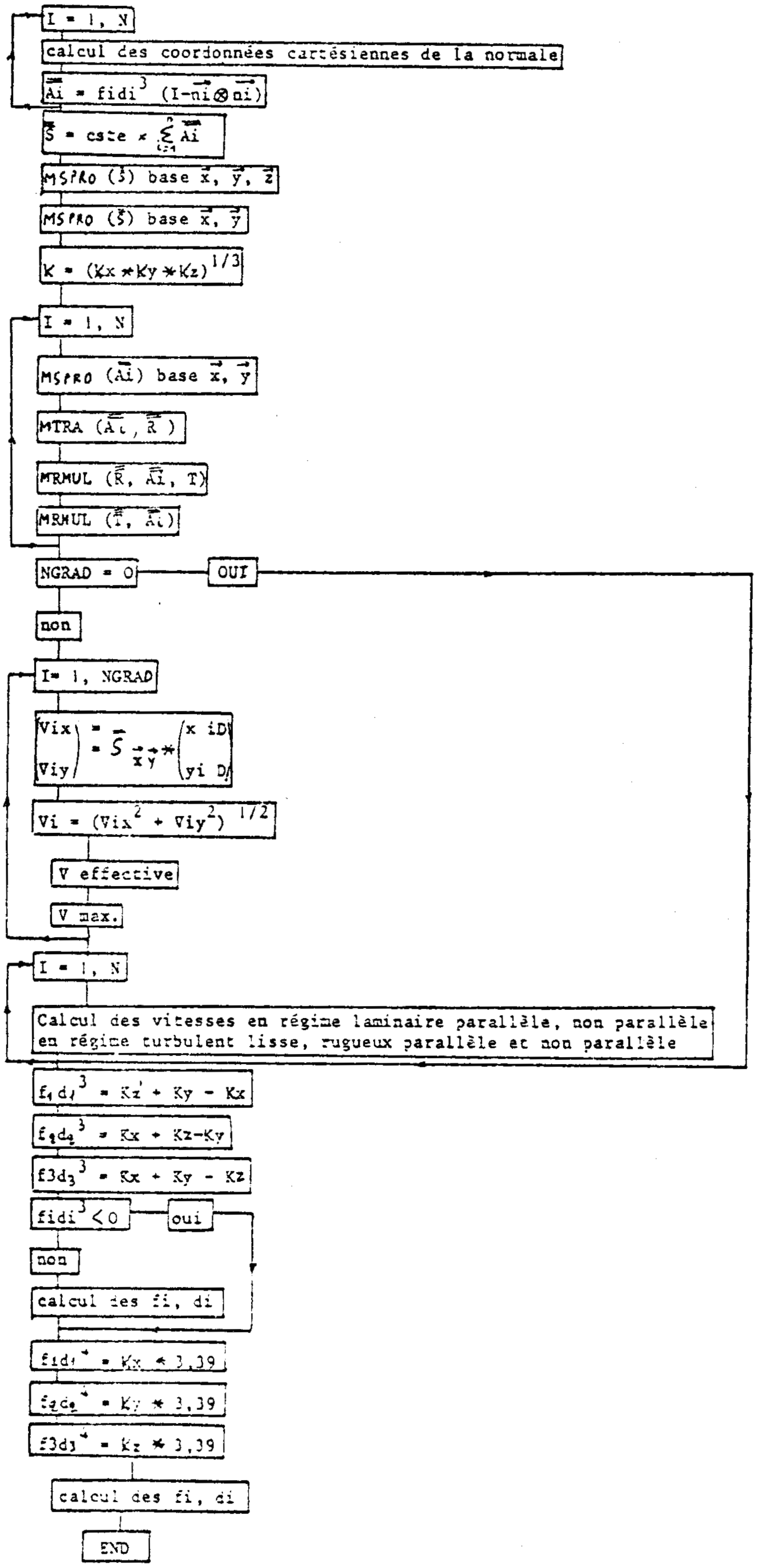
Le programme est relatif à des milieux fissurés. Il a pour fonction, outre celle du programme TENSEUR, le calcul des vitesses effectives et maximales en régime laminaire parallèle, le calcul des vitesses en régime turbulent rugueux non parallèle, en régime turbulent rugueux parallèle, en régime turbulent hydrauliquement lisse, en régime laminaire non parallèle. Il donne l'expression de chaque tenseur élémentaire de conductivité hydraulique, c'est-à-dire le tenseur relatif à chaque famille de fissure , dans le plan de la fissure et dans le plan géographique, ainsi que l'expression du tenseur global du milieu poreux anisotrope équivalent dans chaque plan de fissure et dans le plan géographique ; et enfin, l'expression de milieux équivalents constitués de trois familles orthogonales de fissures et de milieux équivalents constitués de trois familles orthogonales de conduits cylindriques.

5-22 Données

- Nombre de familles de fissures
- Nombre de valeurs du gradient hydraulique
- Situation géographique du secteur
- Cinq réels compris dans l'intervalle $]+1,+\infty[$ qui permettront la recherche de milieux équivalents
- Direction, valeur du pendage, azimut du pendage
- Fréquence et ouverture des fissures (f,a)
- Direction et valeur du gradient hydraulique

5-23 Ordinogramme du programme TENFY

Une explication détaillée du programme est présentée en annexe 1.



5-3 Programme TENCY

Il a la même structure que le programme TENFY mais est relatif aux conduits cylindriques.

VI. ESSAI DE SIMULATION DE L'ECOULEMENT A SURFACE LIBRE DANS UNE FISSURE

6-1 Introduction

Depuis 1960, les hydrauliciens des usines de dérivation se sont intéressés au calcul des courbes de remous et, notamment, au calcul des cotes de rivières en amont de barrage afin de déterminer avec la plus grande marge de sécurité, le dimensionnement des ouvrages. Ils ont considéré l'écoulement comme étant turbulent rugueux. En s'inspirant de leurs travaux et en vue de mieux appréhender les modalités d'écoulement en milieu fissuré, il a semblé intéressant de présenter :

- une étude de l'écoulement à surface libre dans une fissure verticale en considérant non plus le seul régime turbulent rugueux mais aussi les autres types d'écoulement, à savoir :
  - l'écoulement turbulent hydrauliquement lisse
  - l'écoulement laminaire parallèle
  - l'écoulement laminaire non parallèle
- une méthode de calcul permettant de déterminer selon différents cas de figure, le type de régime d'écoulement.

6-2 Equations aux différences finies

La différence de cote piézométrique entre deux points d'abscisse x_o et x_1 s'écrit (annexe 2) :

$$Z_1 - Z_o = \int_{x_1}^{x_o} i\, d_x + \frac{V_o^2 - V_1^2}{2\, g}$$

En général, le terme $\int_{x_1}^{x_o} i\, d_x$ n'est pas intégrable analytiquement car i peut varier de façon quelconque en fonction de x. Par contre, le problème peut être résolu en utilisant l'équation différentielle de Saint-Venant sous la forme d'une équation aux différences finies.
Si l'on fait l'hypothèse que la perte de charge est constante entre deux points d'abscisse x_1 et x_2, on a :

$$Z_2 - Z_1 = \Delta_2 = i_2\ (x_2 - x_1) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \quad \text{soit } Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + i_2\ (x_2 - x_1)$$

On reconnaît l'équation de BERNOUILLI.

On peut donc découper la fissure en n tronçons successifs au sein desquels les pertes de charges i_1, i_2,..i_n pourront être considérées comme constantes, on obtient :

$$Z_i = Z_o + \Delta_1 + \Delta_2 + \ldots + \Delta_n$$

6-21 Régime turbulent rugueux

CHEZY, cité par H. VARLET (1965), donne l'expression de la vitesse moyenne en fonction du rayon hydraulique.

$$V = C'' \sqrt{dh}\,\sqrt{i}$$

$$dh = \frac{\text{Surface mouillée}}{\text{Périmètre mouillé}} \quad (L)$$

$$C'' = \frac{\alpha\,\sqrt{dh}}{\gamma + \sqrt{dh}} \quad (\text{constante de CHEZY } L^{0,5} \times T^{-1})$$

$$\alpha \; (L^{0,5} \times T^{-1}) = 87$$

γ : coefficient de rugosité ($L^{0,5}$)

En régime turbulent rugueux, deux types d'écoulement peuvent avoir lieu :

- écoulement turbulent rugueux parallèle :

$$V = 4\sqrt{2gdh}\,\log\frac{3,7}{\varepsilon/dh}\,\sqrt{i} \quad (\text{CHEZY-KRASNOPOLISKII})$$

$$\text{donc } C'' = 4\,\sqrt{2g}\,\log\frac{3,7}{\varepsilon/dh} \quad (\varepsilon : \text{hauteur des protubérances})$$

- écoulement turbulent rugueux non parallèle :

$$V = 4\sqrt{2gdh}\,\log\frac{1,9}{\varepsilon/dh}\,\sqrt{I} \quad (\text{LOUIS})$$

$$\text{donc } C'' = 4\,\sqrt{2g}\,\log\frac{1,9}{\varepsilon/dh}$$

En régime turbulent, l'expression de la perte de charge i est :

$$i = \frac{1}{C''^2 dh} \times V^2$$

On en déduit donc : $i = \dfrac{q^2}{dh \times C^2 \times S^2} = \dfrac{q^2}{C''^2} \times \dfrac{P_m}{S^3}$

Pour le tronçon i+1, on prendra comme valeur de C et de i :

$$C''_{i+1} = 87 \quad \frac{\sqrt{dh_i} + \sqrt{dh_{i+1}}}{\gamma + \left(\dfrac{\sqrt{dh_i} + \sqrt{dh_{i+1}}}{2}\right)}$$

$$i_{i+1} = \frac{q^2}{2C''^2_{i+1}} \left(\frac{P_{mi}}{S_i^3} + \frac{P_{mi+1}}{S_{i+1}^3} \right)$$

L'équation de Saint Venant devient donc :

$$Z_{i+1}-Z_i = \Delta_{i+1} = \frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{S_i^2} - \frac{1}{S_{i+1}^2}\right] + \frac{q^2 l_{i+1}}{2C''^2_{i+1}}\left[\frac{P_{m}i}{S_i^3} + \frac{P_{m}i+1}{S_{i+1}^3}\right]$$

l_{i+1} : longueur du tronçon i+1

Les fissures étant généralement étroites, on peut négliger a_i devant h_i et il vient :

$$\frac{P_i}{S_i^3} = \frac{(h_i+a_i) \times 2}{h_i^3\ a_i^3} \sim \frac{2h_i}{h_i^3\ a_i^3} = \frac{2}{h_i^2\ a_i^3}$$

donc :

$$Z_{i+1}-Z_i = \frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{a_i^2 h_i^2} - \frac{1}{a_{i+1}^2 h_{i+1}^2}\right] + \frac{q^2 l_{i+1}}{C''^2_{i+1}}\left[\frac{1}{a_i^3 h_i^2} + \frac{1}{a_{i+1}^3 h_{i+1}^2}\right]$$

6-22 Régime turbulent hydrauliquement lisse

$$V = \left[\frac{g}{0{,}079}\left(\frac{2}{\nu}\right)^{0,25} a^{5/4}\right] \times i^{4/7} \quad \text{(formule de BLASIUS)}$$

La perte de charge i est : $i = \dfrac{0{,}079\ \nu^{0,25}}{1{,}19 \times g \times a^{1,25}}\ V^{1,75}$

$$\text{soit } i = \frac{0{,}066\ \nu^{0,25}}{g\ a^{1,25}}\left(\frac{Q}{S}\right)^{1,75}$$

Pour le tronçon i+1, on prendra comme valeur de i :

$$i = \frac{0{,}33\ \nu^{0,25} \times q^{1,75}}{g}\left(\frac{1}{a_i^3 h_i^{1,75}} + \frac{1}{a_{i+1}^3 h_{i+1}^{1,75}}\right)$$

L'équation de Saint-Venant devient donc :

$$Z_{i+1}-Z_i = \Delta_{i+1} = \frac{q}{2g}\left[\frac{1}{a_i^2 h_i^2} - \frac{1}{a_{i+1}^2 h_{i+1}^2}\right] + \frac{q^{1,75} \times 0{,}33 \times \nu^{0,25} \times l_{i+1}}{g}\left[\frac{1}{a_i^3 h_i^{1,75}} + \frac{1}{a_{i+1}^3 h_{i+1}^{1,75}}\right]$$

6-23 Régime laminaire en écoulement parallèle

$$V = \frac{ga^2}{12\nu}\ i$$

La perte de charge i est :

$$i = \frac{12\nu}{ga^2}\ \frac{q}{S}$$

Pour le tronçon i+1 on prendra comme valeur de i :

$$i = \frac{q6\nu}{g}\left[\frac{1}{a_i^3 h_i} + \frac{1}{a_{i+1}^3 h_{i+1}}\right]$$

L'équation de Saint-Venant devient donc :

$$Z_{i+1}-Z_i = \Delta_{i+1} = \frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{a_i^2h_i^2} - \frac{1}{a_{i+1}^2h_{i+1}^2}\right] + \frac{q6\nu l_{i+1}}{g}\left[\frac{1}{a_i^3h_i} + \frac{1}{a_{i+1}^3h_{i+1}^3}\right]$$

6-24 Régime laminaire en écoulement non parallèle

$$V = \frac{ga^2}{12\nu C'}\, i$$

$C' = 1 + 8{,}8\,(\frac{\varepsilon}{d_h})^{1,5}$: coefficient de rugosité de la fissure.

La perte de charge de i est :

$$i = \frac{12\nu C'}{ga^2}\;\frac{q}{S}$$

Pour le tronçon i+1, on prendra comme valeur de i :

$$i = \frac{q6\nu}{g}\, C'_{i+1}\left[\frac{1}{a^3_ih_i} + \frac{1}{a_{i+1}^3h_{i+1}}\right]$$

L'équation de Saint-Venant devient donc :

$$Z_{i+1}-Z_i = \Delta_{i+1} = \frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{a_i^2h_i^2} - \frac{1}{a_{i+1}^2h_{i+1}^2}\right] + \frac{q6\nu C'_{i+1}l_{i+1}}{g}\left[\frac{1}{a_i^3h_i} + \frac{1}{a_{i+1}^3h_{i+1}}\right]$$

Tous les types d'écoulement possibles en milieu fissuré ont été exprimés sous forme d'équations aux différences finies. Un exemple théorique va être traité afin de montrer l'utilisation et les avantages de ce mode de traitement.

6-3 Exemple

Cas d'une fissure, dont les variations d'ouverture sont connues, dont on connaît la pente du fond, où l'on connaît deux cotes piézométriques, à un même instant, d'abscisse x_o et x_4.

Côte	Altitude du fond	Hauteur mouillée	a ouverture
Z_o = 2 m	Y_o = 1 m	h_o = 1 m	a_o = 0,01
Z_1	Y_1 = 1,2	h_1	a_1 = 0,009
Z_2	Y_2 = 1,4	h_2	a_2 = 0,0075
Z_3	Y_3 = 1,6	h_3	a_3 = 0,005
Z_4 = 5 m	Y_4 = 1,8	h_4 = 3,2 m	a_4 = 0,004

débit $q = 0{,}001\ m^3/s$ $\quad x_4 - x_o = 4000$ m $\quad x_{i+1} - x_i = 1000$ m

6-31 Calage

6-311 Calage en régime turbulent rugueux

$$Z_{i+1}-Z_i = \Delta_{i+1} = \frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{a_i^2h_i^2} - \frac{1}{a_{i+1}^2h_{i+1}^2}\right] + \frac{q^2 l_{i+1}}{C''^2_{i+1}}\left[\frac{1}{a_i^3h_i^2} + \frac{1}{a_{i+1}^3h_{i+1}^2}\right]$$

deux inconnues figurent dans cette équation : C_{i+1} et h_{i+1}

C''_{i+1} dépend de la valeur de γ, coefficient de rugosité. On prendra une valeur provisoire de γ en calculant C" à partir des deux extrêmes x_o et x_4.

$C''^2 = 3\ 367{,}8$ d'où $C = 58{,}03$. On en déduit que $\gamma = 0{,}029$.

Pour déterminer h_{i+1}, on utilisera la méthode dite de fausse position, en ce sens que l'on attribuera à Z_{i+1} une cote supposée, Z_i étant déterminée, d'où l'on déduira la hauteur mouillée h_{i+1} que l'on reportera dans l'équation. On calculera, par l'équation, Δ_{i+1}.

Si Δ_{i+1} calculée = Δ_{i+1} supposée, Z_{i+1} est déterminée ; sinon, il faut attribuer à Z_{i+1} une autre valeur jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre la valeur supposée et la valeur calculée. On calculera, maille par maille, les cotes piézométriques. Si Z_4 observée = Z_4 calculée, la valeur provisoire de γ sera retenue, sinon il faudra recommencer les calculs avec une autre valeur de γ, et ceci jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre Z_4 observée et Z_4 calculée.

$\gamma = 0{,}029$

Calcul de Z_1

Z_1 supposée	h_1 (hauteur mouillée)	Z_1 calculée
2,5	1,3	2,483
2,48	1,28	2,489
2,489	1,289	2,486
2,487	1,287	2,487

$Z_1 = 2{,}487$ $\quad C''_1 = 61{,}23$

Calcul de Z_2

Z_2 supposée	h_2	Z_2 calculée
3	1,6	2,975
2,98	1,58	2,98

$Z_2 = 2{,}98$ $\quad C''_2 = 59{,}9$

Calcul de Z_3

Z_3 supposée	h_3	Z_3 calculée
3,5	1,9	3,76
3,7	2,1	3,66
3,65	2,05	3,68
3,66	2,06	3,679
3,67	2,07	3,67

$Z_3 = 3,67 \qquad C''_3 = 63,5$

Calcul de Z_4

Z_4 supposée	h_4	Z_4 calculée
4,9	3,1	4,89
4,88	3,08	4,877
4,878	3,078	4,878

$Z_4 = 4,878 \qquad C''_4 = 53,95$

On voit que Z_4 calculée est inférieure à Z_4 observée. Il convient donc de diminuer C'' afin d'augmenter la valeur Z_4 calculée.

On peut choisir comme critère de convergence l'algorithme suivant :

si Z_i calculée < Z_i observée

$$\frac{(Z_i \text{ calculée} - Z_o)}{(Z_i \text{ observée} - Z_o)} = \frac{(C''_1)^2}{(C''_2)} \Longrightarrow C'^2_1 = C''^2 \times \frac{(Z_i \text{ calculée} - Z_o)}{(Z_i \text{ observée} - Z_o)}$$

Si Z'_i calculé < Z_i observée, Z'_i calculée étant la nouvelle valeur calculée à partir de C'

$$C''^2_2 = C''^2_1 \times \frac{(Z_i \text{ calculée} - Z_o)}{(Z_i \text{ observée} - Z_o)} = C''^2 \times \frac{(Z_i \text{ calculée} - Z_o)(Z'_i \text{ calculée} - Z_o)}{(Z_i \text{ observée} - Z_o)^2}$$

Si, le n^{ie} essai est concluant on aura :

$$C''_n = C''^2 \prod_{o}^{n-1} \frac{Z_i^{(K)'} \text{calculée} - Z_o}{(Z_i \text{ observée} - Z_o)^n}$$

De même si Z_i calculée > Z_i observée, on aura :

$$C''_n = C''^2 \times \frac{(Z_i \text{ observée} - Z_o)^n}{\prod_{o}^{n-1} (Z_i^{(K)'} - Z_o)}$$

$$\frac{2,83}{3} = \frac{(C''_1)^2}{(C'')} \Longrightarrow C''_1 = 56,26 \Longrightarrow \gamma = 0,031$$

Pour cette valeur de γ, on obtient successivement :

$Z_1 = 2,5$ $\qquad$ $C''_1 = 60$

$Z_2 = 3,005$ $\qquad$ $C''_2 = 58,65$

$Z_3 = 3,82$ $\qquad$ $C''_3 = 55,86$

$Z_4 = 4,97$ $\qquad$ $C''_4 = 52,58$

Il faut donc diminuer C, soit augmenter γ.

$$\frac{2,96}{3} = \frac{(C')^2}{(C\ )} \Longrightarrow C' = 55,88 \Longrightarrow \gamma = 0,032$$

On obtient pour $\gamma = 0,032$

$Z_1 = 2,51$ $\qquad$ $C''_1 = 59,40$

$Z_2 = 3,016$ $\qquad$ $C''_2 = 58,04$

$Z_3 = 3,837$ $\qquad$ $C''_3 = 55,22$

$Z_4 = 4,996$ $\qquad$ $C''_4 = 51,91$

Z_4 calculée - Z_4 observée = 0,004 m.

L'erreur est donc de 4 mm. On peut continuer le calcul pour un nouveau γ jusqu'à obtenir Z_4 calculée égale à Z_4 observée. Ici, on conviendra que l'ajustement est acceptable.

6-312 Calage en régime laminaire parallèle

$$Z_{i+1}-Z_i = \frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{a_i^2h_i^2} - \frac{1}{a_{i+1}^2h_{i+1}^2}\right] + \frac{q6\nu l_{i+1}}{g}\left[\frac{1}{a_i^3h_i} + \frac{1}{a_{i+1}^3h_{i+1}}\right]$$

On obtient successivement :

$Z_1 = 3,1$

$Z_2 = 3,648$

$Z_3 = 4,67$

$Z_4 = 6,04$

Z_4 calculée est donc différent de Z_4 observée, on peut donc dire que l'écoulement relatif à ce cas de figure n'est pas laminaire parallèle.

6-313 Calage en régime laminaire non parallèle

$$Z_{i+1}-Z_i = \frac{q}{2g}\left[\frac{1}{a_i^2h_i^2} - \frac{1}{a_{i+1}^2h_{i+1}^2}\right] + \frac{q6\nu C'l_{i+1}}{g}\left[\frac{1}{a_i^3h_i} + \frac{1}{a_{i+1}^3h_{i+1}}\right]$$

$C' = 1 + 8,8\ (\frac{\varepsilon}{dh})^{1,5} > 1$, donc Z_4 calculée sera donc supérieur à

Z_4 calculée en régime laminaire parallèle ; on peut donc dire que l'écoulement relatif à ce cas de figure n'est pas laminaire non parallèle.

6-314 Calage en régime turbulent hydrauliquement lisse

$$Z_{i+1}-Z_i = \frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{a_i\,h_i} - \frac{1}{a_{i+1}h_{i+1}}\right] + \frac{q^{1,75}x0,33x\nu^{0,35}xl_{i+1}}{g}\left[\frac{1}{a_i{}^3h_i{}^{1,75}} + \frac{1}{a_{i+1}^3h_{i+1}^{1,75}}\right]$$

On obtient successivement :

$Z_1 = 3,28$

$Z_2 = 4,46$

$Z_3 = 5,99$

$Z_4 = 8$

L'écoulement n'est donc pas un écoulement en régime turbulent hydrauliquement lisse.

6-315 Discussion

Si le régime d'écoulement est turbulent rugueux, le problème est donc de savoir si il est parallèle ou non parallèle. Pour cela, nous allons calculer le nombre de Reynolds R_e et la rugosité relative $\frac{\varepsilon}{dh}$; on pourra donc déterminer dans quel domaine se situe le point $m(R_e, \frac{\varepsilon}{dh})$ et, donc, de résoudre le problème.

Calcul de R_e :

$$R_e = \frac{2\ V\ e}{\nu} = 1218$$

Calcul de $\frac{\varepsilon}{dh}$:

a) écoulement non parallèle

$$C'' = 4\ \sqrt{2g}\ \ \log \frac{1,9}{\varepsilon/dh} \Longrightarrow \frac{\varepsilon}{dh} = 0,08 \quad (C = 55,88)$$

b) écoulement parallèle

$$C'' = 4\ \sqrt{2g}\ \ \log \frac{3,7}{\varepsilon/dh} \Longrightarrow \frac{\varepsilon}{dh} = 0,16$$

$R_e > 180$: l'écoulement est donc turbulent

$\frac{\varepsilon}{dh} > 0,033$: lécoulement est donc non parallèle

Conclusion : L'écoulement est en régime turbulent, rugueux et non parallèle.

La hauteur des protubérances est : $\varepsilon = 0,00028$

6-4 Etude prévisionnelle

Le modèle étant calé, il est possible d'envisager divers scénarios.

6-41 Augmentation de la cote piézométrique

Supposons que la cote Z_o passe de 2 m à 3,5 m ; et que le débit passe de 0,001 m^3/s à 0,005 m^3/s ; connaissant la valeur de γ, il est possible de calculer les cotes piézométriques en amont de Z_o

$Z_1 = 5,23$	$C''_1 = 59,4$
$Z_2 = 6,526$	$C''_2 = 58,04$
$Z_3 = 8,6$	$C''_3 = 55,22$
$Z_4 = 11,6$	$C''_4 = 51,91$

6-42 Diminution de la cote piézométrique

Supposons que la cote Z_o passe à 1,8 m, que le débit devient égal à 18×10^{-9} m^3/s.

Le calcul des cotes Z_i montre une très faible surélévation :

$1,8 < Z_1 < 1,8000001$

$Z_1 < Z_2 < 1,8000001$

$Z_2 < Z_3 < 1,8000002$

$Z_4 = 1,8012.$

$$\left.\begin{array}{l} R_e = \dfrac{2Ve}{\nu} = 21 < 180 \\ \\ \dfrac{\varepsilon}{dh} = 0,08 > 0,033 \end{array}\right\} \Longrightarrow \text{l'écoulement est en régime laminaire non parallèle}$$

Le calcul des cotes Z_i donne donc des résultats erronés, car il a été fait dans l'hypothèse d'un régime turbulent rugueux non parallèle.
Il faut donc recalculer ces cotes dans l'hypothèse du régime laminaire non parallèle.
Le coefficient de rugosité a pour expression en régime laminaire non parallèle :

$$C = 1 + 8,8 \left(\frac{\varepsilon}{dh}\right)^{1,5} \text{ soit } C = 1 + 8,8 \frac{(0,00028)^{1,5}}{(dh)^{1,5}} = 1 + \frac{410^{-5}}{dh^{1,5}}$$

Les cotes Z_i sont donc :

$Z_1 = 1{,}800057$ $C'_1 = 1{,}12$

$Z_2 = 1{,}8002$ $C'_2 = 1{,}151$

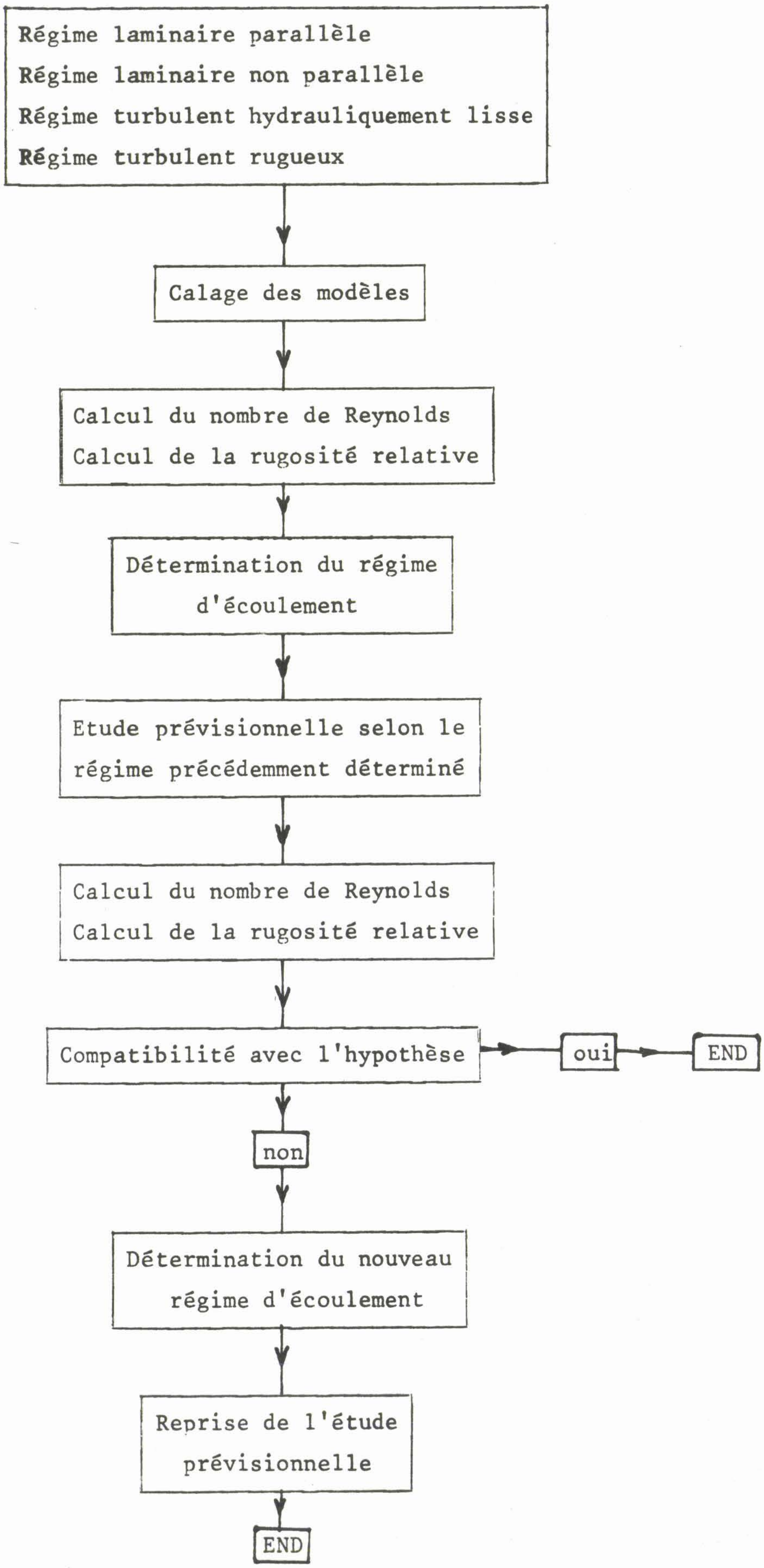
$Z_3 = 1{,}801$ $C'_3 = 1{,}229$

$Z_4 = 1{,}8185$ $C'_4 = 1{,}37$

6-5 Conclusion

Il conviendra donc d'être très prudent quand on effectuera une étude prévisionnelle ; en effet, une variation de la cote peut engendrer un changement de régime d'écoulement. Il faudra donc vérifier si le résultat, caractérisé par le nombre de Reynolds et la rugosité relative, n'est pas en contradiction avec l'hypothèse faite au départ ; auquel cas, il faudra recommencer le calcul avec une hypothèse plus adéquate.

L'ordinogramme suivant synthétise le déroulement de l'étude.


Régime laminaire parallèle
Régime laminaire non parallèle
Régime turbulent hydrauliquement lisse
Régime turbulent rugueux
Calage des modèles
Calcul du nombre de Reynolds
Calcul de la rugosité relative
Détermination du régime d'écoulement
Etude prévisionnelle selon le régime précédemment déterminé
Calcul du nombre de Reynolds
Calcul de la rugosité relative
Compatibilité avec l'hypothèse
oui
END
non
Détermination du nouveau régime d'écoulement
Reprise de l'étude prévisionnelle
END

VII. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'HYDRODISPERSION EN MILIEU FISSURE

7-1 Définition (d'après G. DE MARSILY, cours d'hydrogéologie 1980, ENSMP)

L'hydrodispersion est un ensemble de phénomènes mécaniques et physico-chimiques responsables de l'éloignement dans le temps et dans l'espace de particules qui étaient, à l'origine, voisines.

Equation de la dispersion :

elle a comme hypothèse de base la conservation de la masse :

$$m = \underbrace{\int \omega C dv}_{1} + \underbrace{\int_V \omega' C' dv}_{2} + \underbrace{\int_V (1-\omega) C'' dv}_{3} \qquad m = \int_V \omega_c C dv + \int_V \omega' C' dv + \int_V (1-\omega) C'' dv$$

Le terme (1) exprime la masse relative à la concentration C de la phase fluide mobile, le terme (2) celle relative à la concentration C' de la phase fluide immobile, le terme (3) celle relative à la concentration C" au niveau du solide.

La variation de masse dans le temps $\frac{dm}{dt}$ résulte de trois phénomènes qui sont la convection, la diffusion moléculaire, la dispersion cinématique ; on peut écrire :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\partial \omega_c C}{\partial t} + \frac{\partial \omega'}{\partial t} + \partial \frac{(1-\omega) C''}{\partial t} = - \operatorname{div}(C\vec{V}) + \operatorname{div}\left[\omega_c \overrightarrow{\mathrm{grad}} C (\overline{\overline{D}}_m + d)\right] + \operatorname{div}\left[\omega' d \, \overrightarrow{\mathrm{grad}} C'\right]$$

$\overline{\overline{D}}_m + d = \overline{\overline{D}}$ est le tenseur de dispersion apparent ou équivalent.

$$\overline{\overline{D}}_m = \begin{pmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_T \end{pmatrix}$$

D_L : Coefficient de dispersion longitudinale ($L^2\ T^{-1}$)

D_T : Coefficient de dispersion transversale ($L^2\ T^{-1}$)

d : Coefficient de diffusion moléculaire

ω : Porosité

ω_c : Fraction d'eau mobile ou teneur en eau mobile = V_{wm}/V_T

ω : Fraction d'eau immobile ou teneur en eau immobile : V_{wim}/V_T

7-2 La dispersivité

Le tenseur de dispersion peut se mettre sous la forme :

$$\overline{\overline{D}} = \begin{vmatrix} \alpha_L & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_T \end{vmatrix} \times V_e$$

pour un intervalle de nombre de Peclet défini par O. PFANKUCH.

V_e : vitesse effective

α_L : dispersivité longitudinale (L)

α_T : dispersivité latérale (L)

α_L et α_T seraient des caractéristiques intrinsèques du terrain. Or, DIEULIN (1980) propose l'expression suivante :
$D_L = V_e^{3/2} \times g(x)$ ou $g(x)$ est une caractéristique intrinsèque du terrain ; ceci d'après des études sur colonne (écoulement monodimensionnel uniforme) et sur terrain alluvionnaire (écoulement bidimensionnel uniforme).
En effet, il a étudié le rapport $\frac{D_L(t)}{V_e} = \alpha_L$ en fonction de la distance $V_e xt$ et il montre que α_L n'est pas indépendante de la vitesse.

7-3 Dispersion en milieu fissuré à matrice imperméable et poreuse

L'équation de dispersion établie précédemment reste valable pour le milieu fissuré.
Le seul mécanisme de migration dans la matrice est la diffusion moléculaire. Si ω_m est la porosité de la matrice et C' la concentration du traceur dans l'eau retenue dans la matrice, la masse échangée par unité de surface de contact entre les deux milieux est $\phi'_{d_m} = -\omega_{d_m} \overrightarrow{\text{grad}} C'$.
L'équation de dispersion devra tenir compte de ce flux échangé qui sera introduit comme terme source dans l'équation (DE MARSILY, 1980)

$$\text{div}\,(\omega_c \,\overline{\overline{D}}\, \overrightarrow{\text{grad}}\, C - C\vec{V}) = \omega_c \frac{\partial c}{\partial t} + \gamma\phi'_{dm}$$

$$\gamma = \frac{\text{aire des plans de fissures}}{\text{volume du milieu}}$$

Si l'on admet qu'il y a linéarité entre C et C', on peut écrire :

$$\text{div}\,(\omega_c \,\overline{\overline{D}}\, \overrightarrow{\text{grad}}\, C - C\vec{V}) = \omega_c \left(1 + \frac{\gamma K'}{\omega_c}\right) \frac{\partial c}{\partial t}$$

$R = 1 + \frac{\gamma K'}{\omega}$ est le coefficient de retard.

7-4 Quelques valeurs de dispersivité pour le milieu fissuré

Peu de valeurs de dispersivité sont connues pour le milieu fissuré :
Basaltes (AhlSTRom et al cité par DE MARSILY 1978) : $\alpha_L = 30$ m
$\alpha_T = 20$ m

Basaltes et couches sédimentaires intercalaires (ROBERTSON (1974) cité par G. DE MARSILY 1978) : $\alpha_L = 91$ m
$\alpha_T = 137$ m

Calcaire fissuré (G. ROVE 1978) : α_L = 12 m

Craie du Sénonien (POREL 1982) : 0,17 < α_L < 4,51

La méthode d'obtention de la dispersivité est inqiquée en annexe 3.

DEUXIEME PARTIE

UTILISATION DES LOIS DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE L'HYDRODISPERSION POUR L'ETUDE DES EAUX SOUTERRAINES DE L'AVESNOIS

VIII. TRAITS GENERAUX DE LA GEOLOGIE ET DE L'HYDROGEOLOGIE DE L'AVESNOIS

8-1 Géologie

L'Avesnois fait partie d'un ensemble situé à la terminaison occidentale des Ardennes, et plus particulièrement, à la bordure sud du synclinorium de Dinant. Lors de la phase asturienne de l'orogenèse hercynienne, les terrains primaires furent plissés en petits synclinaux et anticlinaux de direction générale Est-Ouest puis faillés.
Le Trias et le Jurassique sont absents, le Wealdien est conservé dans des poches du socle paléozoïque calcaire, principalement dans des dépressions situées au contact de terrains calcaires et de terrains pélitiques. Les sédiments déposés lors de la transgression crétacée sont discordants sur le primaire. Le pays a connu un épisode continental marqué par des dépôts lacustres ou fluviatiles du Landenien (régression fin crétacé). La transgression marine du tertiaire s'est produite pendant l'Yprésien supérieur (Cuisien) dont il subsiste des lentilles sableuses.

8-2 Hydrogéologie

Plusieurs aquifères sont présents en Avesnois :
- l'aquifère du Dévonien moyen : la porosité des calcaires frasniens et givetiens est faible, mais grâce à leur fracturation, ils contiennent une nappe assez bien exploitée.
- l'aquifère du Fammenien : le Fammenien, constitué de pélites, grès et psammites était considéré comme imperméable. A l'affleurement, les schistes sont fissurés et altérés ce qui permet l'existence d'une nappe limitée en profondeur.
- l'aquifère du Dinantien : lors de la phase asturienne, le Dinantien fut plissé pour donner un ensemble de synclinaux de direction Est-Ouest. Chacune de ses formations est composée de calcaires et dolomie et contient une nappe dont la circulation s'effectue par les fissures.
- l'aquifère du Turonien : le Crétacé, transgressif sur le socle primaire, contient dans ses parties inférieure et moyenne des bancs calcaires séparés par d'épaisses couches de marnes. La nappe est localisée au niveau de ces calcaires.

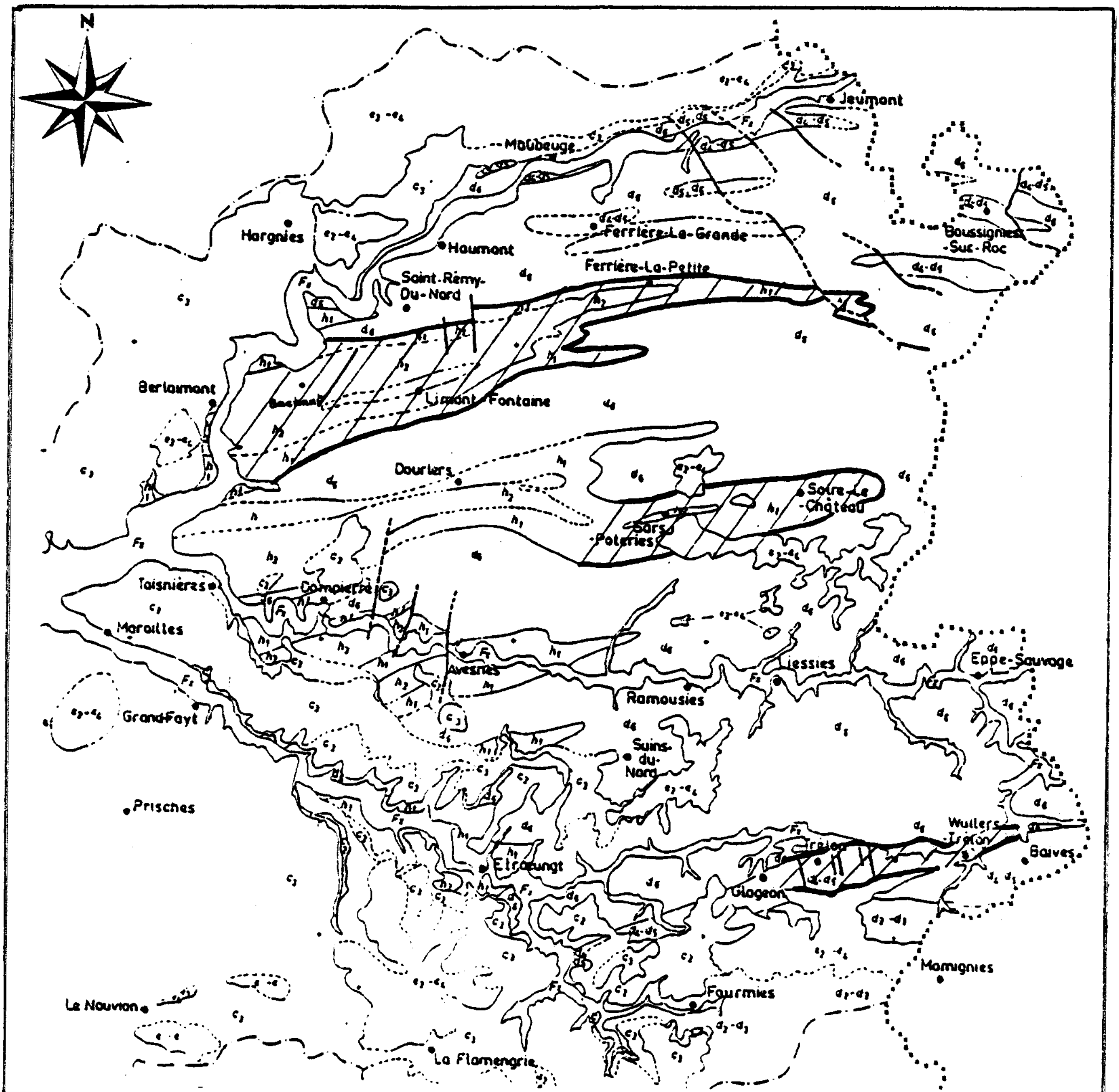
- l'aquifère des sables tertiaires : les massifs sableux sont souvent localisés au niveau des poches de dissolution de la surface du primaire. Ils affleurent pourtant à SARS-POTERIES et WALLERS-TRELON. Ils possèdent des perméabilités très faibles dues à leur taux élevé en matériaux argileux d'où leur utilisation comme substratum de décharge.
- l'aquifère des alluvions : seules les alluvions de la Sambre sont réellement aquifères.

			Aquicludes	Aquifères
CENOZOIQUE	quaternaire	Holocène		Alluvions récentes ([illegible]2)
		Pleistocène	Limons des plateaux (LP)	
	tertiaire	Eocène		Yprésien (L4)
		Paléocène		Landenien (L2)
MESOZOIQUE	Secondaire	Crétacé	Cénomanien (c1-c2)	Turonien (C3)
PALEOZOIQUE	Primaire	Carbonifère		Dinantien (h1-h2)
		Dévonien	Famennien (d6) Couvinien (d3) Emsien (d2)	Frasnien (d5) Givétien (d4)

Tableau 1 - Principaux aquifères de l'Avesnois.

Les secteurs étudiés (figure 2) sont :

- le synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite
- le synclinal de Sars-Poteries
- le monoclinal de Trélon-Wallers-Trélon.




secteurs étudiés

5 km

figure 2 -CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE DE L'AVESNOIS-
(d'après Delporte 1979)

IX. LE SYNCLINORIUM DE BACHANT

9-1 Géologie

9-11 Stratigraphie

Dès 1880, J. GOSSELET a étudié la stratigraphie des secteurs de Maubeuge et de Bachant. Au niveau des formations primaires, il a reconnu :

Le Fammenien : Il est constitué successivement de schistes* feuilletés qui affleurent à Marpent, Maubeuge, Ostergnies, Colleret et Hautmont ; de psammites qui sont des grès micacés, tantôt en feuillets minces, tantôt en bancs volumineux ; et de schistes argileux accompagnés de bancs calcaires compacts, gris à bleu à structure sublamellaire due à la présence de nombreuses tiges d'encrines (schistes et calcaire d'Etroeungt).

Le Carbonifère : J. GOSSELET y a reconnu huit formations qui sont successivement :

- le calcaire d'Avesnelles qui est un calcaire noir surmonté de shistes très fissiles
- "le petit granite" qui est un calcaire à encrines
- le calcaire de Waulsort qui est un calcaire rose à noyaux spathiques
- le calcaire de Bachant qui est un calcaire noir, compact ou subgrenu dont les bancs peuvent être épais ou mince ; cette formation a été étudiée ultérieurement en détail par CARPENTIER (1913) et DERVILLE (1952) qui montrent que ce calcaire présente de grande variation tant au niveau du faciès que de la faune
- la dolomie de Namur qui alterne avec des bancs calcaires
- le calcaire du Hauts-Banc qui est un calcaire gris blanc alternant avec des couches dolomitiques
- le calcaire de Limont qui est un calcaire blanc ou rosé et enfin le calcaire de St Rémy-Chaussée qui est un calcaire noir ou blanc, à banc dolomitique, fendillé ; ce calcaire peut présenter un aspect véritablement brèchique lorsque les fentes sont nombreuses.

De 1960 à 1970, C. DELATTRE, B. POLVECHE, B. et G. WATERLOT ont repris les travaux de J. GOSSELET et ont abouti à une description plus détaillée du carbonifère qui est divisé en quatre sous-étages qui sont :

*Le mot schiste est employé pour définir des formations pelitiques ; c'est un vocabulaire régional car aucun métamorphisme n'est apparent dans la zone étudiée.

Le Tournaisien constitué du calcaire d'Avesnelles, du petit granite, du calcaire bleu à phtanites , et de la dolomie du camp de Cœsar qui correspond au niveau stratigraphique au calcaire de Waulsort de GOSSELET.

Le Viséen inférieur qui est constitué du calcaire de Bachant et d'un calcaire dolomitique qui correspond à la dolomie de Namur de GOSSELET.

Le Viséen moyen constitué du calcaire de fontaine qui correspond au calcaire du Haut-Banc de GOSSELET

Le Viséen supérieur constitué du banc d'or (brèche pyriteuse), du calcaire de Limont et du calcaire de St Hilaire qui correspond au calcaire de St Rémy Chaussée de J. GOSSELET. Le sommet du Viseen supérieur est caractérisé par les schistes de Queue-Noir-Jean dont l'aspect charbonneux annoncé les formations namuriennes.

Seul le banc d'or n'avait pas été observé par J. GOSSELET. Il convient de signaler que GOSSELET n'avait pas distingué d'étage de passage entre le Fammenien et le Tournaisien ; en effet il avait placé les schistes et calcaires d'Etroeungt dans le Fammenien ; or cette zone d'Etroeungt contient des faunes dévoniennes, notamment au niveau des schistes, et des faunes dinantiennes au niveau des calcaires (F. LETHIERS 1982). Il a donc semblé logique de désigner la zone d'Etroeungt comme une zone intermédiaire entre le Fammenien et le Tournaisien : le Strunien. Actuellement on distingue deux types de Strunien :

Le Strunien s.s : schiste et calcaire d'Etroeungt.

Le Strunien s.l ou Strunien au sens de CONYL (1964) : schiste et calcaire d'Etroeungt et schistes de l'épinette qui sont une épaisse formation comprise entre le Fammenien et le Strunien s.s

Le fait que les schistes de l'Epinette présentent plus d'affinités paléontologiques avec le Strunien s.s qu'avec le Fammenien, et leur caractère transgressif dans l'ensemble du bassin franco-belge après la régression du Fammenien supérieur expliquent la position logique des schistes de l'Epinette à la base du Strunien.

La figure (4) synthétise les données stratigraphiques du synclinorium.

9-12 Paléogéographie et tectonique

Les schistes et psammites (sédiments détritiques) du Fammenien indiquent une phase regressive. Le passage entre le Dévonien et le Carbonifère

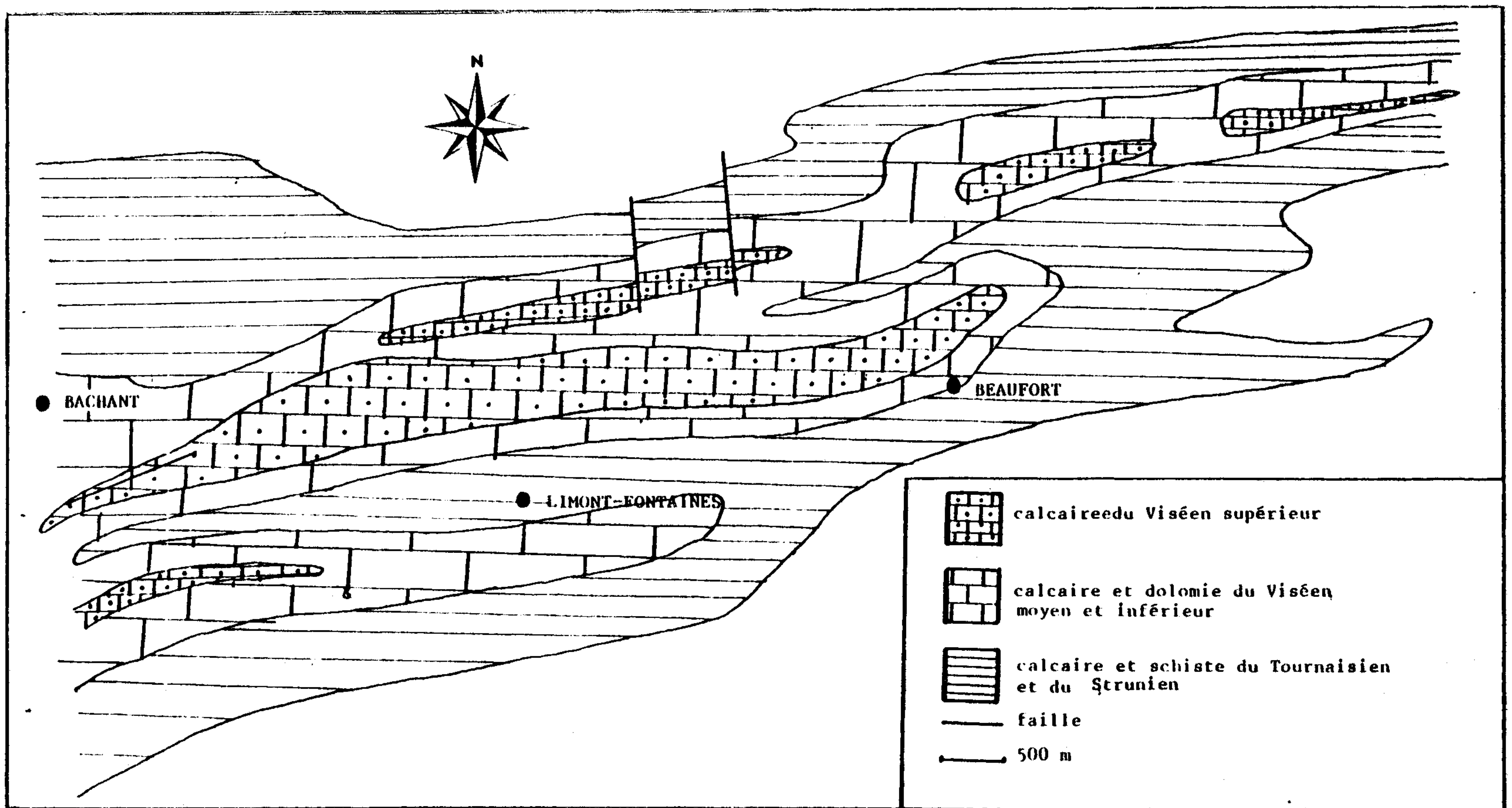


figure 3- SCHEMA GEOLOGIQUE DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

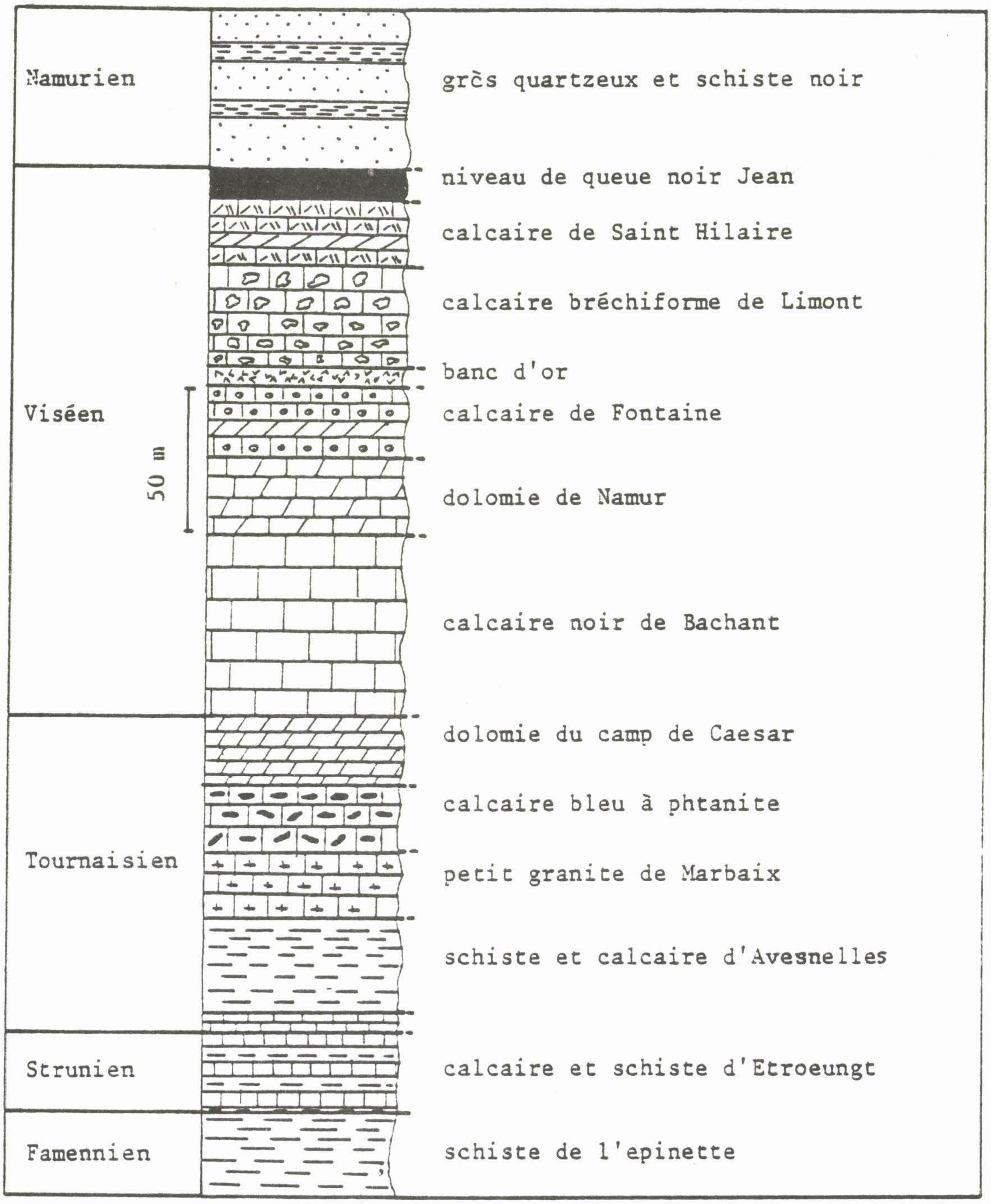


figure 4 - COLONNE STRATIGRAPHIQUE DU SYNCLINORIUM DE BACHANT- (d'après la notice de la carte géologique d'Avesnes à 1/50 000)

est représenté par le Strunien qui est un faciès de transition entre ces deux périodes, tant sur le plan paléontologique que sédimentologique. L'assise, forte de 25 mètres, montre une intercalation progressive de schistes calcareux et des bancs de calcaire pur qui deviennent prédominant vers le sommet de l'étage et annoncent la grande transgression dinantienne.
Au Dinantien commence l'importante transgression marine carbonifère ; les apports détritiques ont alors pratiquement cessé et il n'y aura plus qu'une sédimentation chimique.
Le Tournaisien, épais de 70 m, est marqué par une légère régression marquée par les schistes d'Avesnelles dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 20 m. La diversité des faciès du Viséen inférieur : calcaire fin de Bachant (eaux calmes), calcaires organoclastiques ou oolithiques (eaux agitées) montre la mobilité du fond de la mer ; cette instabilité produit aussi des glissements et des plis synsédimentaires ; son épaisseur est d'environ 45 m. Au Viséen moyen, il y eut d'abord le comblement des dépressions avec le dépôt d'un calcaire massif très pur pouvant parfois contenir des niveaux de calcaire dolomitique. Le sommet de l'assise montre quelquefois une texture oolithique indiquant un remaniement des sédiments en mer peu profonde et agitée, son épaisseur est de 45 m. Le Viseen supérieur est caractérisé par une rythmiticité de sédimentation ; les brèches intraformationnelles résultent de déformations en écho de la phase sudète. L'envahissement progressif par des sédiments détritiques annonce le régime terrigène du Namurien ; son épaisseur est d'environ 45 m. A la fin du Carbonifère, la phase asturienne entraîne la déformation de toute la série primaire ; le synclinorium de Dinant vient chevaucher le synclinorium de Namur par l'intermédiaire de la Faille du Midi. Des ondulations provoquées dans ce même synclinal naîtront les différentes unités paléozoïques de l'Avesnois dont l'une est le synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite. De ce fait la structure du synclinorium est composée d'une alternance d'anticlinaux et de synclinaux ; on peut y distinguer cinq synclinaux :

- synclinal de Fontaine
- synclinal d'Eclaibes
- synclinal de Berlaimont
- synclinal de Bachant
- synclinal de Ferrière-La-Petite

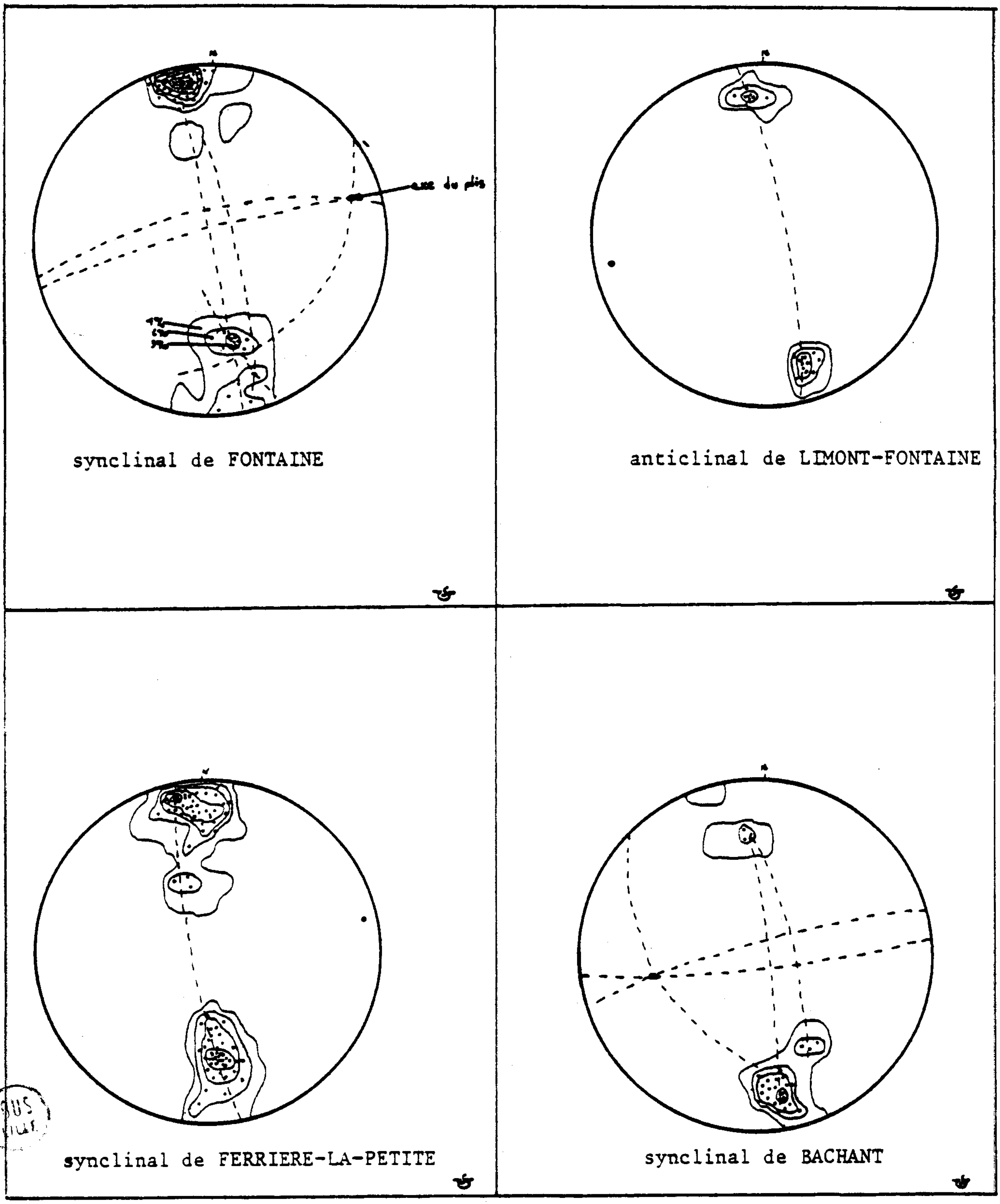


figure 5 -REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES AXES SYNCLINAUX ET ANTICLINAUX DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

9-13 Etude des plis

L'étude de la stratification (figure 5) au niveau de charnières de plis a montré de faibles surélévations d'axe de plis, certains pouvant être interprété comme des plis coniques. De plus, un certain étirement subnormal des zones d'isodensité au grand cercle joignant les pôles des stratifications semblerait indiquer une reprise des plis selon une déformation Est-Ouest.

Durant la période d'émersion qui suivit la phase asturienne de l'orogenèse hercynienne, le relief existant est aplani et une karstification s'opère. A la fin du Jurassique, la phase néocimérienne déforme une nouvelle fois le socle paléozoïque qui acquiert sensiblement sa configuration actuelle.

DENOMINATION	AZIMUT DE L'AXE
synclinal de Ferrière-La-Petite	80°/8°
anticlinal de Limont-Fontaine	260°/10°
synclinal de Fontaine	72°/10°
synclinal de Bachant	258°/38°

tableau 2-AZIMUT DE L'AXE DES PLIS
DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

9-2 Fracturation

9-21 Introduction

L'étude de la fracturation du synclinorium a été entreprise afin de déterminer certains paramètres tels que les conductivités hydrauliques directionnelles qui interviennent dans le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère ; en effet, les calcaires du synclinorium étant pour la plupart compacts, on peut émettre l'hypothèse que la circulation des eaux souterraines s'effectue essentiellement au niveau des fissures. Cette étude, portant sur la répartition directionnelle, sur la fréquence et sur l'ouverture des fissures, va permettre de cerner les modalités de l'écoulement au niveau du synclinorium.

9-22 Définitions (d'après J.P.COLBEAUX 1982)

"Au cours des dernières décennies la définition des fractures s'est vue orientée vers la différenciation basée sur l'échelle d'observation ; le terme de diaclase étant réservé à des fractures sans déplacement, le terme de joint étant réservé à des fractures sans ou avec un petit déplacement et désignant par extension toute surface de rupture non cartographiable (KELLEY et CLINTON 1960). Le terme de faille désigne des fractures cartographiables ayant inclus des déplacements".

La nomenclature de J.P. COLBEAUX permet de distinguer :

- les joints (J) qui sont des ruptures simples, d'échelle centimétrique ou métrique
- les joints bien marqués (JBM) qui sont des ruptures bien visibles affectant un ou plusieurs bancs et qui engendrent des blocs faisant saillie sur le front de taille
- les grands joints qui sont des ruptures recoupant tous les bancs sur la hauteur du front de taille
- les joints stratigraphiques ou stratification.

9-23 Méthode de relevé sur le terrain

Pour chaque joint, ont été mesurés pendage et direction, ouverture (écartement des épontes), espacement entre joints d'une même famille (joints de même pendage et direction). De plus a également été relevé un remplissage éventuel de calcite, ou d'argile, un aspect karstique (trace de dissolution) . Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'une boussole à clinomètre et d'un décamètre.

9-24 Etude statistique des données de terrains

Il faut un minimum de 50 mesures par affleurement pour que l'étude statistique soit significative. Les mesures de joints (direction et pendage) ont été reportés sur canevas de Schmidt (hémisphère inférieur) où le plan de joint est représenté par son pôle.

L'estimation de la densité des nuages de points se fait manuellement à l'aide d'une fenêtre représentant 1 % de la surface du canevas* ; le comptage fait, il est alors possible de tracer les zones d'isodensité (fig. 6) qui représentent un nombre de pôle dans 1 % de la surface du stéréogramme.

* *La densité s'exprime en %, 5 % signifie que 5 pôles sont concentrés dans 1 % de la surface totale du stéréogramme, bien qu'il s'agisse d'un abus de langage, cette nomenclature est universellement admise.*

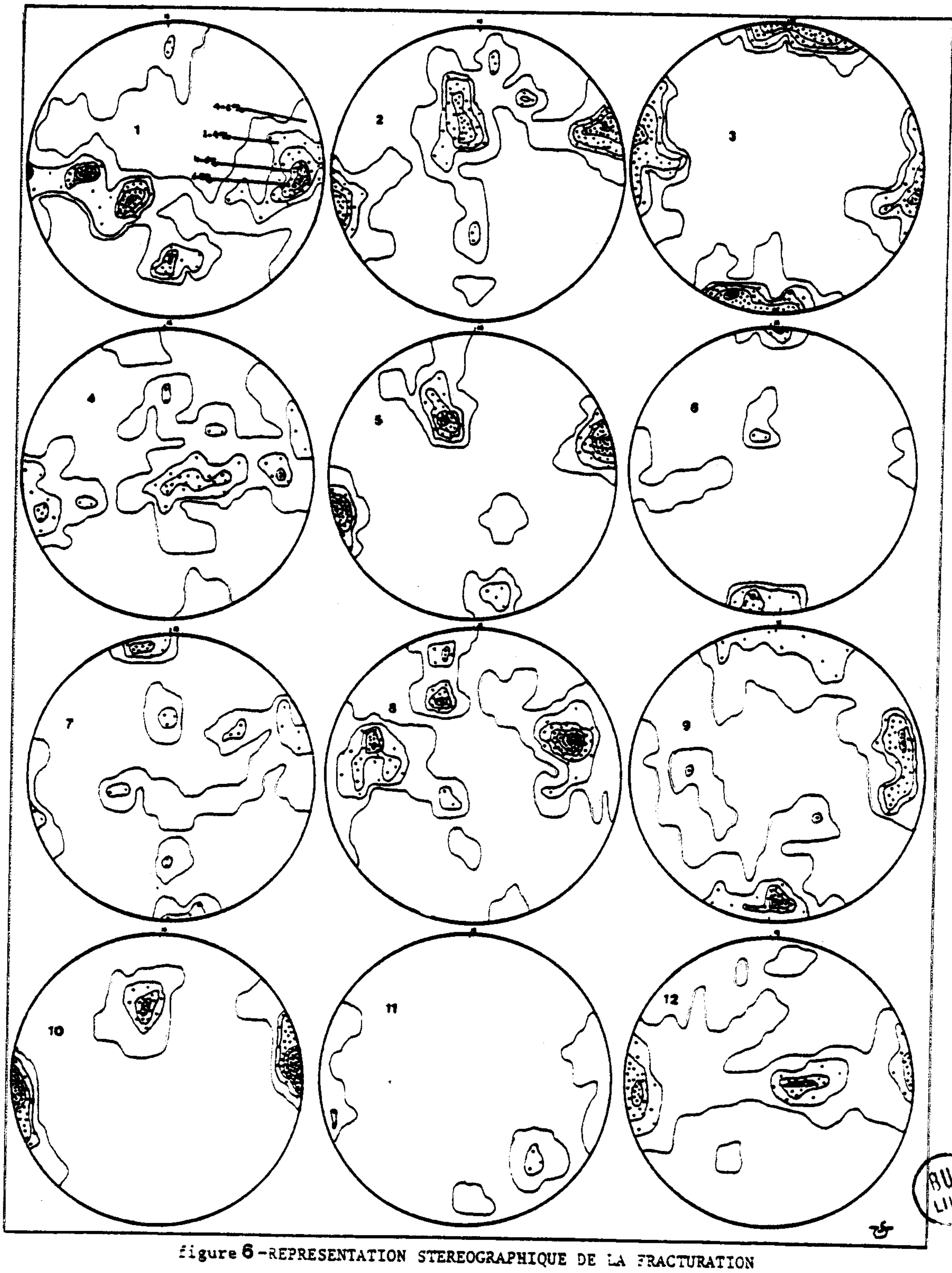


figure 6 -REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DE LA FRACTURATION DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

Les résultats sont ensuite répertoriés sur un tableau (tableau 3) où est indiqué pour chaque famille de joints le pourcentage, le nombre de grands joints, de joints bien marqués, le nombre de joints présentant des traces d'écoulement, la fréquence (L^{-1}), la fréquence des joints ouverts (L^{-1}), l'ouverture (L) et un coefficient de pondération.

PAYS: France		REGION: Avesnois			LIEU DIT: carrière CBS			NOMBRE DE MESURES: 91	
ANTICLINAL	coeur	REMARQUES: karst selon la stratification(E-W) ouverture=0.09cm fréquence=0.02							
	bord								
SYNCLINAL	coeur								
	bord								
MONOCLINAL									
			%	GJ	JBM	KARST	FREQUENCE	FREQUENCE(J.ouvert)	OUVERTURE	PONDERATION
DIRECTIONS ET PENDAGES DES FAMILLES PRINCIPALES DE JOINTS		170-180/W/30-40	7	1	7	0	0.035	0.015	0.001	14.18
		160-180/E/65-90	5	3	7	1	0.115	0.015	0.001	14.81
		160-180/W/65-90	5	3	7	1	0.115	0.015	0.001	14.81
DIRECTIONS ET PENDAGES DES JOINTS ALEATOIRES		85/N/10 130/S/25 150/W/15 160/E/45 63/N/40 30/E/70 40/N/50 55/S/30 135/W/80 150/E/80								

tableau 3-TABLEAU SYNTHETIQUE DES DONNEES DE FRACTURATION-

ce coefficient a été calculé en tenant compte des paramètres suivants :

- contexte géologique : anticlinal (coeur : 0 ; (bord : 5

  synclinal (coeur : 10 ; (bord : 5
- du pourcentage : 10 pour la plus forte densité (22 %)
- nombre de joints bien marqués : 3 pour le plus grand nombre (33)
- nombre de grands joints : 3 pour le plus grand nombre (21)
- fréquence des joints ouverts : 5 pour la plus grande fréquence (0,46)
- l'ouverture : 5 pour la plus grande ouverture (0,05)
- traces de circulation d'eau : 5 pour le plus grand nombre de trace (4).

Ce coefficient, égal au maximum à 46, représente, en fait, une note d'aptitude à la circulation d'eau et n'est à prendre en considération que sur un plan purement qualitatif.

9-25 Schéma structural

Sur ce schéma (fig. 7) sont indiqués les axes synclinaux et anticlinaux ainsi que leur azimut, les failles cartographiées, et la fracturation en représentation stéréographique.

Les familles principales de fractures à forte pente (pendage supérieur à 60°) sont celles de direction 80-90°, 170-180° ; celles à faible pente (pendage inférieur à 45°) sont 70-90°, 170-180°, et, secondairement, 140-150°.

Les failles cartographiées par C. DELATTRE, B. POLVECHE, G. WATERLOT (1967) et B. WATERLOT (1970) ont des directions similaires aux directions de fractures.

La faille de l'Horipette avait été cartographiée par C. DELATTRE, B. POLVECHE et G. WATERLOT (1967) comme une faille de direction N 30°, alors que DASSONVILLE et PLAT (1968) avaient mesuré une direction N 80°.

J'ai mesuré une direction N 80°, corroborée par une famille principale de fractures de même direction.

Les synclinaux et anticlinaux ont une direction 70-80° et montrent des surélévations d'axes. Il a été montré qu'ils sont de types coniques ou cylindriques.

Au niveau de la région, J.P. COLBEAUX vient d'établir (1983), une chronologie relative des phases de déformation qui a permis de dresser un historique de la genèse des fractures et des plis du secteur étudié. Les plis d'axe Est-Ouest sont issus de la phase asturienne de l'orogénèse hercynienne (phase P1), de même que les fractures 170-180° à forte pente, et les fractures 70-90° à faible pente. La phase P2 du permo-trias a généré des plis d'axe Nord-Sud, ce qui explique les surélévations d'axes des plis du secteur, et les fractures 170-180° à faible pente. La phase P3, fini Trias anté Rhétien, a fait rejouer les fractures 70-90° et 170-180° à faible pente. La phase P4, du Miocène a donné naissance aux fractures 80-90° à forte pente. Enfin, à la fin du Pléistocène moyen, la phase P5 a fait rejouer les fractures 170-180° à forte pente et en a généré un nombre très inférieur à celui relatif à la phase P1.

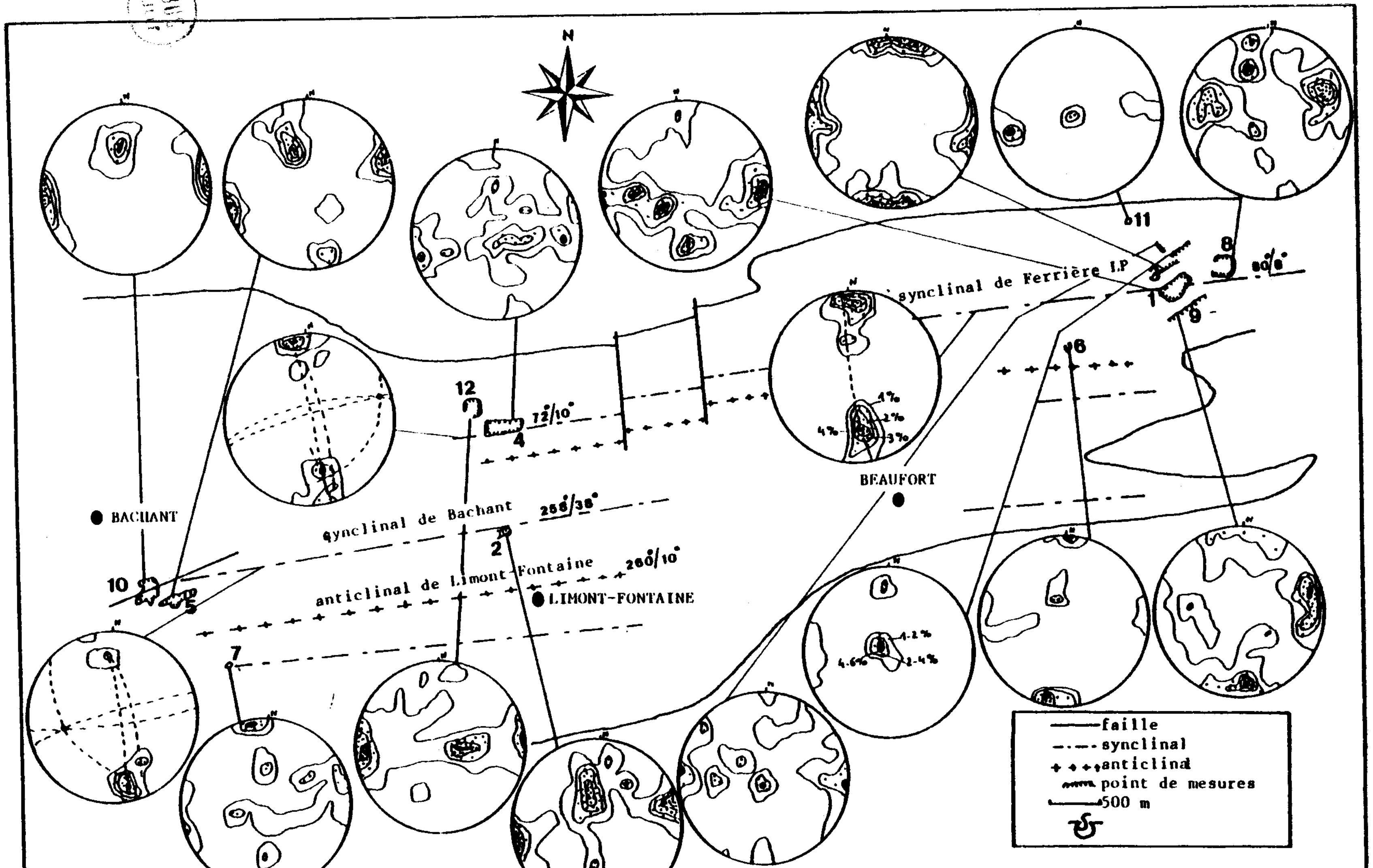


figure 7-SCHEMA STRUCTURAL DU SYNCLINORIUM DE BACHANT

9-26 Représentativité des mesures à l'échelle du synclinorium

9-261 Introduction

Dans maints problèmes, on est amené à évaluer les caractéristiques d'une population à partir d'un échantillonnage donné ; même si les échantillons ont été extraits sans aucune sélection, de façon à être représentatifs, les caractéristiques qu'ils fournissent ne sont pas les caractéristiques exactes de la population, elles s'en écartent plus ou moins et il convient d'étudier leurs fluctuations.

9-262 Etude des fluctuations de la fracturation

Les données statistiques permettant ce type d'étude sont indiquées en annexe (5).

L'étude des fluctuations porte sur deux groupes de fractures :

- les fractures à forte pente (pendage $\geq$ 60°)
- les fractures à faible pente (pendage $\leq$ 45°).

Au niveau de chaque groupe, les fluctuations sont étudiées sur les paramètres suivants :

- pourcentage de chaque famille de fractures
- fréquence dans chaque famille de fractures
- écartement des épontes dans chaque famille de fractures.

L'intervalle de confiance est déterminé pour le risque P = 1/5.

. Fractures à forte pente (tableau 4) :

Les familles prépondérantes sont celles de direction 80-90°, 170-180°.

Exemple d'utilisation du tableau :

Pour la famille de direction N 170°, en un point quelconque du synclinorium, le risque est de 1/5 pour que le pourcentage de cette famille soit hors de la fourchette 52,8 % - 12,6 %, pour que la fréquence soit hors de la fourchette 0,08 - 0,032 m^{-1}, pour que l'écartement des épontes soit hors de la fourchette 0,0058m - 0,0025m.

. Fractures à faible pente (tableau 5) :

Les familles prépondérantes sont celles de direction 70-90°, 170-180°.

DIRECTION	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	
MOYENNF	0	3.9	0	5.7	0	0	0	5.3	7.5	5.9	2.3	0	0	0	0	3.4	52.8	13.03	POURCENTAGE
VARIANCE	0	1319	0	253.9	0	0	0	253.6	356.7	588	9039	0	0	0	0	192.5	1652	1098	
INTERVALLE DE CONFIANCE	0	3.56	0	5.09	0	0	0	4.94	7.52	7.92	2.95	0	0	0	0	4.30	12.60	10.29	
MOYENNE	0	.004	0	.003	0	0	0	.009	.009	0	0	0	0	0	0	.009	.082	.007	FREQUENCE
VARIANCE	0	.0001	0	.0001	0	0	0	.001	.0005	0	0	0	0	0	0	.0014	.010	.0003	
INTERVALLE DE CONFIANCE	0	.004	0	.003	0	0	0	.009	.007	0	0	0	0	0	0	.0110	.032	.0056	
MOYENNE	0	35.10^{-5}	0	29.10^{-5}	0	0	0	.002	.001	.0006	.003	0	0	0	0	6.10^{-4}	.0058	.0035	OUVERTURE
VARIANCE	0	15.10^{-7}	0	15.10^{-7}	0	0	0	5.10^{-5}	10^{-5}	6.10^{-6}	14.10^{-5}	0	0	0	0	6.10^{-6}	$6.6.10^{-5}$	.00015	
INTERVALLE DE CONFIANCE	0	3.10^{-4}	0	3.10^{-4}	0	0	0	.002	.001	.0007	.003	0	0	0	0	7.10^{-4}	.0025	.0038	

tableau 4-REPRESENTATIVITE DES MESURES A L'ECHELLE DU SYNCLINORIUM DE BACHANT POUR LES FRACTURES A FORTE PENTE-

DIRECTION	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	
MOYENNE	5.88	0	0	0	0	0	8.8	8.14	18.82	0	0	0.9	0	0	4.38	0	7.23	21.26	POURCENTAGE
VARIANCE	588	0	0	0	0	0	698	538	1523	0	0	15.9	0	0	178	0	602	1555	
INTERVALLE DE CONFIANCE	7.5	0	0	0	0	0	8.2	7.3	12.1	0	0	1.15	0	0	4.14	0	7.62	12.24	
MOYENNE	6.10^{-5}	0	0	0	0	0	8.10^{-4}	.001	5.10^{-4}	0	0	6.10^{-5}	0	0	3.10^{-4}	0	1.10^{-4}	$5.3.10^{-4}$	FREQUENCE
VARIANCE	6.10^{-4}	0	0	0	0	0	7.10^{-6}	2.10^{-6}	6.10^{-6}	0	0	6.10^{-7}	0	0	15.10^{-7}	0	10^{-7}	15.10^{-7}	
INTERVALLE DE CONFIANCE	7.10^{-5}	0	0	0	0	0	8.10^{-4}	.001	7.10^{-4}	0	0	7.10^{-5}	0	0	$3.7.10^{-4}$	0	10^{-4}	$3.2.10^{-4}$	
MOYENNE	.003	0	0	0	0	0	.01	.016	.020	0	0	.0006	0	0	.01	0	.01	.016	OUVERTURE
VARIANCE	$.10^{-4}$	0	0	0	0	0	10^{-3}	.002	.002	0	0	6.10^{-6}	0	0	.001	0	.001	.001	
INTERVALLE DE CONFIANCE	.008	0	0	0	0	0	.01	.014	.014	0	0	7.10^{-4}	0	0	.009	0	.01	.010	

tableau 5-REPRESENTATIVITE DES MESURES A L'ECHELLE DU SYNCLINORIUM DE BACHANT POUR LES FRACTURES A FAIBLE PENTE-

9-263 Commentaires

Les tableaux rendent compte de la répartition moyenne, homogénéisée, de chaque famille à l'échelle du synclinorium ; or, une famille qui a un pourcentage moyen faible, peut avoir, localement, un pourcentage réel très important ; évidemment, si en ce point, on ne dispose d'aucun affleurement, il faudra se contenter du pourcentage moyen représentatif. Il convient donc d'essayer de trouver des "indicateurs" de fracturation qui rendent compte du pourcentage réel de fractures. Si ces indicateurs s'avèrent représentatifs de l'état de fracturation, ils pourront permettre de résoudre le problème du manque d'affleurement, problème souvent posé dans les régions telles que l'Avesnois où la couverture végétale est importante.

9-3 Corrélation entre fracturation et géomorphologie

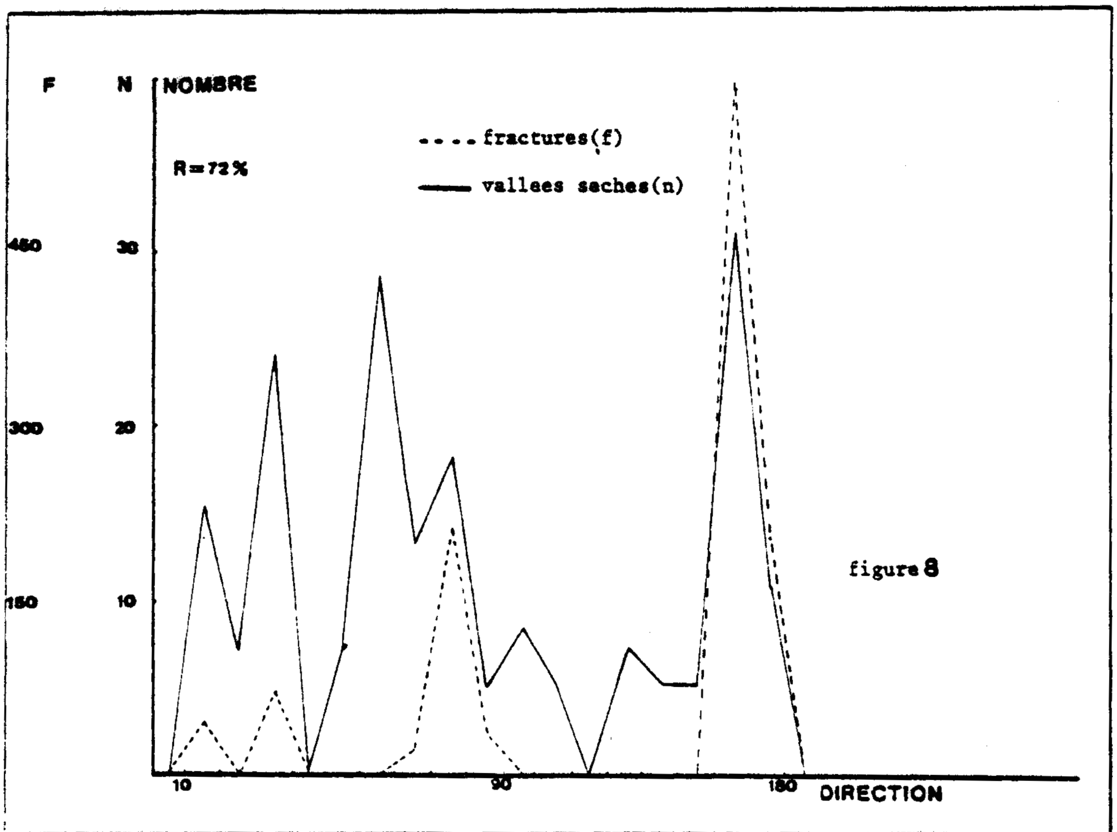
9-31 Introduction

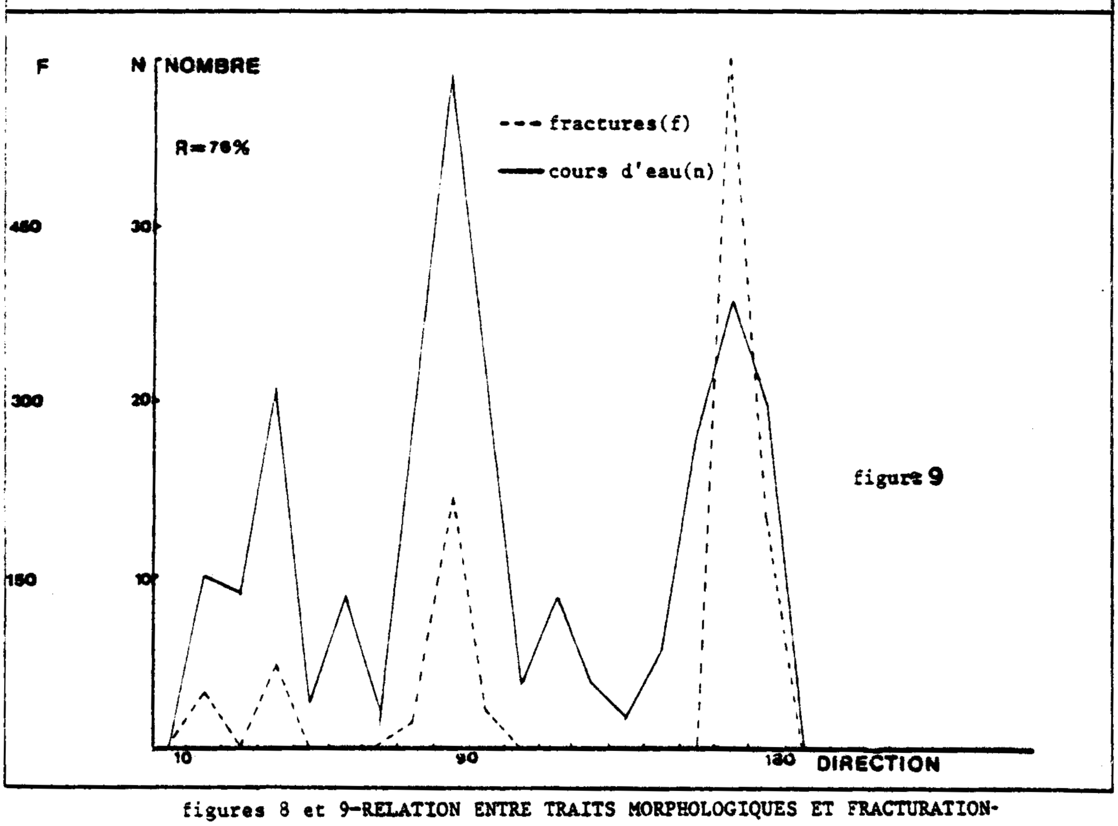
DAUBREE(1893) émit l'hypothèse d'une relation entre fracturation et géomorphologie. J.P. COLBEAUX et J. SOMME (1981) furent les premiers à effectuer ce type d'étude, de façon qualitative, sur le substrat crayeux du Nord de la France (feuille de DESVRES 1/50.000). Ils en ont déduit qu'au 1/50.000, la correspondance entre géomorphologie et fracturation n'est pas toujours évidente, alors qu'à plus grande échelle, la correspondance était sans équivoque. Dans ce chapitre, à la suite de ces auteurs, des comparaisons entre les paramètres suivants : fracturation, vallée sèche et cours d'eau sont présentés, tout d'abord de manière qualitative à l'aide des histogrammes comparés puis de façon quantitative à l'aide de lois statistiques.

9-32 Etude qualitative

Les vallées sèches ont été relevées et comptabilisées pour chaque intervalle de 10° sur les cartes au 1/25.000 de Maubeuge, Avesnes et Trélon, au niveau du synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite. Pour les cours d'eau, les mesures ont été effecutées au niveau des ruisseaux d'Eclaibes, d'Ecuelin, Desprès, de Waremme, de Glarge, de la Carnoye, des rivières la Solre,le Quievelon,le Cligneux.

La méthode de travail consiste à mesurer les directions de vallées sèches et des coudes brusques des cours d'eau, de faire un comptage par famille et de les comparer aux nombres des familles à forte pente





figures 8 et 9-RELATION ENTRE TRAITS MORPHOLOGIQUES ET FRACTURATION-de même direction. Les résultats sont présentés sur les figures 8 et 9. Les graphes comparés suggèrent une liaison, en direction, entre cours d'eau, vallées sèches et fractures.

9-33 Etude quantitative

Introduction :

Dans la nature, la plupart des paramètres peuvent à la fois ne pas être indépendants et ne pas être liés par une relation fonctionnelle qui pour un paramètre x lui associe un et un seul paramètre y, ce qui revient à dire que la probabilité d'obtenir la valeur de l'une des variables à partir de l'autre est égale à 1. Effectivement, la plupart des variables sont telles qu'à une valeur précise de x correspondent plusieurs valeurs de y et vice versa, on parle alors de liaison probabiliste ou stochastique. De plus, si la liaison stochastique est une relation linéaire, cette liaison s'appellera corrélation ou liaison corrélative. Un rappel théorique sur les liaisons corrélatives est présenté en annexe (6).

9-331 Relation entre fracturation et cours d'eau

DIRECTION	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
NOMBRE DE FRACTURES	0	48	0	72	0	0	0	24	216	36	0	0	0	0	0	0	600	204	
NOMBRE DE COUDES DE COURS D'E-AU	2	10	9	21	3	9	2	20	39	20	4	9	4	2	6	8	26	20	

tableau 6-RELATION ENTRE FRACTURATION ET COURS D'EAU-

Aux valeurs nulles de certaines familles de fractures, correspondent diverses valeurs non nulles de cours d'eau dont la limite supérieure est 9. L'étude de la relation portera sur les nombres strictement positifs de fractures et les nombres de coudesde cours d'eau associés.
Les nombres de fractures seront désignés par la variable x, les nombres de coude de cours d'eau par la variable y.
De plus, la stratification de direction 70-100° peut influencer la variable y, il faut donc, dans un premier temps éliminer de l'étude ces familles .

moyennes : $\bar{x} = 231$, $\bar{y} = 19{,}25$

somme des carrés des écarts pour x : 195660

somme des carrés des écarts pour y : 134,75

somme des produits des écarts $(\bar{x}-x_i)\ (\bar{y}-y_i)$: 3885

coefficient de régression de y en x : 0,02

coefficient de régression de x en y : 0,034

coefficient de corrélation : 0,76

coefficient de Student : 2,34

probabilité d'erreur : 0,084

intervalle de confiance ex = 248,36

intervalle de confiance ey = 6,56

régression de y en x : $y = 0{,}02\ x + 14{,}63 \pm 6{,}56$

régression de x en y : $x = 26{,}3\ y - 324 \pm 248{,}36$

les droites de régression sont représentées sur la figure

Pour les familles 70-80°, 80-90°, 90-100°, il convient d'étudier l'influence de la stratification en prenant comme hypothèse de travail la validité de la corrélation :

DIRECTION	NOMBRE DE FRACTURES X	NOMBRE DE COUDES OBSERVES Y	CALCULES Y'	ΔY
70-80	24	20	15.11±6	4.86±6
80-90	216	39	18.95±6	20.05±6
90-100	36	20	15.35±6	4.65±6

tableau 7-INFLUENCE DE LA STRATIFICATION SUR LES COURS D'EAU-

y calculé correspond au nombre de coudes dus à la fracturation, Δy indique donc l'influence de la stratification pour ces familles. L'influence de la fracturation est prépondérante pour les familles 70°-80°, 90°-100°, alors que pour la famille 80°-90° l'influence de la stratification est sensiblement la même que celle de la fracturation.

<u>9-332 Relation entre fracturation et vallées sèches</u>

<table>
<tr><td>DIRECTION</td><td colspan="18">0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180</td></tr>
<tr><td>NOMBRE DE FRACTURES</td><td>0</td><td>48</td><td>0</td><td>72</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>24</td><td>216</td><td>36</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>600</td><td>204</td></tr>
<tr><td>NOMBRE DE VALLEES - -SECHES</td><td>0</td><td>15</td><td>7</td><td>24</td><td>0</td><td>7</td><td>29</td><td>13</td><td>18</td><td>5</td><td>8</td><td>5</td><td>0?</td><td>7</td><td>5</td><td>5</td><td>31</td><td>11</td></tr>
</table>

tableau 8-RELATION ENTRE FRACTURATION ET VALLEES SECHES-

L'étude ne portera que sur les valeurs non nulles de fracture.

Les vallées sèches de direction 60°-70°, en nombre important, n'ont pas de correspondance avec la fracturation. On peut émettre deux hypothèses :

- elles sont en relation avec la stratification
- elles sont en relation avec des fractures 60°-70° non observées (il convient de signaler que des études faites par J.P. COLBEAUX sur les terrains primaires du Boulonnais montrent que ces fractures 60°-70° sont en générale fermées et d'espacement minimum décamétrique).

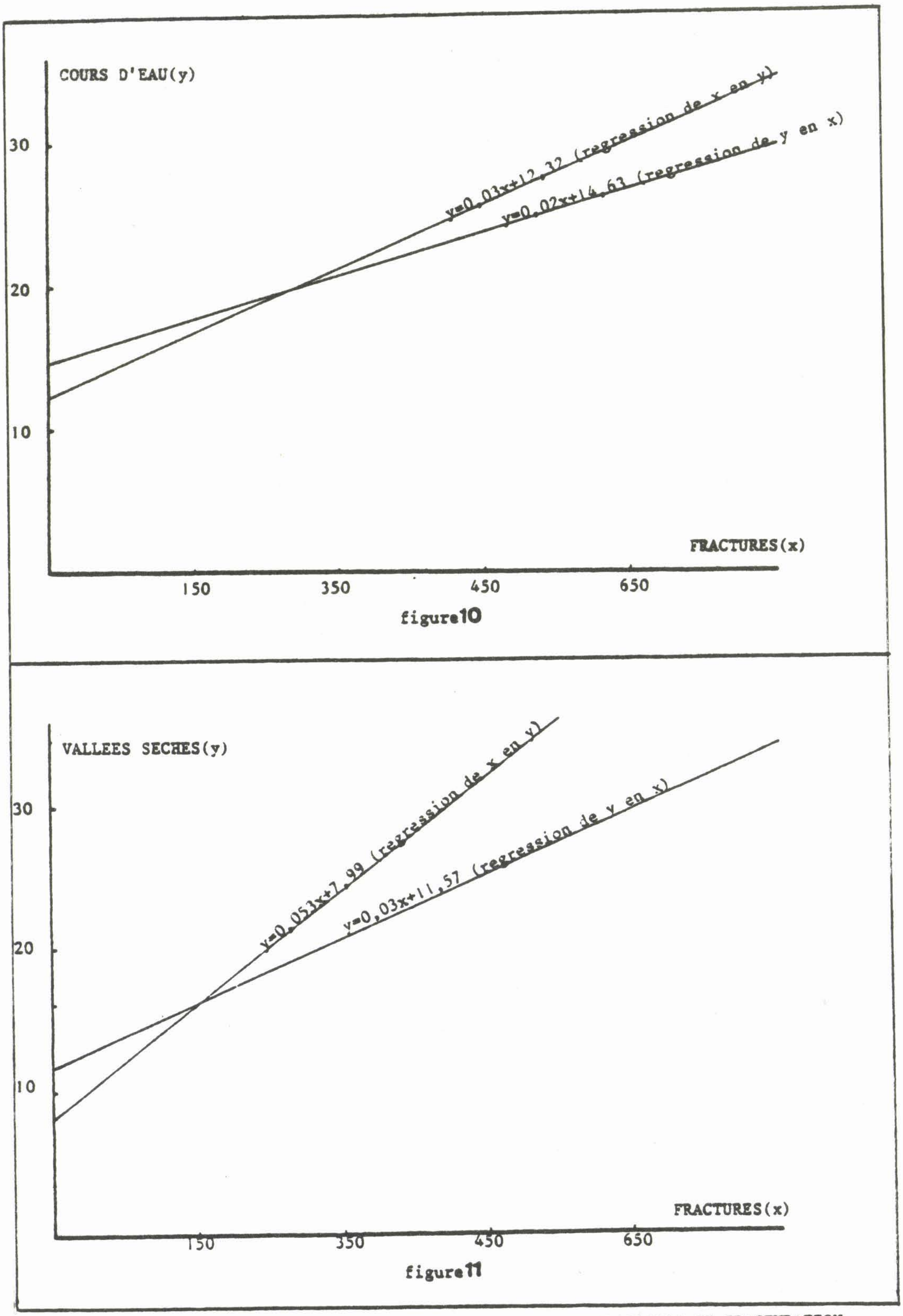
De plus, afin d'éliminer une éventuelle influence de la stratification, les vallées sèches de direction 80°-100° seront provisoirement éliminées.
Le coefficient de corrélation calculé est égal à 66 %, l'équation de la régression de y en x est : y = 0,023 x + 14,85.
Influence de la stratification :

DIRECTION	NOMBRE DE FRACTURES X	NOMBRE DE VALLEES SECHES OBSERVEES Y	CALCULEES Y'	ΔY
70-80	24	13	15.40	-2.4
80-90	216	18	19.80	-1.8
90-100	36	5	15.6	-10.6

tableau 9-INFLUENCE DE LA STRATIFICATION SUR LES VALLEES SECHES-

Δy est toujours négatif, il semble donc que la stratification soit sans influence pour les vallées sèches de directions 80°-100°. Il faut donc tenir compte de ces familles dans l'étude de la corrélation afin d'obtenir un ajustement plus représentatif du couple de variables (x,y) :

coefficient de régression de y en x : 0,03
coefficient de régression de x en y : 17,1
coefficient de corrélation : 0,72
coefficient de Student : 2,25
probabilité d'erreur : 0,079
intervalle de confiance ex : 244,75
intervalle de confiance ey : 8,62
régression de y en x : y = 0,03x + 11,57 ± 8,62
régression de x en y : x = 17,1y - 114,3 ± 244,75



figures 10 et 11-RELATION ENTRE TRAITS MORPHOLOGIQUES ET FRACTURATION-

Les vallées sèches 60-70° étant au nombre de 29, la régression de x en y indique un nombre de fractures de direction 60°-70° compris entre 136 et 626. Le nombre étant important, il semble qu'il faille rejeter l'hypothèse de la non observation. De plus, il est peu vraisemblable que la stratification 80°-100°, sans influence sur les vallées sèches 80°-100°, ait une influence sur les vallées sèches 60-70°. Il faut donc imputer la présence des vallées sèches 60-70° à des paramètres autres que la statification et la fracturation.

9-333 Relation entre vallées sèches et cours d'eau

En prenant les valeurs brutes, donc sans éliminer l'influence de la stratification sur les cours d'eau, on obtient un coefficient de corrélation égal à 0,3 donc faible.
En éliminant l'influence de la stratification sur les cours d'eau, on obtient un coefficient de corrélation égal à 0,68, un coefficient de Student de 2,074.
La régression de y en x est : y = 0,41 x + 11,48 ± 5,6
La régression de x en y est : x = 1,31 y - 4 ± 9.

	COEFFICIENT DE CORRELATION	DROITE DE REGRESSION DE X EN Y	DROITE DE REGRESSION DE Y EN X	RISQUE	INTERVALLE DE CONFIANCE	
					Y EN X	X EN Y
FRACTURE COURS D'EAU	76%	Y=0.02X + 14.63	X=28.8Y - 324	0.084	6.56	248.36
FRACTURE VALLEE SECHE	71%	Y=0.03X + 11.57	X=17.1Y -114.3	0.079	8.62	244.75
VALLEE SECHE COURS D'EAU	68%	Y=0.41X + 11.48	X=1.31Y -4	0.095	5.6	9

tableau 10-TABLEAU SYNTHETIQUE DES RELATIONS ENTRE TRAITS MORPHOLOGIQUES ET FRACTURATION-

9-334 Exemples d'utilisation des droites de régression

Exemple 1 (fig. 10) :

Pour un nombre de fracture égal à 150, pour une direction donnée, le nombre de variations brusques de cours d'eau de même direction est compris entre 11 et 24 avec un risque de 0,084.

(n = 50 $11 < x < 24$). Ce qui signifie que le nombre de coudes de cours d'eau de même direction que la fracturation à 91,6 chances sur 100 d'être compris entre 11 et 24.

Exemple 2 (fig. 11) :

Pour un nombre de coudes de cours d'eau égal à 25, pour une direction donnée, le nombre de fractures de même direction à 91,6 chances sur 100 d'être compris entre 196 et 657.

9-34 Conclusion

A l'échelle 1/25.000, on peut dire que la corrélation entre fracturation et géomorphologie existe. La quantification de cette corrélation, et de son risque d'erreur associé, permet, à partir de la géomorphologie, de définir quantitativement, l'état de fracturation du secteur étudié. Une simple étude sur carte topographique permet donc d'avoir une bonne idée, tant qualitative que quantitative de la fracturation. D'un point de vue hydrogéologique, l'écoulement se faisant essentiellement au niveau des fissures, on pourra donc déterminer de façon acceptable les possibilités directionnelles d'écoulement en mettant en oeuvre une méthodologie relativement simple et rapide.

9-4 Hydrogéologie

9-41 Ressource en eau du synclinorium

Le synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite est très exploité puisqu'il fournit 50 % du volume d'eau utilisé pour l'ensemble de l'Avesnois, et il est vraisemblable que, dans les années à venir, sa production passe de 50 % à 75 %. Les prélèvements se font essentiellement au niveau des captages "Eau et Force", SIDEN et des captages de carrières. Un bilan hydrogéologique a été effectué afin de voir si le synclinorium n'est pas en surexploitation pour les 60 mois consécutifs, l'excédent est de 1420 mm pour une hauteur de pluie de 4245mm. Le volume d'eau total non évaporé est égal à 92.230.000 m^3.
B. DELPORTE (1979) montre que 40 % du volume d'eau non évaporé s'infiltre, le reste s'écoulant. Il y a donc 36.920.000 m^3 d'eau infiltré et 55.310.000 m^3 d'eau repris par les eaux de surface.
De plus, il montre que sur l'ensemble des cours d'eau du synclinorium 25 % du volume d'eau écoulé se perd et rejoint les eaux souterraines ; on peut donc en déduire que 13.827.500 m^3 d'eau ont subi une infiltration retardée. Pour les cinq années, on peut donc estimer le volume d'eau infiltré à 50.747.000 m^3.

Les prélèvements sont essentiellement effectués par les sociétés "Eau et Force" SIDEN, Maréchal Ketine, et la carrière CBS de Limont Fontaine :

	1977	1978	1979	1980	1981
EAU ET FORCE	8.578.000	8.726.000	8.943.000	8.948.000	8.760.000
SIDEN	1.143.410	1.245.188	1.398.306	1.746.661	1.673.903
TOTAL	9.721.410	9.971.188	10.346.306	10.694.661	10.433.903

tableau 11-PRELEVEMENT EN m^3 D'EAU EFFECTUE AU NIVEAU DU SYNCLINORIUM DE BACHANT DE 1977 A 1981-

La carrière CBS a prelevé en 1978 1.550.300 m^3 d'eau et 2.715.246 m^3 en 1979.
La société Maréchal Ketine a un prélèvement d'environ 500.000 m^3 par an.
Le volume d'eau total prélevé sur les cinq années est donc de 57.933.014 m^3 d'eau.
Il y a donc un déficit de 7.186.014 m^3 pour les cinq ans.
Si l'on considère que la Sambre et la Solre peuvent engendrer des apports extérieurs aux eaux souterraines du synclinorium par pertes franches ou diffuses, il suffirait que la somme des débits des pertes soit égale à 45 l/s pour compenser ce déficit.

9-42 Etude hydrodynamique et hydrodispersive

9-421 Choix du modèle

Le facteur déterminant pour la modélisation d'un milieu fissuré est le rapport entre la dimension des blocs fracturés et celle du domaine étudié ; si ce rapport est très faible, il sera possible d'assimiler le milieu fissuré à un milieu homogène anisotrope.
Au niveau du synclinorium, il y a rarement continuité, d'un secteur à l'autre, des paramètres relatifs à la fracturation ; en effet, même si l'on retrouve souvent les mêmes familles de fractures, celles-ci montrent des variations de fréquence et d'ouverture selon le domaine étudié. Le synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite est donc considéré comme étant constitué de secteurs, homogènes anisotropes, dont la réunion forme un ensemble hétérogène et anisotrope.

9-422 Les perméabilités directionnelles

La notion de perméabilités directionnelles et de tenseur de perméabilités a été étudié au chapitre I. Le traitement des données de fracturation par programme TENFY (Chapitre V) a permis de dresser la carte des perméabilités du synclinorium (fig.12).

Le tableau suivant récapitule les valeurs des perméabilités principales des secteurs, considérés comme homogènes et anisotropes, ainsi que leur direction dans le repère $\{\overrightarrow{Nord}, \overrightarrow{Ouest}\}$ (bidimensionnel) ; de plus, les familles de fractures ayant permis l'obtention de ces perméabilités, sont indiquées.

ZONE	PERMEABILITES PRINCIPALES (m/s)	COORDONNEES DANS LE REPERE NORD-OUEST	FRACTURES
1	K1=1.337 K2=0.257	X=0.98 Y=0.17 X=-0.17 Y=0.98	160-170/90 70-80/N/70-80 65-70/S/30-40
2	K1=0.02 K2=0.016	X=0.98 Y=0.17 X=-0.17 Y=0.98	160-170/W/70-80 160-170/E/25-35 70-80/S/75-85 80/S/35 80/N/45-55
3	K1=0.78 K2=1.04	X=0.98 Y=0.17 X=-0.17 Y=0.98	170/W/80-85 75-80/S/25-30
4	K1=0.0034 K2=13.08	X=0.98 Y=0.17 X=-0.17 Y=0.98	170-10/E/75-85 170-10/W/15-30 80/90
5	K1=0.03 K2=0.045	X=0.99 Y=-0.1 X=0.1 Y=0.99	90-100/N/75-85 80-90/S/15-20
6	K1=4.7 K2=0.36	X=0.34 Y=0.93 X=0.93 Y=-0.34	105-110/N/80-85 15-20/90 170-180/E/65-70 85-90/90
7	K1=0.22 K2=0.033	X=0.98 Y=0.17 X=-0.17 Y=0.98	170-180/E/5-7 165-170/E/65-75 165-170/W/55-65

tableau 12-PERMEABILITES PRINCIPALES DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

Les zones 1, 3, 4, 6 ont une de leurs perméabilités principales très importante (1,337 ; 1.04 ; 13.08 ; 4.7), elles sont situées au coeur de synclinaux pour les zones 1, 4, 6 et juste en bordure

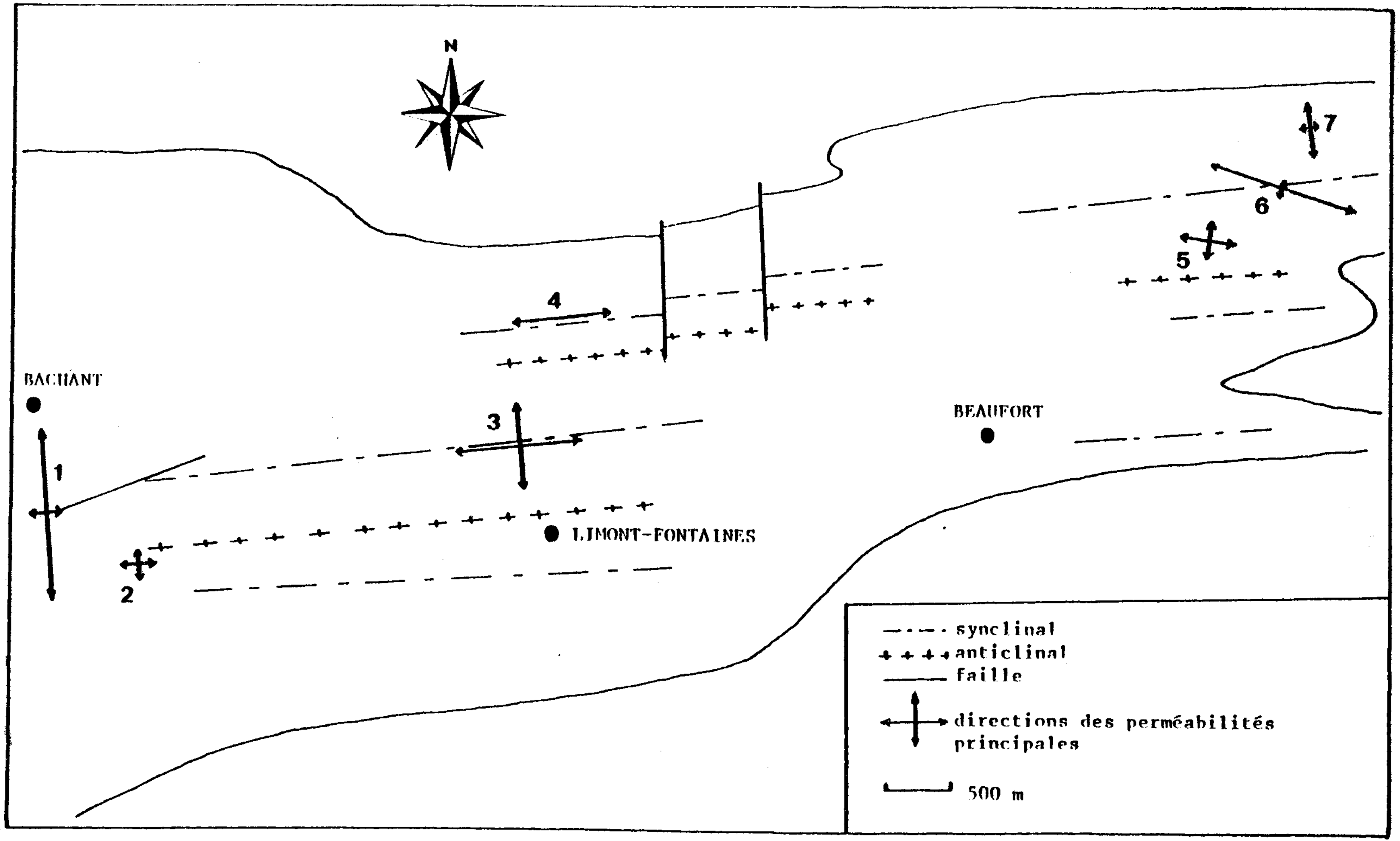


figure 12-DIRECTIONS DES PERMEABILITES PRINCIPALES DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

pour la zone 3 ; les autres zones présentent des perméabilités principales de 10 à 100 fois plus faibles et elles sont situées soit au niveau d'anticlinaux ou très en bordure de synclinaux. Il semble donc que les perméabilités les plus importantes se situent au niveau des synclinaux.
Hormis la zone 6, les zones ont des perméabilités principales Nord-Sud/Est-Ouest ; en effet, les familles de fractures systématiques sont de direction 160°-180°, 70°-90° et, de plus, elles sont prépondérantes en fréquence et en ouverture. La zone 6 présente une perméabilité principale égale à 4,7 m/s et de direction x = 0,34 y = 0,93 ; bien que les familles de direction 160°-180°, et 70°-90° soient présentes au niveau de cette zone, la famille prépondérante est celle de direction 105°-110° avec un pourcentage deux fois plus élevé que celles précédemment citées, et une ouverture moyenne 5 fois à 50 fois plus importante ; il convient de souligner que cette famille est absente au niveau des autres zones.
La zone 4 présente une perméabilité Est-Ouest très importante (13,08 m/s) ; ceci est dû au fait que des traces d'écoulement et des figures karstiques pouvant avoir des ouvertures de 20 cm, sont présentes selon la direction Est-Ouest.

9-423 Etude d'une série Viséen moyen - Viséen supérieur

L'aquifère étant essentiellement localisé au niveau du Viséen moyen et du Viséen supérieur, une étude de la série a été effectuée afin d'y repérer, éventuellement, des niveaux perméables susceptibles de représenter les zones productrices réelles.
La série a été étudiée banc par banc et datée par les foraminifères dont la systématique fut établi par CONYL R., GROESSENS E. et PIRLET H. (1976).

La description lithologique des bancs représentée par la figure 13 est synthétisée par le tableau (15).

De plus, des relevés de fracturation (fréquence, ouverture, orientation) ont été effectués à chaque niveau.

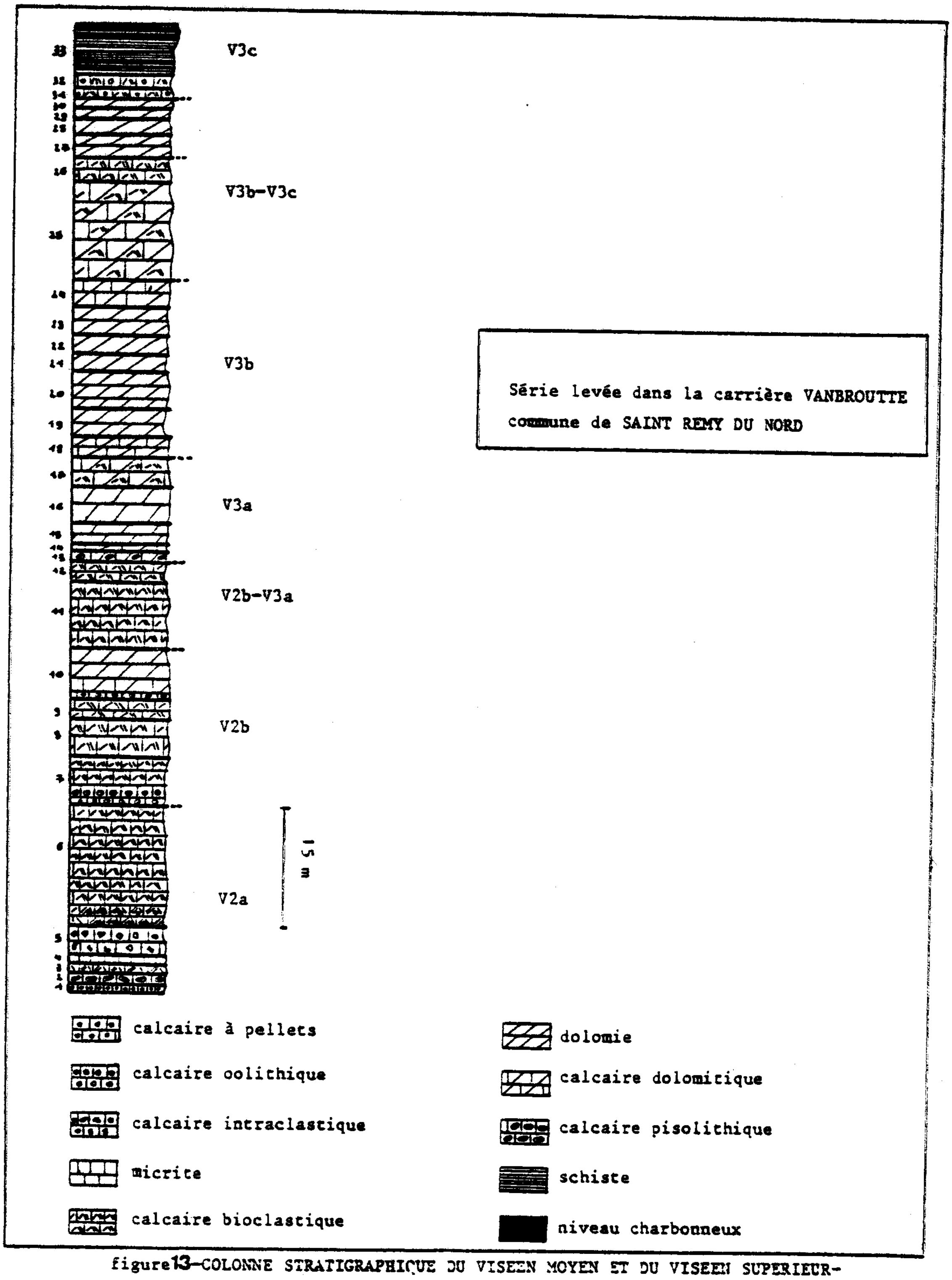


figure 13–COLONNE STRATIGRAPHIQUE DU VISEEN MOYEN ET DU VISEEN SUPERIEUR–

BANCS	EPAISSEUR	DESCRIPTION LITHOLOGIQUE
1	40cmm	calcaire à pellets,grumeleux,à ciment spathique
2	1m	calcaire pisolithique à ciment spathique
3	1m	calcaire bioclastique à ciment spathique
4	1m	micrite
5	3m	intrasparite
6	15m	calcaire bioclastique,oolithique à la base
7	5m	oosparite à la base,biosparite au sommet
8	4m	biosparite légèrement dolomitisée
9	2m	biointrasparite
10a	50cm	oosparite
10b	1m	calcaire dolomitique
10c	2.5m	dolomie
11	7m	biosparite
12	2m	biosparite
13	1m	calcaire dolomitique à faciès algaire
14	1m	dolomie macrocristalline
15	2m	dolomie macrocristalline
16	4m	dolomie macrocristalline
17	3m	biomicrite dolomitisée
18	2m	calcaire dolomitique
19	3m	dolomie
20	4m	dolomie
21	2m	dolomie
22	2m	dolomie
23	3m	dolomie
24	4m	calcaire dolomitique
25	10m	biomicrite dolomitisée
26	2m	biomicrite
27	2m	dolomie macrocristalline
28	3m	dolomie
29	1m	micrite dolomitisée
30	1m	dolomie
31	1m	calcaire à pellets et à bioclastes
32	1m	calcaire à pellets et à bioclastes
33	4m	calcaire à niveaux charbonneux et schistes

tableau 15-DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DE LA SERIE
VISEEN MOYEN-VISEEN SUPERIEUR (St Rémy Du Nord)-

A partir des données de fracturation, le programme TENFY a permis d'obtenir les perméabilités principales pour chaque étage. Les perméabilités sont exprimées dans le plan géographique :

SUBDIVISIONS	ORIENTATION	FREQUENCE
V2a	170/W/50	1.4
	180/E/70	1.4
	175/E/45	0.86
V2b	60/N/50	0.5
	170/E/80	2.1
	160/W/60	1.1
	170/W/50	1.4
	85/90	0.2
V3a	0/0	0.73
	80/S/65	0.28
	170/E/65	1.7
	5/W/40	1.7
V3b-c	0/0	0.6
	180/W/30	2.8
	5/W/70	2.8
V3c	0/0	0.33
	180/E/75	5.7
	170/W/30	3.4

tableau 13-FRACTURATION DE LA SERIE
VISEEN MOYEN-VISEEN SUPERIEUR
(St Remy Du Nord)-

SUBDIVISIONS	PERMEABILITE K1(m/s)	COORDONNEES X1	COORDONNEES Y1	PERMEABILITE K2(m/s)	COORDONNEES X2	COORDONNEES Y2	PERMEABILITE GLOBALE(m/s)
V2a	0.298 10^{-2}	0.997	0.072	0.097 10^{-2}	-0.072	0.997	1.7 10^{-3}
V2b	0.374 10^{-2}	0.975	0.218	0.092 10^{-2}	-0.218	0.975	1.85 10^{-3}
V3a	0.275 10^{-2}	0.996	0.087	0.109 10^{-2}	-0.087	0.996	1.7 10^{-3}
V3b-c	0.457 10^{-2}	0.997	-0.068	0.198 10^{-2}	0.068	0.997	3 10^{-3}
V3c	0.742 10^{-2}	0.999	0.0237	0.241 10^{-2}	-0.0237	0.999	4.2 10^{-3}

tableau 14-PERMEABILITES PRINCIPALES DE LA SERIE
VISEEN MOYEN-VISEEN SUPERIEUR(St Remy Du Nord)-

Les perméabilités directionnelles Nord-Sud sont toujours plus importantes que celles Est-Ouest. Jusqu'au V3a, les perméabilités globales semblent garder une valeur constante ($1,7\,10^{-3}$ à $1,8\,10^{-3}$) alors que pour les niveaux supérieurs V3b-c, V3c elles augmentent (3.10^{-3} et $4{\cdot}2\,10^{-3}$) ; or l'ouverture des fissures n'a pas augmenté par rapport à celle des niveaux inférieurs, par contre on peut observer une augmentation de la fréquence des fissures pour les

niveaux supérieurs. Il semble donc que les niveaux supérieurs (V3b, V3c) soient susceptibles d'être les zones les plus aquifères. De plus, au niveau du V3b où aucune mesure de fracturation n'a pu être effectuée de par la nature du terrain (dolomie sableux), il a été observé, toutefois, au niveau de la stratification, de véritables traces de karstification à la base du V3b.
Ces observations permettent de penser que les cinquante premiers mètres de la série sont plus propices à la circulation des eaux souterraines.

9-424 Zones d'alimentation des captages

La connaissance de la fracturation et de la piézométrie du synclinorium établie par B. DROZ (1981) permet de déterminer les sens d'écoulements de la nappe ainsi que les vitesses de DARCY. Comme il a été montré au chapitre IV, gradient hydraulique et sens d'écoulement sont, sauf cas exceptionnel, non colinéaires. Le synclinorium a été divisé en cinq ensembles déterminés selon les champs captants ; chaque ensemble a été scindé en secteurs au sein desquels le gradient hydraulique est sensiblement constant ; connaissant les directions principales de perméabilités et le gradient hydraulique, le programme CPVGRHMA (chapitreIV) a permis de déterminer le sens d'écoulement et la vitesse de DARCY au sein de chaque secteur et de déterminer les zones dangereuses à partir desquelles une pollution éventuelle pourrait contaminer les champs captants (fig. 14, 15, 16, 17).
Ces zones n'intègrent pas la notion d'isochrones, mais seulement de zone d'alimentation.
Les deux paramètres, fracturation et piézométrie, dont dépendent les zones d'alimentation , n'ont pas la même évolution spatio-temporelle. En effet, la fracturation peut être considérée, à l'échelle temporelle humaine, comme constante alors que la piézométrie varie, ne serait-ce qu'en période d'étiage et de hautes eaux. Il convient donc de signaler que ces zones ont un domaine de définition qui varie avec la piézométrie. Sachant que gradient hydraulique et vitesse n'ont pas la même direction, le tracé des zones d'alimentation de captages à partir des seules isopièzes, ce qui revient à considérer l'aquifère

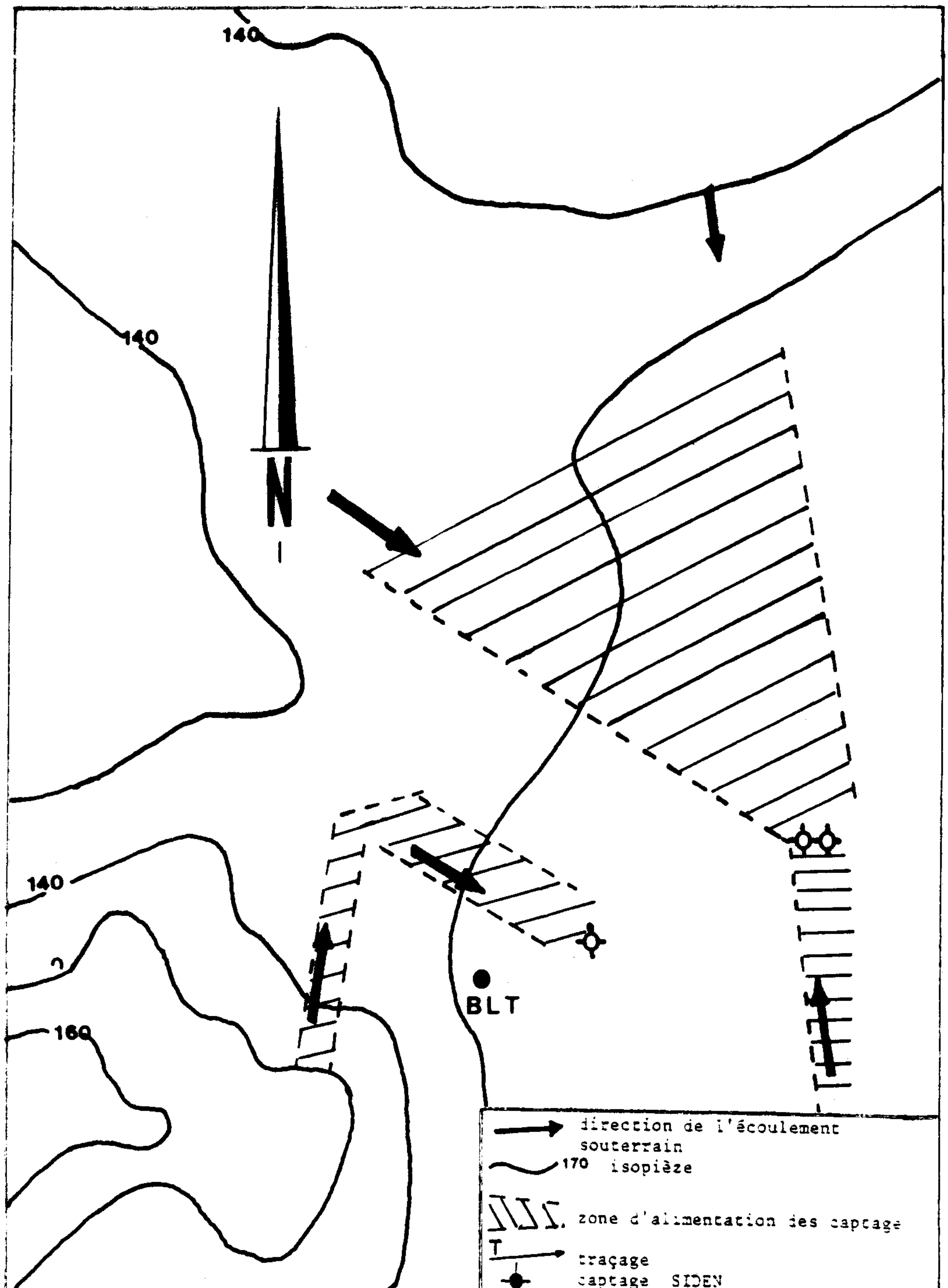

140
140
140
160
N
BLT
direction de l'écoulement souterrain
170 isopièze
zone d'alimentation des captage
T
traçage
captage SIDEN
captage EAU ET FORCE
500 M

figure 14

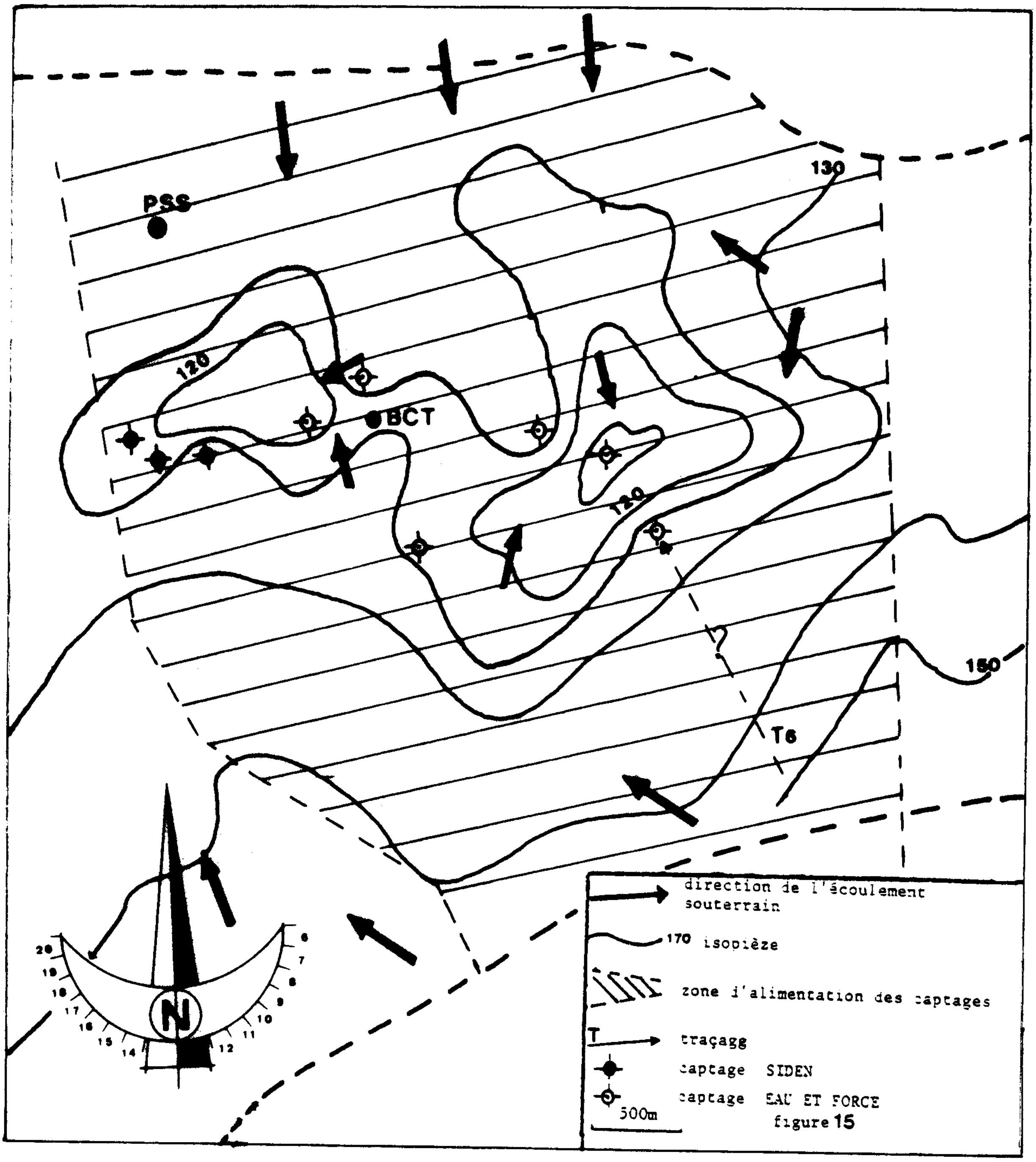
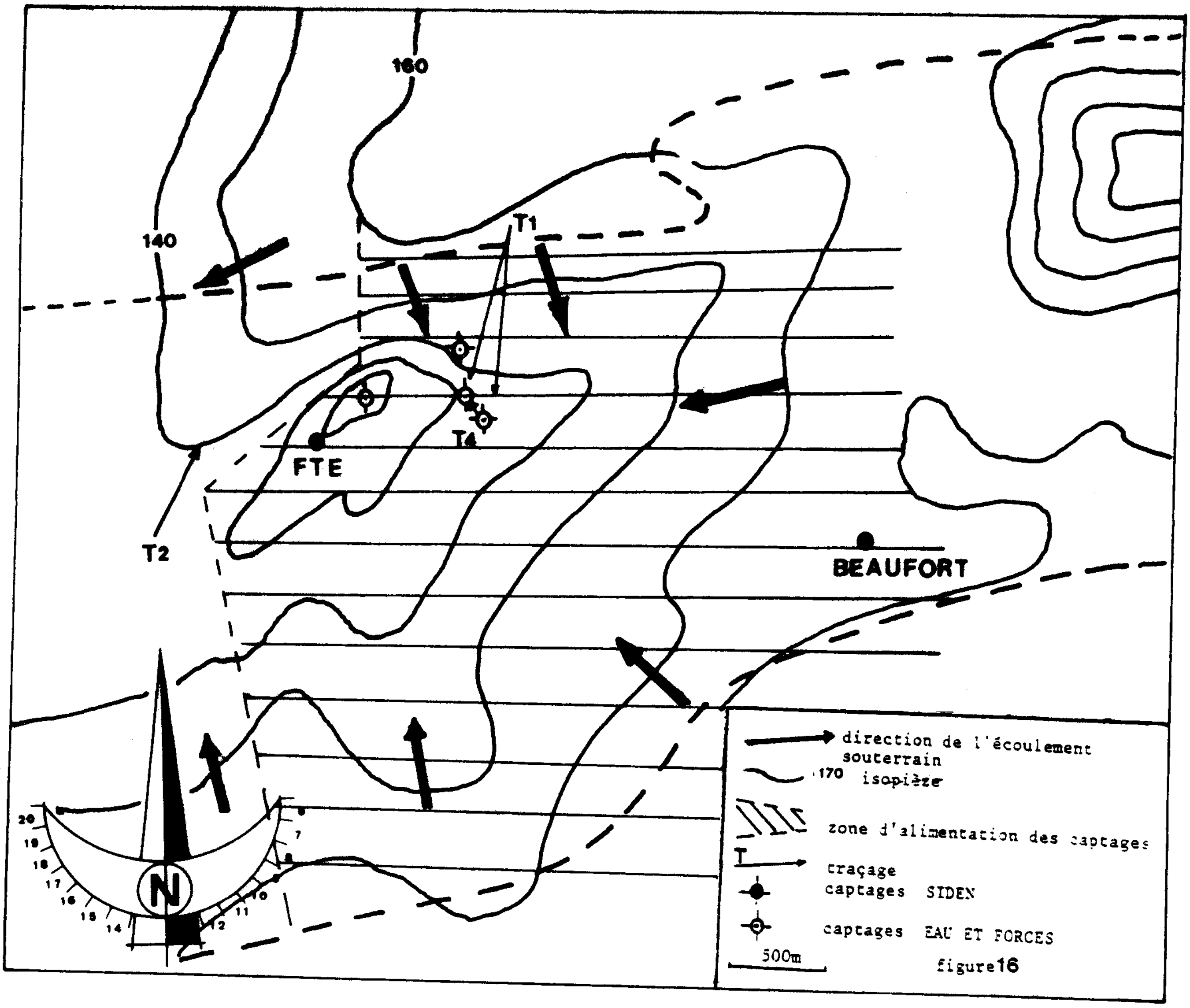

PSS
BCT
120
120
120
130
150
?
T6
N
direction de l'écoulement souterrain
170 isopièze
zone d'alimentation des captages
T traçagg
captage SIDEN
captage EAU ET FORCE
500m

figure 15



160
140
T1
T4
FTE
T2
BEAUFORT
N
direction de l'écoulement souterrain
170 isopièze
zone d'alimentation des captages
T
traçage
captages SIDEN
captages EAU ET FORCES
500m

figure 16

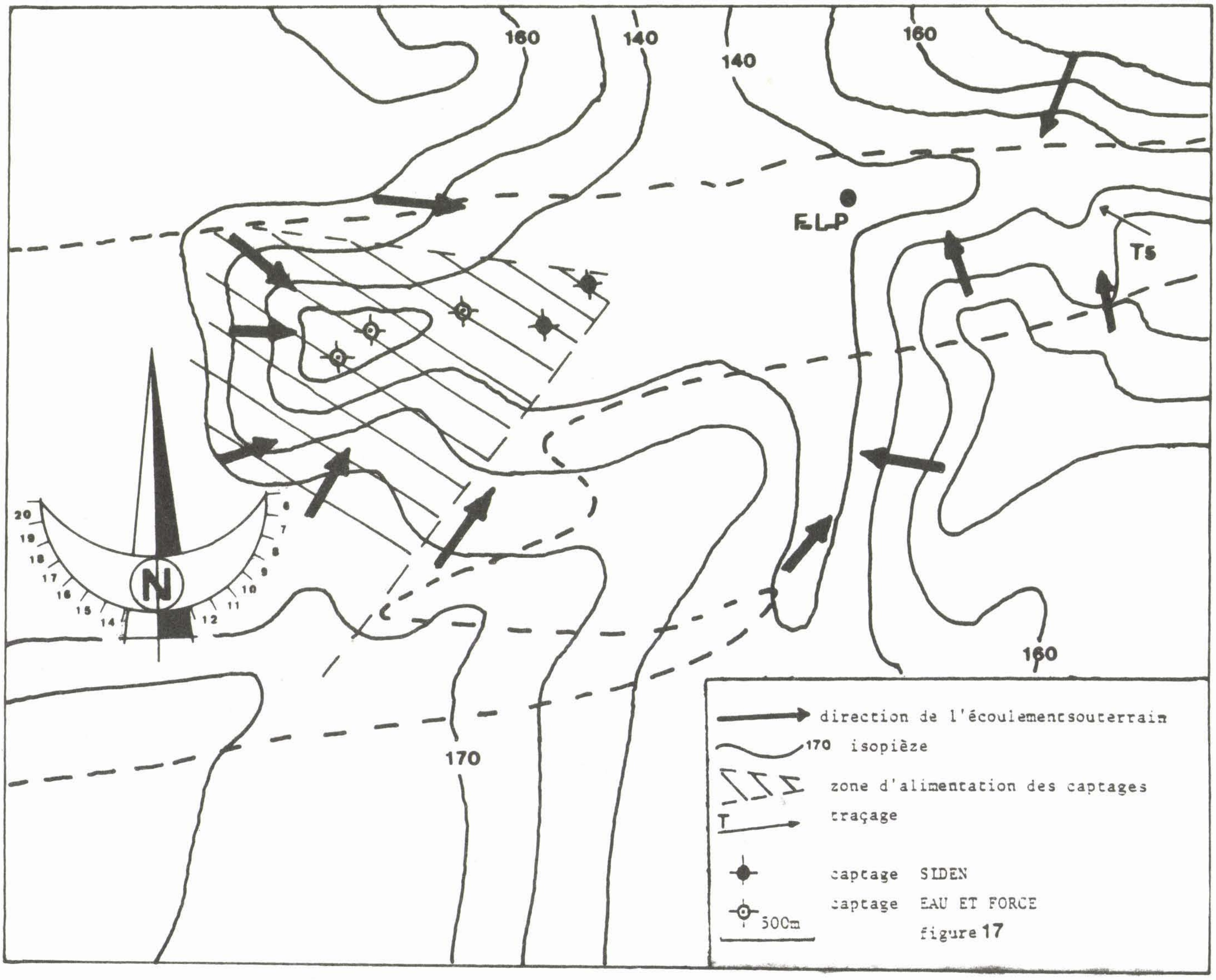

160
140
140
160
E.L.P
Ts
160
170
N
20
19
18
17
16
15
14
12
11
10
9
8
7
6
direction de l'écoulement souterrain
170 isopièze
zone d'alimentation des captages
T
traçage
captage SIDEN
captage EAU ET FORCE
500m

figure 17

comme étant isotrope, est discutable. Il serait souhaitable d'étudier l'évolution de la piézométrie à période régulière, et de modifier, le cas échéant, les zones de vulnérabilité et les périmètres de protection éloignés.

9-43 Traçages

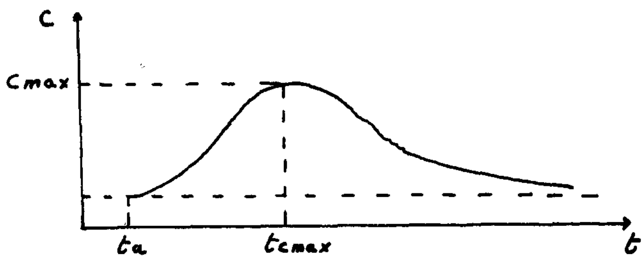
9-431 Résultats

Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus :

TRACAGE	DISTANCE (m)	durée(j)	ta(j)	tcmax(j)	cmax(kg/l)	Vmax (m/j)	Vcmax (m/j)	tc(j)	P	α (m)
1	1000	45	8	16	$4.48\ 10^{-7}$	125	62.5	/	/	/
2	510	30	2	13	$3.2\ 10^{-9}$	255	39.2	13.33	400	1.25
3	480	14	3	12	$2.2\ 10^{-9}$	160	40	/	/	7
4	116	10	1.13	5.33	$2.06\ 10^{-8}$	103.2	21.75	9	4	29
5	600	16	9	/	/	66.66	/	/	/	/
6	15000	/	/	/	/	/	/	/	/	/

tableau 16-INTERPRETATION GLOBALE DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

Signification des symboles :



ta : temps d'arrivée

tcmax : temps correspondant à la concentration maximale

P : nombre de peclet dynamique défini par x/α_L

αL : dispersivité longitudinal

tc : temps de transfert par convection pure

Va : vitesse maximale

vcmax : vitesse correspondant au tcmax

En écoulement monodimensionnel uniforme, tc est égal à $\frac{x}{V_e}$ où Ve est la vitesse effective (constante) ; en écoulement radial à débit constant, V_e n'est plus constante, tc est égal à $\frac{\omega_c \pi r^2 h}{|q|}$ où h est l'épaisseur de l'aquifère, r la distance au puits et ω_c la porosité cinématique.

Les résultats sont difficilement interprétables de part l'irrégularité de la réponse (superposition d'écoulements selon les familles de fissures et ou variation du débit de pompage) et les problèmes liés à l'emploi des fluocapteurs (cf : M. VREULX DEA 1983) ; seuls deux traçages ont pu être traités en termes de dispersion.

9-432 Essai d'interprétation en milieu fissuré

Le traçage 4 (fig. 18) indique une forte rétention ; la dispersivité est élevée ; il présente les caractéristiques d'un traçage effectué en milieu poreux, alors que le traçage 2 (fig. 19) montre une faible rétention, une faible dispersivité et un nombre de Peclet élevé qui indique une prédominance de la convection et de la dispersion mécanique par rapport à la diffusion moléculaire et à la rétention.

Les traçages 3 et 1 (fig. 19 et 21) montrent une arrivée du traceur en plusieurs vagues qui implique une impossibilité d'interprétation par la méthode des abaques pour l'obtention de paramètres hydrodispersifs ; on peut émettre deux hypothèses, l'une étant des variations de débits de pompage, l'autre étant un acheminement du traceur par des fractures à ouverture et fréquence différentes.

En considérant le débit de pompage constant, il est possible de tenter d'interpréter la courbe de restitution en le décomposant en courbes unimodales ; chacune d'elles étant relative à une famille de fissures. Par simplification, les fractures sont considérées comme étant verticales, ayant la même direction (celle du traçage) mais de fréquence et d'ouverture différentes. La courbe de restitution du traçage 1 (fig. 21) a été décomposée en trois courbes de concentration maximum successives $6.8 \cdot 10^{-7}$ Kg/l, $4.48 \cdot 10^{-7}$ Kg/l et $1.9 \cdot 10^{-7}$ Kg/l.

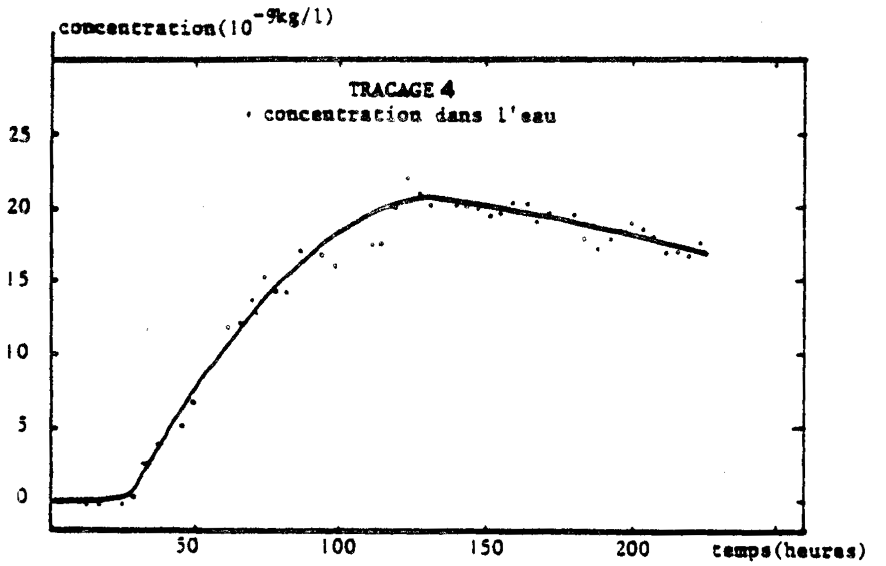


figure18

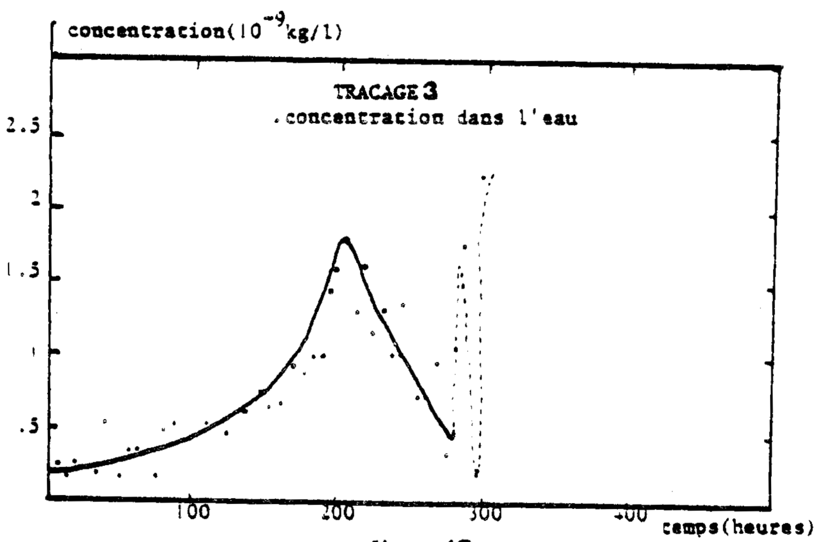


figure19

figures 18 et 19-RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

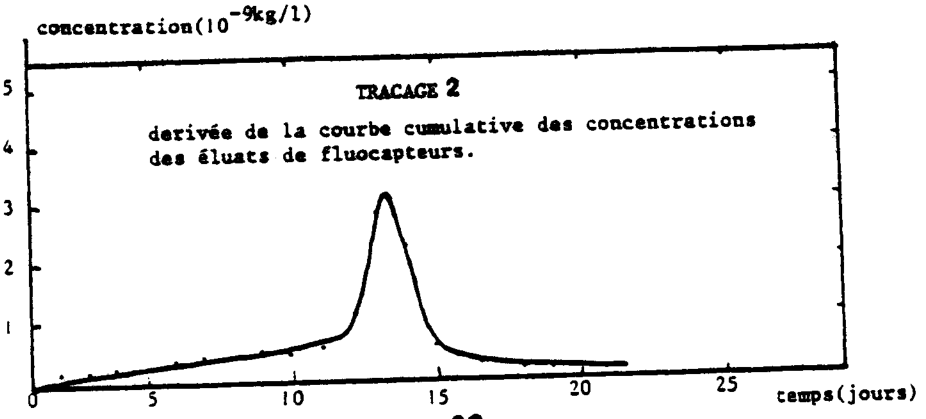


figure 20

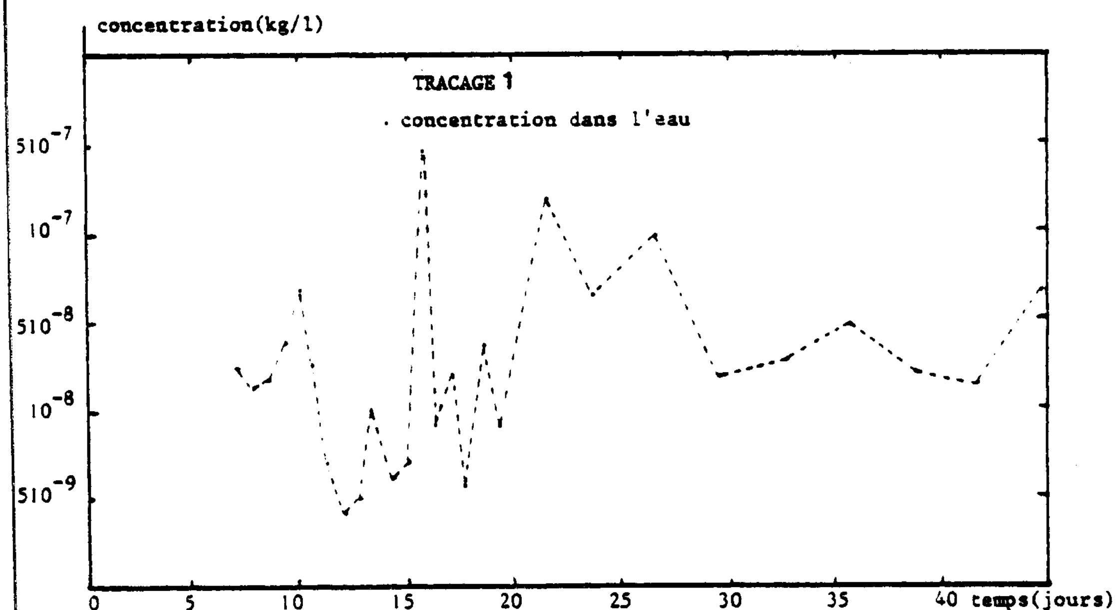


figure 21

figures 20 et 21-RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

COURBE	Cmax(kg/l)	Tcmax(h)	Tc(h)	P	α (m)
1	$6.8\ 10^{-8}$	240	241.51	160	6.25
2	$4.5\ 10^{-7}$	380	380.31	1226	0.81
3	$1.9\ 10^{-7}$	520	520.65	800	1.25

tableau 17-INTERPRETATION DU TRACAGE 1 PAR DECOMPOSITION EN COURBES UNIMODALES-

Connaissant les valeurs des temps de transfert par convection pure, il est possible de calculer la vitesse effective d'écoulement ; cette vitesse s'exprime par la relation

$$V_e = \frac{K\ X\ i}{\omega c} \cos\alpha'$$

i : gradient hydraulique

K : perméabilité (LT^{-1})

ω_c: porosité cinématique

α': angle entre gradient hydraulique et la direction du traçage

Le calcul de i se fait à partir de l'esquisse piézométique, le calcul de K s'effectue par le programme CPVGRHMA à partir des perméabilités principales du secteur : $K = 3{,}45\,10^{-3}$ m/s.

Si l'on prend comme axe des abscisses, la direction du traçage, l'expression des perméabilités pour chaque famille de fissures est, dans le plan (x,y) :

$$\bar{\bar{K}}_1 = \frac{g}{12\nu} f_1 a_1^3 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\bar{\bar{K}}_2 = \frac{g}{12\nu} f_2 a_2^3 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\bar{\bar{K}}_3 = \frac{g}{12\nu} f_3 a_3^3 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{soit } \bar{\bar{K}} = \sum_{i=1}^{3} Ki = \frac{g}{12\nu} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} f_1 a_1^3 + f_2 a_2^3 + f_3 a_3^3)$$

On obtient une équation à six inconnues. Pour résoudre le problème, on fera l'hypothèse suivante :

les familles ont une même perméabilité mais présentent des porosités différentes.

Exemple :

FREQUENCE	OUVERTURE	POROSITE	PERMEABILITE
0.1845	1.077	0.198 ·	g/12νx023
0.02307	2.155	0.049	g/12νx0.23

tableau 18-RELATION NON UNIVOQUE ENTRE POROSITE ET PERMEABILITE-

La perméabilité de chaque famille est donc : $K' = 1.15\,10^{-3}$ m/s.
Si l'on considère que la porosité cinématique ω_c n'est pas trop éloigné du produit f a, on peut écrire :

$$V_e = \frac{g\ fa^3}{12\nu fa}\ i\ \cos\alpha' = \frac{g}{12\nu}\ a^2 i \cos\alpha' \qquad a = \sqrt{\frac{V_e \cdot 12\nu}{g\ \ i\ \ \cos\alpha}}$$

a étant déterminé, on peut calculer f : $f = \frac{\omega}{d} = \frac{K' \cdot i \cdot \cos\alpha}{V_e \quad a}$

(i = 0,03 ; cosα = 30°).

COURBE	VITESSE EFFECTIVE(m/s)	POROSITE CINEMATIQUE	FREQUENCE	OUVERTURE
1	$1.15\ 10^{-3}$	0.0259	111.98	$2.32\ 10^{-4}$
2	$7.3\ 10^{-4}$	0.041	221	$1.85\ 10^{-4}$
3	$5.3\ 10^{-4}$	0.056	354	$1.59\ 10^{-4}$

tableau 19-INTERPRETATION DU TRAÇAGE 1 EN FONCTION DE LA FRACTURATION-

Il convient bien de signaler que ces familles sont fictives et que, si elles existaient, elles donneraient un résultat comparable à celui du traçage 1.
Si l'on ne considère que la partie ascendante de la courbe du traçage 3, il est possible d'en tirer les caractéristiques hydrodispersives.

tc = 230,7 h P = 8,44 α = 56,87

Le traçage a une direction N 80°, si l'on considère que le traceur est essentiellement acheminé par la famille 80°/90°, prépondérante dans ce secteur, de fréquence 0,02 m^{-1} et d'ouverture 0,09 m, il est possible de pouvoir en tirer des caractéristiques hydrodynamiques.
La vitesse effective est de $5.78\,10^{-4}$ m/s, ce qui donne, compte tenu d'une porosité cinématique d'environ 0,0018, une vitesse de Darcy égale à 10^{-6} m/s.

La vitesse de Darcy théorique, calculée à partir des données de fracturation est égale à 6.10^{-1} m/s, soit six cent mille fois plus importante. Il faut donc rejeter l'hypothèse du régime d'écoulement laminaire parallèle. Chaque régime d'écoulement a été envisagé ; les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

REGIME D'ECOULEMENT	VITESSE	RUGOSITE RELATIVE	POSSIBLE
laminaire parallèle	0.6m/s	/	non
laminaire non parallèle	10^{-6}m/s	1560	non
turbulent hydrauli- -quement lisse	0.16m/s	/	non
turbulent rugueux parallèle	10^{-6}m/s	3.7	non
turbulent rugueux non parallèle	10^{-6}m/s	1.9	oui

tableau 20-DETERMINATION DU REGIME D'ECOULEMENT RELATIF AU TRACAGE 3-

La rugosité relative $\frac{\varepsilon}{d_h}$, où ε représente la hauteur des protubérances et dh le diamètre hydraulique, est égale à 3,7 dans le cas du régime turbulent rugueux parallèle, ce qui signifie que les protubérances, dh étant égal à la moitié de l'ouverture, ont une hauteur égale à 1,85 fois l'ouverture, ce qui est impossible. Par contre, en régime turbulent rugueux non parallèle, la hauteur des protubéances est égale à 0,95 fois l'ouverture, ce qui rend ce régime le seul compatible avec les données expérimentales.

Le traçage 4 a une direction N/140° ; deux hypothèses sont envisagées :

- la fracturation est telle qu'elle rend le terrain assimilable à un terrain poreux, anisotrope
- le traceur a été acheminé par la famille 180°/W/10-30, la seule compatible avec la direction du traçage, au niveau du secteur.

Hypothèse du terrain fissuré :

La famille 180°/W/10-30 a une fréquence de 0,075 et une ouverture de 0,001 m. La vitesse effective étant égale à $1,5.10^{-4}$m/s, et la porosité à 0,000075, il en résulte une vitesse de Darcy égale à $1,125.10^{-8}$m/s.

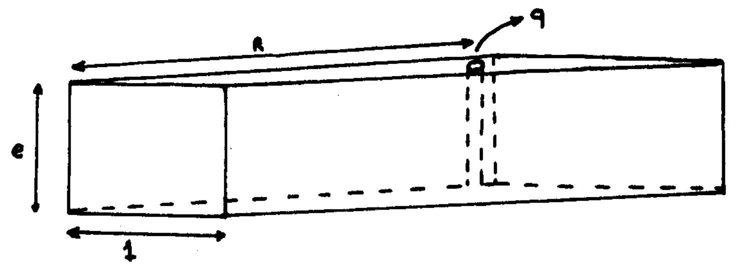
La vitesse effective théorique est égale à 1,65 10^{-2}m/s soit une vitesse de Darcy de 1,24 10^{-6}m/s. En considérant les données de fracturation comme fiables, il en résulte que le régime n'est pas laminaire parallèle. Les différents types de régime d'écoulement sont envisagés et les résultats sont présentés par le tableau suivant :

REGIME D'ECOULEMENT	VITESSE(m/s)	RUGOSITE RELATIVE	POSSIBLE
Laminaire parallèle	1.24 10^{-6}	/	non
laminaire non parallèle	1.125 10^{-8}	5.83	non
turbulent hydrauliquement lisse	1.2 10^{-4}	/	non
turbulent rugueux parallèle	1.125 10^{-8}	3.7	non
turbulent rugueux non parallèle	1.125 10^{-8}	1.9	oui

tableau 21-DETERMINATION DU REGIME D'ECOULEMENT RELATIF AU TRACAGE 4 DANS L'HYPOTHESE DU MILIEU FISSURE-

Seul le régime turbulent rugueux non parallèle est possible dans l'hypothèse du terrain fissuré.
La distance entre forage et point d'injection n'étant égale qu'à 116 m, l'écoulement est considéré comme monodimensionnel non uniforme (variation de la vitesse avec l'inverse de la distance au forage).
L'expression du débit de pompage en fonction de la hauteur d'eau captée est :

$$q = V_e \quad S \quad \omega_c \sim \frac{e \quad 1 \, . \, R \quad \omega_c}{tc}$$



Pour R = 116 m, Q : 0,03m^3/s, tc = 9 jours, ω_c = 0,000075

$$e = \frac{2681375,3}{1}$$

Pour que è soit compris entre 5 et 50 m, 1 est compris entre 536275,86 m et 53627,586 m.
On obtient une hauteur e aberrante ; il faut donc rejeter l'hypothèse du terrain fissuré.
- hypothèse du terrain poreux anisotrope
A partir des données de fracturation, le programme CPVGRHMA permet d'obtenir la perméabilité dans la direction du traçage qui est de $4\ 10^{-3}$ m/s ; ce qui donne une vitesse de Darcy égale à $9{,}2\ 10^{-5}$ m/s ; le rapport entre vitesse de Darcy et vitesse effective donne une porosité cinématique égale à 0,6. La hauteur h est égale à 0,46 m ; cette valeur, quoique faible est nettement plus cohérente que celle obtenue dans l'hypothèse du milieu fissuré.
Il semble donc que l'hypothèse du milieu poreux anisotrope soit acceptable.

9-433 Validité des zones d'alimentation

En fonction des données de fracturation et de l'esquisse piézométrique, les directions d'écoulement ont été déterminées dans l'hypothèse du milieu homogène anisotrope. Il convient donc de comparer les directions de traçages avec les directions d'écoulement calculées.

TRACAGE	DIRECTION	DIRECTION DU GRADIENT HYDRAULIQUE LU SUR LA CARTE	DIRECTION DEL'ECOU-LEMENT CALCULEE	ECART Δ
1	190	170	170	20
2	15	$10 < x < 20$	$9 < x < 17$	$6 > \Delta > 2$
3	256	225	260	4
4	320	325	318	2
5	302	315	307	5

tableau 22-COMPARAISON ENTRE LES DIRECTIONS REELLES ET LES DIRECTIONS CALCULEES DE L'ECOULEMENT SOUTERRAIN-

Mis à part le traçage 1, les écarts angulaires sont faibles (de 2 à 5°). L'anomalie de 20° relative au traçage 1 peut s'expliquer par un acheminement du traceur selon une trajectoire non rectiligne ;
en se basant sur les zones d'alimentation, dont la validité semble être confirmée par les autres traçages, on peut dire que le traceur a eu un trajet de direction 165°/175° selon un écoulement naturel

uniforme jusqu'au cône de rabattement dû au champ captant, puis selon un écoulement provoqué convergent mais non axisymétrique jusqu'au captage.

De plus, les cartes des zones d'alimentation confirment le résultat négatif du traçage 6 ; la direction de la ligne point d'injection - point de surveillance (1500 m) est N/153°, la carte de vulnérabilité indique une direction d'écoulement N/125°, soit une différence de 25°, ce qui donne une erreur, pour 1500 m, égale à 1500 x tg25 = 699 m.

X. SYNCLINAL DE SARS-POTERIE

10-1 Géologie

Le synclinal de Sars-Poterie (fig. 22), d'axe Est-Ouest, est marqué par un substratum schisteux et psammitique Fammenien surmonté d'un ensemble calcaire et dolomitique Strunien, Tournaisien et Viséen pouvant atteindre 120 à 150 m à Sars-Poterie dans l'axe de la cuvette. Des dépôts discordants de sables fins landeniens et de limons quaternaires recouvrent localement les terrains primaires.

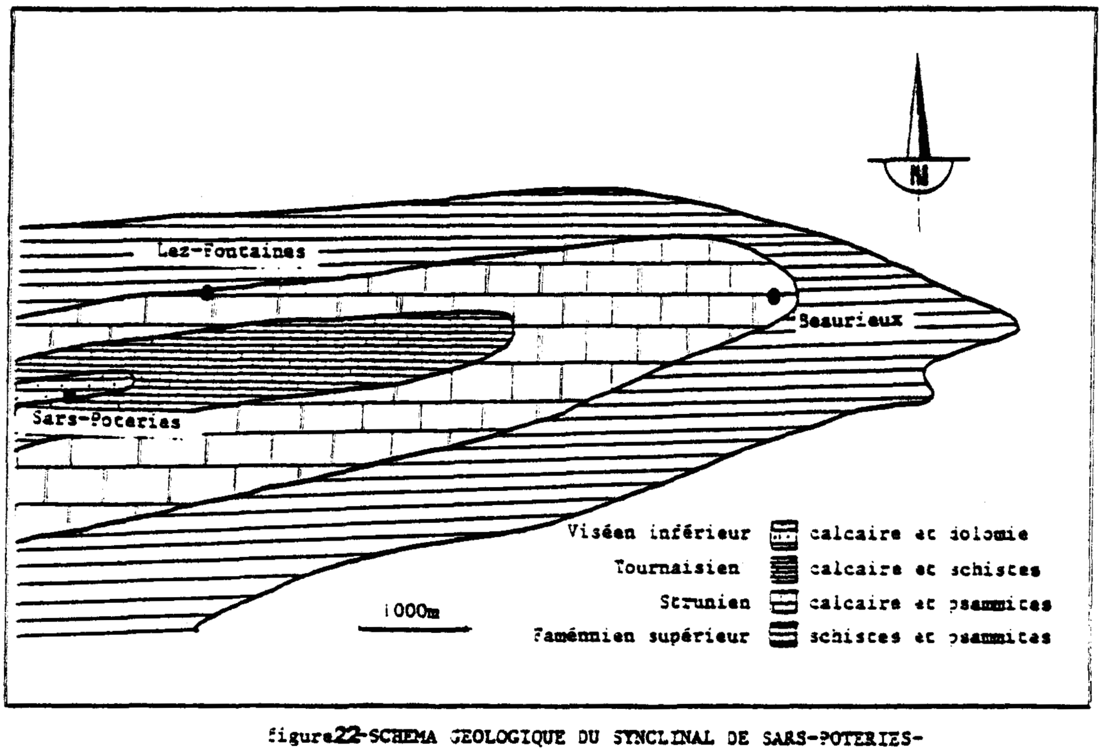


figure22-SCHEMA GEOLOGIQUE DU SYNCLINAL DE SARS-POTERIES-

10-2 Détermination des perméabilités principales à partir des traits morphologiques

De par le manque d'affleurement, il n'a pas été possible d'effectuer une étude statistique directe de la fracturation ; mais sachant que le synclinal fait partie du même ensemble structural que le synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite, que les terrains sont de même nature, que les contraintes tectoniques qui ont sollicité ces formations sont les mêmes, j'ai considéré comme valable, pour ce secteur, les équations de régression relative à la comparaison entre fracturation et géomorphologie du synclinorium Bachant-Ferrière-La-Petite.

Les mesures géomorphologiques ont été effectuées sur carte topographique au 1/25.000. L'équation de régression utilisée est :

$$x = 17{,}09\ y - 114{,}311 \pm 224$$

x : nombre de fractures dans une direction donnée

y : nombre de vallées sèches dans une direction donnée

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

DIRECTION DES VALLEES SECHES	NOMBRE DE VALLEES SECHES OBSERVEES	NOMBRE DE FRACTURES DEDUITE DE LA CORRELATION
0-10	34	467
10-20	14	127
20-30	2	/
30-40	5	/
40-50	6	/
50-60	7	5
60-70	5	/
70-80	1	/
80-90	23	279
90-100	3	/
100-110	0	/
110-120	0	/
120-130	0	/
130-140	1	/
140-150	3	/
150-160	3	/
160-170	0	/
170-180	0	/

tableau 23-DETERMINATION DE LA FRACTURATION A PARTIR DES TRAITS MORPHOLOGIQUES AU NIVEAU DU SYNCLINAL DE SARS-POTERIES-

Ce tableau montre que les familles de fractures prépondérantes sont Nord-Sud, Est-Ouest, elles le sont aussi au niveau du synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite.
Il n'est pas possible, à partir de ces données, de déterminer les perméabilités principales car les fréquences et ouvertures sont inconnues.
Si l'on compare les rapports entre les pourcentages des familles de fractures de synclinal de Sars-Poterie avec ceux du synclinorium de Bachant, on remarque qu'ils sont asses proches :

RAPPORTS	SYNCLINAL DE SARS-POTERIES	SYNCLINORIUM DE BACHANT	ECART
0-10/10-20	3.736	3.334	0.402
0-10/80-90	1.67	1.73	-0.06
10-20/80-90	0.448	0.52	-0.072

tableau 24-COMPARAISON ENTRE LES RAPPORTS DES POURCENTAGES DES FAMILLES DE FRACTURES DU SYNCLINAL DE SARS-POTERIES ET CEUX DU SYNCLINORIUM DE BACHANT-

Bien que le nombre de valeurs soit faible (6), la méthode des moindres carrés a été utilisée.
Le coefficient de corrélation est égal à 0,997, ce qui permet de dire que la relation est fonctionnelle.
L'équation de la droite est : $y = 0,847\ x + 0,2076$.
Le coefficient de Student est égal à 25,76, ce qui donne un risque d'erreur inférieur à 1 %. Pour le calcul estimatif des perméabilités principales, on attribuera aux familles de fractures du synclinal de Sars-Poterie, les mêmes paramètres (fréquence, ouverture) de leurs homologues du synclinorium de Bachant. Il convient de souligner qu'il ne s'agit là que d'une simple hypothèse de travail malheureusement impossible à vérifier sur affleurements par suite de leur absence quasi totale.
Le traitement des données de fracturation par le programme TENFY a permis d'obtenir les résultats suivants :

Valeurs propres du tenseur de perméabilités dans le repère géographique tridimensionnel :

$K_1 = 0{,}2525\,10^{-3}$ m/s	$K_2 = 0{,}1233\,10^{-4}$ m/s	$K_3 = 0{,}2649\,10^{-3}$ m/s
x = 0,996	x = 0,0917	x = 0
y = 0,0917	y = 0,996	y = 0
z = 0	z = 0	z = 1

Perméabilité du milieu poreux isotrope équivalent : $K = 0{,}9388\,10^{-4}$ m/s

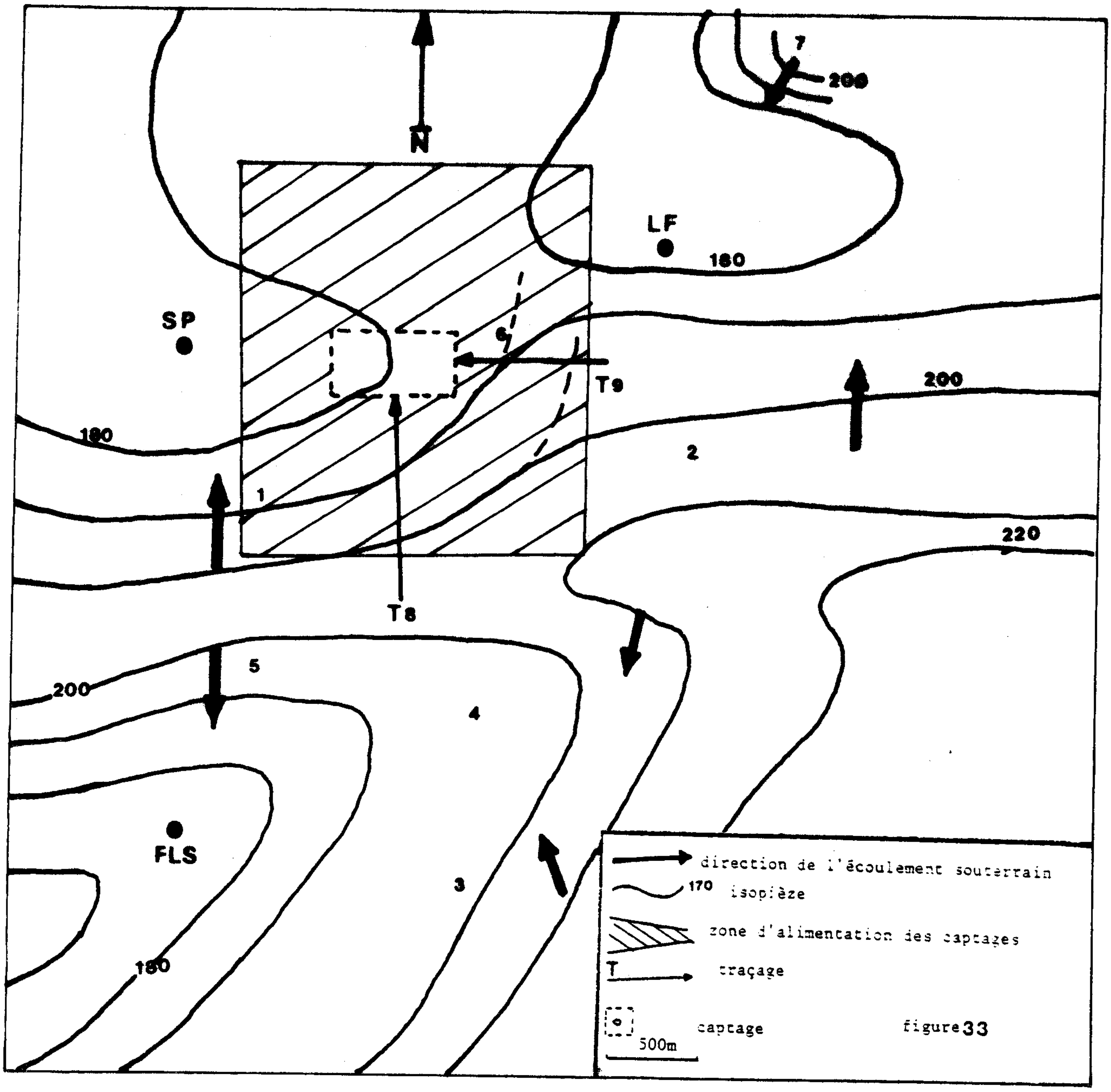
10-3 Zones d'alimentation des captages

L'esquisse piézométrique a été divisée en secteurs où le gradient hydraulique est constant (fig. 23).
Le programme CPVGRHMA a permis de calculer pour chaque secteur, la direction du vecteur vitesse de DARCY, son module, la perméabilité selon ce vecteur (les directions sont données par rapport au Nord) :

SECTEUR	GRADIENT HYDRAULIQUE		VECTEUR VITESSE		PERMEABILITE (m/s)
	direction	valeur	direction	valeur	
1	1	0.0285	0	$7.2\,10^{-6}$	$2.51\,10^{-4}$
2	1	0.02	0	$5.03\,10^{-6}$	$2.51\,10^{-4}$
3	293	0.017	-6.56	$8.3\,10^{-6}$	$9.9\,10^{-5}$
4	250	0.0126	7.63	$5.08\,10^{-7}$	$8.7\,10^{-5}$
5	179	0.032	-0.049	$8.06\,10^{-6}$	$2.52\,10^{-4}$
6	330	0.02	-1.6	$3.84\,10^{-6}$	$2.18\,10^{-4}$
7	215	0.067	2	$1.16\,10^{-5}$	$2.06\,10^{-4}$

tableau 25-VITESSES DE DARCY ET PERMEABILITES CALCULEES AU NIVEAU DU SYNCLINAL DE SARS-POTERIES-

Les directions du vecteur vitesse ont permis de dresser la carte des zones d'alimentation des captages dont le champ est représenté en trait pointillé (fig. 23). Si l'on ne tient pas compte du cône d'influence du champ captant, on remarque que seule une partie du secteur (1) et du secteur (6) est en relation avec les captages.


N
7
200
LF
180
SP
6
T9
200
180
2
1
220
T8
5
200
4
FLS
3
180
direction de l'écoulement souterrain
170 isopièze
zone d'alimentation des captages
T traçage
captage
500m
figure 33

10-4 Traçages

Résultats (fig. 24 et 25):

TRACAGE	Tc(j)	DISTANCE AU PUITS(m)	VITESSE EFFECTIVE(m/j)
8	38	1400	37
9	23	700	30

tableau 26-RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU SYNCLINAL DE SARS-POTERIES-

- milieu poreux anisotrope (régime laminaire parallèle)

La direction du traçage 8 est la même que celle du vecteur vitesse de DARCY calculée du secteur 1. Le module du vecteur vitesse de DARCY est égal à $7{,}18.10^{-6}$ m/s ; la vitesse effective obtenue par traçage est de $4{,}28.10^{-4}$ m/s, ce qui donne une porosité cinématique sensiblement égale à 0,016.

Pour le traçage 9, la direction de la vitesse effective et celle du vecteur vitesse de DARCY sont quasiment orthogonales ; mais il convient de signaler que la détermination du vecteur vitesse de DARCY s'est faite sans tenir compte du cône d'influence du champ captant. Le fait que la direction du traçage 2 aurait du, en écoulement naturel, être orthogonale à celle observée, permet donc de suggérer une extension du cône d'influence des captages (écoulement radial convergent) d'au moins 700 m.

- Milieu fissuré.

Les deux traçages ont été considérés comme étant relatifs à deux familles de fissures, l'une de direction Nord-Sud, l'autre de direction Est-Ouest avec les caractéristiques déduites de la corrélation :

Famille Nord-Sud : fréquence = 0,0072 ouverture = 0,0035 m

Famille Est-Ouest : fréquence = 0,009 ouverture = 0,0012 m

Les cinq régimes d'écoulement ont été envisagés (voir paragraphe 9432) et seul le régime turbulent rugueux non parallèle s'est avéré possible.

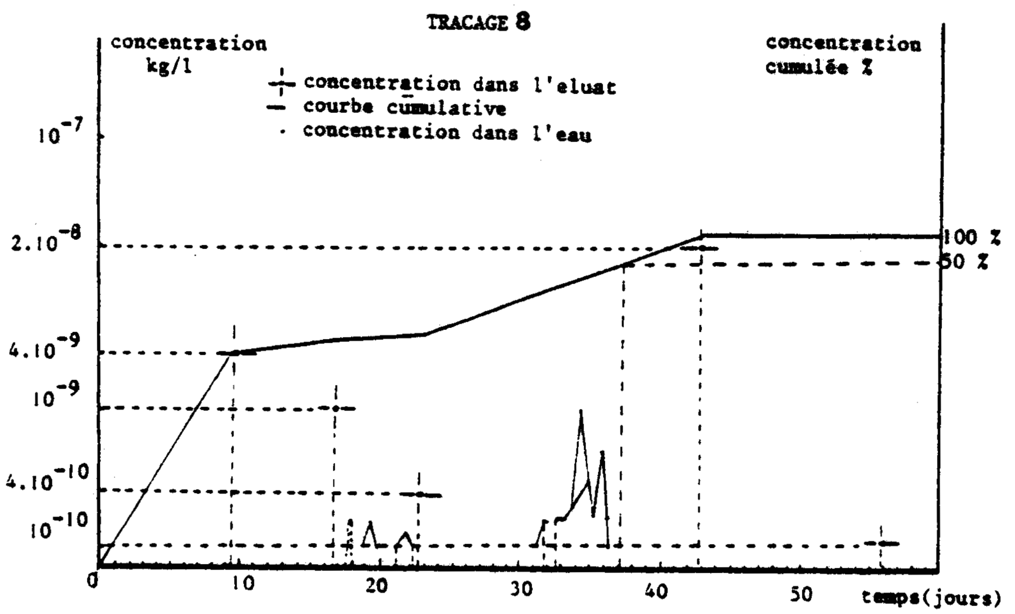


figure 24

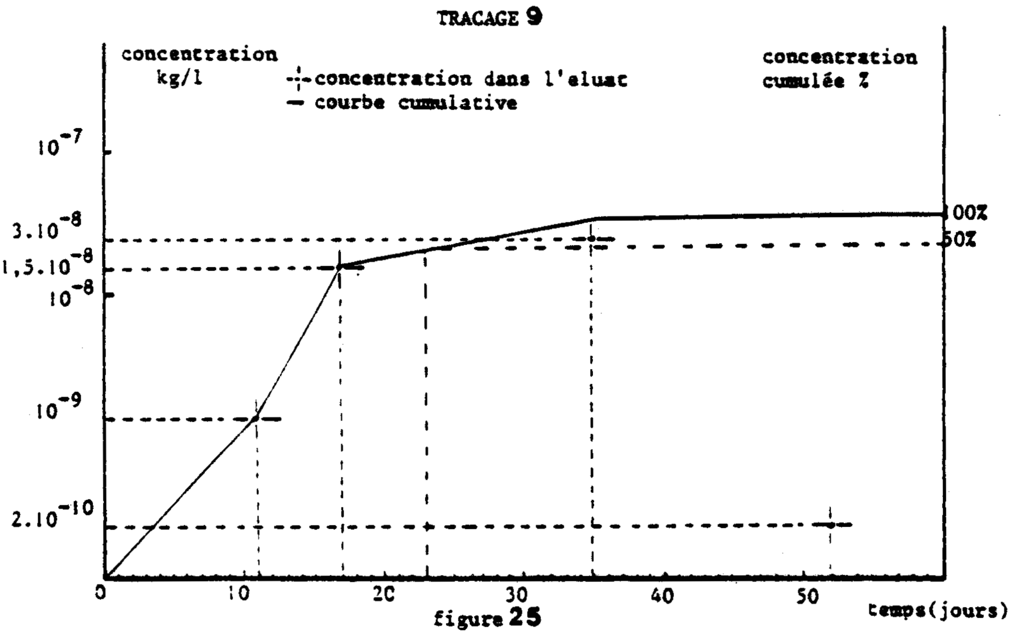


figure 25

figures 24 et 25-RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU SYNCLINAL DE SARS-POTERIES-

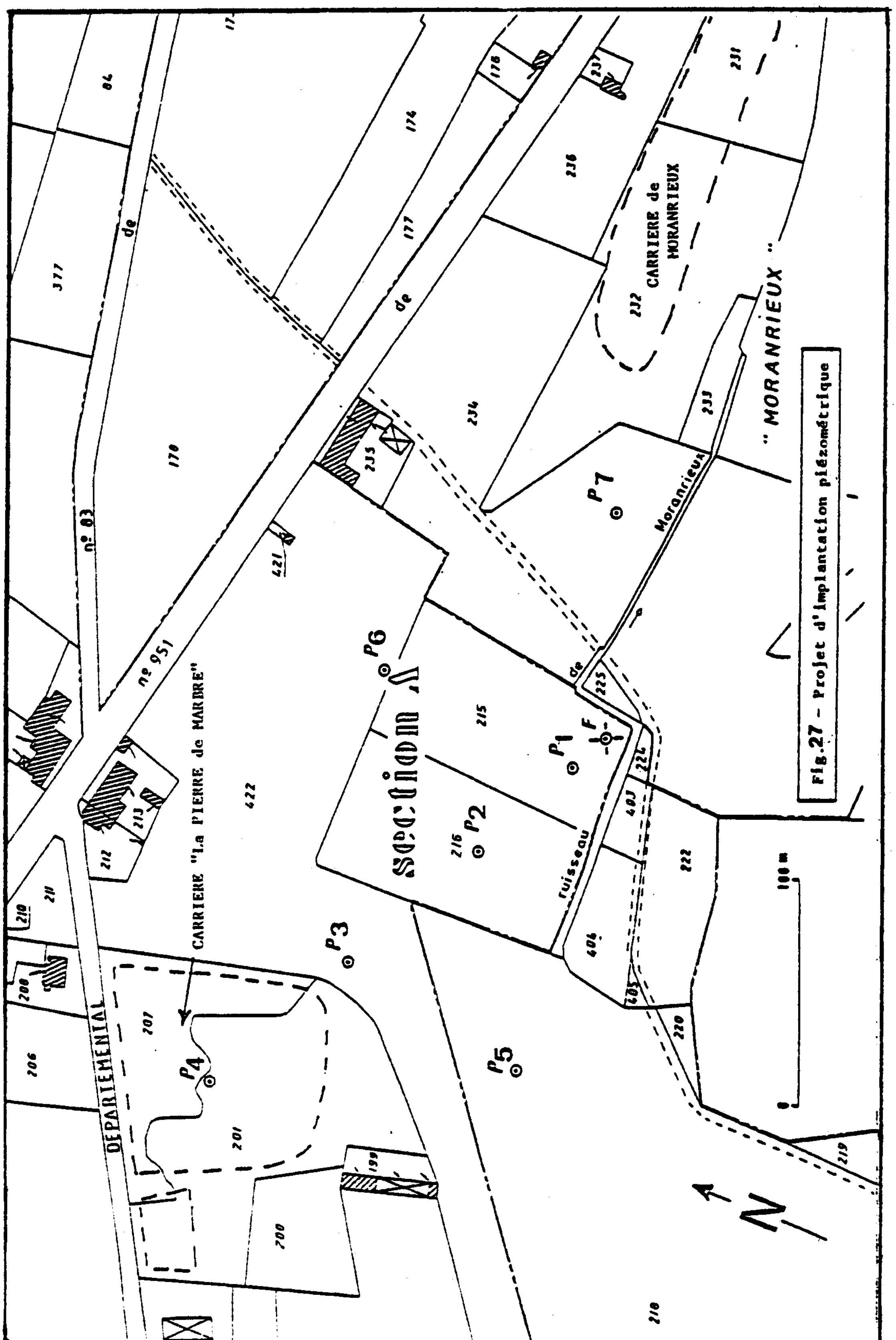


Fig.27 - Projet d'implantation piézométrique

XI. MONOCLINAL DE TRELON

11-1 Géologie

Le secteur de Rocquignies-Wallers-Trélon a une structure monoclinale constituée de bancs à pendage 30° à 40° Nord.
Aux calchistes et calcaires du Couvinien succèdent les calcaires bleus, compacts du Givetien et les schistes et calcaires du Frasnien. Cet ensemble est compartimenté par un réseau de failles subverticales de direction N 160°-170° (fig. 26).

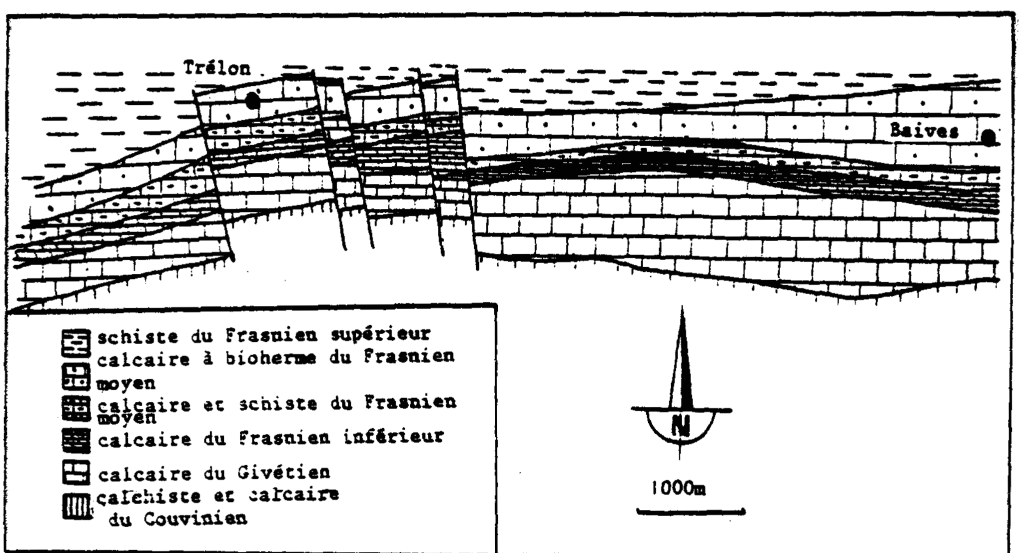


figure 26-SCHEMA GEOLOGIQUE DU MONOCLINAL DE TRELON-
(d'après la carte géologique de Trélon à 1/50 000)

11-2 Site expérimental de Moranrieux

Le site est constitué d'un puits de pompage et de sept piézomètres (fig. 27). Des pompages d'essai en période de baisse des niveaux d'eau et en période de réalimentation, ainsi que des traçages y ont été effectués.

11-21 Pompages d'essai

11-211 Résultats

Le tableau (27) synthétise les résultats de pompage, l'un réalisé en juillet 1982 (pompage 1), l'autre en octobre 1982 (pompage 2). Ils ont été interprétés par deux méthodes relatives aux pompages d'essai en milieu anisotrope.

	METHODE DE HANTUSH					METHODE DE THIERRY			
	GROUPE DE PIEZOMETRES	Tx(m^2/s)	Ty(m^2/s)	ANGLE Tx,NORD	COEF.EMM S	Tx(m^2/s)	Ty(m^2/s)	ANGLE Tx,NORD	COEF.EMM S
	P6-P1-P5	0.015	$2.46\,10^{-3}$	259	0.0219				
POMPAGE 1	P6-P2-P5	0.013	$3.56\,10^{-3}$	298	0.0316	$1.5\,10^{-2}$	$2.27\,10^{-3}$	90	0.017
	P6-P3-P5	$9.5\,10^{-3}$	$2.7\,10^{-3}$	294	0.023				
	P6-P1-P5	0.019	$1.9\,10^{-3}$	318	0.016				
	P6-P1-P7	0.044	$1.1\,10^{-3}$	321	0.011				
	P6-P2-P5	0.046	$8.4\,10^{-4}$	317	0.0075				
	P6-P2-P7	0.023	$2.2\,10^{-3}$	319	0.0197				
POMPAGE 2	P6-P3-P5	0.054	0.0273	274	0.137	$4.16\,10^{-2}$	$1.26\,10^{-2}$	95	0.091
	P6-P3-P7	0.058	0.0267	278	0.134				
	P6-P5-P7	0.011	$4.7\,10^{-3}$	298	0.0257				
	P1-P5-P7	0.020	$2.7\,10^{-3}$	107	0.0487				
	P2-P5-P7	0.019	$3.0\,10^{-3}$	108	0.0458				
	P3-P5-P7	0.048	0.0327	334	0.097				

tableau 27-RESULTATS DES POMPAGES D'ESSAI EFFECTUES SUR LE SITE DE MORENRIEUX-

La méthode de HANTUSH est valable si le milieu est véritablement anisotrope à l'échelle du dispositif puits-piézomètres. Son application par séries successives de trois directions montre une hétérogénéïté directionnelle. Le milieu anisotrope équivalent peut alors être recherché par le complément apporté par D. THIERY à cette méthode, en prenant en compte non plus trois directions, mais la totalité des résultats disponibles.

11-212 Interprétation à partir des données de fracturation

Une étude de la fracturation effectuée par R. LEMPEREUR (1983) met en évidence deux familles principales de fractures dont les caractéristiques sont les suivantes :

180°/E/85°	fréquence = 2	ouverture = 1 cm
90°/S/70°	fréquence = 2	ouverture = 0,5 cm

Le tenseur de perméabilité relatif à ces deux familles est :

$$\frac{9}{12\nu}\begin{pmatrix} 2{,}03\,10^{-6} & 0 \\ 0 & 2{,}16\,10^{-7} \end{pmatrix} \text{ dans la base } \{\overrightarrow{\text{Nord}}, \overrightarrow{\text{Ouest}}\}.$$

On a donc une perméabilité principale de direction Nord-Sud égale à 1,66 m/s et une perméabilité principale Est-Ouest égale à 0,217 m/s.

La comparaison des résultats du pompage d'essai interprété par la méthode complémentaire de THIERY avec ceux de l'interprétation de la fracturation montre une similitude des directions principales d'anisotropie (Nord-Sud, Est-Ouest). Par contre, on observe une divergence des rapports $\frac{K(E-W)}{K(N-S)}$ et $\frac{T(E-W)}{T(N-S)}$: $\frac{K(E-W)}{K(N-S)} = 0{,}131$

$$\frac{T(E-W)}{T(N-S)} = 3{,}3 \text{(pompage 2)}$$

$$\frac{T(E-W)}{T(N-S)} = 6{,}6 \text{(pompage 1)}$$

En plus de la différence des rapports de perméabilité et de transmissivité, il convient de remarquer le résultat paradoxal suivant :
les transmissivités obtenues lors du pompage (1) sont inférieures à celles du pompage (2) alors que ce dernier s'est effectué à une période où les cotes piézométriques étaient inférieures à celles relatives au pompage (1).

Hypothèses :

- l'épaisseur de l'aquifère est constante
- les perméabilités principales sont constantes

Proposition (1) :

Le régime est laminaire durant les intervalles de temps Δt_1 et Δt_2 correspondant aux pompages (1) et (2).
Si l'on considère que les fractures de direction Nord-Sud sont rugueuses, on peut écrire que :

$$\frac{K(E-W)}{K(N-S) \cdot \beta')} = 6{,}6 \quad \text{avec } \beta' = \frac{F}{1+8{,}8\left(\frac{\varepsilon}{dh}\right)1{,}5} = \frac{0{,}131}{6{,}6} = 0{,}0197 \text{ (pompage (1))}.$$

F : degré d'ouverture de la fracture

$\frac{\varepsilon}{dh}$: rugosité relative

$$\frac{K(E-W)}{K(N-S)\ \beta'} = 3{,}3 \Longrightarrow \beta' = 0{,}0394 \text{ (pompage (2))}.$$

Comme, à l'échelle temporelle humaine, β' est constant, la proposition 1 n'est pas valable.

Proposition (2) :

Le régime est turbulent pour le pompage 1 et laminaire pour le pompage 2.
Si l'on considère que seul des fractures Nord-Sud sont rugueuses, il y a composition d'écoulement.

pompage (2) : composition d'un écoulement laminaire parallèle et d'un écoulement laminaire non parallèle

pompage (1) : composition d'un écoulement turbulent hydrauliquement lisse et d'un écoulement turbulent rugueux soit parallèle soit non parallèle.

Le rapport des perméabilités pour le pompage (1) est égal à :

$$\frac{\left[\frac{g}{0{,}0079}\left(\frac{2}{\nu}\right)^{0,25}(fa^2)^{5/4}\right]^{4/7}}{4Fa\sqrt{gf}\,\log\frac{x}{(\varepsilon/dh)}} = 6{,}6 \quad (1)$$

x = 1,9 en écoulement rugueux non parallèle

x = 3,7 en écoulement rugueux parallèle.

- <u>écoulement turbulent rugueux non parallèle</u>

L'équation (1) permet d'écrire : $F \log(\frac{1,9}{\varepsilon/dh}) = 0{,}337$

Les paramètres α et ε/dh doivent vérifier le système :

$$\begin{cases} F \log(\frac{1,9}{\varepsilon/dh}) = 0{,}337 \quad \text{(pompage 1)} \\ \frac{\alpha}{1+8{,}8(\frac{\varepsilon}{dh})^{1,5}} = 0{,}0397 \quad \text{(pompage 2)} \end{cases}$$

Ce système permet d'obtenir l'équation suivante :

$$F = \frac{F \log(F-0{,}0397) + 0{,}5055}{-\ 0{,}0813}$$

Cette équation n'a pas de solution ; l'hypothèse du régime turbulent rugueux non parallèle est donc à rejeter.

- <u>écoulement turbulent rugueux parallèle</u>

$$\begin{cases} F \log \frac{3,7}{\varepsilon/dh} = 0{,}337 \\ \frac{F}{1+8{,}8(\frac{\varepsilon}{dh})^{1,5}} = 0{,}0397 \end{cases} \Longrightarrow \frac{F \log(F-0{,}0397) + 0{,}5055}{0{,}92} = F$$

Cette équation admet une solution : F = 0,1716, ce qui donne une rugosité relative égale à 0,5192.

<u>Conclusion</u> :

Pour rendre compte des données expérimentales, il est possible d'adopter le modèle d'un aquifère à perméabilités directionnelles et épaisseur constante, caractérisé par deux familles de fractures, l'une Est-Ouest, entièrement ouverte et lisse, l'autre Nord-Sud, ayant un degré d'ouverture égal à 17,16 % et dont les aspirités ou sinuosité sont égales au quart de l'ouverture des fractures. De plus, il faut admettre que lors du pompage (1), il y avait composition de deux régimes d'écoulement, l'un turbulent rugueux selon la direction Nord-Sud, l'autre turbulent hydrauliquement lisse selon la direction Est-Ouest ; et que lors du pompage (2), il y avait un écoulement laminaire non parallèle selon la direction Nord-Sud et un écoulement laminaire parallèle selon la direction Est-Ouest.

11-22 Traçages

11-221 Résultats

Le tableau suivant synthétise les résultats des deux traçages (Fig. 28 et 29), l'un Nord-Sud, à partir d'une perte du ruisseau Moranrieux(traçage 13), l'autre de direction 105° à partir du piézomètre P_2 (traçage 14).

TRACAGE	DISTANCE AU PUITS	Tc	P	α(m)	DEBIT(m^3/h)
13	14 m	12.5mn	4.4	3.18	44
14	68.88m	123h	7.7	1.8	73

tableau 28-RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES SUR LE SITE DE MORENRIEUX-

tc : temps de transfert par convection pure

P : nombre de Peclet dynamique

α : dispersivité

en supposant un écoulement axisymétrique convergent

L'expression de la hauteur h d'aquifère est : $e = \frac{q \times tc}{\Pi r^2 \omega_c}$ avec ω_c : porosité cinématique.

Si l'on désigne le produit $e\omega_c$ par hauteur efficace, on a :

$e\omega_c$ = 0,3845 m pour le traçage 2.

$e\omega_c$ = 0,0071 m pour le traçage 1.

Si l'on considère h comme constante, il faut admettre une variation de ω selon la direction c'est-à-dire admettre le concept de porosité cinématique directionnelle.

$$\frac{\omega_c \text{ Nord-Sud}}{\omega_c \text{ Est-Ouest}} = 0,02$$

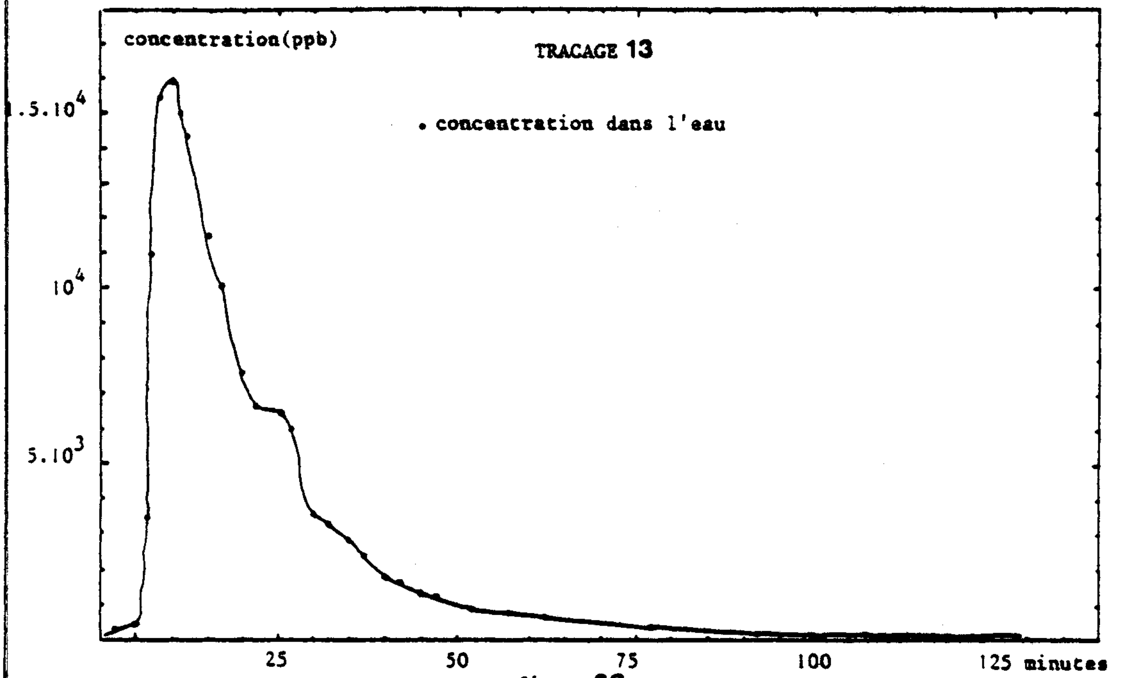


figure 28

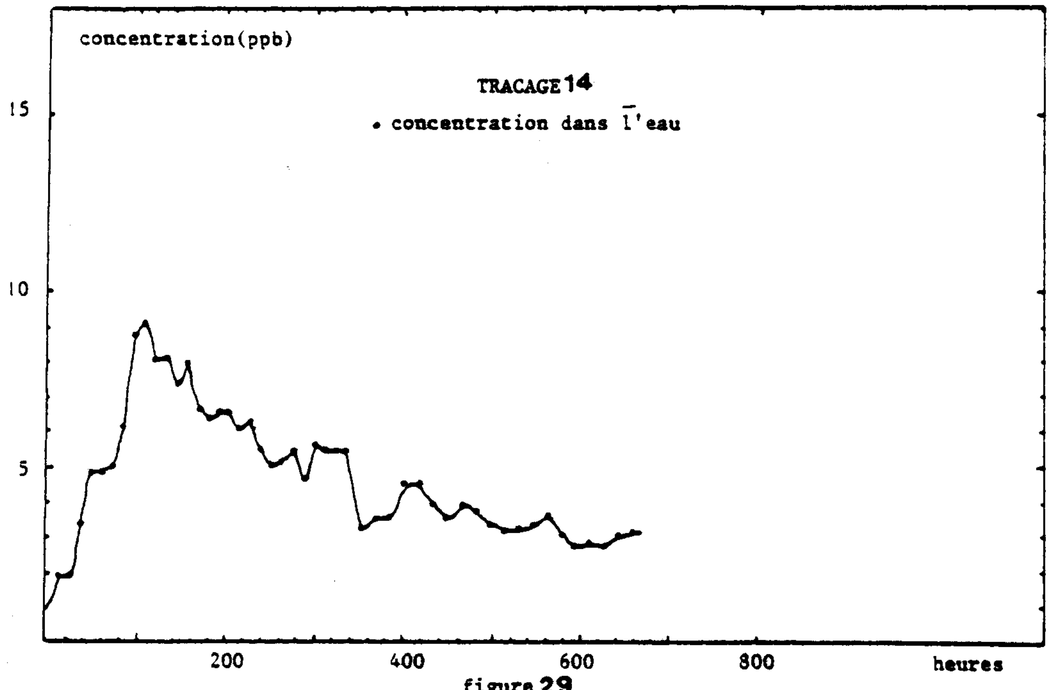


figure 29

figures 28 et 29–RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU SITE EXPERIMENTAL DE MORENRIEUX-

II-222 Relation avec la fracturation

Les données de fracturation donnent un rapport entre les porosités totales égal à 2, les deux familles de fractures ayant même fréquence et une ouverture deux fois plus importante pour la famille de direction Nord-Sud que pour la famille de direction Est-Ouest. Si l'on fait intervenir le degré d'ouverture des fractures de direction Nord-Sud (17 %) ainsi que la rugosité relative (0,5), le rapport passe de 2 à 0,17 ; il est encore 8,5 fois trop important. Les fractures de direction Est-Ouest, considérées comme lisses, ont une surface spécifique moins importante que celle des fractures de direction Nord-Sud, considérées comme rugueuses, ce qui implique que le pourcentage de molécules d'eau liée est plus important pour les familles Nord-Sud que pour les familles Est-Ouest. La porosité cinématique étant définie comme le rapport du volume d'eau mobile et du volume totale, on peut donc admettre que le facteur correctif égal à 8,5 est dû au rapport des pourcentages d'eau liée des familles Nord-Sud et Est-Ouest.

II-223 Interprétation selon la fonction intrinsèque au terrain g (x) telle que $D_L(t) = V_e^{3/2} \cdot g(x)$

L'analyse des traçages donne une dispersivité plus importante dans la direction Nord-Sud que dans la direction Est-Ouest ; intuitivement, ce résultat semble logique, les fractures Nord-Sud étant considérées comme plus rugueuses. Des travaux récents (DIEULIN 1980, PREAUX, 1983) semblent montrer le caractère non intrinsèque de la dispersivité ; des traçages à des débits différents pour une même ligne de piézomètres, effectués sur le site expérimental de Béthune (Pas-de-Calais) montrent que la dispersivité varie. DIEULIN précise que la loi $D_L = \alpha \quad V_e$ n'est valable que dans le cas d'un aquifère homogène et isotrope ; il montre qu'une loi du type $D_L(t) = V_e^{3/2} \quad g(x)$, où g(x) est une fonction qui ne dépend que de la distance, est plus adaptée à des terrains hétérogènes. Le traçage Nord-Sud ayant été effectué à 44 m^3/h, et ayant donné une dispersivité apparente égale à 3,18 m, il convient donc de déterminer la dispersivité pour le débit 73 m^3/h correspondant au traçage Est-Ouest, ce qui revient à déterminer l'évolution de la concentration du traceur pour ce débit. Connaissant les fonctions de dispersion $D_L(t)$ au débit 44 m^3/h, il est possible d'en déduire celles correspondant au débit $74 m^3/h$:

$$\left.\begin{array}{l} D_L^{44}(t) = V_{e44}^{3/2} \quad g(x) \\ D_L^{44}(t') = V_{e74}^{3/2} \quad g(x) \end{array}\right\} \Longrightarrow D_L^{74}(t') = D_L^{44}\left(\frac{V_e^{74}}{V_e^{44}} \quad t'\right) \quad \left(\frac{V_e^{74}}{V_e^{44}}\right)^{3/2} \qquad (1)$$

avec $x = V_e^{44} \quad t = V_e^{74} \quad t'$

A partir des fonctions de dispersions relatives au débit $74m^3/h$, il est possible, grâce aux solutions analytiques du type $C(x,t) = f(x,t,\omega,M,V_e,D_L(t))$ de calculer les concentrations en fonction du temps pour une distance donnée. J.P. SAUTY (1977) montre que, pour des nombres de Peclet dynamique supérieurs à 1, la solution en écoulement monodimensionnel uniforme pour une injection brève et que pour des nombres de Peclet supérieurs à 3, la solution de la dérivée de la réponse à l'échelon en écoulement monodimensionnel concordent très bien avec les solutions relatives à l'écoulement radial convergent.

Pour l'injection instantanée en écoulement monodimensionnel uniforme, la solution est :

$$C(x,t) = \frac{M/\omega_c}{2\sqrt{\Pi D_L(t) \quad t}} \quad \exp\left\{ - \frac{(x-V_e t)^2}{4D_L(t) \quad t} \right\} \qquad (2)$$

Pour la dérivée de la réponse à un échelon imposé elle est :

$$C(x,t) = \frac{M \, X}{2\omega_e V_e \sqrt{\Pi D_L(t)}} \quad \frac{1 \exp}{t^{1,5}} \quad \left\{ - \frac{(x-V_e t)^2}{4D_L(t) \cdot t} \right\} \qquad (3)$$

Or, l'équation (2) s'est avérée inapplicable aux données du traçage Nord-Sud : il n'a pas été possible de calculer les fonctions de dispersion $D_L(t)$ à partir des valeurs $C(x,t)$; alors qu'elles ont pu l'être en utilisant l'équation (3). Ce fait est certainement dû aux conditions expérimentales plus proches d'une injection en créneau que d'une injection instantanée.

En posant $F = \frac{M \; x}{2\omega_c V_e \sqrt{\Pi}}$, l'expression (3) peut se mettre sous la forme :

$$\frac{C(x,t) \quad t^{1,5}}{F} = \frac{1}{\sqrt{D_L(t)}} \quad \exp\left\{ \frac{-(x-V_e t)^2}{4D_L(t)t} \right\} = f\left[D_L(t)\right] \qquad (4)$$

L'expression de la dérivée en fonction de $D_L(t)$ est :

$$\frac{d}{dD_L(t)} \quad f\left[D_L(t)\right] = f\left[D_L(t)\right] \quad \left[\frac{(x-V_e t)^2}{2t} - D_L(t)\right] \quad \frac{1}{2D_L(t)^2} \qquad (5)$$

A partir de l'équation (5), il est donc possible d'étudier les variations de $f\left[D_L(t)\right]$ en fonction de $D_L(t)$

$D_L(t)$	0		$\frac{x-V_e t}{2t}$		$+\infty$
$\frac{d\, f(D_L(t))}{d D_L(t)}$		$+$	0	$-$	
$f[D_L(t)]$	0	$\nearrow$	$f_{max} = \frac{1}{\sqrt{\frac{x-V_e t}{2t}}}\, e^{-\frac{1}{2}}$	$\searrow$	0

DIEULIN arrive au même résultat pour l'écoulement bidimensionnel uniforme.

Connaissant fmax, il est donc possible, à partir de l'équation (4) de calculer F ; connaissant F on pourra calculer les fonctions de dispersion $D_L(t)$, puis l'équation (1) permettra de calculer les fonctions $D'_L(t)$ pour un débit différent.

A partir des valeurs $D'_L(t)$ calculées, on pourra, à partir de l'équation (3) calculer les concentrations $C(x,t)$ et donc d'obtenir les valeurs de dispersivités pour le nouveau débit.

Le tableau (29) présente les résultats obtenus.

La figure (30) montre l'évolution de la fonction $D_L(t)$ pour les débits $44 m^3/h$ et $73 m^3/h$.

TRACAGE	DISTANCE AU PUITS	Tc	P	α (m)	DEBIT(m^3/h)
13	14m	12.5mn	4.4	3.18	44
13	14m	10.5mn	2.38	5.88	73
14	68.88m	123h	1.8	1.8	73

tableau 29-CALCUL DE LA DISPERSIVITE RELATIVE AU TRACAGE 13 POUR LE DEBIT $73 m^3/h$ A PARTIR DE CELLE OBTENUE POUR LE DEBIT $44 m^3/h$-

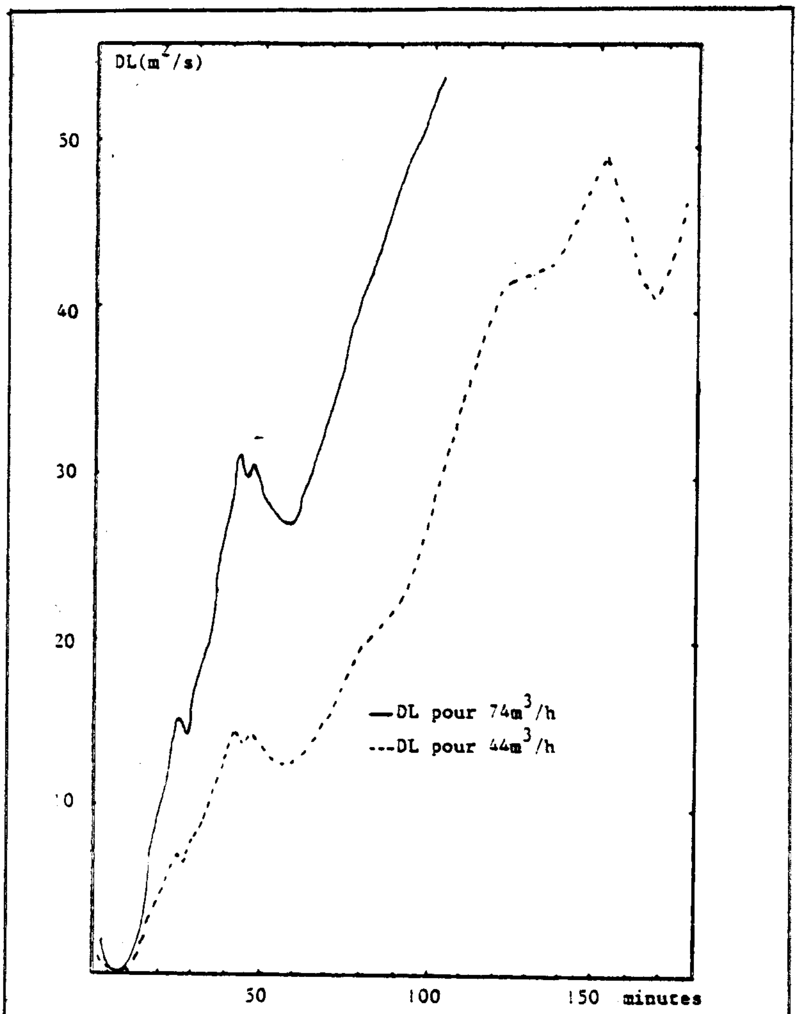


figure 30

figure 30–EVOLUTION TEMPORELLE DE LA FONCTION DE DISPERSION LONGITUDINALE DL(t)-

La dispersivité obtenue pour le débit 73m^3/h est égale à 5,88 m ; donc supérieure à celle obtenue pour le débit 44m^3/h.

Les valeurs de dispersivités obtenues sont des valeurs globales qui résultent de l'hypothèse du caractère intrinsèque de la dispersivité (constance de la dispersivité en fonction du temps). Or D_L étant une fonction du temps, si l'on considère le paramètre $\frac{D_L(t)}{V_e} = \alpha(t)$, on peut dire que la dispersivité est fonction du temps. Le tableau (30) montre l'évolution de la dispersivité en fonction du temps pour les débit $44m^3/h$ et $73m^3/h$; on constate que les valeurs de dispersivité $\alpha(t)$ sont plus élevées pour $73m^3/h$ que pour $44m^3/h$.

t(mn)	C(t)(1000ppb)	$Cxt^{1.5}$	Dl(t)(m^2/mn)	t'=tx1.65	C(t')(1000ppb)	Dl(t')	D'l(t)	C'(t)(1000ppb)	α(t)(m)	α(t')(m)
0	0.0015	0	0	0	0	0	0	[illegible]	0	0
2	0.23	0.65	2.09	3.3	0.3	1.05	2.23	1.44	1.25	1.16
5	0.41	4.5	0.485	8.25	15.7	0.2	0.426	2.7	0.291	0.22
6.38	3.5	56	0.293	10.53	15.6	0.02	0.0426	35	0.175	0.022
7	11.1	18	0.378	11.55	15	0.0016	0.0034	68	0.23	0.0017
8.18	15.5	96.26	0.208	13.49	12.9	0.013	0.0277	20.5	0.125	0.0144
9.42	16	46.26	0.077	15.54	11	0.1	0.213	18.5	0.046	0.11
11.18	15	56.07	0.0054	18.44	8.7	0.347	0.741	11.4	0.003	0.385
12	14.3	59.44	$1.86 10^{-5}$	19.8	7.6	0.525	1.118	9.8	$1.1 10^{-5}$	0.58
14.5	11.5	63.49	0.0426	23.92	6.6	1.62	3.4	7.3	0.025	1.77
17	10	70.09	0.206	28.05	4.9	3.4	7.24	5.18	0.124	3.76
19.5	7.6	65.44	0.482	32.17	3.3	4.4	9.37	3.6	0.28	4.87
25.45	6.5	83.4	2.75	41.99	1.65	7.2	15.33	1.8	1.65	7.97
27	6	84.17	5.5	44.55	1.3	6.7	14.27	1.47	3.3	7.42
29.55	3.6	57.82	4.2	52.8	0.8	8	17.04	0.943	2.52	8.86
35.04	2.85	59.11	6.6	57.82	0.7	10	21.3	0.798	3.96	11.07
37	2.4	54.01	6.6	61.05	.65	11.8	25.13	0.731	3.96	13.06
39.55	1.8	44.77	5.8	65.26	0.59	13	27.7	0.63	3.48	14.4
42	1.65	44.31	7.2	69.3	0.5	14.6	31.1	0.557	4.32	16.17
44.55	1.3	38.65	6.75	73.5	0.4	13.8	29.4	0.462	4.05	15.28
47	1.2	38.66	7.9	77.55	0.35	14.5	30.88	0.406	4.74	16.05
57	0.8	34.42	11.6	94.05	0.15	12.6	26.84	0.2	6.96	13.95
62	0.61	29.77	11.5	102.3	0.11	12.9	27.48	0.153	6.9	14.28
77	0.35	23.64	14.1	127.05	0.08	18.7	39.83	0.107	8.46	20.71
92	0.16	14.12	12.4	151.8	0.055	22.8	48.56	0.073	7.44	25.25
107	0.111	12.17	14.6	176.55	0.05	32.5	69.22	0.062	8.76	35.99
122	0.099	13.34	19.5	201.3	0.042	41.5	88.4	0.051	11.7	46.[illegible]
137	0.064	10.26	19.4	226.05	0.03	42.8	91.16	0.037	11.64	47.4
152	0.055	10.30	23	250.8	0.025	49.5	105.43	0.031	13.8	54.8
167	0.044	9.49	25	275.55	0.014	40.7	86.7	0.019	15	45.08
182	0.036	8.84	27.2	300.3	0.0131	48	102.24	0.017	16.32	53.16

tableau 30-EVOLUTION TEMPORELLE DE LA DISPERSIVITE POUR LES DEBITS $44m^3/h$ et $73m^3/h$-

II-224 Simulation de l'évolution spatio-temporelle d'un traceur en écoulement monodimensionnel non uniforme (Programme SIMEVOT)

II-2241 Modélisation

Il s'agit d'un modèle unidimensionnel à mailles carrées qui a deux fonctions :

- calcul de la piézométrie en régime transitoire
- calcul de la concentration du traceur pour chaque maille et pour chaque pas de temps lorsque le régime permanent est atteint.

Le calcul de la piézométrie est effectué, par différences finies, en utilisant la méthode explicite (voir annexe 9) :

$$h_i^{t+\Delta t} = \frac{T\ t}{S_e \Delta x^2}\ h^t_{i+1} + h^t_{i-1} + h_i^t \left(1 - \frac{2T\Delta t}{S_e \Delta x^2}\right)$$

T : Transmissivité (m^2/s)

S_e: Coefficient d'emmagasinement

Δx: Côté de la maille (m)

Δt: Pas de temps (s)

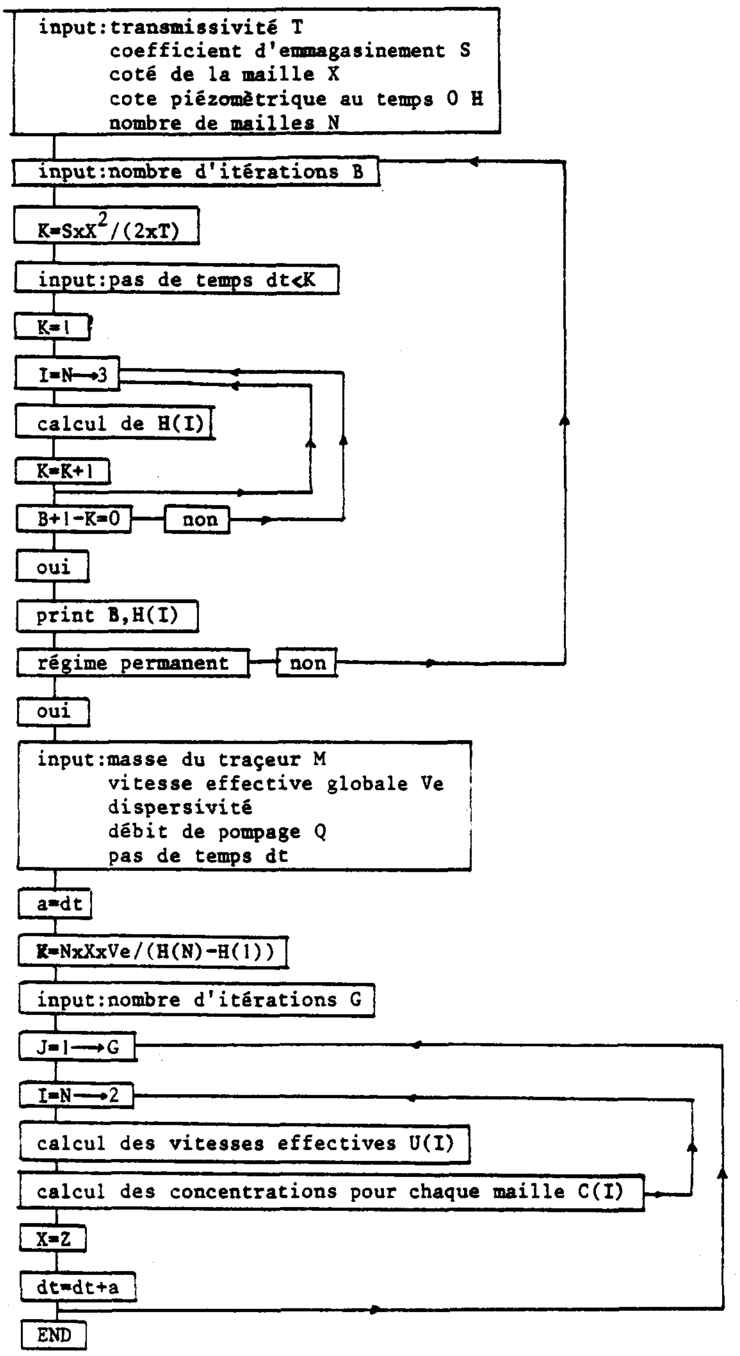
h_i^t : Cote piézométrique de la maille à l'instant t.

Le calcul de la concentration du traceur est effectué en utilisant la solution explicite de la dérivée de la réponse à un échelon de concentration :

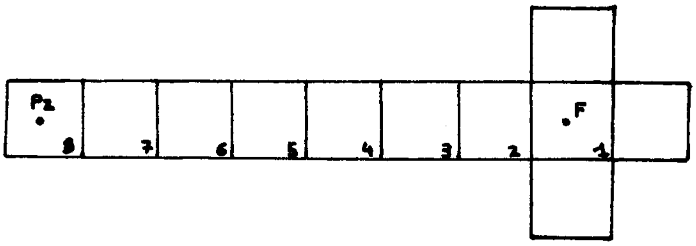
$$C(t) = \frac{M\ x}{2q\sqrt{\Pi D}}\ \frac{1}{t^{1,5}} \exp\left\{- \frac{(x-Ve\,t)^2}{4D\ t}\right\}$$

SAUTY montre que cette solution constitue une excellente approximation pour l'écoulement convergent (injection brève) pour un nombre de Peclet supérieur à 3.

11-2242 Ordinogramme du programme SIMEVOT



II-2243 Exemple de simulation



- Données :

  Vitesse effective moyenne : 0,57 m/h

  Dispersivité : 1,8 m

  Débit de pompage : 71,05 m^3/h

  Transmissivité : 45,56 m^2/h

  Coefficient d'emmagasinement : 0,09

- Cotes piézométriques des mailles en régime permanent (en m) :

  h_1 = 195,2

  h_2 = 195,460

  h_3 = 195,720

  h_4 = 195,980

  h_5 = 196,237

  h_6 = 196,493

  h_7 = 196,747

  h_8 = 197

- Concentrations en Kg/m^3 pour chaque maille et pour un pas de temps égal à 5 heures :

TEMPS	. C1	. C2	. C3	. C4	. C5	. C6	. C7
5	0	0	0	$9.35\,10^{-32}$	$3.19\,10^{-18}$	$6.28\,10^{-9}$	$5.39\,10^{-4}$
10	0	$7.87\,10^{-34}$	$1.6\,10^{-23}$	$2.6\,10^{-15}$	$3.29\,10^{-9}$	$2.98\,10^{-5}$	$1.54\,10^{-3}$
15	$5.41\,10^{-30}$	$1.53\,10^{-21}$	$4.25\,10^{-15}$	$4.67\,10^{-10}$	$1.97\,10^{-6}$	$2.57\,10^{-4}$	$1.3\,10^{-3}$
20	$1\,10^{-21}$	$1.54\,10^{-15}$	$5.01\,10^{-11}$	$1.43\,10^{-7}$	$3.5\,10^{-5}$	$6.81\,10^{-4}$	$8.7\,10^{-4}$
25	$7.6\,10^{-17}$	$4.87\,10^{-12}$	$1.1\,10^{-8}$	$3.5\,10^{-6}$	$1.5\,10^{-4}$	$8.8\,10^{-4}$	$5.4\,10^{-4}$
30	$1.12\,10^{-13}$	$8.7\,10^{-10}$	$3.3\,10^{-7}$	$2.48\,10^{-5}$	$3.51\,10^{-4}$	$8.85\,10^{-4}$	$3.28\,10^{-4}$
35	$1.7\,10^{-11}$	$3.07\,10^{-8}$	$3.3\,10^{-6}$	$8.65\,10^{-5}$	$5.42\,10^{-4}$	$7.62\,10^{-4}$	$1.99\,10^{-4}$
40	$6.9\,10^{-10}$	$3.9\,10^{-7}$	$1.61\,10^{-5}$	$1.94\,10^{-4}$	$6.63\,10^{-4}$	$6.01\,10^{-4}$	$1.2\,10^{-4}$
45	$1.07\,10^{-8}$	$2.53\,10^{-6}$	$5\,10^{-5}$	$3.28\,10^{-4}$	$6.96\,10^{-4}$	$4.49\,10^{-4}$	$7.35\,10^{-5}$
50	$8.7\,10^{-8}$	$1.03\,10^{-5}$	$1.12\,10^{-4}$	$4.53\,10^{-4}$	$6.58\,10^{-4}$	$3.23\,10^{-4}$	$4.49\,10^{-5}$
55	$4.49\,10^{-7}$	$2.97\,10^{-5}$	$1.99\,10^{-4}$	$5.41\,10^{-4}$	$5.77\,10^{-4}$	$2.27\,10^{-4}$	$2.76\,10^{-5}$
60	$1.6\,10^{-6}$	$6.65\,10^{-5}$	$2.99\,10^{-4}$	$5.82\,10^{-4}$	$4.79\,10^{-4}$	$1.57\,10^{-4}$	$1.7\,10^{-5}$
65	$4.47\,10^{-6}$	$1.22\,10^{-4}$	$3.91\,10^{-4}$	$5.77\,10^{-4}$	$3.82\,10^{-4}$	$1.07\,10^{-4}$	$1.06\,10^{-5}$
70	$1.1\,10^{-5}$	$1.94\,10^{-4}$	$4.63\,10^{-4}$	$5.37\,10^{-4}$	$2.95\,10^{-4}$	$7.23\,10^{-5}$	$6.6\,10^{-6}$
75	$1.89\,10^{-5}$	$2.72\,10^{-4}$	$5.04\,10^{-4}$	$4.75\,10^{-4}$	$2.22\,10^{-4}$	$4.85\,10^{-5}$	$4.13\,10^{-6}$
80	$3.12\,10^{-5}$	$3.46\,10^{-4}$	$5.14\,10^{-4}$	$4.04\,10^{-4}$	$1.64\,10^{-4}$	$3.23\,10^{-5}$	$2.6\,10^{-6}$
85	$4.62\,10^{-5}$	$4.06\,10^{-4}$	$4.96\,10^{-4}$	$3.32\,10^{-4}$	$1.19\,10^{-4}$	$2.15\,10^{-5}$	$1.63\,10^{-6}$
90	$6.2\,10^{-5}$	$4.46\,10^{-4}$	$4.58\,10^{-4}$	$2.66\,10^{-4}$	$8.55\,10^{-5}$	$1.428\,10^{-5}$	$1.036\,10^{-6}$
100	$9.08\,10^{-5}$	$4.59\,10^{-4}$	$3.51\,10^{-4}$	$1.6\,10^{-4}$	$4.27\,10^{-5}$	$6.24\,10^{-6}$	$4.18\,10^{-7}$
105	$1\,10^{-4}$	$4.37\,10^{-4}$	$2.94\,10^{-4}$	$1.21\,10^{-4}$	$2.98\,10^{-5}$	$4.11\,10^{-6}$	$2.66\,10^{-7}$
110	$1.056\,10^{-4}$	$4.02\,10^{-4}$	$2.41\,10^{-4}$	$9.07\,10^{-5}$	$2.07\,10^{-5}$	$2.71\,10^{-6}$	$1.7\,10^{-7}$
115	$1.066\,10^{-4}$	$3.58\,10^{-4}$	$1.94\,10^{-4}$	$6.69\,10^{-5}$	$1.43\,10^{-5}$	$1.78\,10^{-6}$	$1.09\,10^{-7}$
120	$1.038\,10^{-4}$	$3.117\,10^{-4}$	$1.53\,10^{-4}$	$4.89\,10^{-5}$	$9.84\,10^{-6}$	$1.17\,10^{-6}$	$7\,10^{-8}$
125	$9.78\,10^{-5}$	$2.64\,10^{-4}$	$1.19\,10^{-4}$	$3.54\,10^{-5}$	$6.73\,10^{-6}$	$7.74\,10^{-7}$	$4.5\,10^{-8}$
130	$8.96\,10^{-5}$	$2.2\,10^{-4}$	$9.1\,10^{-5}$	$2.54\,10^{-5}$	$4.6\,10^{-6}$	$5.1\,10^{-7}$	$2.9\,10^{-8}$
135	$8.01\,10^{-5}$	$1.8\,10^{-4}$	$6.9\,10^{-5}$	$1.81\,10^{-5}$	$3.1\,10^{-6}$	$3.35\,10^{-7}$	$1.87\,10^{-8}$
140	$7\,10^{-5}$	$1.4\,10^{-4}$	$5.21\,10^{-5}$	$1.28\,10^{-5}$	$2.12\,10^{-6}$	$2.21\,10^{-7}$	$1.2\,10^{-8}$
145	$6\,10^{-5}$	$1.15\,10^{-4}$	$3.88\,10^{-5}$	$9.09\,10^{-6}$	$1.44\,10^{-6}$	$1.45\,10^{-7}$	$7.83\,10^{-9}$
150	$5.05\,10^{-5}$	$9.01\,10^{-5}$	$2.86\,10^{-5}$	$6.38\,10^{-6}$	$9.7\,10^{-7}$	$9.57\,10^{-8}$	$5.07\,10^{-9}$

tableau 31-EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE CONCENTRATION (simulation du traçage 14)-

- Comparaison avec les résultats expérimentaux :

La comparaison entre l'évolution des concentrations expérimentales au puits et celles des concentrations obtenues par simulation donne un coefficient de corrélation égal à 92 %.

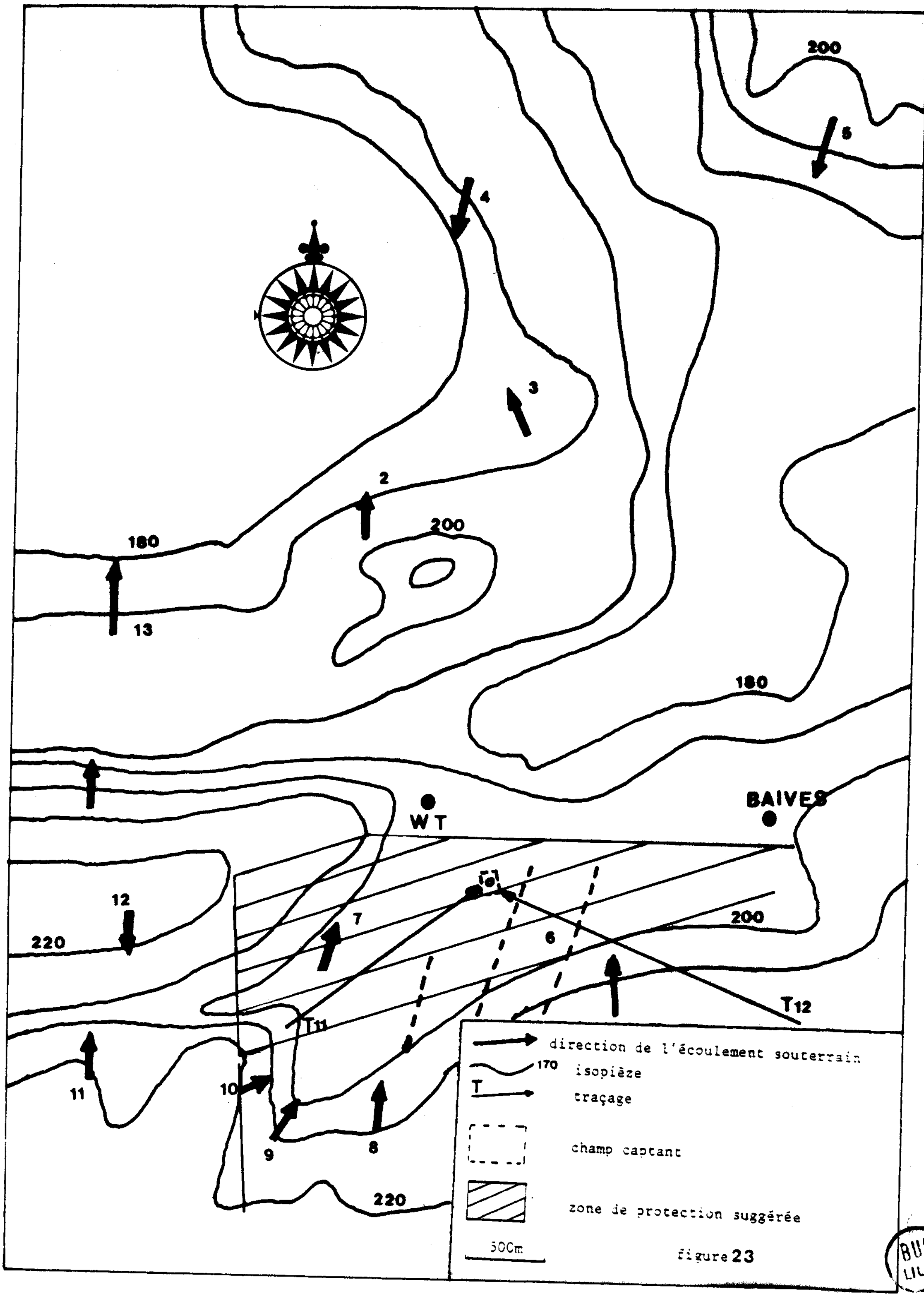
Le temps correspondant à la concentration maximum (9,3ppb) est égal à 110 heures pour les données expérimentales, pour les données simulées, il est égal à 115 heures (106,6ppb). On peut dire que, si le modèle rend compte de façon convenable de l'évolution des concentrations, il restitue des concentrations plus fortes que les concentrations expérimentales (ici, 10 fois supérieur) ; mais il convient de signaler que le modèle ne prend pas en compte les phénomènes de non restitution (stockage par absorption, dégradation) qui se manifestent fréquemment lors des expérimentations.

11-3 Zones d'alimentation du captage de Wallers-Trélon

Les données de fracturation et piézométrique ont permis, à l'aide du programme CPVGRHMA, d'obtenir les résultats suivants (fig. 33).

SECTEUR	GRADIENT HYDRAULIQUE		VITESSE DE DARCY		PERMEABILITE(m/s)
	direction	valeur	direction	valeur	
1	1	0.026	0.1	0.043	1.66
2	320	0.026	-6.2	0.027	1.3
3	292	0.04	-17.9	0.017	0.65
4	240	0.026	12.75	0.015	0.85
5	205	0.026	3.48	0.036	1.50
6	345	0.0177	-2	0.027	1.60
7	45	0.0053	7.45	0.0049	1.18
8	350	0.022	-1.3	0.035	1.63
9	30	0.04	4.31	0.052	1.44
10	85	0.08	56.2	.018	0.26
11	1	0.026	0.13	0.043	1.66
12	175	0.033	-0.6	0.054	1.65
13	179	0.047	-0.13	0.078	1.66

tableau 32-VITESSE DE DARCY ET PERMEABILITES CALCULEES AU NIVEAU DU MONOCLINAL DE TRELON-



200
5
4
3
2
200
180
13
180
BAIVES
W T
12
220
7
6
200
T12
T11
11
10
9
8
220
direction de l'écoulement souterrain
170 isopièze
T
traçage
champ captant
zone de protection suggérée
500m

figure 23

Au niveau du secteur 6, le vecteur vitesse de DARCY calculée et le vecteur vitesse effective expérimentale font un angle de 60 °. Il y a donc divergence entre la piézométrie et l'écoulement réel souterrain. Il convient donc, en fonction de la direction de cet écoulement souterrain, de modifier le sens du gradient hydraulique (option 3 du programme CPVGRHMA) :

Azimut de l'écoulement souterrain : 295°

Azimut du gradient hydraulique associé : 274°

Le vecteur vitesse de DARCY recalculé avec le nouveau gradient a un azimut de - 64,9° et un module égal à $3,9.10^{-3}$ m/s. La perméabilité directionnelle est égale à 0,239 m/s.

11-4 Traçages

11-41 Résultats

Les résultats sont représentés par les figures (31 et 32)

TRACAGE	Tc(j)	DISTANCE AU PUITS(m)	VITESSE EFFECTIVE(m/j)
11	17	1200	73
12	16	2500	156

tableau 33-RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU MONOCLINAL DE TRELON-

11-42 Interprétation

Le traçage 12 donne une vitesse effective de 156 m/J soit environ 2.10^{-3} m/s.
La vitesse de DARCY calculée est égale à $3,9.10^{-3}$ m/s ; on obtient donc une porosité cinématique supérieure à 1 donc aberrante.
Deux hypothèses sont envisageables :

11-421 Hypothèse 1

Les relevés des fractures au niveau de carrières, donc en zone perturbée, ne sont pas représentifs de ce qui prévaut au sein du massif non perburbé. En effet, la décompression des terrains, les ébranlements dus aux tirs à l'explosif, le délavage par des inondations d'eau ou de fluides de forage ont pour effet d'ouvrir les fissures et les perméabilités que l'on calcule en se fondant sur des

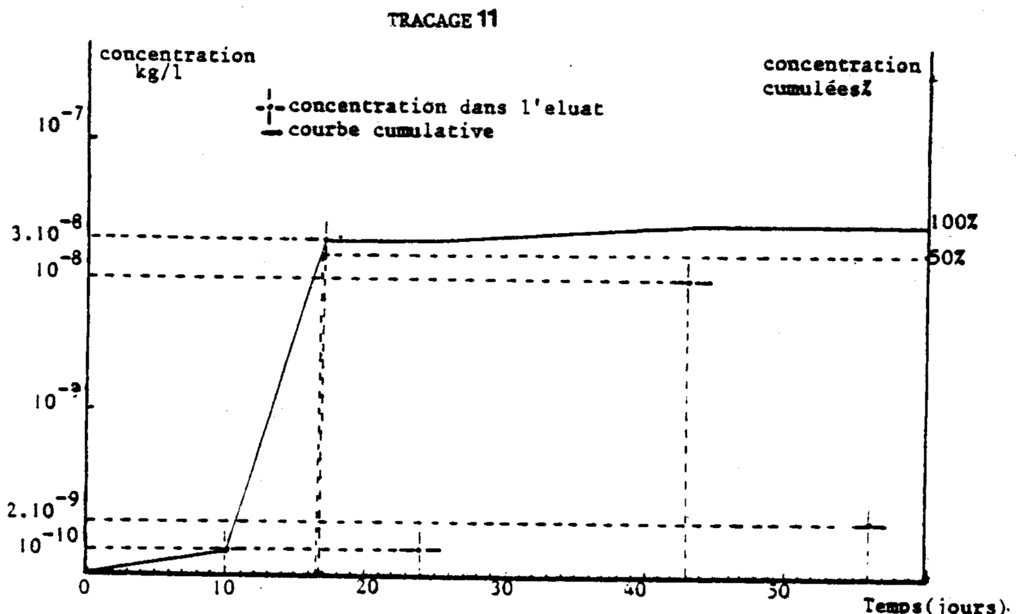


figure 31

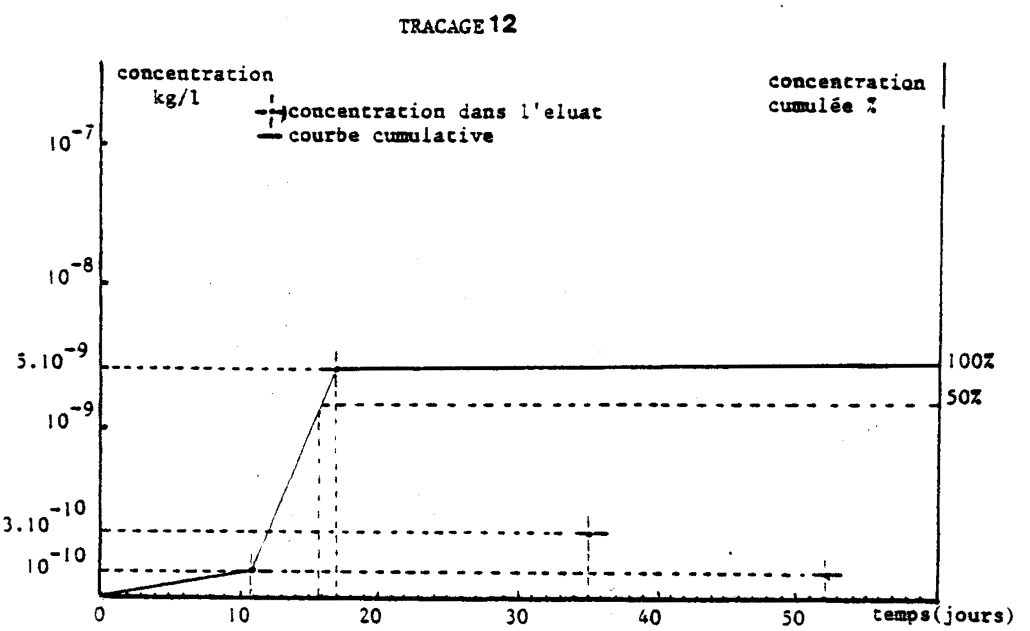


figure 32

figures 31 et 32-RESULTATS DES TRACAGES EFFECTUES AU NIVEAU DU MONOCLINAL DE TRELONépaisseurs observées dans de telles conditions sont toujours très supérieures aux perméabilités réelles déduites d'essai in situ intéressant des volumes de roches non perturbées. Auquel cas, il est illusoire de déterminer un module de perméabilité. Par contre l'expérience acquise jusqu'à ce jour a montré la validité des directions des perméabilités principales du tenseur calculé.

II-422 Hypothèse 2

Le régime d'écoulement est hors du domaine de définition de la loi de DARCY. On peut modéliser le traçage par une famille de fissures telles que, pour le gradient hydraulique d'azimut 274° et de valeur 0,0177, la vitesse de DARCY (régime laminaire parallèle) serait égale à $3{,}9.10^{-3}$ m/s ; cette famille de fissures étant supposées verticales et de même direction que celle du traçage.

$\frac{g}{12\nu} fa^3 J\cos\alpha' = 3{,}9.10^{-3}\,m/s \Longrightarrow fa^3 = 2{,}88.10^{-7}$ avec $f = 2$ et $a = 5{,}2.10^{-3}\,m$ d'après les données de terrains.

II-4221 Cas 1 : Régime laminaire non parallèle

$$\frac{\frac{g}{12\nu} fa^3 J\cos\alpha'}{\left[1+8{,}8\left(\frac{\varepsilon}{dh}\right)^{1,5}\right]} < 2.10^{-3}\ m/s \qquad 1 + 8{,}8\left(\frac{\varepsilon}{dh}\right)^{1,5} > 1{,}95$$

donc $\frac{\varepsilon}{dh} > 0{,}227$

Le nombre de Reynolds $Re = \frac{V\ 2a}{\nu}$ est inférieur à 2. Le régime laminaire non parallèle est donc possible.

II-4222 Cas 2 : Régime turbulent hydrauliquement lisse

$$\left[\frac{9}{0{,}079}\left(\frac{2}{\nu}\right)^{0,25}(fa^2)^{5/4}\right]^{4/7}(J\cos\alpha')^{4/7} < 2.10^{-3}\ m/s$$

soit 4.10^{-4} m/s < 2.10^{-3} m/s.

Le nombre de Reynolds Re est égal à $\frac{Vx2a}{\nu} = 0{,}41$. Or le régime laminaire passe au régime turbulent pour un nombre de Reynolds supérieur à 180. L'hypothèse du régime turbulent hydrauliquement lisse n'est donc pas valable.

II-4223 Cas 3 : régime turbulent rugueux parallèle

$$4\sqrt{gfa^2}\ (\log \frac{3,7}{\varepsilon/dh})\ \sqrt{J\cos\alpha'} < 2.10^{-3}\ m/s \qquad \frac{\varepsilon}{dh} > \frac{3,7}{e^{\left(\frac{0,5.10^{-3}}{\sqrt{gfa^2 J\cos\alpha'}}\right)}}$$

soit $\frac{\varepsilon}{dh} > 0,68$

Or l'écoulement parallèle passe à l'écoulement non parallèle pour un coefficient de rugosité supérieur à 0,033. L'hypothèse du régime turbulent rugueux non parallèle ne semble donc pas valable.

II-4224 Cas 4 : régime turbulent rugueux non parallèle

$$4\ \sqrt{gfa^2}\ (\log \frac{1,9}{\varepsilon/dh})\ \sqrt{J\cos\alpha'} < 2.10^{-3}\ m/s \Longrightarrow \frac{\varepsilon}{dh} > \frac{1,9}{e^{\left(\frac{0,5.10^{-3}}{\sqrt{gfa^2 J\cos\alpha'}}\right)}}$$

soit $\frac{\varepsilon}{dh} > 0,35$

$$Re = \frac{V\cdot 2a}{\nu} < \frac{2.10^{-3}\ 2a}{\nu} = 2$$

Comme le nombre de reynolds est inférieur à 2 donc à 180, l'hypothèse du régime turbulent rugueux non parallèle ne semble pas valable.

II-4225 Conclusion

Si l'on considère les mesures de fracturation représentatives du massif rocheux, le seul régime d'écoulement compatible avec les mesures et avec les résultats du traçage paraît en définitive être le régime laminaire non parallèle avec un coefficient de rugosité relative supérieur à 0,227.

CONCLUSIONS

L'étude de la fracturation a permis de constater que la dimension des blocs fracturés était très petite par rapport à celle des secteurs étudiés ; il a donc était possible d'assimiler le milieu fissuré à un milieu poreux anisotrope équivalent pour étudier le comportement hydraulique des aquifères de l'Avesnois. L'utilisation du tenseur de perméabilité a mis en évidence l'équivalence entre un milieu fissuré quelconque et un milieu fissuré à géométrie simple constitué de trois familles de fissures, orientées selon les directions principales d'anisotropie si les valeurs propres du tenseur vérifiaient le système suivant :

$$\left(\begin{array}{l} d_1 + d_2 - d_3 \geqslant 0 \\ d_2 + d_3 - d_1 \geqslant 0 \\ d_1 + d_3 - d_2 \geqslant 0 \end{array} \right.$$

A l'échelle de la fissure, l'utilisation des différences finies pour résoudre l'équation différentielle de Saint-Venant a permis, d'une part, de déterminer le type de régime d'écoulement compatible avec les données géométriques et hydrauliques initiales et, d'autre part, de prévoir l'évolution spatio-temporelle de la piézométrie et les changements de régimes d'écoulement.

- <u>Synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite</u> : le calcul du tenseur, en chaque point de mesure, a montré la quasi-constance des directions des perméabilités principales (Nord-Sud, Est-Ouest), mais leurs valeurs relatives diffèrent d'un point à un autre, ceci étant dû à des variations de la fréquence des fissures dans une même direction. L'étude corrélative entre fracturation et traits morphologiques a donné les résultats suivants :

fractures (X) - vallées sèches (Y) : R = 71 % $\left(\begin{array}{l} Y = 0,02\ X + 14,63 \\ X = 28,8\ Y - 324 \end{array} \right.$

fractures (X) - cours d'eau (Y) : R = 76 % $\left(\begin{array}{l} Y = 0,03\ X + 11,57 \\ X = 17,1\ Y - 114,3 \end{array} \right.$

A partir de ces résultats, il a été possible de déterminer les directions des perméabilités principales en des points dépourvus d'affleurement. A partir du gradient hydraulique et des perméabilités principales, les directions d'écoulement souterrain, non colinéaires au gradient, ont été déterminées ; il a donc été possible de connaître les zones d'alimentation des champs captants du synclinorium. Les traçages ont permis de tester la validité de ces zones et de mettre en évidence des écoulements autres que celui du régime laminaire parallèle ; les courbes plurimodales de certains traçages ont pu être interprétées comme le résultat de l'acheminement du traceur par des familles de fissures différentes (traçage 1) ; de plus, ils montrent que la dispersivité n'est pas homogène : α = 1,27 m pour une distance de 510 m (traçage 2) ; α = 29 m pour une distance de 116 m (traçage 4). Les vitesses effectives calculées vont de 10 à 30 m/j. L'étude d'une série viséenne a montré que, quoique l'ouverture des fissures ne semblait pas augmenter vers les niveaux supérieurs, la fréquence était plus importante en montant dans la série ; ce qui permet de suggérer une zone aquifère intéressante située dans les cinquante premiers mètres de la série :

(K = 3 à 4 10^{-3} m/s (0 à 50 m)
(K = 1,7 à 1,8 10^{-3} m/s (50 m)

Un bilan hydrogéologique portant sur cinq années (1977 à 1981) a donné un déficit de 7 186 014 m^3 soit, environ, 45 l/s ; il semble que les nombreuses pertes des cours d'eau qui traversent le synclinorium soient en mesure de compenser ce déficit.

- Synclinal de Sars-Poteries : l'étude des traits morphologiques, conditionnée par l'absence d'affleurement en ce secteur, a montré que les familles de fractures prépondérantes étaient les mêmes que celles du synclinorium de Bachant (Nord-Sud, Est-Ouest). Les traçages effectués au niveau de ce synclinal ont permis de vérifier les zones d'alimentation du champ captant et de connaître l'importance du cône d'influence. Ils donnent des vitesses effectives de l'ordre de 30 à 40 m/j.

- Monoclinal de Trélon : l'apport des résultats issus de l'étude de la fracturation aux résultats des pompages d'essai effectués sur le site expérimental de Moranrieux a permis de suggérer le modèle d'un aquifère à perméabilités directionnelles et épaisseur constantes, caractérisé par deux familles de fissures, l'une Est-Ouest, ouverte et lisse, l'autre Nord-Sud ayant un degré d'ouverture de 17,16 % et dont les aspérités et sinuosités sont égales au quart de l'ouverture des fractures ; de plus, les résultats s'expliquent par changement et superposition de régimes d'écoulement :

(hautes eaux : régime turbulent
(étiage : régime laminaire

Les traçages 8 et 9 effectués sur ce site ont permis d'élaborer un modèle mathématique qui rend compte de façon convenable des temps de transfert du traceur en écoulement monodimensionnel non uniforme.

Les traçages 11 et 12 ont permis de mettre en évidence des vitesses effectives (73 m/j et 156 m/j) plus importantes que celles calculées au niveau du synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite et du synclinal de Sars-Poteries.

BIBLIOGRAPHIE

ARLERY R., GRISOLLET H. et GUILNET B. (1962).- Climatologie, méthodes et pratiques. Monographies de météorologie. Gauthiers-Villars et Cie (Ed.).

BADIN L. et MAYA C. (1971).- Etude des circulations souterraines par fluorimétrie. Rapport S. R. A. E. Franche-Comté.

BEAR J. (1972).- Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier (Ed.), p. 764.

BERTRAND L., DURAND E. et FEUGA B. (1982).- Détermination en sondages de la perméabilité d'un milieu rocheux fracturé. Aspects théoriques et pratiques. Revue française de géotechnique. *B. R. G. M.*, 20, p. 39-54.

BREDEHOEFT I.D. et KONIKOW L.F. (1978).- Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground-water. Book 7. U. S. Department of the interior, geological Survey.

CAGNAC G., COMMEAU J. et RAMIS E. (1961).- Nouveau cours de mathématiques spéciales. Masson et Cie (Ed.), 1, p. 459.

CARLIER E. (1981).- Etude de la circulation des eaux souterraines dans deux secteurs de l'Avesnois (Nord) par traçage à l'uranine. D. E. A., Univ. Lille, p. 50.

CARPENTIER A. (1913).- Contribution à l'étude du Carbonifère du Nord de la France. *S. G. N.*, VII, 2, p. 102-104.

CASTANY G. et MARGAT J. (1977).- Dictionnaire français d'hydrologie. *B. R. G. M.*, p. 250, Orléans.

CHARRIERE R. (1974).- Perfectionnements à la mesure de traceurs fluorescents, applications à l'hydrogéologie. Thèse 3e cycle, Univ. Strasbourg.

COLBEAUX J.P. et MANIA J. (1976).- Relations entre la fracturation et l'écoulement des eaux superficielles et souterraines en pays crayeux au cran d'escalles, application à l'Artois. 2e Colloq. d'Hydrogéologie en Pays Calcaire. *Ann. Sci. Univ. Besançon*, p. 179-194.

COLBEAUX J.P. et SOMME J. (1981).- Fracturation du substrat crayeux et géomorphologie dans le Nord de la France. Exemple de la feuille de Desvres à 1/50 000.

CONYL R. (1973).- Intérêt de certaines coupes de l'Avesnois dans la séquence classique du Dinantien. *S. G. N.*, XCIII, p. 169-175.

CRAMPON N. et CARLIER E. (1981).- Circulation et vulnérabilité des eaux souterraines de l'Avesnois (lre phase). Rapport du laboratoire de géologie appliquée, Lille I.

CRASQUIN S. (1982).- Répartition des Ostracodes dans le Viséen du Boulonnais et de l'Avesnois. D. E. A., Univ. Lille, p. 50.

CROCHET P.- Etude statistique de la distribution de la fracturation en profondeur à partir de relevés sur carottes de sondages. Laboratoire d'hydrogéologie, Univ. Montpellier, p. 253-265.

DASSONVILLE G. et PLAT R. (1968).- Données géologiques et hydrogéologiques sur le synclinorium carbonifère de Bachant-Ferrière-La-Petite. *Rapport B. R. G. M.*, 68 SGL 059 NPA.

DELATTRE C., POLVECHE J. et WATERLOT B. et G. (1967).- Aperçu de la structure des terrains carbonifères de l'Avesnois. *S. G. N.*, LXXXVII, p. 203-209.

DELPORTE B. (1979).- Traitement de l'information hydrogéologique, socio-économique et économique ; application au bassin de la Sambre (Nord de la France). Thèse 3e cycle, Univ. Lille, p. 202.

DE MARSILY G. (1980).- Cours d'hydrogéologie. Centre de géologie informatique, Fontainebleau, LHM/RD/37, p. 273.

DE RIDDER N.A. et KRUSEMAN G.P. (1974).- Analysis and evaluation of pumping test data. International institute for land and improvement, Wageningen Nederlands, Bull. 11.

DERVILLE H. (1952).- Les faciès du calcaire de Bachant. *S. G. N.*, LXXII, p. 14-29.

DIEULIN A. (1980).- Propagation de pollution dans un aquifère alluvial. L'effet de parcours. Thèse Docteur Ingénieur, E. N. S. M. P.

DREYFUS M. (1975).- Fortran IV. Dunod informatique, Bordas, p. 228.

DRIEUX B. et LIJU A.L. (1973).- Le langage BASIC. Presses universitaires de France, p. 172.

DROZ B. (1982).- Circulation des eaux souterraines dans le synclinorium de Bachant-Ferrière-La-Petite. D. E. A., Univ. Lille, p. 31.

FRIED J. (1975).- Ground water pollution. Elsevier scientific publishing company, p. 330.

GAILLAD B. (1976).- Méthode des traceurs pour la détermination des paramètres de transfert de substances en solution dans l'eau des aquifères. Contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau d'alimentation publique. Thèse, Univ. Grenoble, p. 113.

GOSSELET J. (1880).- Description géologique du canton de Maubeuge. *S. G. N.*, VI, p. 129.

GOSSELET J. (1880).- Description géologique du canton de Berlaimont. *S. G. N.*, VII, p. 270-302.

KIAM HU (1973).- Résultats d'essais par pompage réalisés sur quelques forages des karsts de la région montpelliéraine. Thèse Docteur de spécialité, Univ. Montpellier.

KIRALY L. (1970).- L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. Institut de géologie, Neuchatel. *Bull. ver. Schweiz. petrol. geol. U. Ing.*, 37, NR91, oktober, p. 50-57.

LALLEMAND A. et PALOC H. (1964).- Possibilités offertes par la méthode de détection au charbon actif pour les expériences de coloration à la fluoresceine. *Spelunca mem.*, 4, p. 27-40.

LEVASSOR A. (1978).- Simulation et gestion des systèmes aquifères ; application aux nappes du complexe terminal du Bas-Sahara algérien. Thèse 3e cycle, Univ. Paris VI, p. 173.

LEZAS P. et SCHWARTZ D.- Eléments de statistique. Editions médicales Flammarion.

LIMACHER D. et PROUVOST J. (1965).- A propos d'un échantillon de pyrite trouvé dans un forage au lieu dit "les fouées", commune de Ferrière-La-Petite. *S. G. N.*, LXXXV, p. 97-98.

LOUIS C.L. (1972).- Les caractéristiques hydrauliques du massif de fondation du barrage de Grand-Maison (Isère). *Bull. B. R. G. M.*, 2e série, section III, 4, p. 37.

MANGIN A. (1975).- Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat Etat. Institut Sciences de la Terre, Univ. Dijon.

MANIA J. (1978).- Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France. Thèse Doctorat Etat. *S. G. N.*, Mémoire n° 15.

PANAHI M. (1979).- Essai de détermination des paramètres hydrodispersifs de la nappe captive de la craie sur le site expérimental de l'I. U. T. de Béthune. D. E. A., Univ. Lille, p. 50.

PAPADOPOULOS I.S. (1965).- Non steady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer. Symposium in hydrology of fractured rocks. Duhovnik. *Int. Assoc. Sci. Hydrology*, I, p. 21-31.

PITARD J. (1976).- Contribution à l'interprétation des essais par pompages dans les roches fissurés. Thèse Docteur de spécialité, Univ. Montpellier.

PLOTNIKOV N.A. (1962).- Ressources en eaux souterraines. Classification et méthodes d'évolution. Gauthier-Villars (Ed.), p. 194.

POREL G. (1982).- Paramètres hydrodispersifs de la nappe de la craie sur le site expérimental de Béthune (Pas-de-Calais). D. E. A., Univ. Lille, p. 51.

PREAUX C. (1983).- Influence des conditions de réalisation et des méthodes de dépouillement de traçages en écoulement convergent sur les paramètres hydrodispersifs. Nappe de la craie. Site de Béthune. D. E. A., Univ. Lille, p. 55.

ROCHE M. (1963).- Hydrologie de surface. *Cah. O. R. S. T. O. R. M* . Gauthier-Villars (Ed.).

SAUTY J.P. (1977).- Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçages. Thèse Docteur Ingénieur, Univ. Grenoble, p. 157.

SAUTY J.P. (1977).- Analyse de la courbe de restitution d'une injection instantanée de traceur dans une nappe en écoulement uniforme. Colloque national organisé par le service géologique national, thème 2.

SAUTY J.P. (1978).- Identification des paramètres du transfert hydrodispersif dans les aquifères par interprétation de traçages en écoulement cylindrique convergent et divergent. *Journ. hydrology*, 39, 1/2, p. 69-105.

SCHENEEBELLI G. (1966).- Hydraulique souterraine. Eyrolles (Ed.), p. 362.

THIERY D. (1980).- Interprétation d'un pompage d'essai en milieu anisotrope. Utilisation de plus de trois piézomètres. Note technique 80/2. S. G. R. Hydrogéologie, Orléans.

VARLET H. (1965).- Usines de dérivation. Eyrolles (Ed.), I, p. 337.

VIALON P., RUHLAND M. et GROLIER J. (1976).- Eléments de tectonique analytique. Masson (Ed.), p. 118.

VREULX M. (1983).- Conditions d'application aux traçages de quelques méthodes de dosages. D. E. A., Univ. Lille, p. 63.

WATERLOT B. (1970).- Données nouvelles sur le Carbonifère des environs de Pont-Sur-Sambre. *S. G. N.*, XC, p. 39-40.

WATERLOT B. et MARLIERE R. (1971).- Carte géologique 1/50 000 de Le Quesnoy.

WATERLOT G. (1957).- Carte tectonique du synclinal carbonifère de Bachant-Ferrière-La-Petite (Nord). *Rapport B. R. G. M.*, A 1 136, p. 2.

WATERLOT G. (1970).- Carte géologique 1/50 000 de Trélon.

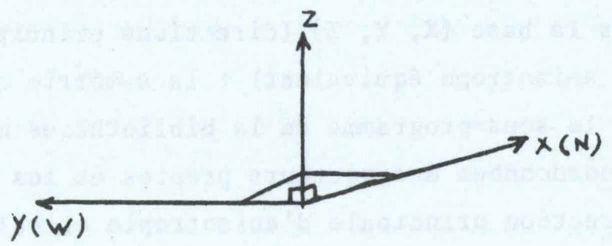
WATERLOT G., BEUGNIES A. et GODFRIAUX Y. (1967).- Carte géologique 1/50 000 de Maubeuge.

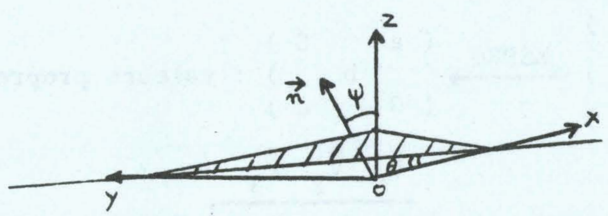
WATERLOT G. et WATERLOT B. (1969).- Carte géologique 1/50 000 d'Avesnes.

ANNEXES

ANNEXE 1 : PROGRAMME TENFY

- Calcul des coordonnées cartésiennes de la normale à chaque famille de fissures ; repère direct :





$\vec{n}$: normale au plan de fissure

θ : direction

ψ : angle entre la normale et l'axe vertical OZ

Coordonnées de $\vec{n}$ (x, y, z) :

$$x = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) \quad \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$y = - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$z = - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right)$$

- Calcul du produit X_i = fréquence$_i$ x (ouverture$_i$)^3

- Création de la matrice des normales :

$$\overline{\overline{A}}_i = \begin{pmatrix} x_i^2 & x_i y_i & x_i z_i \\ y_i x_i & y_i^2 & y_i z_i \\ z_i x_i & z_i y_i & z_i^2 \end{pmatrix}$$

$$\overline{\overline{B}}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \overline{\overline{A}}_i$$

- Produit des $X_i \times \overline{\overline{B_i}}$

- Somme des produits : $\overline{\overline{S}} = \sum_{i=1}^{n} X_i \times \overline{\overline{A_i}}$

- Calcul des vecteurs propres et des valeurs propres de la matrice $\overline{\overline{S}}$ x cste x 10^{10} dans la base {X, Y, Z} (directions principales d'anisotropie du milieu poreux anisotrope équivalent) : la symétrie de la matrice a permis d'utiliser le sous-programme de la bibliothèque mathématique MSPRO qui calcule les coordonnées des vecteurs propres et les valeurs propres de la matrice (direction principale d'anisotropie et valeur de la conductivité hydraulique selon ces directions)

$$\begin{pmatrix} a_1 & & \\ a_2 & a_4 & \\ a_3 & a_5 & a_6 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{MSPRO}} \begin{pmatrix} a & & 0 \\ & b & \\ 0 & & c \end{pmatrix} : \text{valeurs propres} \quad \begin{pmatrix} a = K_x \\ b = K_y \\ c = K_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{c|c} \vec{V}_1 \quad \vec{V}_2 \quad \vec{V}_3 & \\ \hline \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} & \begin{matrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{matrix} \end{array} : \text{vecteurs propres}$$

Les conductivités hydrauliques principales sont : $\frac{a}{10^{10}}$ selon $\vec{V}_1$

$\frac{b}{10^{10}}$ selon $\vec{V}_2$

$\frac{c}{10^{10}}$ selon $\vec{V}_3$

Les valeurs de $\overline{\overline{S}}$ étant très faibles (pouvant aller jusqu'à 10^{-11}), il a été nécessaire de les multiplier par cste x 10^{10} et ensuite de diviser les valeurs propres par 10^{10}. En effet, le sous-programme MSPRO restituait des valeurs erronées pour des matrices à coefficient très faible.

- Calcul des vecteurs propres et valeurs propres de la matrice dans la base {X, Y} (représentation du tenseur globale dans le plan géographique)

$$\begin{pmatrix} a_1 & \\ a_2 & a_4 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{MSPRO}} \begin{pmatrix} a' & 0 \\ 0 & b' \end{pmatrix} : \text{valeurs propres}$$

$$\begin{array}{c|c} \vec{V}_1{}' \quad \vec{V}_2{}' & \\ \hline \begin{pmatrix} x'_1 & x'_2 \\ y'_1 & y'_2 \end{pmatrix} & \begin{matrix} \vec{x} \\ \vec{y} \end{matrix} \end{array} : \text{vecteurs propres}$$

- Calcul de la conductivité hydraulique du milieu poreux isotrope équivalent :

$$K = \sqrt[3]{K_x\, K_y\, K_z}$$

- Expression des conductivités hydrauliques principales en fonction de la conductivité hydraulique globale :

$$K_x = \alpha K \quad ; \quad K_y = \beta K \quad ; \quad K_z = \gamma K$$

- Calcul des valeurs propres et vecteurs propres de chaque tenseur élémentaire dans la base $\{\vec{X}, \vec{Y}\}$ à l'aide du sous-programme MSPRO.

- Représentation de chaque tenseur élémentaire dans la base {direction, pendage} de la fracture associée.

Soit $\overline{\overline{t_i}}$ un tenseur élémentaire relatif à la famille de fracture i ; $\overline{\overline{t_i}}$ est exprimé dans la base du repère direct $\{\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}\}$.

L'expression de $\overline{\overline{t_i}}$ dans la base {direction, pendage} de la famille i est :

$$\overline{\overline{AC}}^{-1} \times \overline{\overline{t}} \times \overline{\overline{AC}} = \overline{\overline{tt}}$$

où $\overline{\overline{AC}}$, matrice de rotation, a pour expression :

$$\overline{\overline{AC}} = \begin{array}{c|c} \begin{array}{ccc} \text{Direction} & \text{Pendage} & \vec{N} \end{array} & \\ \hline \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta\cos\psi & \sin\theta\,\mathrm{syn}\,\psi \\ -\sin\theta & \cos\theta\cos\psi & \sin\psi\cos\theta \\ 0 & -\mathrm{syn}\,\psi & -\cos\psi \end{pmatrix} & \begin{array}{c} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{array} \end{array}$$

pour les matrices de rotation, on sait que $\overline{\overline{AC}}^{-1} = \overline{\overline{AC}}^{t}$, c'est-à-dire que l'inverse d'une matrice de rotation est égale à la transposée de la matrice, donc :

$$\overline{\overline{tt}} = \overline{\overline{AC}}^{t} \times \overline{\overline{t}} \times \overline{\overline{AC}}$$

Les sous-programmes utilisés de la bibliothèque sont :

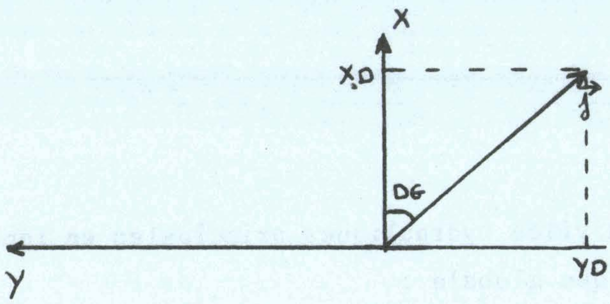
MRTRA : transposée d'une matrice

MRMUL : multiplication de deux matrices

MSPRO : calcul des vecteurs propres et valeurs propres d'une matrice symétrique

- Représentation du tenseur global dans chaque plan de fracture (même démarche que dans le cas de la représentation d'un tenseur élémentaire dans la base (direction, pendage).

- Calcul des coordonnées du gradient hydraulique lu sur la carte



$(X_D = \cos(DG) \times |\vec{j}|)$

$(Y_D = \sin(DG) \times |\vec{j}|)$

- Calcul des vitesses en régime laminaire parallèle pour chaque famille de fissure ; vitesse de DARCY :

les coordonnées du vecteur vitesse sont :

$$\begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \end{pmatrix}$$

$$(a = fi\ ai^3\ (1 - x_i^2) \times g/12\ \nu)$$
$$(c = fi\ ai^3\ (- x_i y_i) \times g/12\ \nu)$$
$$(b = fi\ ai^3\ (1 - y_i^2) \times g/12\ \nu)$$

le module du vecteur vitesse est : $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$

vitesse effective : $V_{eff} = V \times ai^2 / fi\ ai^3$

vitesse maximale : $V_{max} = 1.5.V_{eff}$

- Calcul des vitesses en régime turbulent hydrauliquement lisse.

L'expression de la vitesse est :

$$V = \left(\frac{9}{0,079} \left(\frac{2}{\nu}\right)^{0,25} \times a^{5/4} \right)^{4/7} \cdot i^{4/7}$$

en fonction de la vitesse de DARCY, elle s'écrit :

$$V = (V_{darcy}^{0,57}) \times 0,524/(fi\ ai^3)^{0,213}$$

- Calcul des vitesses en régime laminaire non parallèle.

L'expression de la vitesse est :

$$V = \frac{fi\ \ ai^3\ \times g}{12\ \ (1 + 8,8 \times (\frac{\varepsilon}{dh})^{1,5}}$$

En fonction de la vitesse de DARCY, elle s'écrit :

$$V = V_{darcy}/(1 + 8,8 \times (\frac{\varepsilon}{dh})^{1,5})$$

Les vitesses sont calculées pour les valeurs suivantes de rugosité relative $\frac{\varepsilon}{dh}$:

0.001 ; 0.01 ; 0.033 ; 0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5

- Calcul des vitesses en régime turbulent rugueux parallèle.

L'expression de la vitesse est :

$$V = - 4 \sqrt{g \text{ fi } ai^2} \left(\log \frac{3,7}{\varepsilon/dh}\right) \sqrt{I}$$

En fonction de la vitesse de DARCY, elle s'écrit :

$$V = 0.0138 \times \ln (3,7/\varepsilon/dh) \times V_{darcy}^{0,9}/d_i^{0,5}$$

Les vitesses sont calculées pour les mêmes valeurs de rugosité relative que dans le cas du régime laminaire non parallèle.

- Calcul des vitesses en régime turbulent rugueux non parallèle.

L'expression de la vitesse est :

$$V = 4 \sqrt{g \text{ (f } ai^2)} \left(\log \frac{1,9}{\varepsilon/dh}\right) \sqrt{I}$$

En fonction de la vitesse de DARCY, elle s'écrit :

$$V = 0.0138 \times \ln (3,7/\varepsilon/dh) \times V_{darcy}^{0,5}/d_i^{0,5}$$

Les vitesses sont calculées pour les mêmes valeurs de rugosité relative que dans le cas du régime laminaire non parallèle.

- Calcul des vitesses relatives au milieu poreux anisotrope équivalent.

Les coordonnées de la vitesse sont :

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \end{pmatrix}$$

$$a = \sum_{i=1}^{n} \text{fi } ai^3 (1 - x_i^2) \times \frac{g}{12 \nu}$$

$$c = \sum_{i=1}^{n} \text{fi } ai^3 (- x_i y_i) \times \frac{g}{12 \nu}$$

$$b = \sum_{i=1}^{n} \text{fi } ai^3 (1 - y_i^2) \times \frac{g}{12 \nu}$$

Le module du vecteur vitesse est :

$$V = \sqrt{X_D^{\,2} \times Y_D^{\,2}}$$

- Expression des milieux équivalents

. Milieu équivalent fissuré.

Ce milieu est caractérisé par trois familles de fissures, orthogonales entre elles, dont les normales sont les directions principales d'anisotropie (K_x, K_y, K_z)

$$f_1\, a_1^{\,3} = (K_z + K_y - K_x)/2$$

$$f_2\, a_2^{\,3} = (K_x + K_z - K_y)/2$$

$$f_3\, a_3^{\,3} = (K_x + K_y - K_z)/2$$

Si l'une des valeurs $fi\ ai^3$ est négative, il n'existe pas de milieu fissuré équivalent. Il a été montré au chapitre III que pour $K \varepsilon\ ]+1, +\infty[$, on a :

$$\alpha = K \sqrt{\frac{fi\ ai^3 + fj\ aj^3}{(fi\ ai^3 + fj\ aj^3)^2}}$$

avec : $i = 1 \quad j = 2,3$

$i = 2 \quad j = 1,3$

$i = 3 \quad j = 1,2$

Calcul des fréquences :

$$fi = \frac{1}{\alpha^3\ (fi\ ai^3)^2}$$

$$fj = \frac{1}{\alpha^3\ (fj\ aj^3)^2}$$

Calcul des ouvertures de fissure :

$$ai = \alpha\ fi\ di^3$$

$$aj = \alpha\ fj\ dj^3$$

. Milieu équivalent à faisceaux cylindriques.

Ce milieu est caractérisé par trois familles de conduits cylindriques, orthogonales entre elles, dont les directions sont les directions principales d'anisotropie (voir chapitre III).

$$f_1\, d_1{}^4 = K_x \times 3{,}39$$

$$f_2\, d_2{}^3 = K_y \times 3{,}39$$

$$f_3\, d_3{}^4 = K_z \times 3{,}39$$

f : fréquence des conduits (L^{-2})

d : diamètre des conduits

Pour $K \varepsilon \,]+1, +\infty[$, on a :

$$\alpha = K \sqrt{\frac{\pi}{4\ fi\ di^4}}$$

$$fi = \frac{1}{\alpha^4\ fi\ di^4}$$

$$di = \alpha\ fi\ di^4$$

$$f_1\, d_1^{4} = K_x \times 2,29$$

$$f_2\, d_2^{4} = K_y \times 1,38$$

$$f_3\, d_3^{4} = K_q \times 1,39$$

f : fréquence des [illegible] (Hz)

d : diamètre des conduits

Pour K([illegible]) [illegible] on a :

[illegible]

[illegible]

$d^4 =$ [illegible]

ANNEXE 2 : ECOULEMENT A SURFACE LIBRE

ASPECT THEORIQUE

Considérons une fissure, à écartement variable, dans laquelle s'effectue un écoulement à surface libre.

Le volume d'eau de la tranche est S x dx au temps t. Au temps t + dt, la section 1 a pour abscisse $x + \frac{dx}{dt} dt = x + Vdt$, de même l'abscisse de la section 2 est $(x + dx) + (V + \frac{\partial V}{\partial x} . dx) dt$.

L'aire mouillée de la première section est à t + dt : $S + \frac{dS}{dt} dt$

Comme $dS = \frac{\partial S}{\partial t} dt + \frac{\partial S}{\partial x} dx$, on en déduit que :

$$S + \frac{dS}{dt} dt = S + (\frac{\partial S}{\partial x} V + \frac{\partial S}{\partial t}) dt$$

Le volume d'eau de la tranche au temps t + dt est donc :

$$\left[S + (\frac{\partial S}{\partial x} V + \frac{\partial S}{\partial t}) dt \right] \left[(1 + \frac{\partial V}{\partial x} dt) dx \right] \qquad (1)$$

Si l'on admet que l'eau est incompressible, il vient : (1) = S dx

$$\Longrightarrow S \frac{\partial V}{\partial x} dt + \frac{\partial S}{\partial x} V dt + \frac{\partial S}{\partial x} V \frac{\partial V}{\partial x} (dt)^2 + \frac{\partial S}{\partial t} dt + \frac{\partial S}{\partial t} \frac{\partial V}{\partial x} (dt)^2 = 0$$

et si l'on néglige les termes de deuxième ordre par rapport au terme de premier ordre, on obtient :

$$S \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial x} V + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \Longleftrightarrow \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V \times S) = 0$$

Cette équation exprime la conservation du volume de la tranche d'eau ; c'est l'équation de continuité.

La masse d'eau de la tranche est $m = \rho$ S dx. Si cette masse est soumise à une accélération $\frac{dV}{dt}$, on peut écrire :

$$m \frac{dV}{dt} = F + F' + F''$$

F + F' + F" est la somme des projections horizontales des forces appliquées à la masse m. Ces forces sont :

$\vec{F}$: poids de la masse d'eau. F = 0 ($F = |\vec{F}| \times \cos 90°$).

$\vec{F}'$: composante normale des réactions extérieures sur les faces de la tranche.

$\vec{F}''$: composante tangentielle des réactions extérieures sur les faces de la tranche.

La composante normale fait équilibre à la pression qu'exerce l'eau de la tranche sur la face considérée tandis que la composante tangentielle correspond au frottement extérieur sur la tranche liquide.

1. Détermination de la projection horizontale de la résultante des réactions normales

Si P est la pression qui s'exerce sur l'aire S, la force P x S admet pour projection sur l'axe x, F = P Sx où Sx est la projection de S sur le plan YOZ.

Si l'on considère deux plans horizontaux infiniment voisins, séparés par dh', on peut dire qu'ils déterminent deux bandes de surface :

S_1 au temps t dans la section 1.

S_2 au temps t dans la section 2.

$S_2 - S_1 = S' + S''$ où S' et S" représentent les projections, sur le plan YOZ, des surfaces mouillées latérales de la fissure.

Les pressions s'exerçant sur S_1 et S_2 sont :

$P_1 = \rho g h$ (potentiel Z, abscisse x)

$P_2 = \rho g\,(h + dz)$ (potentiel Z + dz, abscisse x + dx)

$P_2 = P_1 + \rho g\, dz$

donc : $dP = - \rho g\, dz$.

On en déduit $F' = - \rho g\, dz \int_s dS = - \rho g\, dz\, S$.

2. Détermination de la projection horizontale de la résultante des des réactions tangentielles

La face F" effectue le travail résistant suivant : F" x V dt. Pour vaincre les frottements, l'eau a dû fournir un travail. Cette perte d'énergie a pour expression :

$(\rho g\ V\ dt \times S) \times i \times dx$

où i est la perte de charge unitaire qui n'est autre que la perte de puissance par unité de poids de débit et par unité de longueur.

V x S est le débit, $\rho g\ V\ S\ dt$ est le poids d'eau débité pendant dt, donc : $|F''| = \rho g\ S\ i\ dx$. $\vec{F}''$ étant dirigé en sens contraire de $\vec{V}$, $F'' = \rho g\ S\ i\ dx$. F' et F'' étant déterminés, on peut donc écrire l'équation dynamique :

$$m\gamma = \rho g\ dz\ S - \rho g\ S\ i\ dx$$

soit : $\rho\ S\ dx \frac{dV}{dt} = - \rho g\ dz\ S - \rho g\ S\ i\ dx$

$$\frac{dx}{g}\frac{dV}{dt} = - dz - i\ dx \qquad - \frac{dz}{dx} = i + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}$$

Cette expression est l'équation de la pente hydraulique i' :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} = V\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

donc : $$i' = i + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{V^2}{2\ g}\right) + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$$

Le système d'équation différentielle qui régit l'écoulement à surface libre dans une fissure est :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(V\ S) = 0 \qquad \text{(équation de continuité)}$$

$$i' = i + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{V^2}{2\ g}\right) + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} \qquad \text{(équation dynamique)}$$

Ces deux équations ont été établies pour la première fois par de Saint-Venant, cité par H. Varlet (1965). Le terme i est l'abaissement de pente (perte d'énergie) nécessaire pour vaincre les frottements. Le terme $\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{V^2}{2\ g}\right)$ est la modification de pente due à la variation d'énergie cinétique engendrée par le passage de la vitesse V à la vitesse $V + \frac{\partial V}{\partial x} dx$ en passant de la section d'abscisse x à la section d'abscisse x + dx. Le terme $\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$ est la mosidication de pente accompagnant la variation de débit qui fait passer la vitesse V à la valeur $V + \frac{\partial V}{\partial t} dt$ dans la même section d'abscisse x. Si le régime est permanent, alors $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$.

$$(\omega g\, V\, dt \times S) \times i \times dx$$

où i est la perte de charge unitaire qui n'est autre que la perte de puissance par unité de poids de débit et par unité de longueur.

$V \times S$ est le débit, $\omega g V S\, dt$ est le poids d'eau débité pendant dt, donc : $F'' V\, dt = \omega g V S\, dt\, i\, dx$, F'' étant dirigé en sens contraire de V, $F'' = \omega g S\, i\, dx$. F' et F'' étant déterminés, on peut donc écrire l'équation dynamique :

$$F' - F'' = \omega g\, dz\, S - \omega g\, S\, i\, dx$$

soit : $\rho S\, dx \frac{dV}{dt} = -\omega g\, dz\, S - \omega g\, S\, i\, dx$

$$\frac{dV}{g\, dt} = -\frac{\partial z}{\partial x} - i \qquad -\frac{\partial z}{\partial x} = i + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}$$

Cette expression est l'équation de la pente hydraulique (1) :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} = V\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

donc : $\quad i' = i + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{V^2}{2g}\right) + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$

Le système d'équations différentielles qui régit l'écoulement à surface libre dans une rivière est :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(V\,S) = 0 \qquad \text{(équation de continuité)}$$

$$i' = i + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{V^2}{2g}\right) + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} \qquad \text{(équation dynamique)}$$

Ces deux équations ont été établies pour la première fois par de Saint-Venant, cité par R. Vatier (1965). Le terme i est l'abaissement de pente (perte d'énergie) nécessaire pour vaincre les frottements. Le terme $\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{V^2}{2g}\right)$ est la modification de pente due à la variation d'énergie cinétique engendrée par le passage de la vitesse V à la vitesse $V + \frac{\partial V}{\partial x} dx$ en passant de la section d'abscisse x à la section d'abscisse $x + dx$. Le terme $\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$ est la modification de pente accompagnant la variation de débit qui fait passer la vitesse V à la valeur $V + \frac{\partial V}{\partial t} dt$ dans la même section d'abscisse x. Si le régime est permanent, alors $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$.

ANNEXE 3 : PROGRAMME D'OBTENTION D'ABAQUES ET DE TRAITEMENT DES DONNEES EXPERIMENTALES

FONCTION ET DOMAINE DE DEFINITION

A partir des solutions explicites des équations différentielles, des programmes d'obtention d'abaques ont été réalisés pour les différents types d'écoulement :

- DISECCOT : écoulement convergent
- DISECDIV : écoulement divergent et monodimensionnel uniforme
- DISECBID : écoulement bidimensionnel

Les abaques obtenus sont utilisables pour les nombres de Peclet suivants (selon J.P. Sauty, 1977 et 1978, pour l'usage des solutions explicites approchées en écoulement radial) :

INJECTION INSTANTANEE	INJECTION CONTINUE	PROGRAMME
$P > 3$	$P > 3$	DSECCOT
$P > 1$	$P > 1$	DISECDIV(divergent)
$\forall P$	$\forall P$	DISECDIV(monodimensionnel)
$\forall P$	$\forall P$	DISECBID

tableau 34-DOMAINE DE DEFINITION DES ABAQUES UTILISES POUR L'INTERPRETATION DES TRACAGES-

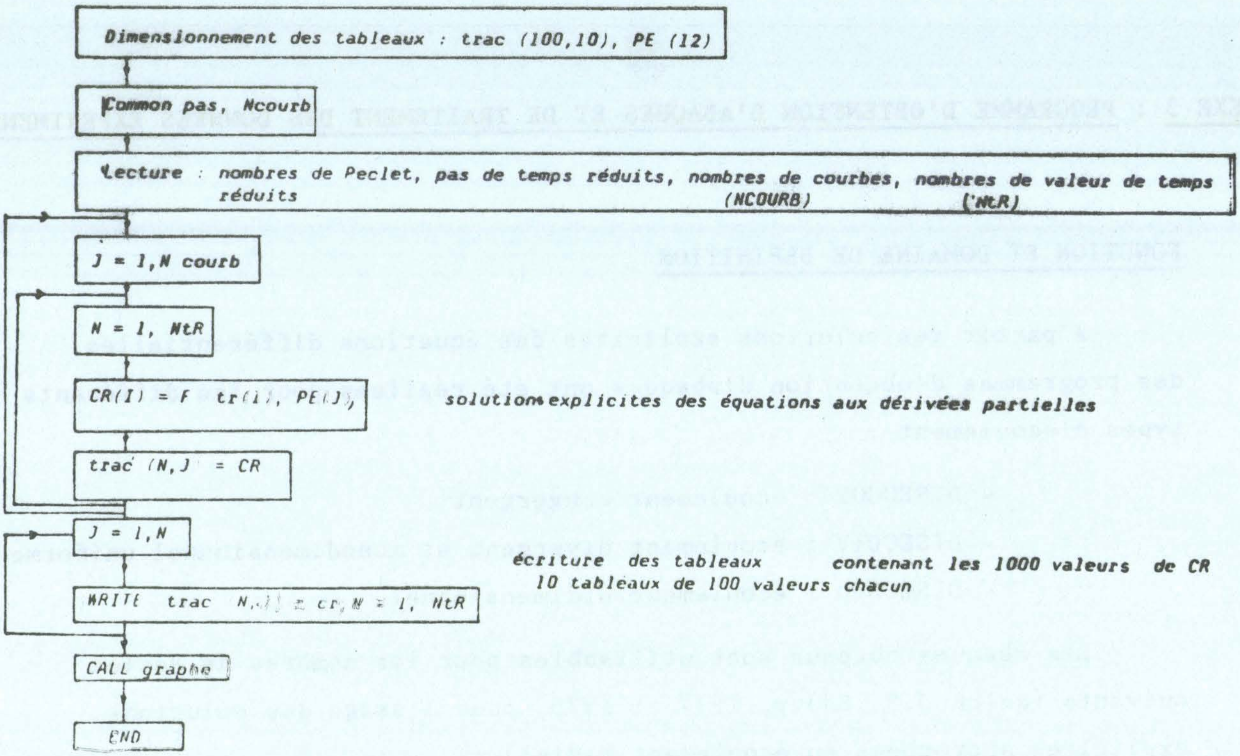
P : nombre adimensionnelqui caractérise l'importance du transport par convection par rapport à la dispersion.

$P = \frac{X}{\alpha}$.

La comparaison de la courbe expérimentale transcrite en coordonnée réduite CR = f (TR) permet l'obtention du nombre de Peclet dont on déduit la dispersivité.

ORDINOGRAMME

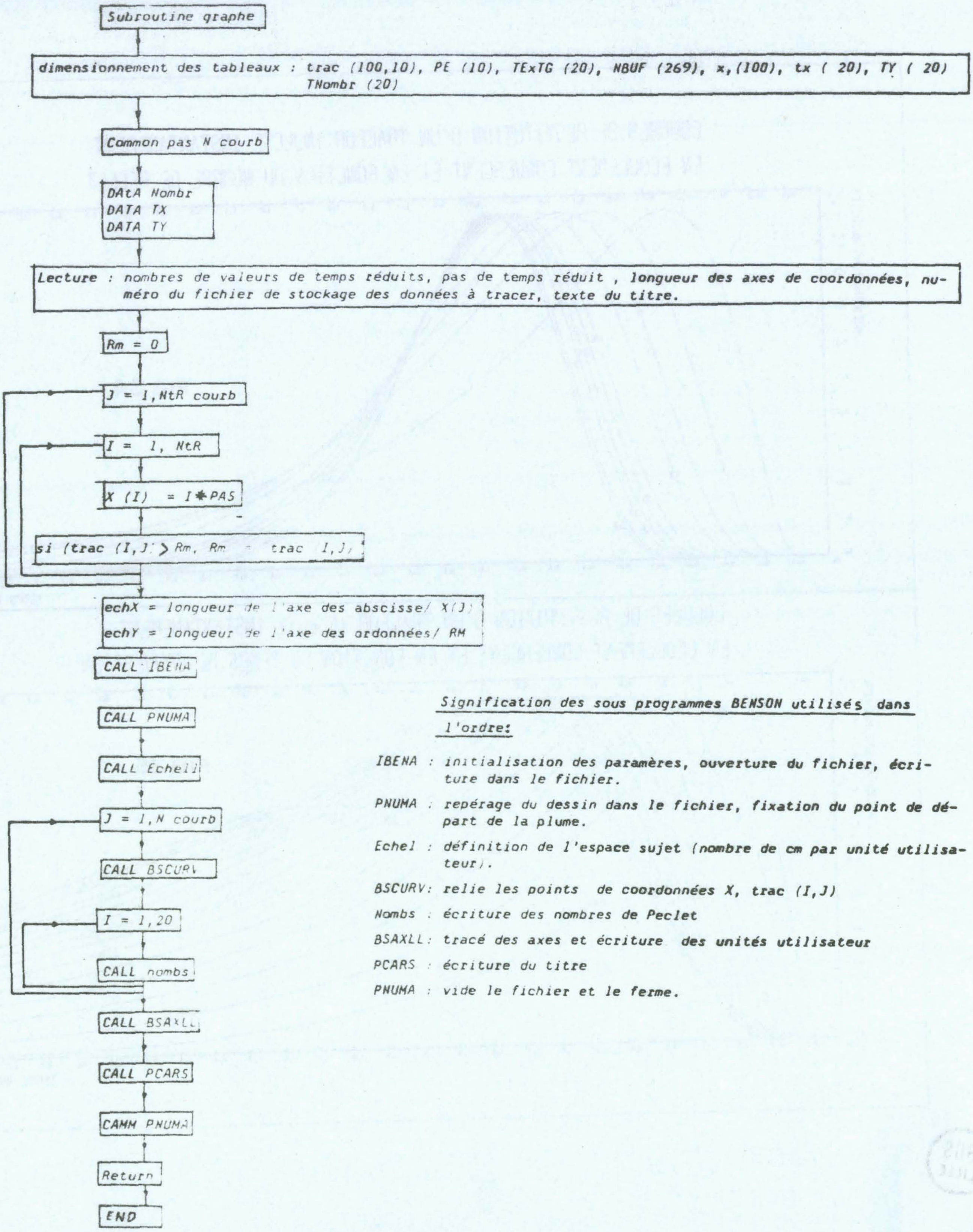
- Programme de calcul



- <u>Programme graphique</u>

Un exemple de sortie de résultat est représent par la figure (34).

Un programme de traitement des données expérimental (D. E. C. O. R. S.) a été établi. Sa fonction principale est la restitution, pour une courbe expérimentale C(t), de N courbes en coordonnées réduites CR(TR), chacune étant relative à un temps de transfert par convection t_c choisi dans un voisinage du temps correspondant à 50 % des concentrations cumulées. La comparaison de ces courbes avec celles de l'abaque permet de déterminer le t_c le plus proche de la réalité. Un exemple de sortie de résultat est représenté par la figure (35).



<u>*Signification des sous programmes BENSON utilisés dans l'ordre:*</u>

IBENA : *initialisation des paramères, ouverture du fichier, écriture dans le fichier.*

PNUMA : *repérage du dessin dans le fichier, fixation du point de départ de la plume.*

Echel : *définition de l'espace sujet (nombre de cm par unité utilisateur).*

BSCURV: *relie les points de coordonnées X, trac (I,J)*

Nombs : *écriture des nombres de Peclet*

BSAXLL: *tracé des axes et écriture des unités utilisateur*

PCARS : *écriture du titre*

PNUMA : *vide le fichier et le ferme.*

COURBES DE RESTITUTION D'UN TRACEUR INJECTE INSTANTANEMENT
EN ECOULEMENT CONVERGENT ET EN FONCTION DU NOMBRE DE PECLET

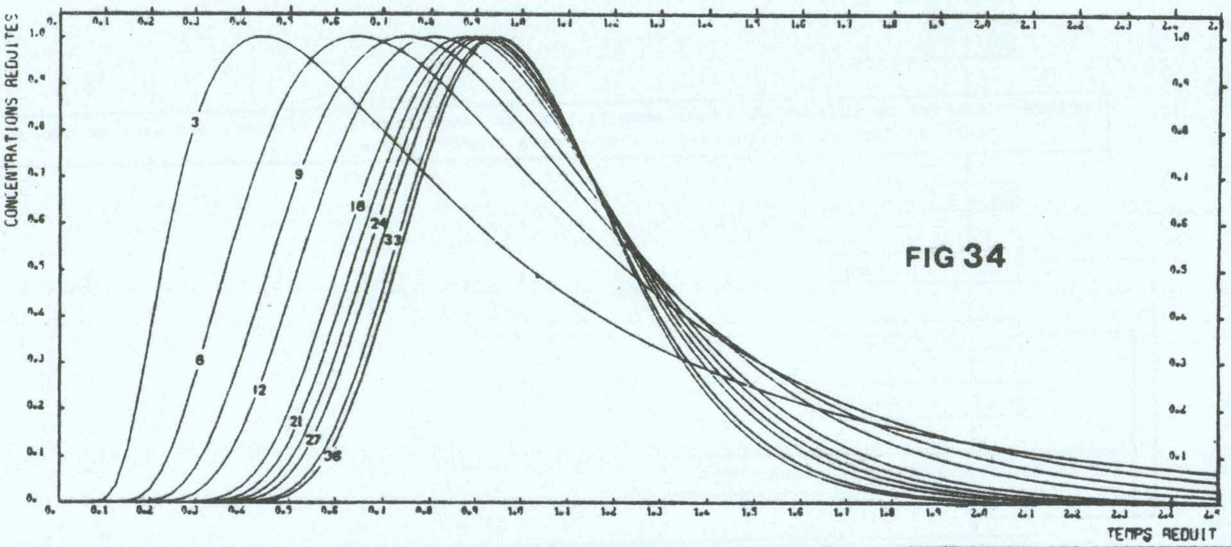


FIG 34

COURBES DE RESTITUTION D'UN TRACEUR INJECTE INSTANTANEMENT
EN ECOULEMENT CONVERGENT ET EN FONCTION DU TEMPS DE CONVECTION

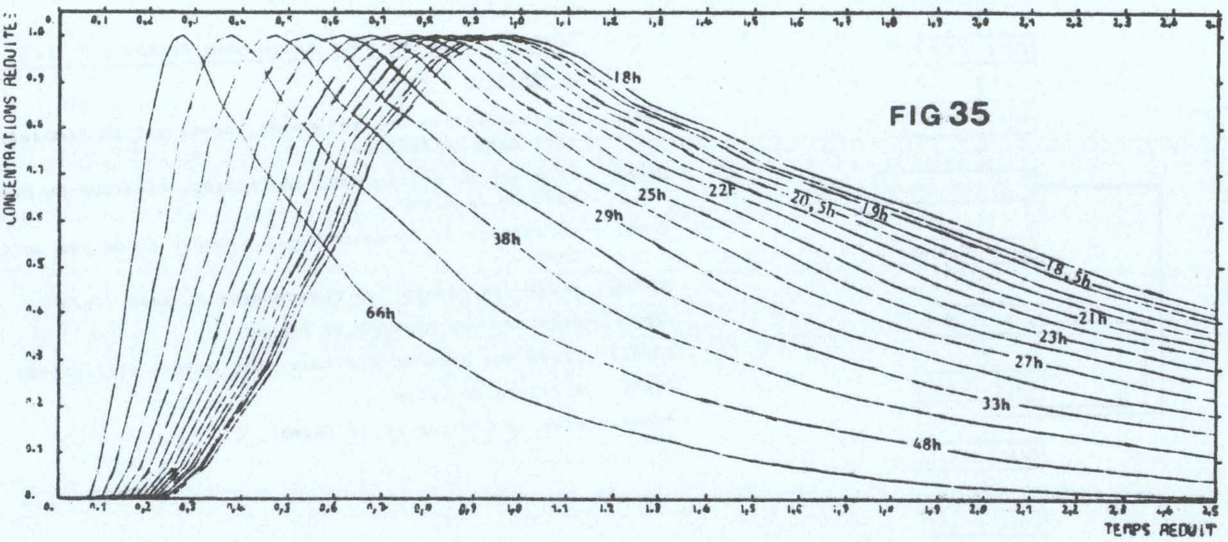


FIG 35

ANNEXE 4 : FLUCTUATIONS

DEFINITIONS

Intervalle de "pari" : il est défini par un écart e autour de P qui est le pourcentage réel.

Le risque : c'est la probabilité d'être hors de l'intervalle de pari.

L'écart réduit : c'est l'écart e exprimé en unité d'écart type dont l'expression est $T = \left(\frac{\Sigma\ (xi - \mu)^2}{n}\right)^{1/2}$

où μ est la moyenne réelle des paramètres xi et où n est le nombre d'échantillon de valeur xi. ε est donc égal à $\frac{e}{T}$.

LA VARIANCE : c'est la moyenne des carrés des écarts $T^2 = \frac{\Sigma\ (xi - \mu)^2}{n}$

Si l'on dispose de n échantillons de valeur xi, on peut calculer la moyenne m et la variance ; or, m est une estimation de μ, moyenne réelle. On démontre que :

$$\forall \alpha \in R,\ \Sigma\ (xi - m)^2 < \Sigma\ (xi - \alpha)^2$$

donc : $\Sigma\ (xi - m)^2 < \Sigma\ (xi - \mu)^2$

La valeur de $S^2 = \frac{\Sigma\ (xi - m)^2}{n}$ est donc une estimation trop faible de $T^2 = \frac{\Sigma\ (xi - \mu)^2}{n}$. On démontre que la meilleure correction possible consiste à compenser le numérateur trop petit de S^2 en diminuant le dénominateur de une unité ; on a donc $S^2 = \frac{\Sigma\ (xi - m)^2}{n - 1}$, n - 1 est le nombre de degré de liberté.

LES FLUCTUATIONS. m étant une estimation de μ, moyenne réelle de la population, il convient d'évaluer, pour chaque intervalle centré sur μ, la probabilité pour que m soit hors de cet intervalle. ε étant l'écart réduit correspondant au risque α , on assigne à la moyenne inconnue μ, l'intervalle de confiance tel que $\mu \in [m - \varepsilon \frac{S}{\sqrt{n}}\ ,\ m + \varepsilon \frac{S}{\sqrt{n}}]$

ANNEXE 4 : FLUCTUATIONS

DEFINITIONS

Intervalle de "pari" : il est défini par un écart ε autour de P qui est le pourcentage réel.

Le risque : c'est la probabilité d'être hors de l'intervalle de pari.

L'écart réduit : c'est l'écart ε exprimé en unité d'écart type dans l'expression : $\sqrt{\frac{P(1-P)}{n}}$

où P est la moyenne (ex. : les pourcentages) et où n est le nombre [illegible] de valeur x_i, [illegible] égal à [illegible].

La variance : c'est la moyenne des carrés des écarts $\sigma^2 = \frac{\Sigma (x_i - \mu)^2}{n}$

Si [illegible] on ne connaît pas la valeur μ, on doit calculer la moyenne m de la population, or m est une estimation de μ, moyenne réelle. On démontre que :

$$\forall a \neq m, \ \Sigma (x_i - m)^2 < \Sigma (x_i - a)^2$$

donc $\Sigma (x_i - m)^2 < \Sigma (x_i - \mu)^2$

La valeur de $s^2 = \frac{\Sigma (x_i - m)^2}{n}$ est donc une estimation trop faible de $\sigma^2 = \frac{\Sigma (x_i - \mu)^2}{n}$. On démontre que la meilleure correction possible consiste à compenser le numérateur trop petit de s^2 en diminuant le dénominateur d'une unité ; on a donc $s^2 = \frac{\Sigma (x_i - m)^2}{n - 1}$; n - 1 est le nombre de degré de liberté.

LES FLUCTUATIONS : m étant une estimation de μ, moyenne réelle de la population, il convient d'évaluer, pour chaque intervalle centré sur μ, la probabilité pour que m soit hors de cet intervalle, ε étant l'écart et [illegible] correspondant au risque, on assigne à la moyenne inconnue μ, l'intervalle de confiance tel que $\mu \in \left[m - t \frac{s}{\sqrt{n}} , m + t \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$

ANNEXE 5 : CORRELATION

Soit deux variables x et y. Si l'on porte x en abscisse et y en ordonnée, on obtient un nuage de points. La droite caractéristique de ce nuage passe par le point central du nuage de coordonnées $(\bar{x}, \bar{y})$ que l'on peut prendre comme origine des ordonnées.

L'équation de la droite $y = f(x) = \alpha_1 x + \beta_1$ sera déterminée par le calcul de α_1 et β_1. Si l'on admet que y fluctue autour de f(x) selon une loi de distribution normale, la probabilité pour que y - f(x) ait la valeur observée $y_1 - f(x_1)$ à $\pm$ dy près est :

$$\frac{2\,dy}{\sqrt{\pi}\,T\sqrt{2}} \exp - \left[\frac{y_1 - f(x_1)}{T\sqrt{2}}\right]^2$$

Il en est de même pour tous les couples $[y_n, f(x_n)]$. La probabilité pour que l'on ait simultanément tous ces évènements s'obtient en multipliant les probabilités des évènements élémentaires :

$$\left(\frac{2\,dy}{\sqrt{\pi}\,T\sqrt{2}}\right)^n \times \exp - \left[\frac{\Sigma\,[yi - f(xi)]^2}{T\sqrt{2}}\right]$$

La probabilité sera donc maximum lorsque $\Sigma\,[yi - f(xi)]^2$ sera minimum. On démontre que cela se produit lorsque les dérivées partielles par rapport aux différents paramètres sont nulles :

$$\frac{\partial\,\Sigma\,[yi - f(xi)]^2}{\partial\,\alpha} = 0 \;;\; \frac{\partial\,\Sigma[yi - f(xi)]^2}{\partial\,\beta} = 0$$

$\Sigma\,[yi - f(xi)]^2 = \Sigma\,[yi - (\alpha xi + \beta)]^2 = \alpha^2\,\Sigma\,xi + 2\alpha\beta\,\Sigma\,xi + n\,\beta^2 - 2\alpha\,\Sigma\,xiyi - 2\beta\,\Sigma\,yi + \Sigma\,yi^2$.

Les dérivées partielles par rapport à α et β permettent d'obtenir les relations suivantes :

$$\alpha\,\Sigma\,xi^2 + \beta n\,\bar{x} = \Sigma\,xiyi$$
$$\alpha\,\bar{x} + \beta = \bar{y}$$

Si le point central est pris comme origine, l'application affine devient linéaire donc $\beta = 0$; on en déduit :

$$\alpha_1 = \frac{\Sigma\,(xi - \bar{x})\,(yi - \bar{y})}{\Sigma\,(xi - \bar{x})^2}$$

La relation $f : x \longrightarrow y = f(x)$ est appelée régression de y en x.

Si l'on considère la relation $g : y \longrightarrow g(y) = x$, g sera la régression de x en y, et on aura :

$$\alpha_2 = \frac{\Sigma\,(yi - \bar{y})^2}{\Sigma\,(xi - \bar{x})\,(yi - \bar{y})}$$

Le coefficient de corrélation est défini par l'expression $R = \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$.

Lorsque R = 1, les droites de régression sont confondues, il y a relation fonctionnelle

R = 0, il y a indépendance

0 < R < 1, il peut y avoir corrélation.

Le coefficient de corrélation étant calculé, il convient ensuite de déterminer la probabilité d'erreur, c'est-à-dire de déterminer le degré de validité de la dépendance des paramètres étudiés. Le calcul du coefficient de STUDENT $t = \frac{R}{\sqrt{1 - R^2}} \sqrt{n - 2}$ permet de déterminer le risque d'erreur ; en effet, à chaque valeur de t est associé le risque d'erreur correspondant. Enfin, il convient de déterminer l'intervalle de confiance, c'est-à-dire d'étudier, pour x donné, la fluctuation de y autour de $\alpha_1\ x + \beta_1$ et, pour y donné, la fluctuation de x autour de $\alpha_2\ y + \beta_2$; au risque P précédemment déterminé, correspond l'écart réduit $\varepsilon = \frac{e}{T}$, T étant l'écart type ; connaissant ε, on en déduit e, intervalle de confiance.

ANNEXE6-bilan hydrogéologique du synclinorium de Bachant de 1977 à 1981-

MOIS	J	F	M	A	MA	J	JUIL	AO	SEP	OC	NO	DEC
TEMPERATURE	9.1	5.5	7	6.5	11.5	14.5	17	16.5	13.3	12.2	6.8	4.9
ETP(mm)	10	19	33	34	73	96	114	101	68	54	24	15
PLUIE(mm)	90.6	98.9	62.5	85.7	62.2	119.8	59.1	50.9	6.8	54	115.1	61.4
RFU(mm)	100	100	100	100	89.2	100	45.1	0	0	0	91.1	100
ETR(mm)	10	19	33	34	73	96	114	96	6.8	54	24	15
EXCEDENT(mm)	81	80	30	52	0	14	0	0	0	0	0	38

tableau 35-ANNEE 1977-

surface:65km^2

excédent moyen sur les 12 mois: 24.41mm

précipitation: 867mm

volume d'eau non évaporé: 19.045.000m^3

MOIS	J	F	M	A	MA	J	JUIL	AO	SEP	OC	NO	DEC
TEMPERATURE	2.9	2.3	6.8	7.7	12.9	15.2	15.3	16.4	14.7	11.8	5.3	3.4
ETP(mm)	9	8	32	41	82	100	102	101	75	52	18	11
PLUIE(mm)	72	30.3	103	49.5	106	75.8	65.4	36.9	28.7	18.9	9	102
RFU(mm)	100	100	100	100	100	83.8	46.4	0	0	0	0	91
ETR(mm)	9	8	32	41	82	100	102	83.3	28.7	18.9	9	11
EXCEDENT(mm)	63	22	71	8	24	0	0	0	0	0	0	0

tableau 36-ANNEE 1978-

surface:65km^2

excédent moyen sur les 12 mois: 15.66mm

précipitation: 698mm

volume d'eau non évaporé: 12.220.000m^3

MOIS	J	F	M	A	MA	J	JUIL	AO	SEP	OC	NO	DEC
TEMPERATURE	0	1.5	4.8	8.6	11.7	16.2	16.7	16.1	14	11.9	5.7	5.3
ETP(mm)	0	5	23	47	76	109	113	99	73	53	20	17
PLUIE(mm)	47.5	48.2	153	40.6	53.3	68.9	46.4	61	27.4	50.6	112	96.9
RFU(mm)	100	100	100	94	71	31	0	0	0	0	92	100
ETR(mm)	0	5	23	47	76	109	77	61	27.4	50.6	20	17
EXCEDENT(mm)	39	43	128	0	0	0	0	0	0	0	0	72

tableau 37-ANNEE 1979-

surface: $65km^2$

excédent moyen sur les 12 mois: 23.5mm

précipitation: 805mm

volume d'eau non évaporé: $18.330.000m^3$

MOIS	J	F	M	A	MA	J	JUIL	AO	SEP	OC	NO	DEC
TEMPERATURE	2.7	6.2	5.8	8.5	13	15.6	16.2	18.4	15.7	9.1	2.8	2.5
ETP(mm)	2	22	26	45	82	103	108	112	79	38	9	7
PLUIE(mm)	37.1	69.4	102	26	72.1	91.6	182	47.4	8.7	94.6	63.2	93.7
RFU(mm)	100	100	100	81	71	60	100	35	0	57	100	100
ETR(mm)	2	22	26	45	82	103	108	112	44	38	9	7
EXCEDENT(mm)	35	47.4	76	0	0	0	34	0	0	0	11	87

tableau 38-ANNEE 1980-

surface: $65km^2$

excédent moyen sur les 12 mois:24.16mm

précipitation: 888mm

volume d'eau non évaporé: $18.850.000m^3$

MOIS	J	F	M	A	MA	J	JUIL	AO	SEP	OC	NO	DEC
TEMPERATURE	3.1	2.3	9.2	9.6	14	15.6	17.8	17.7	14.7	9.4	6.9	6.9
ETP(mm)	10	8	43	51	89	102	118	107	74	39	23	5
PLUIE(mm)	98.8	39.6	104	17	87.2	130	42	42.6	87.2	164.5	49.4	125
RFU(mm)	100	100	100	66	64	92	16	0	13	100	100	100
ETR(mm)	10	8	43	51	89	102	118	59	74	39	23	5
EXCEDENT(mm)	89	32	61	0	0	0	0	0	0	38.5	26	120

tableau 39-ANNEE 1981-

surface: $65km^2$

excédent moyen sur les 12 mois: 30.5mm

précipitation: 987mm

volume d'eau non évaporé: $23.790.000m^3$

ANNEXE 7 : INTERPRETATION DES POMPAGES D'ESSAI EN MILIEU ANISOTROPE

METHODE DE GRINGARTEN ET WITHERSPOON

Ces auteurs proposent deux modèles pour interpréter les pompages d'essai en milieu fissuré : le modèle à fissure verticale unique et le modèle à fissure horizontale unique. Ils supposent deux types d'écoulements :

- un écoulement dans la fracture en communication avec le puits ;

- un écoulement dans la matrice.

Ils démontrent que la variation du rabattement au puits est proportionnelle à la racine carrée du temps, ce qui se traduit par une droite de pente 0,5 sur un graphique bilogarithmique. Au fur et à mesure que l'essai se prolonge, le rabattement devient approximativement identique à celui prévu par la solution de Theis.

L'obtention des caractéristiques hydrauliques résulte de la comparaison de la courbe expérimentale rabattement-temps en diagramme bilogarithmique avec les courbes de l'abaque relatives à différents types de fracturation et d'aquifères.

Il convient de noter que cette méthode n'est applicable que si la courbe expérimentale montre une droite de pente 0,5 au début du pompage ; ce qui suppose une surveillance de période très courte pendant le début du pompage. De plus, cette méthode suppose la connaissance de paramètres tels que l'épaisseur exacte de l'aquifère, la porosité.

On peut donc dire que cette méthode reste peu applicable en raison du manque de connaissance des paramètres qu'elle requiert.

METHODE DE HANTUSH (in De Ridder et Kruseman)

En milieu isotrope, l'expression du rabattement est :

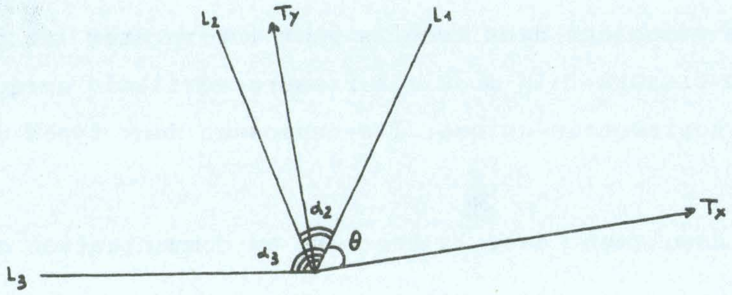
$$S_i = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25\ T\ t}{r_i^2\ S}$$

En milieu anisotrope, elle devient :

$$S_i = \frac{Q}{4\pi T_e} \ln \frac{2,25\ T_i\ t}{r_i^2\ S}$$

avec $T_e = \sqrt{TxTy}$ où Tx et Ty représentent les transmissivités principales. T_e est appelée transmissivité équivalente.

L'utilisation de cette méthode est conditionnée par l'existence de trois lignes de piézomètres.



L'expression de la transmissivité T_i relative à la ligne i est :

$$T_i = \frac{Tx}{\cos^2(\theta + \alpha_i) + m \sin^2(\theta + \alpha_i)} \quad \text{avec } m = \frac{Tx}{Ty} = \left(\frac{T_e}{Ty}\right)^2$$

en posant $$a_i = \frac{T_1}{T_i} = \frac{\cos^2(\theta + \alpha_i) + m \sin^2(\theta + \alpha_i)}{\cos^2\theta + m \sin^2\theta}$$

on en déduit : $$m = \frac{a_i \cos^2\theta - \cos^2(\theta + \alpha_i)}{\sin^2(\theta + \alpha_i) - a_i \sin^2\theta}$$

La combinaison de ces équations permet d'obtenir l'expression suivante, en considérant trois lignes de piézomètres :

$$\operatorname{tg} 2\theta = -2 \frac{(a_3 - 1)\sin^2\alpha_2 - (a_2 - 1)\sin^2\alpha_3}{(a_3 - 1)\sin 2\alpha_2 - (a_2 - 1)\sin 2\alpha_3}$$

Cette équation a deux solutions pour θ : x ; $x + \frac{\pi}{2}$

L'une de ces valeurs correspond à $m > 1$ et l'autre à $m < 1$.

L'axe des x étant considéré comme l'axe de la plus grande transmissivité, la valeur de θ, pour $m > 1$, donne la position de la première ligne de piézomètres par rapport à l'axe des x. De plus, si θ est positif, l'axe des x se trouve à droite de la première ligne de piézomètres.

Cette méthode requiert les paramètres suivants :

- T_e, $\frac{S}{T_i}$ obtenue par la méthode de Theis ou de Jacob ;
- les angles que font entre elles les lignes de piézomètres.

Si l'on dispose de plus trois lignes de piézomètres, il convient d'appliquer la méthode à chaque groupe de trois piézomètres et l'on s'aperçoit qu'en général, on obtient des résultats différents. D. Thiery (1980), en complétant le méthode de I.S. Papadopoulos (1965) (+), montre comment, en employant la méthode des nombres carrés, utiliser tous les piézomètres à la fois et obtenir une méthode fiable et stable d'identification des directions des transmissivités principales et du coefficient d'emmagasinement.

METHODE DE PAPADOPOULOS COMPLETEE PAR D. THIERY

Les intersections de la droite de Jacob avec l'axe des temps permettent d'écrire le système d'équations suivant :

$$x_1^2\ ST_{yy} - 2\,x_1 y_1\ ST_{xy} + y_1^2\ ST_{xx} = 2{,}25\ T^2 \,.\, t_1$$

$$x_2^2\ ST_{yy} - 2\,x_2 y_2\ ST_{xy} + y_2^2\ ST_{xx} = 2{,}25\ T^2 \,.\, t_2$$

$$\vdots$$

$$x_n^2\ ST_{yy} - 2\,x_n y_n\ ST_{yy} + y_n^2\ ST_{xx} = 2{,}25\ T^2 \,.\, t_n$$

$$\overbrace{\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 \end{bmatrix}}^{A} \begin{bmatrix} ST_{yy} \\ -2\ ST_{xy} \\ ST_{xx} \end{bmatrix} = 2{,}25\ T^2 \begin{bmatrix} t_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ t_n \end{bmatrix}$$

(x_i, y_i) : coordonnées du piézomètre P_i.

On voit que A est une matrice rectangulaire. Pour trouver ST_{xx}, ST_{xy} et ST_{yy}, on multiplie A par sa transposée afin d'obtenir une matrice symétrique :

$$^t(A) \times (A)\ (ST) = 2{,}25\ T^2\ {}^t(A)\ (to)$$

L'expression $T^2 = \dfrac{ST_{xx}\,.\,ST_{yy} - (ST_{xy})^2}{S^2}$ permet d'obtenir S et l'on peut

---

(+) La méthode de Papadopoulos est, sous une forme un peu différente, identique à celle de Hantush.

en déduire T_{xx}, T_{yy}, T_{xy}.

Il est alors possible de déterminer les transmissivités principales :

$$T_x = \frac{T_{xx} + T_{yy} + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4\,T_{xy}^2}}{2}$$

$$T_y = \frac{T_{xx} + T_{yy} - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4\,T_{xy}^2}}{2}$$

et l'angle θ entre l'axe OX et T_x : $\operatorname{tg} \theta = \dfrac{T_x - T_{xx}}{T_{xy}}$

ANNEXE 8 : MODELE DE SIMULATION DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE D'UN TRACEUR EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL NON UNIFORME

Le débit de transfert de la maille i - 1 à la maille i (écoulement unidimensionnel) est :

$$q_{i-1 \to i} = \frac{-(K\ b\ \Delta x)\ (H_i^n - H_{i-1}^n)}{\Delta x} = T\ (H_i^n - H_{i-1}^n)$$

K : perméabilité LT^{-1}

Δx : coté de la maille

b : épaisseur de l'aquifère

n : indice de temps

Stockage dans une maille :

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta t} = S \times \Delta x\ \frac{(H_i^{t-\Delta t} - H_i^t)}{\Delta t} = q_{i-1 \to i} - q_{i \to i+1}$$

On en déduit :

$$H_{i+1}^n - 2\ H_i^n + H_{i-1}^n = \frac{S}{T}\ (\frac{\Delta x}{\Delta t})^2\ (H_i^{t+\Delta t} - H_i^t)$$

La méthode explicite suppose que l'on connaisse les cotes piézométriques à un temps t ; pour une maille i, on peut donc en déduire la hauteur H_i à l'instant $t + \Delta t$:

$$H_i^{t+\Delta t} = \frac{T\ .\ \Delta t}{S\ \Delta x^2}\ (H_{i+1}^t + H_{i-1}^t) + H_i^t\ (1 - \frac{2\ T\ \Delta t}{S\ \Delta x^2})$$

On démontre que pour que la solution converge, il faut que Δt soit inférieur à $\frac{S\ \Delta x^2}{2\ T}$

La vitesse effective globale a pour expression : $VeF = \frac{K}{\omega}\ \frac{H_N - H_1}{\Delta x\ (N-1)}$

La vitesse effective relative au transfert de la maille i_{+1} à la maille i est :

$$V'eF = \frac{K}{\omega}\ \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta x}$$

On en déduit : $V'eF = VeF\ \frac{H_{i+1} - H_i}{H_N - H_1}\ (N-1)$

ANNEXE 8 : MODELE DE SIMULATION DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE D'UN TRACEUR EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL NON UNIFORME

Le débit de transfert de la maille i − 1 à la maille i (écoulement unidimensionnel) est :

$$q_{i-1,i} = \frac{(K \times \Delta x)\,(H_{i-1}^{n} - H_i^{n})}{\Delta x}$$

K : perméabilité

Δx : côté de la maille

h : épaisseur de l'aquifère

n : indice du temps

Bilan des débits dans une maille i :

$$\frac{H_i^{n+1} - H_i^{n}}{\Delta t}\, h\, \Delta x = q_{i-1,i} + q_{i+1,i}$$

On en déduit :

$$H_{i+1}^{n} - 2\,H_i^{n} + H_{i-1}^{n} = \frac{h}{K}\left(\frac{\Delta x^2}{\Delta t}\right)(H_i^{n+1} - H_i^{n})$$

La méthode explicite suppose que l'on connaisse les cotes piézométriques à un temps t pour une maille i, on peut donc en déduire la hauteur H_i à l'instant t + Δt :

$$H_i^{t+\Delta t} = \frac{T \cdot \Delta t}{S\,\Delta x^2}\,(H_{i+1}^{t} + H_{i-1}^{t}) + H_i^{t}\,\left(1 - \frac{2\,T\,\Delta t}{S\,\Delta x^2}\right)$$

On démontre que pour que la solution converge, il faut que Δt soit inférieur à $\frac{S\,\Delta x^2}{2\,T}$

La vitesse effective globale a pour expression : $Vef = \frac{K}{\omega}\,\frac{H_N - H_1}{\Delta x\,(N-1)}$

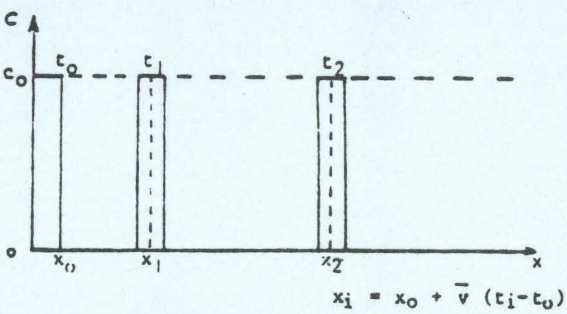
La vitesse effective relative au transfert de la maille i_{+1} à la maille i est :

$$V'ef = K\,\frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta x}$$

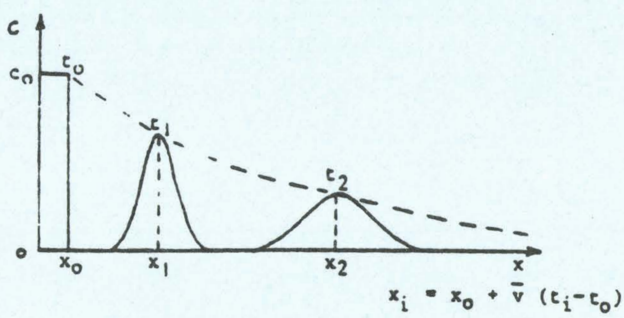
On en déduit : $V'ef = Vef\,\frac{H_{i+1} - H_i}{H_N - H_1}\,(N-1)$

Annexe 9 - HYDRODISPERSION
en écoulement uniforme monodimensionnel-Terminologie-

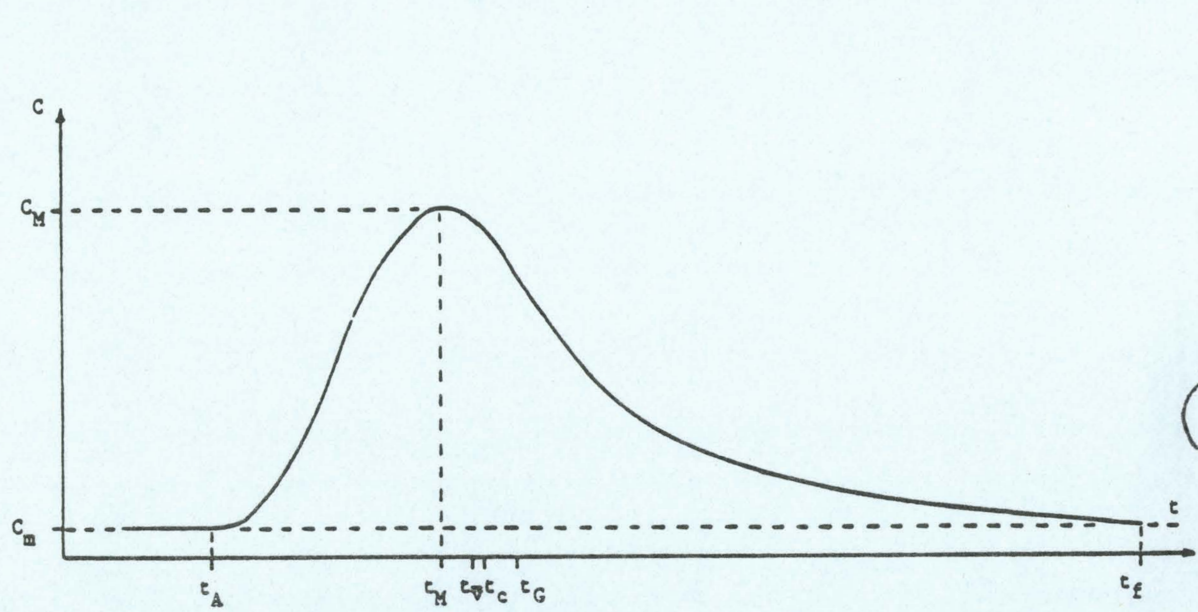
TEMPS		VITESSE (constante $\forall$ x)	
Nom	Définition	Nom	Définition
Temps d'arrivée	$\frac{C}{C_m} = 1 + \varepsilon \Rightarrow t_A$ $t_A < t_M$	vitesse maximale	$v_A = \frac{X}{t_A}$
Temps final	$\frac{C}{C_m} = 1 + \varepsilon \Rightarrow t_f$ $t_f > t_M$	vitesse minimale	$v_f = \frac{X}{t_f}$
Temps de passage	$t_f - t_A$ $C > C_m$		
Temps modal	t_M $dC/dt = 0$	vitesse modale	$v_M = \frac{X}{t_M}$
Temps moyen	$\bar{t} = t_G = \frac{\int_0^\infty t.C.dt}{\int_0^\infty C.dt}$	vitesse médiane	$v_G = \frac{X}{t_G} = \frac{X\int C.dt}{\int t.C.dt}$
	$t_{\bar{v}} = \frac{X}{\bar{v}} = \frac{\int C.dt}{\int \frac{1}{t} C.dt}$	vitesse moyenne	$\bar{v} = \frac{X\int \frac{1}{t} C.dt}{\int C.dt}$



Propagation d'une impulsion en écoulement purement convectif



Propagation d'une impulsion en écoulement hydrodispersif



(N. CRAMPON, 1981)

ANNEXE 10-Récapitulatif des traçages-

TRACAGE	DATE D'INJECTION	LIEU D'INJECTION	MASSE(kg)	LIEU DE PRELEVEMENT	TYPE D'ANALYSE	DISTANCE(m)	Cm(kg/l)	Ta	Vmax	Cmax(kg/l)	Tcmax	Vcmax	Tc	Ve	α(m)
1	8/03/82	effondrement	2uraniné	forage2(Fontaine)	eau-fluocapteur	1000	10^{-9}	<8j	>125m/j	44810^{-9}	16j	42.5m/j	/	/	/
2	27/10/81	perte du ruis-seau d'Ecclaibe	2uranine	carrière CBS	fluocapteur	510	$.210^{-9}$	2j	255m/j	3.210^{-9}	13.3j	38.34m/j	13.33m/j	38.26m/j	1.2
3	9/10/81	forage4(Fonta--ine)	2NAI	forage5(Fontaine)	eau	480	$.2510^{-9}$	3j	160m/j	/	/	/	/	/	/
4	10/08/81	forage3(Fonta--ine)	2NAI	forage2(Fontaine)	eau	116	$.210^{-9}$	1.12j	103m/j	20.610^{-9}	9.33m/j	21.75m/j	9j	12.88m/j	.29
5	24/09/81	perte du ruis--seau des hotels	2uranine	ruisseau du Quiè--velon	fluocapteur	400	$.0510^{-9}$	/		/	/	/	/	/	/
6	10/03/82	ferme de l'ho--pital	1.5uran--nine	forage5(Grande--Faches)	fluocapteur eau	1500	/	/		/	/	/	/	/	/
8	5/11/80	ferme Taille--Pionne	3uranine	captages de Sars-Poteries	fluocapteur	1400	410^{-9}	<15j	>93m/j	210^{-8}	42j	33.3m/j	37j	37m/j	/
9	10/01/81	Le Fourie	2uranine	captages de Sars-Poteries	fluocapteur	700	10^{-9}	<10j	>70m/j	310^{-8}	35j	20m/j	23j	30m/j	/
11	5/11/80	Helpe Majeu--re	2uranine	captage de Wallers-Trelon	fluocapteur	1200	10^{-10}	<10j	>120m/j	310^{-8}	15.5j	77m/j	16j	73m/j	/
12	10/01/80	Macon	2uranine	captage de Wallers-Trelon	fluocapteur	2500	10^{-10}	<10j	>250m/j	510^{-9}	16j	156m/j	16.5j	152m/j	/
13	2/08/82	perte(Moren--rieux)	0.25ura--nine	forage	eau	14	$.2510^{-6}$	<2mn	>510m/h	1.510^{-5}	10mn	108.5m/h	12.5mn	67.2m/h	3.18
14	17/11/82	piezo.P2(Mo--renrieux)	2uranine	forage	eau	68.88	1.910^{-9}	<12h	>5.7m/h	910^{-9}	108h	.64m/h	123h	.56m/h	1.8

PROGRAMMES INFORMATIQUES

```
READY.

 5 OPEN1,4
 6 DIMH(50),U(50),D(50),C(50)
 10 PRINT"NOMBRE DE MAILLES?"
 11 INPUT N
 12 PRINT"TRANSMISSIVITE?"
 13 INPUT T
 14 PRINT"COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT?"
 15 INPUT S
 16 PRINT"COTE DE LA MAILLE(MAILLE CARREE)?"
 17 INPUT X
 18 PRINT"COTE PIEZOMETRIQUE AU TEMPS T=0?"
 19 FORI=1TON:INPUT H(I):NEXT I
 20 PRINT"NOMBRE D'ITERATIONS?"
 25 INPUT B
 30 K=S*X↑2/2/T
 31 PRINT"K=";K
 32 PRINT"PAS DE TEMPS?"
 33 INPUT DT
 35 W=T/S/X↑2
 37 PRINT#1,"PAS DE TEMPS=";DT
 40 K=1
 50 FORI=NTO3STEP-1
 55 H(I-1)=W*DT*(H(I)+H(I-2))+H(I-1)*(1-2*DT*W)
 60 NEXTI
 65 K=K+1
 67 IFB+1-K=0THEN79
 70 GOTO50
 79 PRINT#1,"NOMBRE D'ITERATIONS";B
 80 FORI=1TON:PRINT#1,"H";I;"=";H(I):NEXTI
 81 PRINT"SI LE NOMBRE D'ITERATION EST SUFFISANT,TAPEZ 1,SINON TAPEZ 0"
 85 INPUT P
 90 IFP=1THEN100
 95 IFP=0THEN20
 100 PRINT#1,"*************************************************************"
 105 PRINT"EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DU TRACEUR"
 107 PRINT#1,"EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DU TRACEUR"
 110 PRINT"MASSE INJECTEE?"
 115 INPUT M
 120 PRINT"VITESSE EFFECTIVE GLOBALE?"
 125 INPUT VEF
 130 PRINT"DISPERSIVITE?"
 135 INPUT ALPHA
 140 PRINT"DEBIT DE POMPAGE?"
 145 INPUT Q
 150 PRINT"PAS DE TEMPS?"
 155 INPUT DT
 156 A=DT
 160 CSTE=(N-1)*X*VEF/(H(N)-H(1))
 165 PRINT"NOMBRE D'ITERATIONS?"
 170 INPUT G
 171 Z=X
 175 FORJ=1TOG
 180 F=1
 185 L=1
 186 E=0
 187 U(N+1)=0
 190 FORI=NTO2STEP-1
 191 E=E+1
 195 U(I)=(H(I)-H(I-1))*CSTE/Z
 199 U(I)=(U(I+1)*(E-1)+U(I))/E
 200 D(I)=ALPHA*U(I)
 205 C(I-1)=(M/2/Q/π↑.5/D(I)↑.5/DT↑1.5)*X
 210 C(I-1)=C(I-1)*EXP(-(X-U(I)*DT)↑2/4/D(I)/DT)
 220 L=L+1
 225 X=Z*L
```

```
230 NEXTI
235 PRINT#1,"TEMPS=";DT
238 PRINT#1,"C1=";C(1)/4
240 FORI=2TON-1:PRINT#1,"C";I;"=";C(I):NEXTI
245 F=F+1
250 DT=DT+A
251 X=Z
255 NEXTJ
```

```
READY.

 10 OPEN1,4
 20 PRINT"OPTION: CALCUL DES PERMEABILITES,TAPEZ 1"
 21 PRINT"OPTION: CALCUL DES VITESSES,TAPEZ 2"
 22 PRINT"OPTION: CALCUL DES GRADIENTS,TAPEZ3"
 29 INPUTI
 30 IFI=1THEN35
 31 IFI=2THEN90
 32 IFI=3THEN230
 35 PRINT"CALCUL DES PERMEABILITES EN MILIEU ANISOTROPE"
 36 PRINT"********************************************************************
 40 PRINT"VALEURS DE KX,KY (KX>KY)?"
 45 INPUTB
 46 INPUTA
 47 PRINT"NOMBRE DE DIRECTIONS CHOISIES?"
 48 INPUTN
 50 PRINT"VALEUR DE L'ANGLE ENTRE KX ET LA DIRECTION CHOISIE?"
 51 PRINT"(SENS TRIGONOMETRIQUE)"
 55 FORJ=1TON:INPUTTETA(J):NEXTJ
 56 CMD1
 57 PRINT"CALCUL DES PERMEABILITES EN MILIEU ANISOTROPE"
 58 PRINT"KX=";B;"M/S","KY=";A;"M/S"
 59 FORJ=1TON
 60 TETA(J)=TETA(J)/57.296
 65 K(J)=A*B*((1+TAN(TETA(J))↑2)↑.5)
 66 K(J)=K(J)/(A↑2+B↑2*TAN(TETA(J))↑2)↑.5
 70 PRINT"*****************************************************************"
 75 PRINT"ANGLE DE LA DIRECTION AVEC KX:",TETA(J)*57.296;"DEGRES"
 76 PRINT"VALEUR DE LA PERMEABILITE:",K(J);"M/S"
 80 NEXTJ
 85 END
 90 PRINT"CALCUL DES VITESSES EN MILIEU ANISOTROPE"
 92 PRINT"*****************************************************************"
 95 PRINT"VALEURS DE KX,KY (KX>KY)?"
 100 INPUTB
 105 INPUTA
 107 PRINT"NOMBRE DE DIRECTIONS CHOISIES?"
 108 INPUTN
 110 PRINT"VALEUR DE L'ANGLE ENTRE KX ET LE GRADIENT HYDRAULIQUE?"
 115 FORJ=1TON:INPUTTETA(J):NEXTJ
 120 PRINT"VALEUR DU GRADIENT HYDRAULIQUE?"
 125 FORJ=1TON:INPUTGRH(J):NEXTJ
 126 CMD1
 127 PRINT"CALCUL DES VITESSES EN MILIEU ANISOTROPE"
 128 PRINT"KX=";B;"M/S","KY=";A;"M/S"
 130 FORJ=1TON:PRINT"GRH=";GRH(J):NEXTJ
 135 FORJ=1TON
 140 TETA(J)=TETA(J)/57.296
 145 C=(B*COS(TETA(J)))+(A*SIN(TETA(J))*TAN(TETA(J)))
 150 D=((A↑2*TAN(TETA(J))↑2)+B↑2)/TAN(TETA(J))↑2
 156 D=D↑.5
 157 Z=B/(D*TAN(TETA(J)))
 160 E=C/(D*TAN(TETA(J)))
 165 F=1-E↑2
 166 ZX=1-Z↑2
 170 G=F↑.5/E
```

```
171 ZY=ZX↑.5/Z
172 BETA=ATN(ZY)
175 ALPHA=ATN(G)
176 IFI=3THENGRH(J)=V(J)/(A*B*E)
180 H=A*B*E*GRH(J)
181 IFI=3THENX=TETA(J)
182 IFI=2THENX=BETA
185 HH=1+TAN(X)↑2
190 HG=A↑2+B↑2*TAN(X)↑2
191 IFI=3THENGRH(J)=GRH(J)*((P↑2+Q↑2*TAN(TETA(J))↑2)/HH)↑.5
192 IFI=3THEN200
195 V=H*(HH/HG)↑.5
197 V=V↑2
198 V=V↑.5
200 PRINT"*****************************************************************
201 IFI=3THENPRINT"VALEUR DE LA VITESSE:",V(J);"M/S"
202 IFI=3THENPRINT"ANGLE DE LA VITESSE AVEC KX:",TETA(J)*57.296;"DEGRES"
203 IFI=3THENPRINT"ANGLE DU GRADIENT AVEC KX:",BETA*57.296;"DEGRES"
204 IFI=3THENPRINT"VALEUR DU GRADIENT:",GRH(J)
205 IFI=3THENZK=A*B*(HH/(P↑2+Q↑2*TAN(TETA(J))↑2))↑.5
206 IFI=3THENPRINT"VALEUR DE LA PERMEABILITE:","K=";ZK;"M/S"
207 IFI=3THEN220
208 PRINT"VALEUR DU GRADIENT HYDRAULIQUE:",GRH(J)
210 PRINT"ANGLE DU GRADIENT AVEC KX:",TETA(J)*57.296;"DEGRES"
215 PRINT"ANGLE DE LA VITESSE AVEC KX:",BETA*57.296;"DEGRES"
216 PRINT"VALEUR DE LA VITESSE:",V;"M/S"
217 PRINT"VALEUR DE LA PERMEABILITE:","K=";A*B*(HH/HG)↑.5;"M/S"
220 NEXTJ
223 IFI=3THENRETURN
225 END
230 PRINT"CALCUL DES GRADIENTS HYDRAULIQUES EN MILIEU ANISOTROPE"
235 PRINT"*****************************************************************
240 PRINT"VALEURS DE KX,KY (KX>KY)"
250 INPUTB
260 INPUTA
265 PRINT"NOMBRE DE DIRECTIONS CHOISIES?"
270 INPUTN
275 PRINT"VALEUR DE L'ANGLE ENTRE KX ET LA VITESSE?"
280 FORJ=1TON:INPUTTETA(J):NEXTJ
285 PRINT"VALEUR DE LA VITESSE?"
290 FORJ=1TON:INPUTV(J):NEXTJ
291 CMD1
292 PRINT"CALCUL DES GRADIENTS EN MILIEU ANISOTROPE"
295 PRINT"KX="; B;"M/S","KY="; A;"M/S"
300 P=A
305 Q=B
310 B=A
315 A=Q
320 GOSUB135
325 END
```

Programme I P E M A H

```
READY.

 1 OPEN1,4
 50 DIMM(250)
 55 DIMMM(250)
 60 DIMAA(250)
 65 DIMTETA(250)
 66 DIMTY(250)
 67 DIMTX(250)
 68 DIMTR(250)
 70 DIMBETA(250)
 71 DIMTW(250)
 72 DIMT(250)
 73 DIMS(250)
 74 DIMST(250)
 80 INPUTN
 85 PRINT"N=";N,"VALEUR DES TRANSMISSIVITES?"
 90 FORI=1TON:INPUTT(I):NEXT I
 95 FORI=1TON:PRINTT(I):NEXTI
 97 PRINT"NUMEROS DES PIEZOMETRES?"
 100 FORI=1TON:INPUTP$(I):NEXTI
 105 FORI=1TON:PRINTP$(I):NEXTI
 110 PRINT"DISTANCES AU PUITS?"
 115 FORI=1TON:INPUTR(I):NEXTI
 117 FORI=1TON:PRINTR(I):NEXTI
 120 PRINT"TEMPS POUR CHAQUE PIEZOMETRES?"
 130 FORI=1TON:INPUTTC(I):NEXTI
 135 FORI=1TON:PRINTT(I):NEXTI
 140 PRINT"ANGLES ENTRE PIEZOMETRES?"
 145 FORI=1TON:INPUTALPHA(I):NEXTI
 147 FORI=1TON:ALPHA(I)=ALPHA(I)/57.296:NEXTI
 150 FORI=1TON:PRINTALPHA(I):NEXTI
 151 CMD1
 152 PRINT"COMMENTAIRES:POMPAGES D'ESSAI EN MILIEU ANISOTROPE-METHODE DE HANT
"
 153 PRINT"SI TETA>0 ALORSTX EST A DROITE DE LA PREMIERE LIGNE CHOISIE"
 154 KK=0
 155 FORL=1TON-2
 158 FORJJ=L+1TON:ALPHA(JJ)=ALPHA(JJ)-ALPHA(L):NEXTJJ
 160 ST(L)=2.25*TC(L)/(R(L)↑2)
 165 J=L+1
 170 M=1
 175 K=J+1
 185 FORI=JTOKSTEPM
 190 A(I)=2.25*TC(I)/(R(I)↑2)/ST(L)
 195 NEXTI
 200 KK=KK+1
 202 IFALPHA(J)=ALPHA(K)THEN349
 203 CD=(A(K)-1)*SIN(ALPHA(J))↑2
 204 CD=CD-(A(J)-1)*SIN(ALPHA(K))↑2
 205 CD=-2*CD
 206 CB=(((A(K)-1)*SIN(2*ALPHA(J)))-((A(J)-1)*SIN(2*ALPHA(K))))
 208 AB=CD/CB
 210 TETA(KK)=ATN(AB)
 212 TETA(KK)=TETA(KK)/2
 215 BETA(KK)=TETA(KK)+(π/2)
 220 AA(KK)=TETA(KK)
 225 AA(KK+1)=BETA(KK)
```

```
230 FORII=KKTOKK+1
232 CC=((A(J)*COS(AAA(II))↑2)-(COS(AA(II)+ALPHA(J))↑2))
233 CE=((SIN(AA(II)+ALPHA(J))↑2)-A(J)*SIN(AA(II))↑2)
235 M(II)=ABS(CC/CE)
237 CF=((A(K)*COS(AA(II))↑2)-(COS(AA(II)+ALPHA(K))↑2))
238 CG=((SIN(AA(II)+ALPHA(K))↑2)-A(K)*SIN(AA(II))↑2)
240 MM(II)=ABS(CF/CG)
245 NEXTII
250 IFM(KK)>1THENC=(M(KK)+MM(KK))/2
255 IFM(KK+1)>1THENC=(M(KK+1)+MM(KK+1))/2
257 TW(KK)=(T(L)+T(J)+T(K))/3
260 TY(KK)=((TW(KK)↑2)/C)↑.5
265 TX(KK)=C*TY(KK)
270 IFM(KK)>1THENTETA=AA(KK)
275 IFM(KK+1)>1THENTETA=AA(KK+1)
280 TR(L)=TX(KK)/(COS(TETA)↑2+(C*SIN(TETA)↑2))
285 TR(J)=TX(KK)/(COS(TETA+ALPHA(J))↑2+(C*SIN(TETA+ALPHA(J))↑2))
290 TR(K)=TX(KK)/(COS(TETA+ALPHA(K))↑2+(C*SIN(TETA+ALPHA(K))↑2))
295 S(L)=TR(L)*2.25*TC(L)/(R(L)↑2)
300 S(J)=TR(J)*2.25*TC(J)/(R(J)↑2)
305 S(K)=TR(K)*2.25*TC(K)/(R(K)↑2)
310 PRINT"*************************************************************************
315 PRINT"ETUDE SUR LES PIEZOMETRES",P$(L),P$(J),P$(K)
317 PRINT"VALEUR DE LA TRANSMISSIVITE EQUIVALENTE",TW(KK);"M↑2/S"
320 PRINT"VALEUR DES TRANSMISSIVITES PRINCIPALES","TX=";TX(KK),"TY=";TY(KK)
322 PRINT"ANGLE ENTRE LA TRANSMISSIVITE PRINCIPALE TX ET LA LIGNE PUITS-";P$(
;":"
324 PRINT"TETA=";TETA*57.296;"DEGRES"
325 PRINT"VALEURS DES TRANSMISSIVITES ET DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT:"
330 PRINT"PIEZO.";P$(L),"TRANS.";TR(L),"COEF.EMMAG.";S(L)
335 PRINT"PIEZO.";P$(J),"TRANS.";TR(J),"COEF.EMMAG.";S(J)
340 PRINT"PIEZO.";P$(K),"TRANS.";TR(K),"COEF.EMMAG.";S(K)
349 K=K+1
350 M=M+1
355 IFK<=NTHEN185
360 J=J+1
365 K=J+1
370 M=1
375 IFJ<=N-1THEN185
378 FORJJ=L+1TON:ALPHA(JJ)=ALPHA(JJ)+ALPHA(L):NEXTJJ
379 PRINT"ST=";ST(L)
380 NEXTL
```

Programme DISSECOT

```
C***PROGRAMME DE CALCUL DES ABAQUES DE DISPERSION EN ECOULEMENT CONVERGEN
C** PE=NOMBRE DE PECLET ,TR=TEMPS REDUIT  MOLOTO ,CR=CONC.REDUITE,MOLOTO
C** LE TABLEAU TRAC CONTIENT LES VALEUR DE 10 COURBES
      DIMENSION TRAC(100,10),PE(12) ,LJ(0:11)
      COMMON PAS,NCOURB
      LEC=105
      IMP=108
      READ(LEC,9)NTR,PAS,(PE(J),J=1,10),NCOURB
      WRITE(IMP,9)NTR,PAS,(PE(J),J=1,10),NCOURB
      DO 1 J=1,10
      X3=0.0
      DO 1 N=1,NTR
      TR=X3+(N-1)*PAS
      TRMAX=((1.+(3./PE(J))**2)**0.5)-3./PE(J)
      AKP=(TRMAX**1.5)*EXP(PE(J)*((1.-TRMAX)**2)/4./TRMAX)
      CR=AKP/(TR**1.5)*EXP(-PE(J)*((1.-TR)**2)/4./TR)
    1 TRAC(N,J)=CR
      DO 2 J=1,10
      WRITE(IMP,21)
    2 WRITE(IMP,20)(TRAC(N,J),N=1,NTR)
   20 FORMAT(2X,25(F5.2))
   21 FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU DES VALEURS CALCULEES DE CR ET TR'/,
     1132('*'))
      WRITE(IMP,30)
   30 FORMAT(2X,'APPEL DU PROGRAMME DE TRACAGE')
      CALL GRAPHE(TRAC)
      WRITE(IMP,40)
   40 FORMAT(2X,'TRACAGE TERMINE AVEC SUCCES')
    9 FORMAT(I3,F5.3,10(F5.0),I2)
      END

      SUBROUTINE GRAPHE(TRAC)
      DIMENSION         TRAC(100,10),PE(12),LJ(0:11),IEXTG(20),NBUF(269)
     1,X(100)
      REAL NUMBR
      DIMENSION TX(20),TY(20),NUMBR(20)
      DATA TX/.1,.2,.4,.5,.65,.75,.8,.875,.88,.9,1.,1.6,1.5,2.125,1.5/
     1,1.325,1.3,1.2,1.2,1.15/
      DATA TY/.6,.4,.5,.2,.1,.1,.05,.2,.1,.02,.2,.21,.3,.02,.2,.11,.02,
     1.1,.02,.02/
      DATA NUMBR/1.,3.,10.,20.,50.,100.,200.,300.,500.,1000.
     1,1.,3.,10.,20.,50.,100.,200.,300.,500.,1000./
      COMMON PAS,NCOURB
      LEC=105
      IMP=108
C*** NJOUR=NOMBRE TOTAL DE JOURS  DE  SIMULATION (10 PREVUS AU MAXIMUM)
C*** PAPX =DIMENSION DU GRAPHIQUE SELON L AXE X (EN CENTIMETRE)
C*** PAPY =DIMENSION DU GRAPHIQUE SELON L AXE Y (EN CENTIMETRE)
C*** III  =NUMERO DU FICHIER DE STOCKAGE SUR DISQUE DES DONNEES A TRACER
      WRITE(IMP,500)
  500 FORMAT(2X,'APPEL CONFIRME')
      READ(LEC,100)NJOUR,PAPX,PAPY,III,IEXTG
      RM=0.
      DO10 J=1,NCOURB
      DO10 I=1,NJOUR
      X(I)=I/40.
      IF(TRAC(I,J).GT.RM)RM=TRAC(I,J)
   10 CONTINUE
      ECHX=10.
      ECHY=PAPY/RM
      CALL IBENA(NBUF,269,III)
      NC=1
      CALL PNUMA(0.,0.,NC,0.,0.)
```

```
      CALL ECHEL(ECHX,ECHY,0.,0.)
      DO 20 J=1,NCOURB
      XY=PE(J)
      CALL BSCURV(X,TRAC(1,J),NJOUR,1,0,0.,0.,1,1,0.,0.,0.,)

      DO50 I=1,20
   50 CALLNOMBS(IX(I),IY(I),0,NOMBR(I),-1,.1,.1,1.,0.)
   20 CONTINUE
      CALL BSAXLL(0.,0.,X(NJOUR),.1,0.,0.,'TEMPS',-5,0,0,1)
      DI=RM/5.
      CALL BSAXLL(0.,0.,1.,DI,0.,0.,'RAPPORT C/CC',-12,0,1,1)
      CALL PCARS(0.5,RM*1.05,0,TEXIG,80,.5,.5,1.,0.)
      NC=9999
      CALL PNUMA(0.,0.,NC,0.,0.)
      RETURN
  100 FORMAT(18X,I4,F6.2,2X,F6.2,15/20A4)
      END
```

```
      WRITE(IMP,49)
      WRITE(IMP,30)A3
49    FORMAT(132('*')/,10X,'SOMME QUOTIENTS CONC-TEMPS*PAS'/,132('*'))
      T1=PAS*N
      CMOY=A1/T1
      WRITE(IMP,59)
      WRITE(IMP,30)CMOY
59    FORMAT(132('*')/,10X,'CONCENTRATION MOYENNE'/,132('*'))
      WRITE(IMP,69)
      B(1)=C(1)
      ST(1)=(100*PAS/A1)*B(1)
      DO 70 I=2,N
      B(I)=C(I)+B(I-1)
      P1=(100*PAS/A1)*B(I)
70    ST(I)=P1
69    FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU ST'/,132('*'))
      DO 80 I=1,N
80    WRITE(IMP,10)(ST(I),I=1,N)
      K=0
91    K=K+1
      P18=ST(K)-50.
      IF(P18)91,91,92
92    T50=PAS*((K-1)+(50.-ST(K-1))/(ST(K)-ST(K-1)))
      WRITE(IMP,93)
      WRITE(IMP,30)T50
93    FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE T50'/,132('*'))
      K=0
95    K=K+1
      P19=ST(K)-84.1
      IF(P19)95,95,96
96    T841=PAS*((K-1)+(84.1-ST(K-1))/(ST(K)-ST(K-1)))
      WRITE(IMP,97)
      WRITE(IMP,30)T841
97    FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE  T84.1'/,132('*'))
      K=0
99    K=K+1
      P20=ST(K)-15.9
      IF(P20)99,99,100
100   T159=PAS*((K-1)+(15.9-ST(K-1))/(ST(K)-ST(K-1)))
      WRITE(IMP,101)
      WRITE(IMP,30)T159
101   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE T25.9'/,132('*'))
      WRITE(IMP,109)
      DO 110 I=1,N
      P2=C(I)/A1
110   HT(I)=P2
109   FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU HT'/,132('*'))
      DO 120 I=1,N
120   WRITE(IMP,10)(HT(I),I=1,N)
      F(1)=HT(1)
      DO 130 I=2,N
```

```
      F(I)=HT(I)+F(I-1)
130   P3=F(I)
      H1=PAS*P3
      WRITE(IMP,129)
      WRITE(IMP,30)H1
129   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE H1'/,132('*'))
      G(1)=T(1)*HT(1)
      DO 140 I=2,N
      G(I)=T(I)*HT(I)+G(I-1)
140   P4=G(I)
      H2=PAS*P4
      WRITE(IMP,139)
      WRITE(IMP,30)H2
139   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE H2'/,132('*'))
      U(1)=HT(1)/T(1)
      DO 150 I=2,N
      U(I)=HT(I)/T(I)+U(I-1)
150   P5=U(I)
      H3=PAS*P5
      WRITE(IMP,149)
      WRITE(IMP,30)H3
149   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE H3'/,132('*'))
      VM=DIST/TMAX
      WRITE(IMP,159)
      WRITE(IMP,30)VM
159   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE VM'/,132('*'))
      V50=DIST/T50
      WRITE(IMP,169)
      WRITE(IMP,30)V50
169   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE TV50'/,132('*'))
      V31=DIST*A3/A1
      WRITE(IMP,179)
      WRITE(IMP,30)V31
179   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE V3/1'/,132('*'))
      VH31=DIST*H3/H1
      WRITE(IMP,189)
      WRITE(IMP,30)VH31
189   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE VH3/1'/,132('*'))
      VGA=DIST*A1/A2
      WRITE(IMP,199)
      WRITE(IMP,30)VGA
199   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE VGA'/,132('*'))
      VGH=DIST*H1/H2
      WRITE(IMP,209)
      WRITE(IMP,30)VGH
209   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE VGH'/,132('*'))
      TVA=A1/A3
      WRITE(IMP,219)
      WRITE(IMP,30)TVA
219   FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE TVA'/,132('*'))
      TVH=H1/H3
```

```
      WRITE(IMP,229)
      WRITE(IMP,30)TVH
  229 FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE TVH'/,132('*'))
      TGA=A2/A1
      WRITE(IMP,239)
      WRITE(IMP,30)TGA
  239 FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE TGA'/,132('*'))
      TGH=H2/H1
      WRITE(IMP,249)
      WRITE(IMP,30)TGH
  249 FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE TGH'/,132('*'))
      P(1)=H1(1)
      SH(1)=(100*PAS/H1)*P(1)
      DO 250 I=2,N
      P(I)=HT(I)+P(I-1)
      P6=(100*PAS/H1)*P(I)
  250 SH(I)=P6
      WRITE(IMP,259)
      WRITE(IMP,10)(SH(I),I=1,N)
  259 FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU SH'/,132('*'))
      DO 260 I=1,N
      P7=C(I)/CMAX
  260 CR(I)=P7
      WRITE(IMP,269)
      WRITE(IMP,10)(CR(I),I=1,N)
  269 FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU CONC-REDUITES'/,132('*'))
      DO 270 J=1,M
      DO 280 I=1,N
      P8=T(I)/TC(J)
  280 TR(I)=P8
      WRITE(IMP,279)
      WRITE(IMP,10)(TR(I),I=1,N)
  279 FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU TEMPS REDUITS'/,132('*'))
  270 CONTINUE
      DO 290 J=1,M
      P9=PAS/TC(J)
  290 PASR(J)=P9
      WRITE(IMP,289)
      WRITE(IMP,10)(PASR(J),J=1,M)
  289 FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU PAS REDUITS'/,132('*'))
      R(1)=CR(1)
      DO 300 I=2,N
      R(I)=CR(I)+R(I-1)
  300 P10=R(I)
      R(1)=CR(1)
      SR(1)=(100/P10)*R(1)
      DO 320 I=2,N
      R(I)=CR(I)+R(I-1)
      P11=R(I)
      P12=100*P11/P10
  320 SR(I)=P12
```

```
      WRITE(IMP,319)
  319 FORMAT(132('*')/,10X,'TABLEAU SR'/,132('*'))
      DO 330 I=1,N
  330 WRITE(IMP,10)(SR(I),I=1,N)
      K=0
  400 K=K+1
      P15=ST(K)-50.
      IF(P15)400,400,500
  500 YT=(ST(K)-ST(K-1))/PAS
      WRITE(IMP,401)
      WRITE(IMP,30)YT
  401 FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE LA PENTE ST'/,132('*'))
      K=0
  600 K=K+1
      P16=SH(K)-50.
      IF(P16)600,600,700
  700 YH=(SH(K)-SH(K-1))/PAS
      WRITE(IMP,601)
      WRITE(IMP,30)YH
  601 FORMAT(132('*')/,10X,'VALEUR DE LA PENTE RELATIVE A SH'/,132('*'))
      K=0
  800 K=K+1
      P17=SR(K)-50.
      IF(P17)800,800,900
  900 CONTINUE
      DO 901 J=1,M
      P13=(SR(K)-SR(K-1))/PASR(J)
  901 YR(J)=P13
      WRITE(IMP,902)
      WRITE(IMP,10)(YR(J),J=1,M)
  902 FORMAT(132('*')/,10X,'VALEURS DES PENTES SR'/,132('*'))
      DO1000 J=1,M
      DO 1000 I=1,N
      P20=T(I)
      P21=TC(J)
      P23=P20/P21
 1000 TRAC(I,J)=P23
      CALL GRAPHE
      END
```

```
      SUBROUTINE GRAPHE
      DIMENSION TEXTG(20),NBUF(269)
      COMMON TRAC(200,20),CR(200),TC(20)
      LEC=105
      IMP=108
      READ(LEC,1000)I,PAPX,PAPY,ITI,TEXTG
      READ(LEC,1010)N,M
      RM=0.
      DO 10 I=1,N
      IF(CR(I).GT.RM)RM=CR(I)
   10 CONTINUE
      OUTPUT RM
      ECHX=10.
      ECHY=PAPY/RM
      OUTPUT ECHY
      CALL TBENA(NBUF,269,ITI)
      NC=1
      CALL PNUMA(0.,0.,NC,0.,0.)
      CALL ECHEL(ECHX,ECHY,0.,0.)
      DO 20 J=1,M
      CALL BSCURV(TRAC(1,J),CR,N,1,0,0.,0.,1,1,0.,0.,0.)
      CALL NUMBA(0.,0.,2,TC(J),2,.1,.1,1.,0.)
   20 CONTINUE
      CALL BSAXLL(0.,0.,2.5,0.10,0.,0.,'TEMPS',-5,0,0,1)
      DI=RM/5.
      OUTPUT DI
      CALL BSAXLL(0.,0.,1.,DI,0.,0.,'RAPPORT C/CC',-12,0,1,1)
      CALL PCARS(0.3,RM*1.05,0,TEXTG,80,.3,.5,1.,0.)
      NC=9999
      CALL PNUMA(0.,0.,NC,0.,0.)
      RETURN
 1000 FORMAT(10X,I4,F6.2,2X,F6.2,I5/20A4)
 1010 FORMAT(10X,2I3)
      END
```

Programme T E N C Y

```
C        CALCUL DES VALEURS PROPRES DU TENSEUR DES PERMEABILITES
      DIMENSION A(60),B(9),FRQ(20),FP(20),FACT(20),Y(180),R(9),W(9,20),
     1S(9),AA(6),BB(9),YY(180),TETA(6),AC(9),AR(9),RA(9),PR(9),ARR(3),
     1CC(4),PHI (6),DGRAD(20),VGRAD(20),VII(20)
     1,DU(9),FE(4),PL(9),PC(9),UU(9),CA(9)
     1,FH(4),GB(3),HH(4)
     1,FA(3),FW(3),FC(15),ED(15),FF(15),EC(5)
     1,EEF(15),EED(15)
     1,ZZ(3),VV(4)
     1,VVX(20),VVY(20),VVIT(20)
     1,VEF(20),VMAX(20),VX(20),VY(20)
      INTEGER SITUATION(8)
      LEC=105
      IMP=108
      READ(LEC,1) N,NGRAD,SITUATION
      READ(LEC,3)(EC(I),I=1,5)
      NW=N
      L=N*3
C   LECTURE DE L AZIMUT DE LA FAMILLE DE CONDUITS CYLINDRIQUES
C  EP=OUVERTURE DES CONDUITS
      READ(LEC,13)(TETA(I),I=1,N),(PHI(I),I=1,N)
C LECTURE DES PROJECTION X&Y , ANGLE ALPHA SUR CANEVAS DE WULF
      READ(LEC,3) (FRQ(NA),NA=1,N) ,(EP(NA),NA=1,N)
C  N=NOMBRE DE FAMILLES DE CONDUITS CYLINDRIQUES
C  NOMBRE MAXIMUM AUTORISE: 20 FAMILLES
C FRQ=FREQUENCE D APPARITION DES CONDUITS
C DGRAD=DIRECTION DE L/ECOULEMENT
      IF(NGRAD.EQ.0.)GO TO 31
      READ(LEC,24)(DGRAD(K),K=1,NGRAD),(VGRAD(K),K=1,NGRAD)
C VGRAD=VALEUR DU GRADIENT HYDRAULIQUE
   31 CONTINUE
      K=0
      DO 100  I=1,L,3
      K=K+1
      TETA(K)=TETA(K)*3.1416/180.
      PHI(K)=PHI(K)*3.1416/180.
      A(I)=COS(PHI(K))*COS(TETA(K))
      A(I+1)=-1*COS(PHI(K))*SIN(TETA(K))
      A(I+2)=-1*SIN(PHI(K))
  100 CONTINUE
C LE TABLEAU A CONTIENT LES COMPOSANTES X,Y,Z DE L AZIMUT DE CHAQUE FAMILL
      IC=0
      CST=2.409E+15
      DO 20 J=1,N
      EPP=EP(J)
      FACT(J)=FRQ(J)*EPP*EPP*EPP*EPP
      DO 20 K=1,3
      KK=K+(J-1)*3
      DO 20 I=1,3
      II=I+(J-1)*3
      IC=IC+1
```

```
      Y(IC)=A(II)*A(KK)
   20 CONTINUE
      M=0
      IC=0
      DO 300 K=1,N
  500 IC=IC+1
      M=M+1
      YY(M)=Y(IC)
      L=K*9
      IF(IC.EQ.L) GO TO 400
      GO TO 500
  400 CONTINUE
      M=0
      DO 300 I=1,9
      W(I,K)=YY(I)*FACT(K)
  300 CONTINUE
      DO 408 I=1,9
      S(I)=0.
      DO 40 J=1,N
   40 S(I)=S(I)+W(I,J)
      S(I)=S(I)*CST
  408 CONTINUE
      J=0
      REPEAT 50, FOR I=1,4,5,7,8,9
      J=J+1
      AA(J)=S(I)
   50 CONTINUE
      J=0
      REPEAT 51,FOR I=1,2,5
      J=J+1
      ZZ(J)=S(I)
1     CONTINUE
      CALL MSPRO(ZZ,VV,2,0,1.E-09)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,Z) SITUATION
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,26)
      WRITE(IMP,27)(FACT(K),K=1,N)
      WRITE(IMP,17)
      CALL MSPRO(AA,BB,3,0,1.E-09)
      WRITE(IMP,4)
      I=0
      REPEAT 60,FOR J=1,3,6
      I=I+1
      AA(I)=AA(J)*1.E-10
   60 CONTINUE
      WRITE(IMP,8) (AA(I),I=1,3)
      WRITE(IMP,17)
      CH=AA(1)*AA(2)*AA(3)
      CH=CH**0.3333
      WRITE(IMP,22)CH
```

```
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,5)
      J=0
      REPEAT 70,FOR I=1,4,7,2,5,8,3,6,9
      J=J+1
      DD(J)=BB(I)
   70 CONTINUE
      WRITE(IMP,9) (DD(J),J=1,9)
      WRITE(IMP,17)
      M=0
      DO 101 I=1,NW
      TETA(I)=TETA(I)*180./3.1416
      PHI(I)=PHI(I)*180./3.1416
      Z=TETA(I)
      P=PHI(I)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,14)Z,P
      P4=FACT(I)*CST*1.E-10
      DO 4000 KKKK=1,9
      M=M+1
      Y(M)=W(KKKK,I)*CST
 4000 CONTINUE
      WRITE(IMP,18)P4
      CH1=P4/CH
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,23)CH1
      IF(NGRAD.EQ.0)GOTO35
      DO 34 K=1,NGRAD
   32 XD=DGRAD(K)*3.1416/180.
      XD=COS(XD)*VGRAD(K)
      YD=-1.*SIN(XD)*VGRAD(K)
   33 CONTINUE
      VX(K)=((Y(1)*XD)+(Y(2)*YD))/1.E+10
      VY(K)=((Y(4)*XD)+(Y(5)*YD))/1.E+10
      VIT(K)=SQRT((VX(K)**2.)+(VY(K)**2.))
      VEF(K)=1.274*VIT(K)*(FP(I)**2.)/FACT(I)
      VMAX(K)=VEF(K)*2.
      VTI=VEF(K)
      VTII=VMAX(K)
      VKX=VX(K)
      VKY=VY(K)
      DG=DGRAD(K)
      VG=VGRAD(K)
      VT=VIT(K)
      WRITE(IMP,4004)VKX,VKY
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,25)DG,VG,VT
      WRITE(IMP,4001)DG,VG,VTI
      WRITE(IMP,4002)DG,VG,VTII
      WRITE(IMP,17)
   34 CONTINUE
```

```
      WRITE(IMP,25)DG,VG,VT
   35 CONTINUE
      WRITE(IMP,17)
  101 CONTINUE
      WRITE(IMP,3000)
      ZZ(1)=ZZ(1)/1.E+10
      ZZ(3)=ZZ(3)/1.E+10
      WRITE(IMP,8000)ZZ(1),ZZ(3)
      ZZ(1)=ZZ(1)/CH
      ZZ(3)=ZZ(3)/CH
      WRITE(IMP,8001)ZZ(1),ZZ(3)
      WRITE(IMP,7000)
      WRITE(IMP,8002)VV(1),VV(3),VV(2),VV(4)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1990)
      WRITE(IMP,17)
      DO 4009 KA=1,NGRAD
      XD=COS(DGRAD(KA)*3.1416/180.)
      YD=-1.*SIN(DGRAD(KA)*3.1416/180.)
      VVX(KA)=((S(1)*XD)+(S(2)*YD))/1.E+10
      VVY(KA)=((S(4)*XD)+(S(5)*YD))/1.E+10
      VVIT(KA)=SQRT((VVX(KA)**2.)+(VVY(KA)**2.))
      WRITE(IMP,4004)VVX(KA),VVY(KA)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,25)DGRAD(KA),VGRAD(KA),VVIT(KA)
      WRITE(IMP,17)
 4009 CONTINUE
      EA(3)=.147*(AA(1)+AA(2)-AA(3))
      EA(2)=.147*(AA(1)+AA(3)-AA(2))
      EA(1)=.147*(AA(3)+AA(2)-AA(1))
      IF(EA(1).LT.0.) GOTO 1112
      IF(EA(2).LT.0.) GOTO 1112
      IF(EA(3).LT.0.) GOTO1112
      GOTO 1111
 1112 WRITE(IMP,1114)
      DO 9000 J=1,15
      EF(J)=0.
      ED(J)=0.
 9000 CONTINUE
      GOTO 1001
 1111 CONTINUE
      J=0
      DO 1000 I=1,2
      J=J+1
      EW(J)=((EA(I)+EA(I+1))/((EA(1)**2.)+(EA(I+1)**2.)))**.5
 1000 CONTINUE
      EW(3)=((EA(1)+EA(3))/((EA(1)**2.)+(EA(3)**3.)))**.5
      K=0
      DO 1001 J=1,3
      DO 1001 I=1,5
      K=K+1
```

```
      EG(K)=EC(I)*EW(J)
      ED(K)=EG(K)*EA(J)
      EF(K)=1./((EG(K)**3.)*(EA(J)**2.))
1001  CONTINUE
      DO 1002 I=1,3
      EA(I)=AA(I)
      EW(I)=(3.1416/(4.*EA(I)))**.5
1002  CONTINUE
      K=0
      DO 1003 J=1,3
      DO 1003 I=1,5
      K=K+1
      EG(K)=EC(I)*EW(J)
      EED(K)=EG(K)*EA(J)
      EEF(K)=1./((EG(K)**4.)*(EA(J)**3.))
1003  CONTINUE
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1011)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1004)
      WRITE(IMP,1005)(DD(1),DD(4),DD(7))
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1008)
      WRITE(IMP,1010)(EF(I),ED(I),I=1,5)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1009)
      WRITE(IMP,1010)(EEF(I),EED(I),I=1,5)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1006)
      WRITE(IMP,1005)(DD(2),DD(5),DD(8))
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1008)
      WRITE(IMP,1010)(EF(I),ED(I),I=6,10)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1010)(EEF(I),EED(I),I=6,10)
      WRITE(IMP,1009)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1007)
      WRITE(IMP,1005)(DD(3),DD(6),DD(9))
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1008)
      WRITE(IMP,1010)(EF(I),ED(I),I=11,15)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1009)
      WRITE(IMP,1010)(EEF(I),EED(I),I=11,15)
      WRITE(IMP,17)
1004  FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*1ER VECTEUR PROPRE',47X,'*')
1005  FORMAT(1X,'*',7X,'X,Y,Z',2X,3(E11.4,10X),'*')
1006  FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*2EME VECTEUR PROPRE',46X,'*')
1007  FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*3EME VECTEUR PROPRE',46X,'*')
```

```
 1008  FORMAT(1X,'*','FREQUENCES(1/L) ET OUVERTURES(L) DES FISSURES',32X,
      1'*')
 1009  FORMAT(1X,'*','FREQUENCES(1/L*L) ET OUVERTURES(L) DES CONDUITS',30
      1X,'*')
 7000  FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*1ER VECTEUR PROPRE*2EME VECTEUR PROPRE*
      1',26X,'*')
 1011  FORMAT(1X,'*',9X,'MILIEUX EQUIVALENTS',49X,'*')
 1114  FORMAT(1X,'*',1X,'IL N/EXISTE PAS DE MILIEUX FISSURE EQUIVALENT',1
      1X,'*')
 3000  FORMAT(1X,'*','REPRESENTATION DU TENSEUR DES PERMEABILITES DANS LE
      1PLAN NORD-OUEST',11X,'*')
 1     FORMAT(1X,I2,2X,I2,8A4)
    2  FORMAT(12F6.2)
    3  FORMAT(10(F8.4))
    4  FORMAT(1X,'*','VALEURS PROPRES DU TENSEUR DE PERMEABILITE M/S',31X
      1,'*')
    5  FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*1ER VECTEUR PROPRE*2EME VECTEUR PROPRE*
      13EME VECTEUR PROPRE*',6X,'*')
    6  FORMAT(9F2.0)
    7  FORMAT(1X,'*',8A4,45X,'*',/,1X,79('*'))
    8  FORMAT(1X,'*','K1=',E11.4,1X,'*','K2=',E11.4,1X,'*','K3=',E11.4,31
      1X,'*')
 1010  FORMAT(2(1X,'*',10X,E11.4,16X,'*'))
 8001  FORMAT(1X,'*K1=',F9.4,2X,'K',4X,'K2=',F9.4,2X,'K',43X,'*')
 8000  FORMAT(1X,'*','K1=',E11.4,1X,'*','K2=',E11.4,47X,'*')
 8002  FORMAT(1X,'*',9X,'X',4X,2(E11.4,10X),21X,'*',/,1X,'*',9X,'Y',4X,2(
      1E11.4,10X),21X,'*')
    9  FORMAT(1X,'*',9X,'X',4X,3(E11.4,10X),'*',/,1X,'*',9X,'Y',4X,3(E11.
      14,10X),'*',/,1X,'*',9X,'Z',4X,3(E11.4,10X),'*')
 26    FORMAT(1X,'*','PRODUIT DE LA FREQUENCE PAR L EPAISSEURELEVEE A LA
      1PUISSANCE 4',15X,'*')
   27  FORMAT(1X,'*',6(E11.4,1X),5X,'*')
   13  FORMAT(12F5.1)
 14    FORMAT(1X,'*','VALEUR DE LA PERMEABILITE DU CONDUIT CYLINDRIQUE D
      1AZIMUT',2X,F5.1,2X,F5.1,6X,'*')
 4004  FORMAT(1X,'*','DIRECTION VITESSE','X=',E11.4,1X,'Y=',E11.4,22X,'*'
      1)
 1990  FORMAT(1X,'*','VITESSE MOYENNE RESULTANTE',51X,'*')
 25    FORMAT(1X,'*','GRADIENT HYDRAULIQUE N',F5.1,1X,'VALEUR',F8.4
      1,'DONNE UNE VITESSE MOY',1X,E9.3,'M/S*')
 4001  FORMAT(1X,'*','GRADIENT HYDRAULIQUE N',F5.1,1X,'VALEUR',F8.4
      1,'DONNE UNE VITESSE EFF',1X,E9.3,'M/S*')
 4002  FORMAT(1X,'*','GRADIENT HYDRAULIQUE N',F5.1,1X,'VALEUR',F8.4
      1,'DONNE UNE VITESSE MAX',1X,E9.3,'M/S*')
   17  FORMAT(1X,79('*'))
 18    FORMAT(1X,'*','K1=',E11.4,63X,'*')
   22  FORMAT(1X,'*VALEUR GLOBALE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE K=',3X,E
      111.4,15X,'*')
 23    FORMAT(1X,'*K1=',F9.4,'K',64X,'*')
   24  FORMAT(8(F9.5))
       END
```

Programme T E N F Y

```
C          CALCUL DES VALEURS PROPRES DU TENSEUR DES PERMEABILTIES
      DIMENSION A(18),B(9),FRQ(6),EP(6),FACT(6),Y(54),R(9),W(9,6),S(9),A
     1A(6),RB(9),YY(54),TETA(6),AC(9),AR(9),RA(9),RP(9),APR(3),CC(4),PHI
     2(6),DGRAD(20),VGRAD(20),VIT(20),GAM(6),AZ(6)
     1,DD(9),FE(4),RB(9),PC(9),OU(9),DA(9)
     1,FA(3),FV(3),FG(15),EP(15),FF(15),EC(5)
     1,FEF(15),FEP(15)
     1,ZZ(3),VV(4)
     1,VX(20),VY(20),VMAX(20),VFF(20),VVIT(20),VVX(20),VVY(20)
     1,VTPF(20,18),VTRNP(20,18),VLNP(20,18),VTL(20)
     1,ZU(9)
      INTEGER SITUATION(8)
      LEC=105
      IMP=108
      READ(LEC,1) N,NGRAD,SITUATION
      READ(LEC,3)(EC(I),I=1,5)
      M=N
      L=N*3
C LECTURE DE LA DIRECTION ET DU PENDAGE DE LA FAMILLE DE FRACTURE
C TETA.DIRECTION DE LA COUCHE PAR RAPPORT AU NORD
C PHI.PENDAGE DE LA COUCHE EN DEGRES
      READ(LEC,13)(TETA(I),I=1,N),(PHI(I),I=1,N),(AZ(I),I=1,N)
C LECTURE DES PROJECTION X&Y , ANGLE ALPHA SUR CANEVAS DE WULF
      DATA(B(IB),IB=1,9)/1.,0.,0.,0.,1.,0.,0.,0.,1./
      DATA(PR(IK),IK=1,8)/.001,.010,.033,.1,.2,.3,.4,.5/
C LECTURE DE LA MATRICE IDENTITE
      READ(LEC,3) (FRQ(MA),MA=1,N) ,(EP(MA),MA=1,N)
C N=NOMBRE DE FAMILLES DE FRACTURES CONDUCTRICES
C NOMBRE MAXIMUM AUTORISE:6 FAMILLES
C FRQ=FREQUENCE D/APPARITION DES FRACTURES
C EP=EPAISSEUR DES FRACTURES
C DGRAD=DIRECTION DE L/ECOULEMENT
C VGRAD=VALEUR DU GRADIENT HYDRAULIQUE
      IF(NGRAD.EQ.0.)GO TO 31
      READ(LEC,24)(DGRAD(K),K=1,NGRAD),(VGRAD(K),K=1,NGRAD)
   31 CONTINUE
      K=0
      DO 100 I=1,L,3
      K=K+1
      GAM(K)=(3.1416/2.)-(PHI(K)*3.1416/180.)
      AZ(K)=AZ(K)*3.1416/180.
      A(I)=COS(GAM(K))*COS(AZ(K))
      A(I+1)=-1*COS(GAM(K))*SIN(AZ(K))
      A(I+2)=-1*SIN(GAM(K))
100   CONTINUE
C LE TABLEAU A CONTIENT LES COMPOSANTES X,Y,Z DE LA NORMALE DE CHAQUE FAMI
C SUCCESSIVE
      IC=0
      DO 20 J=1,N
      EPP=EP(J)
      FACT(J)=FRQ(J)*EPP*EPP*EPP
```

```
      DO 20 K=1,3
      KK=K+(J-1)*3
      DO 20 I=1,3
      II=I+(J-1)*3
      IC=IC+1
      Y(IC)=A(II)*A(KK)
   20 CONTINUE
      M=0
      IC=0
      DO 300 K=1,N
  500 IC=IC+1
      M=M+1
      YY(M)=Y(IC)
      L=K*9
      IF(IC.EQ.L) GO TO 400
      GO TO 500
  400 CONTINUE
      CALL MRDIF(B,YY,N,3,3)
      M=0
      DO 300 I=1,9
      W(I,K)=B(I)*FACT(K)
  300 CONTINUE
C SOMME DES MATRICES DE CHAQUE NORMALE APRES CORRECTION
      CSI=6.175E+10
      DO 408 I=1,9
      S(I)=0.
      DO 40 J=1,N
   40 S(I)=S(I)+W(I,J)
      S(I)=S(I)*CSI
  408 CONTINUE
      J=0
      REPEAT 50,FOR I=1,4,5,7,8,9
      J=J+1
      AA(J)=S(I)
   50 CONTINUE
      J=0
      REPEAT 51,FOR I=1,2,5
      J=J+1
      ZZ(J)=S(I)
   51 CONTINUE
      CALL MSPRO(ZZ,VV,2,0,1.E-06)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,7) SITUATION
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,2400)
      WRITE(IMP,2500)(FACT(K),K=1,N)
      WRITE(IMP,17)
      CALL MSPRO(AA,BB,3,0,1.E-06)
      WRITE(IMP,4)
      I=0
      REPEAT 60,FOR J=1,3,6
```

```
      I=I+1
      AA(I)=AA(J)/1.E+05
   60 CONTINUE
      WRITE(IMP,8) (AA(I),I=1,3)
      WRITE(IMP,17)
      CH=AA(1)*AA(2)*AA(3)
      CH=CH**0.3333
      WRITE(IMP,22)CH
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,5)
      J=0
      REPEAT 70,FOR I=1,4,7,2,5,8,3,6,9
      J=J+1
      DD(J)=BB(I)
   70 CONTINUE
      WRITE(IMP,9) (DD(J),J=1,9)
      WRITE(IMP,17)
      DO 9050 I=1,N
      M=0
      WRITE(IMP,17)
      Z=AZ(I)*180./3.1416
      P=PHI(I)
      WRITE(IMP,16)I,Z,P
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      DO 9051 KKKK=1,9
      M=M+1
      Y(M)=W(KKKK,I)*CST
 9051 CONTINUE
      J=0
      REPEAT 9052,FOR KK=1,2,5
      J=J+1
      A(J)=Y(KK)
 9052 CONTINUE
      CALL MSPRO(A,BB,2,0,1.E-06)
      A(1)=A(1)/1.E+05
      A(3)=A(3)/1.E+05
      WRITE(IMP,9053)
      WRITE(IMP,18)A(1),A(3)
      A(1)=A(1)/CH
      A(3)=A(3)/CH
      WRITE(IMP,23)A(1),A(3)
      WRITE(IMP,21)
      WRITE(IMP,19)BB(1),BB(3),BB(2),BB(4)
      WRITE(IMP,17)
      TETA(I)=TETA(I)*3.1416/180.
      PHI(I)=PHI(I)  *3.1416/180.
      AC(1)=COS(TETA(I))
      AC(2)=     SIN(TETA(I))*COS(PHI(I))
      AC(3)=SIN(TETA(I))*SIN(PHI(I))
      AC(4)=-1*SIN(TETA(I))
```

```
      AC(5)=COS(TETA(I))*COS(PHI(I))
      AC(6)=     SIN(PHI(I))*COS(TETA(I))
      AC(7)=0.
      AC(8)=-1*SIN(PHI(I))
      AC(9)=-1*COS(PHI(I))
      CALL MRTRA(AC,RA,3,3)
      CALL MRMUL(RA,Y,RB,3,3,3)
      WRITE(IMP,9054)
      KKK=0
      GOTO 9055
9056  CALL MRMUL(RA,S,RB,3,3,3)
      KKK=1
      WRITE(IMP,9057)
9055  CALL MRMUL(RB,AC,ZO,3,3,3)
      REPEAT 80,FOR M=3,6,7,8,9
      ZO(M)=0.
80    CONTINUE
      IF(KKK.EQ.1) GOTO 2909
      IF (NGRAD.EQ.0.) GOTO 34
      DO 34 K=1,NGRAD
      XD=DGRAD(K)*3.1416/180.
      XD=COS(XD)*VGRAD(K)
      YD=-1.*SIN(XD)*VGRAD(K)
33    CONTINUE
      VX(K)=((Y(1)*XD)+(Y(2)*YD))/1.E+05
      VY(K)=((Y(4)*XD)+(Y(5)*YD))/1.E+05
      VIT(K)=SQRT((VX(K)**2.)+(VY(K)**2.))
      VEF(K)=VIT(K)*(FP(1)**2.)/FACT(I)
      VMAX(K)=VEF(K)*1.5
      VTL(K)=(VIT(K)**.57)*.0524/(FACT(I)**.213)
      DO 2007  KN=1,8
      VLNP(K,KN)=VIT(K)/(1.+(8.8*(RR(KN)**1.5)))
      VTRNP(K,KN)=.0138*ALOG(1.9/RR(KN))*(VIT(K)**.5)/(FP(1)**.5)
      VTRP (K,KN)=.0138*ALOG(3.7/RR(KN))*(VIT(K)**.5)/(FP(1)**.5)
2007  CONTINUE
1999  CONTINUE
      IF(I.GT.1) GOTO 34
      VVX(K)=((S(1)*XD)+(S(2)*YD))/1.E+05
      VVY(K)=((S(4)*XD)+(S(5)*YD))/1.E+05
      VVIT(K)=SQRT((VVX(K)**2.)+(VVY(K)**2.))
2000  CONTINUE
   34 CONTINUE
      J=0
2909  CONTINUE
      REPEAT 86,FOR N=1,2,5
      J=J+1
      ARR(J)=ZO(N)
86    CONTINUE
      CALL MSPRO(ARR,CC,2,0,1.E-06)
      N=0
      REPEAT 90,FOR J=1,3
```

```
      M=M+1
      APR(M)=ARP(J)/1.E+05
   90 CONTINUE
      WRITE(IMP,18)(APR(M),M=1,2)
      CH1=APR(1)/CH
      CH2=APR(2)/CH
      WRITE(IMP,23)CH1,CH2
      WRITE(IMP,21)
      J=0
      REPEAT 91,FOR M=1,3,2,4
      J=J+1
      FE(J)=CC(M)
   91 CONTINUE
      WRITE(IMP,19) (FE(J),J=1,4)
      WRITE(IMP,17)
      IF(KKK.EQ.1) GOTO 9050
      IF (NGRAD.EQ.0.) GOTO 35
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1994)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      DO 35 K=1,NGRAD
      WRITE(IMP,17)
      DG=DGRAD(K)
      VG=VGRAD(K)
      VT=VIT(K)
      VTT=VEE(K)
      VTTT=VMAX(K)
      VKX=VX(K)
      VKY=VY(K)
      WRITE(IMP,1993) VKX,VKY
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,25) DG,VG,VT
      WRITE(IMP,26)DG,VG,VTT
      WRITE(IMP,27)DG,VG,VTTT
35    CONTINUE
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1995)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      DO 2015 K=1,NGRAD
      WRITE(IMP,17)
      VKX=VY(K)
      VKY=VY(K)
      DG=DGRAD(K)
```

```
      VG=VGRAD(K)
      VTH=VTL(K)
      WRITE(IMP,1993) VKX,VKY
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,2221)DG,VG,VTH
 2015 CONTINUE
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1996)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      DO 2016 K=1,NGRAD
      WRITE(IMP,17)
      DG=DGRAD(K)
      VG=VGRAD(K)
      VKX=VX(K)
      VKY=VY(K)
      WRITE(IMP,1993)VKX,VKY
      WRITE(IMP,17)
      DO 2017 KN=1,8
      RRT=RR(KN)
      VLNT=VLNR(K,KN)
      WRITE(IMP,2220) DG,VG,RRT,VLNT
 2017 CONTINUE
 2016 CONTINUE
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1997)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      DO 2016 K=1,NGRAD
      WRITE(IMP,17)
      DG=DGRAD(K)
      VG=VGRAD(K)
      VKX=VX(K)
      VKY=VY(K)
      WRITE(IMP,1993)VKX,VKY
      WRITE(IMP,17)
      DO 2019 KN=1,8
      RRT=RR(KN)
      VTRN=VTRNR(K,KN)
      WRITE(IMP,2220)DG,VG,RRT,VTRN
 2019 CONTINUE
 2018 CONTINUE
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
```

```
      WRITE(IMP,1998)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      DO 2020 K=1,NGRAD
      WRITE(IMP,17)
      DG=DGRAD(K)
      VG=VGRAD(K)
      VKX=VX(K)
      VKY=VY(K)
      WRITE(IMP,1993) VKX,VKY
      WRITE(IMP,17)
      DO2021 KN=1,8
      RRT=RR(KN)
      VTR=VTRR(K,KN)
      WRITE(IMP,2220)DG,VG,RRT,VTR
 2021 CONTINUE
 2020 CONTINUE
      IF(KNK.EQ.0) GOTO 9056
 9050 CONTINUE
      WRITE(IMP,3000)
      ZZ(1)=ZZ(1)/1.E+05
      ZZ(3)=ZZ(3)/1.E+05
      WRITE(IMP,18)ZZ(1),ZZ(3)
      ZZ(1)=ZZ(1)/CH
      ZZ(3)=ZZ(3)/CH
      WRITE(IMP,23)ZZ(1),ZZ(3)
      WRITE(IMP,21)
      WRITE(IMP,19)VV(1),VV(3),VV(2),VV(4)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1990)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      DO 1991 K=1,NGRAD
      DG=DGRAD(K)
      VG=VGRAD(K)
      VKKX=VVX(K)
      VKKY=VVY(K)
      VTV=VVIT(K)
      WRITE(IMP,1993) VKKX,VKKY
      WRITE(IMP,25)DG,VG,VTV
 1991 CONTINUE
      EA(3)=(AA(1)+AA(2)-AA(3))/2.
      EA(2)=(AA(1)+AA(3)-AA(2))/2.
      EA(1)=(AA(3)+AA(2)-AA(1))/2.
      DO 1111 I=1,3
      IF(EA(1).LT.0.) GOTO 1112
      IF(EA(2).LT.0.) GOTO1112
```

```
      IF(EA(3).LT.0.) GOTO1112
      GOTO1111
 1112 WRITE(IMP,1114)
      DO 9000 J=1,15
      ED(J)=0.
      EF(J)=0.
 9000 CONTINUE
      GOTO 1001
 1111 CONTINUE
      J=0
      DO 1000 I=1,2
      J=J+1
      EW(J)=((EA(I)+EA(I+1))/((EA(I)**2.)+(EA(I+1)**2.)))**.5
 1000 CONTINUE
      EW(3)=((EA(1)+EA(3))/((EA(1)**2.)+(EA(3)**3.)))**.5
      K=0
      DO 1001 J=1,3
      DO 1001 I=1,5
      K=K+1
      EG(K)=EC(I)*EW(J)
      ED(K)=EG(K)*EA(J)
      EF(K)=1./((EG(K)**3.)*(EA(J)**2.))
 1001 CONTINUE
      DO 1002 I=1,3
      EA(I)=AA(I)*10.60/3.1416
      EW(I)=(3.1416/(4.*EA(I)))**.5
 1002 CONTINUE
      K=0
      DO 1003 J=1,3
      DO 1003 I=1,5
      K=K+1
      EG(K)=EC(I)*EW(J)
      EFD(K)=EG(K)*EA(J)
      EFF(K)=1./((EG(K)**4.)*(EA(J)**3.))
 1003 CONTINUE
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1011)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1004)
      WRITE(IMP,1005)(ED(1),ED(4),ED(7))
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1008)
      WRITE(IMP,1010)(EF(I),ED(I),I=1,5)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1009)
      WRITE(IMP,1010)(EFF(I),EFD(I),I=1,5)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1006)
      WRITE(IMP,1005)(ED(2),ED(5),ED(8))
      WRITE(IMP,17)
```

```
      WRITE(IMP,1008)
      WRITE(IMP,1010)(EF(I),ED(I),I=6,10)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1009)
      WRITE(IMP,1010)(EEF(I),EED(I),I=6,10)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1007)
      WRITE(IMP,1005)(DD(3),DD(6),DD(9))
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1008)
      WRITE(IMP,1010)(EF(I),ED(I),I=11,15)
      WRITE(IMP,17)
      WRITE(IMP,1009)
      WRITE(IMP,1010)(EEF(I),EED(I),I=11,15)
      WRITE(IMP,17)
 1993 FORMAT(1X,'*','DIRECITON VITESSE','X=',E11.4,1X,'Y=',E11.4,22X,'*
     1')
 1994 FORMAT(1X,'*','REGIME LAMINAIRE PARALLELE',51X,'*')
 1995 FORMAT(1X,'*','REGIME TURBULENT HYDRAULIQUEMENT LISSE',39X,'*')
 1996 FORMAT(1X,'*','REGIME LAMINAIRE NON PARALLELE',47X,'*')
 1997 FORMAT(1X,'*','REGIME TURBULENT,RUGUEUX,NON PARALLELE',39X,'*')
 1998 FORMAT(1X,'*','REGIME TURBULENT,RUGUEUX,PARALLELE',43X,'*')
 1990 FORMAT(1X,'*','VITESSE MOYENNE RESULTANTE EN REGIME LAMINAIRE PARA
     1LLELE',21X,'*')
 25   FORMAT(1X,'*','GRADIENT HYDRAULIQUE N',F5.1,1X,'VALEUR',F8.4,'DONN
     1E UNE VITESSE MOY',1X,E9.3,'M/S*')
 26   FORMAT(1X,'*','GRADIENT HYDRAULIQUE N',F5.1,1X,'VALEUR',F8.4,'DONN
     1E UNE VITESSE EFF',1X,E9.3,'M/S*')
 27   FORMAT(1X,'*','GRADIENT HYDRAULIQUE N',F5.1,1X,'VALEUR',F8.4,'DONN
     1E UNE VITESSE MAX',1X,E9.3,'M/S*')
 2220 FORMAT(1X,'*','GRADIENT N',F5.1,1X,'VALEUR',F8.4,1X,'RUGOSITE RELA
     1TIVE',F5.3,1X,'V=',E9.3,1X,'M/S',8X,'*')
 2221 FORMAT(1X,'*','GRADIENT HYDRAULIQUE N',F5.1,1X,'VALEUR',F9.5,'DONN
     1E UNE VITESSE DE',1X,E9.3,'M/S*')
 9053 FORMAT(1X,'*','REPRESENTATION DU TENSEUR ELEMENTAIRE DANS LE PLAN
     1NORD-OUEST',16X,'*')
 9054 FORMAT(1X,'*','REPRESENTATION DU TENSEUR ELEMENTAIRE DANS LE PLAN
     1DE FRACTURE',15X,'*')
 9057 FORMAT(1X,'*','REPRESENTATION DU TENSEUR GLOBAL DANS LE PLAN DE FR
     1ACTURE',20X,'*')
 3000 FORMAT(1X,'*','REPRESENTATION DU TENSEUR GLOBAL DANS LE PLAN NORD-
     1OUEST',22X,'*')
 1004 FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*1ER VECTEUR PROPRE',47X,'*')
 1005 FORMAT(1X,'*',7X,'X,Y,Z',2X,3(E11.4,10X),'*')
 1006 FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*2EME VECTEUR PROPRE',46X,'*')
 1007 FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*3EME VECTEUR PROPRE',46X,'*')
 1008 FORMAT(1X,'*','FREQUENCES(1/L) ET OUVERTURES(L) DES FISSURES',32X,
     1'*')
 1010 FORMAT(2(1X,'*',10X,E11.4,16X,'*'))
 1009 FORMAT(1X,'*','FREQUENCES(1/L*L) ET OUVERTURES(L) DES CONDUITS',30
     1X,'*')
```

```
1011  FORMAT(1X,'*',9X,'MILIEUX EQUIVALENTS',49X,'*')
1114  FORMAT(1X,'*',1X,'IL N/EXISTE PAS DE MILIEUX FISSURE EQUIVALENT',
     1X,'*')
    1 FORMAT(2X,I2,2X,I2,8A4)
    2 FORMAT(12F6.2)
    3 FORMAT(10(F8.4))
    4 FORMAT(1X,'*','VALEURS PROPPES DU TENSEUR DE PERMEABILITE M/S',31
     1,'*')
    5 FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*1ER VECTEUR PROPRE*2EME VECTEUR PROPRE
     13EME VECTEUR PROPRE*',6X,'*')
    6 FORMAT(9F2.0)
    7 FORMAT(1X,'*',8A4,45X,'*',/,1X,79('*'))
    8 FORMAT(1X,'*','K1=',E11.4,1X,'*','K2=',E11.4,1X,'*','K3=',E11.4,3
     1X,'*')
    9 FORMAT(1X,'*',9X,'X',4X,3(E11.4,10X),'*',/,1X,'*',9X,'Y',4X,3(E11.
     14,10X),'*',/,1X,'*',9X,'Z',4X,3(E11.4,10X),'*')
2400  FORMAT(1X,'*','PRODUIT DE LA FREQUENCE PAR LE CUBE DE L/EPAISSEUR
     1',27X,'*')
2500  FORMAT(1X,'*',6(E11.4,1X),5X,'*')
   13 FORMAT(12F5.1)
   14 FORMAT(1X,'*','VALEURS PROPPES APRES ROTATION DANS LA FAMILLE DE F
     1RACTURE',19X,'*')
   15 FORMAT(1X,'*','VECTEURS PROPRES APRES ROTATION DANS LE PLAN DE LA
     1FAMILLE DE FRACTURE',7X,'*')
16     FORMAT(1X,'*','FAMILLE NUMERO',2X,I1,5X,'D/AZIMUT',11X,F5.1,2X,'E1
     1 DE PENDAGE',2X,F5.1,9X,'*')
   17 FORMAT(1X,79('*'))
   18 FORMAT(1X,'*','K1=',E11.4,1X,'*','K2=',E11.4,47X,'*')
   19 FORMAT(1X,'*',9X,'X',4X,2(E11.4,10X),21X,'*',/,1X,'*',9X,'Y',4X,2(
     1E11.4,10X),21X,'*')
   21 FORMAT(1X,'*','COMPOSANTES*1ER VECTEUR PROPRE*2EME VECTEUR PROPRE*
     1',26X,'*')
   22 FORMAT(1X,'*VALEUR GLOBALE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE K=',3X,E
     111.4,15X,'*')
   23 FORMAT(1X,'*K1=',E9.4,2X,'K',4X,'K2=',E9.4,2X,'K',43X,'*')
   24 FORMAT(8(F9.5))
      END
```