



structure et hydrodynamique des milieux fissurés aquifères

synthèse bibliographique



structure et hydrodynamique des milieux fissurés aquifères

synthèse bibliographique

Ph. Leblanc

février 1986
86 SGN 102 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département Eau
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - Tél.: (33) 38.64.34.34

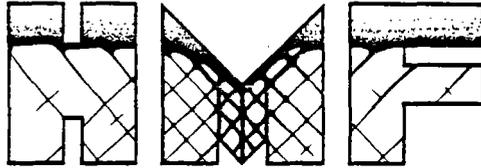
SOMMAIRE

	Pages
THEME 1 - MILIEU FISSURE	
- Connaissances sur la structure du milieu	
- Influence de la structure sur le comportement hydrodynamique du milieu	
INTRODUCTION	3
I - DEFINITIONS	3
I.1 - Milieu fissuré	3
I.2 - Fracturation	3
I.3 - Fracture	4
II - ORIGINE DE LA FRACTURATION	4
III - CARACTERISTIQUES ET PARAMETRES DE LA FRACTURATION	4
III.1 - Localisation et orientation	4
III.2 - Familles de fractures	5
III.3 - Extension, continuité des fractures	5
III.4 - Degré d'interconnexion	6
III.5 - Chronologie relative d'apparition	6
III.6 - Rejeux successifs	6
III.7 - Espacement des fractures	6
III.8 - Fréquence et densité de fracturation	6
III.9 - Dimensions des fractures - longueur de trace	7
III.10 - Influence de la profondeur	7
III.11 - Ouverture apparente de la fracture	7
III.12 - Rugosité apparente	7
III.13 - Volume de la fracture	7
III.14 - Nature des matériaux de remplissage	7
III.15 - Degré de séparation	8
III.16 - Relations mutuelles de différents paramètres caractérisant les fractures	8
III.17 - Influence de la distribution des contraintes	8
III.18 - Ouverture hydraulique équivalente	8

	Pages
IV - ETUDE DE LA FRACTURATION : CARACTERISATION DES CHAMPS DE FRACTURES. METHODES ET RESULTATS	9
IV.1 - Méthodes	9
IV.1.1 - Bases théoriques de la géostatistique	9
IV.1.2 - Etudes statistiques de répartition spatiale	9
IV.1.3 - Etapes de la méthode informatique d'étude des champs de fractures	10
IV.2 - Résultats obtenus	10
IV.2.1 - Longueur des fractures	10
IV.2.2 - Espacement	10
IV.2.3 - Comparaison de la fréquence de densité des grandes fractures par rapport à celle des petites fractures	11
IV.2.4 - Ouvertures des fractures	11
IV.3 - Conclusion : Définition mathématique de la fracturation	12
IV.3.1 - Phénomène déterministe	12
IV.3.2 - Phénomène aléatoire	12
IV.3.3 - Phénomène régionalisé	12
V - INFLUENCE DE LA STRUCTURE SUR LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DU MILIEU	12
V.1 - Lois d'écoulement en milieu fissuré	12
V.2 - Ecoulement dans un système de fractures : le milieu poreux équivalent	13
V.2.1 - Concept du milieu poreux équivalent	13
V.2.2 - Détermination de la forme et de l'orientation du tenseur de perméabilité d'un milieu rocheux fracturé à partir des données de l'analyse de la fracturation	15
V.3 - Facteurs influençant la valeur de la conductivité hydraulique	17
V.3.1 - Influence de la profondeur et des contraintes	17
V.3.2 - Influence prépondérante des grands accidents sur la valeur de la perméabilité	19
V.3.3 - Influence de l'échantillonnage sur le calcul de perméabilité	19

	Pages
V.4 - Mesures in situ de la perméabilité	19
V.4.1 - Mesure de perméabilité en sondage par injections entre sondages	20
V.4.2 - Essais entre sondages	20
V.4.3 - Essais en galeries	20
 BIBLIOGRAPHIE	 21
 THEME 2 : INTERPRETATION DES POMPAGES D'ESSAI EN MILIEU FISSURE	 33
 I - GENERALITES	 35
 II - FORME DES COURBES DE RABATTEMENT	 35
 III - LE MILIEU FISSURE EST CONSIDERE COMME UN SYSTEME A DOUBLE POROSITE : LE MODELE DE Warren & Root , SES DERIVES	 39
III.1 - La théorie du milieu à double porosité	39
III.2 - Le modèle de continuité de Barenblatt et al. (1960)	39
III.3 - Le modèle de Warren & Root (1963)	41
III.4 - Le modèle de Odeh (1965)	45
III.5 - Le modèle de Kazemi (1969)	45
III.6 - Le modèle de Boulton-Streltsova (1977-78)	45
 IV - LE MILIEU FISSURE EST CONSIDERE COMME UN MILIEU POREUX HOMOGENE ANISOTROPE	 54
IV.1 - Méthode de Papadopoulos (1965)	54
IV.2 - Interprétation d'un pompage d'essai en milieu anisotrope en utilisant plus de trois piézomètres - Thiery (1980)	56
 V - LE MILIEU FISSURE EST CONSIDERE COMME UN MILIEU ISOTROPE AFFECTE D'UNE FISSURE UNIQUE	 56
V.1 - Modèle à fracture verticale unique - Gringarten et al. (1974)	57

	Pages
V.2 - Modèle à fissure horizontale unique - Gringarten & Ramey (1974)	68
V.3 - Modèle à fissure oblique. Cinco et al. (1975)	69
VI - ARTICLES TRAITANT PLUS PARTICULIEREMENT DE LA SIMULATION NUMERIQUE DE L'EXPLOITATION DES RESERVOIRS FISSURES	72
VI.1 - Kiraly (1971)	72
VI.2 - Narasimhan (1982)	73
VII - UN EXEMPLE D'EFFETS DE POMPAGE DANS UN TERRAIN GRANITIQUE FRACTURE. Kohut et al. (1983)	75
VII.1 - Pompage en site A	76
VII.2 - Pompage en site B	77
BIBLIOGRAPHIE	79
THEME 3 : METHODOLOGIE DE PROSPECTION DES EAUX SOUTERRAINES ET D'IMPLANTATION DES FORAGES EN MILIEU FISSURE	91
I - ORIENTATION DE LA RECHERCHE	92
II - METHODOLOGIE	92
II.1 - Etude documentaire	92
II.2 - Etude des photographies aériennes	92
II.3 - Etude géophysique	92
II.4 - Implantation des forages de reconnaissance et d'exploitation	92
BIBLIOGRAPHIE	93
BIBLIOGRAPHIE : OUVRAGES GENERAUX	97



AVANT-PROPOS

L'hydrogéologie des milieux discontinus, sous son aspect quantitatif, fait appel aux principaux thèmes suivants :

- la prospection,
- l'équipement et la mesure,
- l'interprétation des mesures et la définition des périmètres hydrodynamiques,
- la structure des milieux et sa représentation,
- les comportements d'ensemble et leur simulation.

Les sujets qui sont actuellement abordés par le programme HMF au département de l'Eau, soit par leur aspect méthodologique, soit par leur aspect expérimental sur des sites réels, relèvent de ces différents thèmes et principalement des points 1, 3 et 5 pour l'exercice 1986.

L'état de l'art sur ces trois thèmes fait, ici, l'objet d'une liste de références bibliographiques, complétée par une synthèse des principales notions et méthodes d'études. Un accent particulier a été mis sur l'exposé des méthodes d'interprétation des pompages d'essai en milieux fissurés, objet actuellement d'une thèse par l'auteur, au département Eau.

On observera que la grande diversité des méthodes d'études et des concepts de discontinuités en hydrogéologie du socle est le reflet d'une réalité : il n'existe pas un type de milieu mais des types très divers et les techniques appropriées pour les étudier et les exploiter sont le plus souvent très spécifiques.

**LEXIQUE ANGLAIS-FRANCAIS DES MOTS ET DES EXPRESSIONS
MENTIONNES SUR LES FIGURES**

	Pages
Analytical solution	74
Axis of symmetry	73
Depletion of fracture storage	37
Drawdown	38
Effect of fault	38
Effect of stream	38
Elevation of water level contour (non pumping)	76
Equipotential line	59
Extended well	59
Flow line	59
Free water surface	52
gpm	37
Major zone of pumping influence	77
Porous block	46
Pumping test	37
Pumped well	74
Removal of fracture filling	37
Stream	74
Time	74
Type curve	74
Well bore	74

THEME 1

MILIEU FISSURE

- **Connaissances sur la structure du milieu**
- **Influence de la structure sur le comportement hydrodynamique du milieu**

INTRODUCTION

La structure géométrique des aquifères en roches fissurées s'édifie à la faveur de la fracturation ; fracturation visible en surface et géométrie de ce type d'aquifère présentent de ce fait une étroite relation.

C'est pourquoi l'analyse de la fracturation est devenue un élément majeur de l'étude hydrogéologique de ces milieux.

I - DEFINITIONS

I.1 - MILIEU FISSURE (Feuga - Vaubourg, 1980)

En hydraulique souterraine, on parle en général de milieu fissuré par opposition au milieu poreux, le caractère discontinu du premier s'opposant au caractère continu du second.

Cependant, cette distinction n'est pas aussi nette : les milieux poreux de l'hydrogéologie sont en fait presque toujours discontinus puisque constitués de grains séparés les uns des autres, tandis que l'on peut trouver des roches intensément fracturées dont la maille de fracturation soit de l'ordre de grandeur de la dimension de gros graviers alluvionnaires et assimilables de ce fait à un milieu poreux.

En fait, on considèrera le milieu comme poreux (ou continu) si, dans la schématisation (modèle) adoptée, on ne distingue pas, dans l'écoulement du fluide traversant le milieu, de cheminements individuels bien localisés. Au contraire, le milieu sera considéré comme fissuré si on peut localiser des **surfaces de cheminement bien délimitées et immuables : les fissures.**

Ce qui ressort de fondamental de cette définition, c'est que la **distinction entre milieu poreux et milieu fissuré dépend en fait de l'échelle des phénomènes étudiés.**

I.2 - FRACTURATION

Réponse du milieu rocheux, sous la forme de discontinuités, à des champs de contraintes qui se sont manifestés ou se manifestent encore dans la roche.

I.3 - FRACTURE (Bles - Feuga, 1980)

Discontinuité d'origine mécanique et tectonique apparaissant dans les niveaux structuraux supérieurs de l'écorce terrestre.

Différents types de fractures :

- diaclases
- joints
- fentes et fractures d'extension
- failles
- joints stylolitiques.

II - ORIGINE DE LA FRACTURATION

L'origine de la fracturation dans le socle se trouve :

- d'une part dans le refroidissement des magmas granitiques lors de leur mise en place ; à ce stade apparaissent les fractures précoces ou primaires
- d'autre part dans l'existence de phénomènes tectoniques qui se sont produits après la mise en place et le refroidissement des magmas ; ce sont des manifestations tardives.

III - CARACTERISTIQUES ET PARAMETRES DES FRACTURES

Sont assemblés ici tant les caractéristiques descriptives, géométriques que les paramètres liés à la fracturation et pouvant influencer le comportement hydrodynamique du milieu.

III.1 - LOCALISATION (SITUATION GEOGRAPHIQUE) ET ORIENTATION (DIRECTION ET PENDAGE)

Carlsson - Olsson (1980)

Key (1982) : permettent de déterminer la profondeur d'intersection des fractures.

Feuga (1983 et 1984) : les orientations se regroupent généralement autour de quelques directions privilégiées de plans.

III.2 - FAMILLES DE FRACTURES

Long et al. (1982)

Bles - Dutartre - Gros (1982) : les familles de fractures regroupent des fractures de **direction, de sens et de mouvements identiques.**

Carlsson - Olsson (1980) : l'existence de différents familles de fractures entraîne une anisotropie de la masse rocheuse et des interconnexions entre fractures.

La "famille" est également une notion de statistique. L'étude statistique des fractures nécessite la création de populations. A cet effet, Razack (1980) caractérise une famille de fractures par :

Une intensité de la fracturation

- . en nombre de fractures
- . en longueur cumulée de fractures.

Une longueur moyenne de fracture

Une distance interfracturale.

III.3 - EXTENSION, CONTINUITÉ DES FRACTURES

Feuga (1983) : l'extension d'une fracture est caractérisée par une **longueur** (en deux dimensions) ou par une **surface** (en trois dimensions).

Long et al. (1982) : sur le terrain, il est démontré que les fractures ont toujours une extension finie. **Une fracture ne peut donc participer à la perméabilité du massif que si elle recoupe d'autres fractures conductrices, ce qui implique que l'écoulement dans chaque fracture n'est pas indépendant de l'écoulement dans les autres fractures du milieu : la perméabilité d'un réseau n'est donc pas simplement la somme des perméabilité de chaque fracture.**

III.4 - DEGRE D'INTERCONNEXION

Feuga (1983) : cette notion dépend de l'extension des fractures et de la densité de fracturation.

III.5 - CHRONOLOGIE RELATIVE D'APPARITION

Bles - Dutartre - Gros (1982)

III.6 - REJEUX SUCCESSIFS

Brière et Razack (1982) : permettent le maintien de fractures actives hydrauliquement, implique également que les roches les plus fracturées ne sont pas toujours les plus perméables.

III.7 - ESPACEMENT DES FRACTURES

Long et al. (1982)

Carlsson - Olsson (1980)

III.8 - FREQUENCE ET DENSITE DE FRACTURATION

Feuga (1984) :

- **Densité**

- . en une dimension, c'est le nombre de fractures par unité de longueur (équivalent à la fréquence pour une famille donnée)
- . en deux dimensions, c'est la longueur cumulée de fractures par unité de surface
- . en trois dimensions, c'est la surface cumulée par unité de volume.

- **La fréquence vraie d'une famille est l'inverse de l'espacement moyen des fractures de cette famille.**

Bertrand et al. (1982) définissent, à l'usage de la photo-interprétation, la densité de fracturation par classes d'angles de fracturation.

III.9 - DIMENSIONS DES FRACTURES - LONGUEUR DE TRACE

Feuga (1984) : constate que, sauf exception, l'observation ne permet pas de déterminer toutes les dimensions d'une fracture. Seule est mesurable, dans le meilleur des cas, **la longueur de sa trace sur la surface d'observation qui constitue une limite inférieure de sa plus grande dimension** (taille limitée de la surface d'observation, surface qui recoupe rarement la fracture suivant sa plus grande dimension).

III.10 - INFLUENCE DE LA PROFONDEUR

Crosby (1881) : la fréquence des fissures décroît rapidement avec la profondeur.

Jahns (1943) : il existe une grande concentration des systèmes de fissures horizontales dans la partie superficielle du milieu rocheux.

La distance séparant ces fissures horizontales augmente avec la profondeur.

III.11 - OUVERTURE APPARENTE DE LA FRACTURE

Key (1982)

III.12 - RUGOSITE APPARENTE

Carlsson-Olsson (1980)

III.13 - VOLUME DE LA FRACTURE

Long et al. (1982)

III.14 - NATURE DES MATERIAUX DE REMPLISSAGE

Feuga (1983)

III.15 - DEGRE DE SEPARATION

Feuga (1983) : fraction de la surface de fracture effectivement offerte à la circulation d'eau.

Louis (1974) : rapport de la surface ouverte à la surface totale de la fracture.

III.16 - RELATIONS MUTUELLES DE DIFFERENTS PARAMETRES CARACTERISANT LES FRACTURES

Feuga (1984) : montre que, pour une famille directionnelle donnée, il existe entre le nombre de fractures par unité de surface ou de volume, n , l'écartement moyen des fractures, e , et leur dimension moyenne, a (longueur ou surface suivant les cas), la relation : $n . a . e . = 1$.

Cette formule conduirait à rechercher une corrélation entre longueur et inverse de l'espacement.

III.17 - INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION DES CONTRAINTES

Carlsson et Olsson (1980) : constatent que les fractures parallèles aux directions des contraintes compressives maximales sont les plus ouvertes (compression minimale perpendiculairement au plan de fracture), et par suite, les fractures orientées perpendiculairement à cette direction sont les plus fermées.

III.18 - OUVERTURE HYDRAULIQUE EQUIVALENTE

Feuga (1984) : paramètre expérimental déterminé par essais à l'eau sur fractures en sondage, et qui rend compte :

- de l'ouverture libre des fissures
- de leur continuité
- de leur degré de séparation
- de leur rugosité
- etc.

Soit l'ensemble des facteurs influençant la valeur de la conductivité hydraulique des fractures.

IV - ETUDE DE LA FRACTURATION : CARACTERISATION DES CHAMPS DE FRACTURES. METHODES ET RESULTATS

IV.1 - METHODES

IV.1.1 - BASES THEORIQUES DE LA GEOSTATISTIQUE

Brière et Razack (1982)

C'est une technique d'étude de la variabilité spatiale d'un phénomène interprété comme la réalisation unique, en Sciences de la Terre, d'une fonction aléatoire. Tout le raisonnement est donc conduit en termes probabilistes.

L'application de cette technique s'appuie sur la stationnarité du phénomène (homogénéité de nature statistique), mais ceci est rare dans le domaine des Sciences de la Terre. On impose alors seulement aux accroissements du phénomène (fonction aléatoire) d'être stationnaires d'ordre 2, ce qui se traduit en termes mathématiques par :

$$E (F_{i+h} - F_i) = 0 ; Var (F_{i+h} - F_i) = 2 \gamma (h)$$

Si le phénomène prend les valeurs F_i au point i et F_{i+h} au point $i+h$, l'espérance mathématique de l'accroissement est nulle. La variance de cet accroissement ne dépend que du vecteur h .

Le graphe de la fonction $2 \gamma (h)$, ou **variogramme**, est particulièrement révélateur de la structuration spatiale, ou régionalisation, du phénomène.

La géostatistique, s'appuyant sur une interprétation probabiliste des phénomènes, présente l'avantage d'intégrer la spécificité tectonique et génétique des milieux fissurés.

IV.1.2 - ETUDES STATISTIQUES DE REPARTITION SPATIALE

IV.1.3 - ETAPES DE LA METHODE INFORMATIQUE D'ETUDE DES CHAMPS DE FRACTURES

Razack (1980)

Brière - Razack (1981)

Blès - Dutartre - Gros (1982)

- . Acquisition de l'information sur la fracturation par interprétation de clichés aériens et réalisation de cartes de photo-fracturation.
- . Numérisation du relevé de fracturation par digitalisation puis stockage sur fichier.
- . Traitement automatique du fichier.
- . Interprétation des résultats.

Remarque : problème de l'effet d'échelle.

- Chaque échelle d'échantillonnage fait ressortir une régionalisation qui lui est propre. Il semble cependant que l'échelle au 1/15 000e soit la mieux adaptée au relevé de fracturation. Razack (1980).

IV.2 - RESULTATS OBTENUS

IV.2.1 - LONGUEUR DES FRACTURES

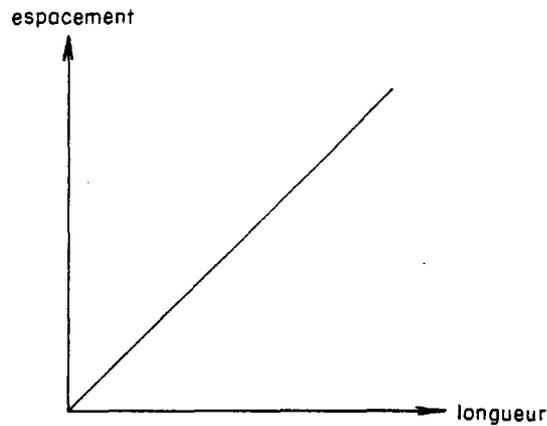
Jamier et Simeoni (1979), Baecher et Lanney (1978), Razack (1982) mettent en évidence une distribution de type log normale, ce qui entraîne le caractère probabiliste de la fracturation, les fractures étant assimilables à des variables aléatoires. Ceci est une justification de l'emploi de méthodes stochastiques.

IV.2.2 - ESPACEMENT

Baecher et Lanney (1978) mettent en évidence une distribution exponentielle.

Avec l'observation du paragraphe précédent, ils en concluent que les fractures sont des disques circulaires distribués au hasard dans l'espace et dont les rayons suivent une loi log-normale.

Pour Jamier et Simeoni (1979), par contre, la relation espacement = f(longueur) entre des failles parallèles est une loi **linéaire** (massifs calcaires).



IV.2.3 - COMPARAISON DE LA FREQUENCE DE DENSITE DES GRANDES FRACTURES PAR RAPPORT A CELLE DES PETITES FRACTURES

Blès - Dutartre - Gros (1982)

- les zones à forte densité de grandes fractures sont caractérisées par une fréquence élevée de petites fractures
- inversement, les zones à faible densité de grandes fractures sont caractérisées par une fréquence faible de petites fractures
- les histogrammes de fréquence montrent généralement deux pics bien individualisés pour des valeurs d'espacement très différentes.

IV.2.4 - OUVERTURE DES FRACTURES

Selon **Bianchi-Snow (1968)**, **Witherspoon-Gale (1983)**, les ouvertures des fractures sont distribuées selon une loi **log-normale**.

IV.3 - CONCLUSION : DEFINITION MATHEMATIQUE DE LA FRACTURATION

Razack (1980)

IV.3.1 - Il est possible d'établir des lois reliant :

- . intensités de fracturation en longueurs cumulées
- . intensités de fracturation en nombre de fractures
- . distances interfracturales.

Chaque groupe de deux facteurs permettant de définir le troisième, on aboutit à l'hypothèse selon laquelle le processus de fracturation obéit à des lois de nature déterministe.

La fracturation est un phénomène déterministe.

IV.3.2 - L'analyse de la distribution des longueurs de fracture aboutit à une loi de type log-normale.

La fracturation est un phénomène aléatoire.

IV.3.3 - L'analyse structurale par variogramme semblerait montrer que le phénomène est continu, régulier, et qu'il présente une certaine anisotropie.

La fracturation est un phénomène régionalisé.

V - INFLUENCE DE LA STRUCTURE SUR LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DU MILIEU

V.1 - LOIS D'ÉCOULEMENT EN MILIEU FRACTURE

Les lois d'écoulement en milieu fracturé, établies par Louis (1967-1974), montrent qu'en régime laminaire, la vitesse moyenne d'écoulement dans une fracture est proportionnelle au carré de l'ouverture de cette fracture, le débit transitant dans celle-ci étant lui proportionnel au cube de cette ouverture.

Ainsi, le débit transitant dans une fracture d'ouverture $2e$ sera 8 fois supérieur à celui transitant dans une fracture d'ouverture e .

On se rend ainsi compte du rôle fondamental des fractures de grande ouverture dans le rendement des ouvrages de captage, et celui des variations d'ouverture sur les modifications de la perméabilité globale du milieu fissuré.

V.2 - ECOULEMENT DANS UN SYSTEME DE FRACTURES : LE MILIEU POREUX EQUIVALENT

Dans la réalité, on constate qu'il n'y a pas d'application directe des lois d'écoulement dans les fractures individuelles, ce qui a amené à assimiler le milieu fissuré à un milieu poreux équivalent.

V.2.1 - CONCEPT DU MILIEU POREUX EQUIVALENT

Bertrand - Durand - Feuga (1981)

Feuga (1983)

Dans un milieu rocheux fracturé, l'essentiel de l'écoulement s'effectue par l'intermédiaire du réseau de fractures, et le caractère discontinu de ce milieu interdit normalement la définition d'un tenseur de perméabilité, comme dans le milieu poreux continu.

Selon cette théorie cependant, la distinction entre milieu poreux, supposé continu, et milieu fissuré, supposé discontinu, est quelque peu arbitraire et relève en fait d'une question d'échelle.

Ainsi, à petite échelle, on peut assimiler le milieu fissuré à un milieu poreux continu, les blocs étant assimilables à des grains, et les fractures limitant ces blocs à des pores séparant des grains.

Le milieu poreux fictif, de caractéristiques hydrauliques égales à celles du milieu fissuré qu'il représente, est nommé milieu poreux équivalent (sous-entendu : au milieu fissuré) ou MPE.

L'utilité du MPE repose sur le fait que la relation flux-gradient de charge est linéaire en régime laminaire, aussi bien dans le milieu poreux que dans le milieu fissuré, ce qui rend possible son utilisation pour les calculs de distribution des charges hydrauliques et des débits moyens en milieu fissuré avec des méthodes mises au point pour le milieu poreux.

La perméabilité de ce MPE doit être caractérisée par un tenseur, défini en tout point, mais qui en pratique ne peut être déterminé qu'en prenant en compte

un certain volume du milieu fissuré entourant chaque point. Le plus petit volume, sur lequel ce tenseur peut être déterminé, est nommé volume élémentaire représentatif (VER) dont la taille dépend de l'ensemble des caractéristiques du champ de fractures.

Long et al. (1982) définissent le VER comme étant le volume minimal en dessous duquel la perméabilité reste constante, quelque soit le volume, inférieur au VER, considéré.

Ces auteurs remarquent par ailleurs que le VER n'existe pas nécessairement : il n'y a de sens à parler de VER dans un massif fracturé que lorsque l'écoulement s'accompagne d'un gradient constant et de lignes d'écoulement rectilignes dans un milieu homogène anisotrope.

Feuga (1983) pose les conditions sous lesquelles il est possible de définir un MPE :

- paramètres de fracturation distribués dans l'espace de façon parfaitement aléatoire
- linéarité de la relation flux-gradient, relation qui doit être caractérisée par un tenseur de perméabilité dont la définition découle de l'établissement d'une relation du type :

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{i}_x \\ \bar{i}_y \\ \bar{i}_z \end{pmatrix}$$

flux

gradients

**V.2.2 - DETERMINATION DE LA FORME ET DE L'ORIENTATION DU
TENSEUR DE PERMEABILITE D'UN MILIEU ROCHEUX FRACTURE
A PARTIR DES DONNEES DE L'ANALYSE DE LA FRACTURATION
(Approche théorique)**

de Marsily (1981)

Bertrand - Durand - Feuga (1981)

Bertrand et al. (1982)

Feuga (1984)

On considère une fracture individuelle, de conductivité hydraulique isotrope k .

$$V = -k \text{ grad } \phi$$

V : vitesse moyenne d'écoulement

ϕ : charge hydraulique

$\text{grad } \phi$: projection du gradient de charge sur le plan de fissure.

- Soit un repère orthonormé $oxyz$, tel que oxy correspond au plan de fissure et ox correspond à l'horizontale.

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\delta\phi}{\delta x} \\ \frac{\delta\phi}{\delta y} \\ \frac{\delta\phi}{\delta z} \end{pmatrix}$$

- On considère maintenant un volume cubique de milieu rocheux fracturé, de côté l , contenant la fissure considérée précédemment. Cette fissure, d'épaisseur e , est parallèle à l'une des faces du cube.
- On considère également le même volume de MPE.

Le débit traversant la fissure a pour expression :

$$Q = Vle = lek |\overline{\text{grad } \phi}|$$

Un même débit doit traverser l'ensemble du volume du MPE :

$$\frac{Q}{S} = \frac{Q}{l^2} = k_{eq} |\overrightarrow{\text{grad}} \phi|$$

d'où : $k_{eq} = \frac{e}{l} k$

et : $K_{eq} = \frac{e}{l} k \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

K_{eq} est une matrice représentant, dans le repère Oxyz, le tenseur de perméabilité du milieu poreux équivalent au volume de milieu fissuré contenant la fracture considérée.

Dans le repère géographique, cette même matrice s'écrit :

$$K_{eq} = \frac{e}{l} k \cdot R$$

avec :

$$R = \begin{pmatrix} 1 - \cos^2 d \sin^2 p & 1/2 \sin 2d \sin^2 p & 1/2 \sin 2p \cos d \\ 1/2 \sin 2d \sin^2 p & 1 - \sin^2 d \sin^2 p & 1/2 \sin 2p \sin d \\ -1/2 \sin 2p \cos d & 1/2 \sin 2p \sin d & \sin^2 p \end{pmatrix}$$

d : direction, par rapport au nord, de la fracture

et :

p : pendage de la fracture

Si le volume de référence de milieu fracturé est recoupé par N fractures de conductivité hydraulique k_i , épaisseur e_i , direction d_i , pendage p_i , $i = 1$ à N ; le tenseur de perméabilité résultant du MPE a pour expression :

$$K_{eq \text{ rés}} = \sum_{i=1}^N K_{eqi} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^N (e_i k_i R_i)$$

Cette formule donne des valeurs très supérieures aux valeurs déterminées in situ, mais elle permet cependant de calculer les valeurs relatives des perméabilités principales (détermination de la forme du tenseur de perméabilité du MPE) et les directions des perméabilités principales (c'est-à-dire l'orientation de ce tenseur).

V.3 - FACTEURS INFLUENCANT LA VALEUR DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

V.3.1 - INFLUENCE DE LA PROFONDEUR ET DES CONTRAINTES

Louis (1967-1974) - Toute sollicitation mécanique appliquée à un massif rocheux entraîne une modification de la géométrie du milieu, de ses vides, et en particulier des fractures. Il va ainsi en résulter une variation des caractéristiques hydrauliques, elles-mêmes étroitement liées à la géométrie des vides du milieu.

La déformabilité des massifs fracturés est très nettement plus élevée que celle de la matrice rocheuse. Ce contraste de déformabilité aura pour effet de **concentrer les déformations sur les fractures lors de toute action mécanique extérieure**. Réciproquement, toute variation de la pression du fluide entraînera une perturbation elle-même influençant les caractéristiques hydrauliques.

Dans les formations homogènes d'une certaine puissance, la fissuration se développe davantage en surface, en raison essentiellement du faible état de contrainte, bien que cette fissuration ait généralement la même parenté génétique en profondeur qu'en surface. Cela revient à dire, en d'autres termes, que **l'intensité de la fracturation, et par voie de conséquence les caractéristiques hydrauliques, décroissent lorsque la profondeur augmente**.

Une analyse statistique, menée pour des sites très variés, a montré que la loi empirique qui traduisait le plus fidèlement le phénomène était de la forme :

$$K = K_0 \exp (- \alpha \sigma)$$

$$\sigma = \gamma t - p$$

K : conductivité hydraulique dans une direction donnée

σ : contrainte effective perpendiculaire à la direction testée

α : coefficient qui dépend de la nature de la roche et de la fracturation

K_0 : conductivité hydraulique à la partie supérieure de la formation.

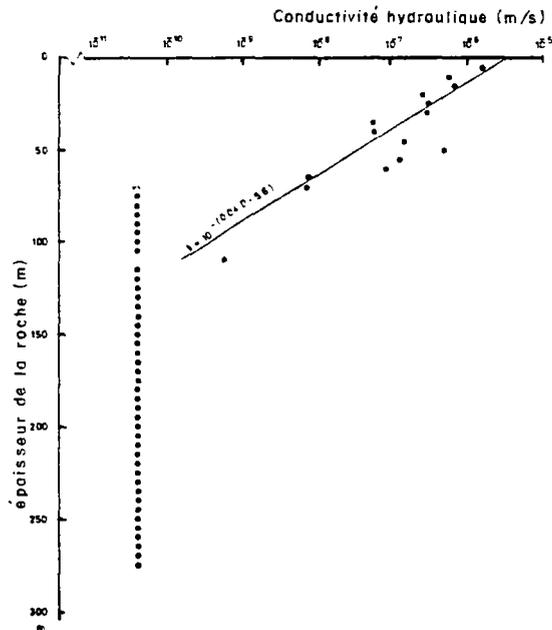


Figure 1 - Valeurs moyennes de la perméabilité en fonction de la profondeur

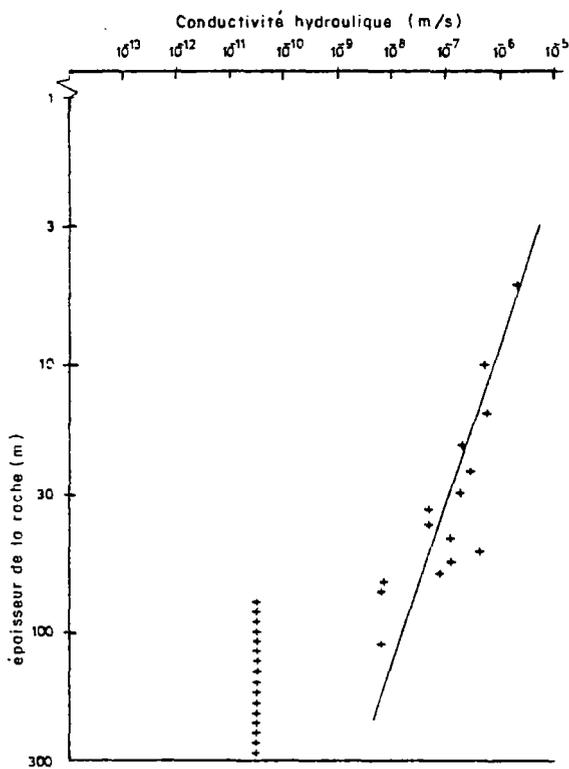


Figure 2 - Valeurs moyennes de la perméabilité en fonction de la profondeur -
Représentation bilogarithmique

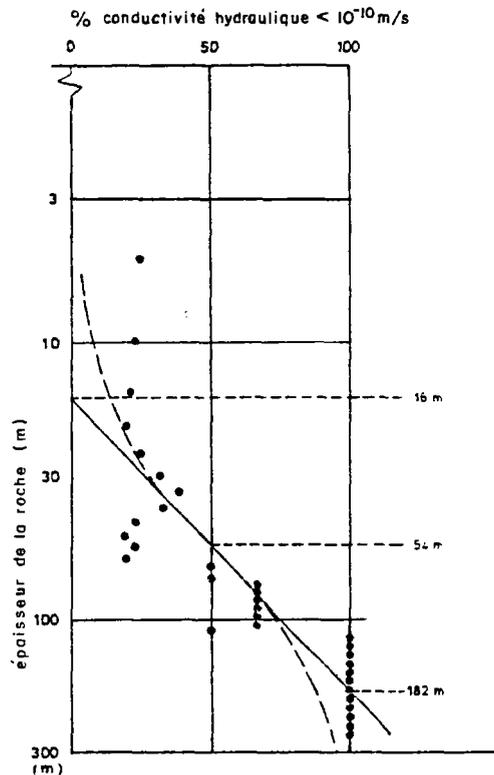


Figure 3 - Distribution des pourcentages de roche imperméable en fonction de la profondeur. La droite montre, pour une profondeur supérieure à 54 m, plus de 50 % de mesures caractérisent une roche imperméable

Feuga (1984) ajoute : "La déformabilité des fractures, dont la conductivité hydraulique est proportionnelle au carré de l'ouverture, entraîne une extrême sensibilité de la perméabilité globale du milieu fissuré aux déformations qu'il subit".

Ceci explique la diminution de la perméabilité avec la profondeur dans les milieux fissurés.

Carlsson et Olsson (1977) ont réalisé des tests d'injection d'eau en milieu fissuré cristallin afin de mettre en évidence la relation perméabilité - profondeur visualisée sur les diagrammes des figures 1, 2, 3.

V.3.2 - INFLUENCE PREPONDERANTE DES GRANDS ACCIDENTS SUR LA VALEUR DE LA PERMEABILITE

Snow (1969) constate que, plus le volume pris en compte pour la détermination de la perméabilité d'un milieu rocheux fissuré est grand, plus cette perméabilité est elle même grande : ceci tient à l'influence prépondérante des grands accidents qui n'interviennent qu'à partir d'un certain volume sur la perméabilité global du massif.

V.3.3 - INFLUENCE DE L'ECHANTILLONNAGE SUR LE CALCUL DE PERMEABILITE

Snow (1969) constate que les perméabilités évaluées par une modélisation du milieu fissuré augmentent avec la taille de l'échantillon ce qui revient à dire que N forages dans une roche cristalline fracturée produisent plus de N fois le débit d'un forage unique.

V.4 - MESURES IN SITU DE LA PERMEABILITE

Les méthodes d'interprétation utilisées ne prennent pas en compte, ou tout du moins de façon peu satisfaisante, l'anisotropie du milieu. Les essais de pompage, mais surtout d'injection, avec observation des pressions dans les piézomètres permettent la reconstitution de leur distribution en trois dimensions.

V.4.1 - MESURE DE PERMEABILITE EN SONDAGE PAR INJECTION ENTRE OBTURATEURS

Carlsson - Olsson (1979)

Bertrand - Durand - Feuga (1981)

Witherspoon - Gale (1983)

On peut considérer deux types d'essai :

- A pression constante

On impose dans la chambre d'injection une surpression constante et on enregistre les variations du débit injecté jusqu'à stabilisation.

On passe ensuite à une pression supérieure, elle aussi maintenue constante jusqu'à stabilisation du débit, et ainsi de suite. On répète ensuite la même séquence d'opérations, mais cette fois par paliers de pression décroissants.

On en déduit une relation $K = f(\Delta P, Q)$.

La courbe $(Q, \Delta P)$ est linéaire tant que l'on ne dépasse pas une certaine pression d'injection entraînant une ouverture élastique des fissures et donc une augmentation de leur conductivité hydraulique. Sinon, on obtient une droite de pente proportionnelle à K .

- A débit constant

On procède à une injection dans la chambre d'injection pendant une certaine durée, l'évolution de la pression d'injection étant enregistrée pendant l'essai. Après l'arrêt de l'injection, on enregistre la chute de pression en fonction du temps.

V.4.2 - Essais entre sondages

Carlsson et al. (1983)

V.4.3 - Essais en galeries

Witherspoon et al. (1980).

BIBLIOGRAPHIE

- Aguilera (R.)** 1980.- Naturally fractured reservoirs.- Penn Well Publishing, Tulsa, Okla.
- Baecher (G.B.), Einstein (H.H.), Lanney (N.A.)** 1977.- Statistical description of rock properties and sampling : Paper presented at the 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Colorado School of Mines Golden (Colorado).
- Baecher (G.B.), Lanney (N.A.)** 1978.- Trace length biases in joint surveys.- Paper presented at the 19th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Mackay School of Mines, Univ. of Nev.- Reno. 5C1, p. 1-8.
- Baker (W.J.)** 1955.- Flow in fissured formations.- Proc. World Pet. Congr., 4th, Rome, Sect. II, p. 379-393.
- Bertrand (L.), Beucher (H.), Creutin (D.), Feuga (B.), Landry (J.), Thiery (D.)** 1982.- Essai de détermination de la distribution régionale du tenseur de perméabilité du "milieu poreux équivalent".- Doc. BRGM n°45, p. 97.
- Bertrand (L.), Durand (E.), Feuga (B.)** 1981.- Détermination de la perméabilité d'un milieu rocheux fracturé.- Aspects théoriques et pratiques. BRGM - Département Génie Géologique. Note technique n°19/81.
- Beucher (H.), Marsily (G. de)** 1984.- Approche statistique de la détermination des perméabilités d'un massif fracturé.- Ecole des Mines de Paris - Centre d'Informatique Géologique.- LHM/RD/84/16.
- Bianchi (L.), Snow (D.T.)** 1968.- Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures.- Ann. Arid Zone, 8(2), p. 231-245.
- Blès (J.L.), Dutartre (P.), Gros (Y.)** 1982.- La fracturation du granite de Bassiès.- Etude des densités de fracturation à différentes échelles.- Doc. BRGM n°45 - p.
- Blès (J.L.), Feuga (B.)** 1977.- La fracturation des roches - Rappel de mécanique des roches.- Rapport BRGM 77 SGN 247 GEO.

- Blès (J.L.) 1977.-** La fracturation des roches - 2ème partie. Observation et interprétation des fractures nouvelles.- Rapport BRGM 77 SGN 248 GEO.
- Briere (G.), Razack (M.) 1982.-** Caractérisation géostatistique de champs de fractures.- Implication pour la reconnaissance des systèmes fissurés discontinus en hydrogéologie.- Doc. BRGM n°45 - p.
- Briere (G.), Razack (M.) 1982.-** Méthode informatique pour l'étude sur clichés aériens de la fracturation des magasins aquifères fissurés.- Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn., vol. 23, fasc. 2, p. 131-142.
- Buckley (D.K), ZEIL (P.) 1984.-** The character of fractured rock aquifers in eastern Botswana.- AISH, n°144, p. 25-36.
- Caldwell (J.A.) 1972.-** The theoretical determination of the permeability tensor of joint rock.- Paper presented at the Symposium on percolation through fissured rock.- Int. Soc. for Rock Mech. and Int. Assoc. of Eng. Geol.- Stuttgart. T1E, p. 1-6.
- Carlsson (A.), Carlsson (L.), Jamtlid (A.), Norlander (H.), Olsson (O.), Olsson (T.) 1983.-** Cross-hole techniques in a deep seated rock mass.- Bull. of the International Association of Engineering Geology - n°26-27 - Paris.
- Carlsson (L.), Carlsted (A.) 1976.-** Estimations of transmissivity and permeability in Swedish bedrocks.- Nordic Hydrological Conference, Session III, p. 27-39, Reykjavik.
- Carlsson (A.), Olsson (T.) 1977.-** Hydraulic conductivity and its relation to depth. Bull. geol. Inst. Univ. Uppsala, N.S. 7, p. 71-84.
- Carlsson (A.), Olsson (T.) 1977.-** Variations of hydraulic conductivity in some Swedish rock types. The first International Symposium on Storage in Excavated rock Caverns.-Preprints, vol. 2, p. 85-92 - Stockholm.
- Carlsson (A.), Olsson (T.) 1979.-** Hydraulic conductivity and its stress dependance.- Workshop on Low - Flow, Low - Permeability Measurements in largely impermeable rocks. OECD - NEA, p. 249-259 - Paris.

- Carlsson (A.), Olsson (T.)** 1979.- The water-pressure test for determining hydraulic conductivity. Bull. geol. Inst. Univ. Uppsala, N.S. 8, p. 67-75.
- Carlsson (A.), Olsson (T.)** 1980.- Caractéristiques de fracture et propriétés hydrauliques d'une région au sous-sol cristallin en Suède.- Bull. BRGM. (2), III, n°3, p. 215 à 233.
- Carrière (J.F.), Fasanino (G.), Lavedan (G.), Marsily (G. de)** 1984.- Identification des caractéristiques hydrogéologiques d'un réservoir en nappe aquifère.-Revue de l'IFP, vol. 39, n°3, mai-juin.
- Colbeaux (J.P.), 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.- Annales scientifiques de l'université de Besançon - 2ème colloque d'hydrologie en pays calcaire, Géologie - Fasc. 25, 3ème série.
- Crochet (Ph.)** 1983.- Fracturation profonde en milieu cristallin : Analyse à partir de travaux souterrains.- Etude in situ de la déformation des milieux karstiques : mesures extensométriques.- Thèse Doct.-Ing. USTL -Montpellier.
- Davadant (D.)** 1971.- Méthodes d'étude de la fissuration par diagraphies et essais de puits. (Artep) Réf. 19676 (octobre).
- Doe (T.W.), Long (J.C.S.), Endo (H.K.), WILSON (C.R.)** 1982.- Approaches to evaluating the permeability and porosity of fractured rock masses.- Doc. Lawrence Berkeley Laborat.
- Dutartre (Ph.)** 1981.- Etude de la fracturation du granite de la Margeride (Région de St Alban-sur-Limagnole, Lozère).- Géométrie, cinématique, densité de fractures.- Thèse de 3ème cycle, Univ. Paris VII, 344 p.
- Feuga (B.)** 1983.- Caractérisation du milieu poreux équivalent à un milieu rocheux fracturé, par essais à l'eau in situ.- Bull. de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur n°26-27. Paris.
- Feuga (B.) Mars** 1984.- Eléments d'approche des milieux rocheux fracturés du point de vue de l'hydraulique souterraine.- Rapport du BRGM 84 SGN 128 GEG.

- Gale (J.E.), Rouleau (A.)** 1984.- Characterizing and interpreting the geometry, permeability and porosity of fractures for repository evaluation.- Fields measurements in geomechanics.- International Symposium (1983) Zurich, NLD, Rotterdam : A.A. Balkema, 2, p. 1343-1369.
- Gourgand (B.), Sarrot Reynauld (J.)** 1983.- Hydrogéologie des roches fissurés, nature et mode de circulation des eaux rencontrées en galeries dans les massifs du Rissiou, des Grandes Rousses et de Belledonne (Isère - France).- Congrès National des Sociétés Sarantes, Grenoble, FRA, Paris : CTHS, 1, n°1, p. 211-222.
- Grillot (J.C.)** 1979.- Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré.- Contribution méthodologique à cette connaissance.- Thèse Doct. d'Etat, USTL - Montpellier, p. 212.
- Grillot (J.C.), Guérin (M.)** 1975.- Tectonique, microtectonique et directions des écoulements souterrains.- Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn. vol. 22, fasc. 1. p.
- Hudson (J.A.), Priest (S.D.)** 1979.- Discontinuities and rock mass geometry.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech., 16, p. 339-362.
- Jamier (D.)** 1975.- Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes dans les massifs de l'Arpille et du Mont Blanc.- Thèse Doct. - Univ. Neuchâtel.
- Jamier (D.), Simeoni (G.P.)** 1979.- Etude statistique de la distribution spatiale des éléments structuraux dans deux massifs des Alpes Helvétiques.- Conséquences pour l'hydrogéologie karstique.- Bull. BRGM (2), III, n°1, p. 67-76.
- Karcz (L.)** 1978.- Rapid determination of lineament and joint densities. Elsevier Scientific Publishing Company - Amsterdam.- Tectonophysics, 44, T29-T33.
- Keys (W.S.)** 1982.- Location and character of fractures in geothermal wells.- In "Fractures in geothermal reservoirs" Circum - Pacific Energy and Mineral Resources Conference, Honolulu - Hawaï.

- Kiraly (L.)** 1969.- Statistical analysis of fractures (orientation and density). Geol. Rundschau, B. 59, H.1, p. 125-151.
- Ko Sato, Toshio Ide** 1975.- On structural characters and simulations of rock fracturing of geothermal areas in northeastern Japan.- Proceedings of the Second United Nation Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, vol. 1, section II, p. 575-582.
- Lassagne (D.)** 1983.- Essai de caractérisation du milieu fracturé en massif granitique. Site de Fanay Angères (Haute-Vienne).- Travail de fin d'étude.- 4ème année ENSM Paris.
- Lewis (D.S.), Burgy (R.H.)** 1964.- Hydraulic characteristics of fractured and jointed rock.- Groundwater 2, (3), p. 4-9.
- Limaye (D.G.), Limaye (S.D.)** 1973.- A mathematical approach to some aspects of groundwater flow in hard rock areas.- In: Proc. Int. Symp. on Development of Groundwater Resources, Madras India, vol. III, p. 95-103.
- Lomize (G.M.)** 1951.- Flow in fractured rocks.- All-union energetics Publishers, Moscow/Leningrad, p. 7-127.
- Long (J.C.S.), Remer (J.S.), Wilson (C.R.), Witherspoon (P.A.)** 1982.- Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures.- Water Resources Research, vol. 18, n°3, p. 645-658.
- Louis (C.)** 1974.- Introduction à l'hydraulique des roches.- Bull. BRGM (2), III, n°4, p. 283-356.
- Maini (Y.N.T.)** 1981.- In situ hydraulic parameters in jointed rock. Their measurement and interpretation.- Ph. D. Thesis - Imperial College - London.
- Maini (Y.N.T.), Noorishad (J.)** 1973.- A discontinuum approach to fluid flow in fractured rocks.- Proc. Intern. Symp. on Development of Groundwater Resources, Madras - India, vol. III, p. 131-139.

- Maini (Y.N.T.), Noorishad (J.), Sharp (J.)** 1972.- Theoretical and field considerations on the determination of in situ hydraulic parameters in fractured rocks.- Proc. of the Symp. "Percolation through fractured rock" - Stuttgart. T1E, p. 1-8.
- Marine (I.W.)** 1966.- Hydraulic correlation of fracture zones in buried crystalline rock at the Savannah River Plant, near Aiken, South Carolina.- U.S. Geol. Surv., Prof. paper 550-D, p. D223-D227.
- Marine (I.W.)** 1967.- The permeability of fractured crystalline rock at the Savannah River Plan near Aiken, South Carolina.- U.S. Geol. Surv. Prof. paper 575-B, p. B203.
- Mundi (E.K), Wallace (J.R.)** 1973.- On the permeability of some fractured crystalline rocks.- Bull. of the Association of Engineering Geologists, vol. X, n°4.
- Neuzil (C.E.), Tracy (J.V.)** 1981.- Flow through fractures.- Water Res. Res., 1751, p. 191-199.
- Noyer (M.L.)** Septembre 1980.- Calcul des directions principales et des coefficients d'anisotropie de perméabilité d'un milieu poreux équivalent à un milieu rocheux fracturé.- Le programme TENSEUR.- BRGM, Département Génie Géologique - Note technique n°13.
- Olsson (T.)** 1979.- Hydraulic properties and groundwater balance in a soil-rock aquifer system in the Juktan Area, Northern Sweden.- Striae, vol. 12, 72 p., Uppsala.
- Parsons (M.L.)** 1972.- Determination of hydrogeological properties of fissured rocks. Proc. 24th Geol. Congress, Montreal, section II, Hydrogeology, p. 89-99.
- Razack (M.)** 1982.- A propos d'une loi de distribution des fractures : intérêt pour l'hydrogéologie des aquifères fissurés.- C.R. Acad. Sc. Fr., Paris, série D., t. 242, p. .
- Razack (M.)** 1978.- Sur la contribution de méthodes d'analyse numérique appliquées à l'étude d'un champ de fractures pour une meilleure connaissance de la structure des réservoirs fissurés.- C.R. Acad. Sc. Fr. Paris, série D., t. 286, p. 1577-1580.

- Razack (M.)** 1979.- Approche numérique et quantitative de l'étude sur clichés aériens de la fracturation des magasins aquifères fissurés.- Rev. Inst. Fr. Pétrole, vol. XXXIV, n°4, p.547-574.
- Razack (M.)** 1980.- Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées.- Numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens.- Bull. BRGM (2), III, n°3, p. 257-262.
- Razack (M.)** 1980.- Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées.- Numération et analyse quantitative de la fracturation relevée sur photographies aériennes.- Thèse 3ème cycle, USTL - Montpellier, 124 p.
- Razack (M.)** 1980.- Approche quantitative de l'effet d'échelle sur le relevé de la fracturation par photo-interprétation dans l'étude de la géométrie des réservoirs fissurés.- Mém. h. Soc. géol. France, n°11, p. 81-90.
- Razack (M.), Deshons (P.)** 1984.- Préviation par krigeage de la fracturation des roches.-C.R. Acad. Sc. Fr., Paris. Série 2, 299, n°9, p. 573-576.
- Reiss (L.H.), Bossie-Codreanu (D.N.), Lefebvre du Pray (E.)** 1980.- Flow in fissured reservoirs.- SPE - AIME, n°4343.
- Ribstein-Coudran (A.)** 1983.- Contribution à l'étude des massifs rocheux fissurés : transferts de fluide, de chaleur et de matière associés.- Thèse Doct.-Ing., ENSM Paris - Univ. Paris VI.
- Rocha (M.), Franciss (F.)** 1977.- Determination of permeability in anisotropic rock masses from integral samples.- Structural and Geotechnical Mechanics, edited by Hall W.J., Prentice Hall - New York, p. 178-202.
- Runchal (A.K.), Sagar (B.)** 1982.- Permeability of fractured rock: effect of fracture size and data uncertainties.- Water Resour. Res., vol. 18, n°2, p. 262-274.
- Sarrot-Reynauld (S.), Sarrot-Reynauld (J.)** 1981.- Circulation des eaux dans les roches fissurées ; hydrogéologie du massif des Grandes Rousses (Alpes Françaises).- C.R. 102ème Congrès National des Sociétés Savantes - Limoges.

- Secor (D.T.Jr)** 1965.- Role of fluid pressure in jointing.- Am. Jour. of Sci., vol. 263, p. 633-646.
- Sharp (J.C.)** 1970.- Fluid flow through fissured media.- Ph. D. Thesis - Imperial College - London.
- Sharp (J.C.), Maini (Y.N.T.)** 1972.- Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joints in rock.- Int. Symp. on Percolation through fissured rock T1 - F, p. 1-15 - Stuttgart.
- Smith (L.), Freeze (R.A.)** 1979.- Stochastic analysis of steady state groundwater in a bounded domain, 1, one-dimensional simulations.- Water Resour. Res., 15(3), p. 521-528.
- Smith (L.), Freeze (R.A.)** 1979.- Stochastic analysis of steady groundwater flow in a bounded domain, 2, two-dimensional simulations.- Water Resour. Res., 15(6), p. 1543-1559.
- Snow (D.T.)**- Fracture deformation and changes of permeability and storage upon changes of fluid pressure.- Quaterly of the Colorado School of Mines, p. 201-244.
- Snow (D.T.)** 1968.- Rock fracture spacing, openings and porosities.- J. Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Engineers, vol. 94, p. 73-91.
- Snow (D.T.)** 1969.- Anisotropic permeability of fractured media.- Water Resour. Res., vol. 5, n°6.
- Snow (D.T.)** 1970.- The frequency and apertures of fractures in rocks.- J. Rock. Mech. Min. Sci., vol. 7, p. 23-40.
- Streltsova (T.D.)** 1976.- Hydrodynamics of groundwater flow in a fractured formation.- Water Resour. Res., vol. 12, n°3, p. 405-414.
- Veneziano (D.)** 1979.- Probabilistic model of joints in rock.- Report, 47 p., Civ. Eng. Dep., Mass. Inst. of Technol. - Boston.
- Witherspoon (P.A.), Gale (J.E.)** 1983.- Hydrogeological testing to characterize a fractured granite.- Bull. of the Int. Assoc. of Eng. Geol., n°26-27 - Paris.

Witherspoon (P.A.), Wang (J.S.Y.), Iwai (K.), Gale (J.E.) 1980.- Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture.- *Water Resour. Res.*, vol. 16, p. 1016-1024.

Witherspoon (P.A.), Wilson (C.R.), Long (J.C.S.), Galbraith (R.M.), Dubois (A.O.), Gale (J.E.), Mc Pherson (M.J.) 1980.- Mesures de perméabilité en grand dans les roches cristallines fracturées.- *Bull. BRGM (2) III*, n°1, p. 53-61.

Wittke (W.) 1970.- Three dimensional percolation in fissured rock.- *Proc. of the Open Pit Mining Symposium Johannesburg, South Africa*, p. 181-191.

Wittke (W.), Rissler (P.), Semprich (S.) 1972.- Räumliche, laminare und turbulente Strömung in klüftigem Fels nach zwei verschiedenen Rechenmodellen.- *Proc. of the Symposium "Percolation through fissured rock" - Stuttgart*.

THEME 2

INTERPRETATION DES POMPAGES D'ESSAI EN MILIEU FISSURE

I - GENERALITES

Les méthodes d'interprétation dérivées de la solution de Theis, qui suppose l'aquifère homogène, isotrope et d'extension latérale infinie, sont difficilement applicables au milieu fissuré, du fait même de la nature des hypothèses de départ.

Un certain nombre de modèles mathématiques ont été proposés afin de résoudre ce problème. Dans la plupart d'entre eux, le milieu aquifère est considéré :

- soit comme un **système à double porosité**
- soit comme un **milieu poreux homogène anisotrope**
- soit comme un **milieu isotrope affecté d'une fracture unique**

Jouanna et Louis (1984) reconnaissent trois types de problème se posant lors de l'étude des écoulements dans les milieux fissurés :

- Au niveau de la conceptualisation : il faut constater **l'extrême variété des milieux naturels fissurés qui se laissent mal enfermer dans une image théorique unifiée.**
- Au niveau des reconnaissances : une fois fixé un modèle conceptuel, il se révèle ardu de caler les paramètres de la conceptualisation, paramètres qui sont plus nombreux que dans le milieu continu et d'accès expérimental délicat.
- Au niveau de la modélisation : celle-ci impose la **prise en compte simultanée de phénomènes considérés jadis de façon indépendante** : phénomènes mécaniques, hydrauliques, thermiques, climatiques, voire biologiques.

II - FORME DES COURBES DE RABATTEMENT

UNESCO (1979)

d'après Davis S.N., Dewiest R.G.N.- Hydrogeology -John Wiley and sons, 463 p., 1966.

Les différentes combinaisons possibles de localisation, largeur, contenu de remplissage des fractures sont à l'origine de plusieurs types de courbes de rabattement. On peut classiquement distinguer les courbes suivantes (fig. 4 à 11).

Les différents travaux publiés, et qui sont l'objet des paragraphes suivants, sur les essais de puits en milieu fissuré montrent **qu'il n'existe pas d'approche unique**, ce qui a abouti à des résultats parfois contradictoires dans l'analyse du comportement du rabattement.

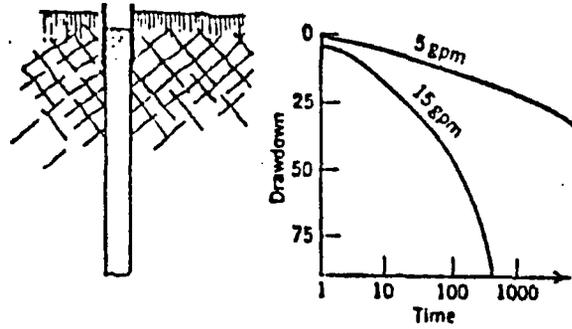


Figure 4 - Système de petites fractures proches de la surface

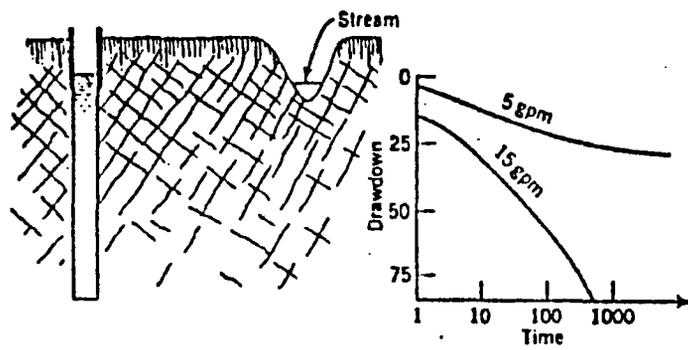


Figure 5 - Système de fractures de grande extension. Mise en évidence d'une limite alimentée ($Q = 5$ gpm)

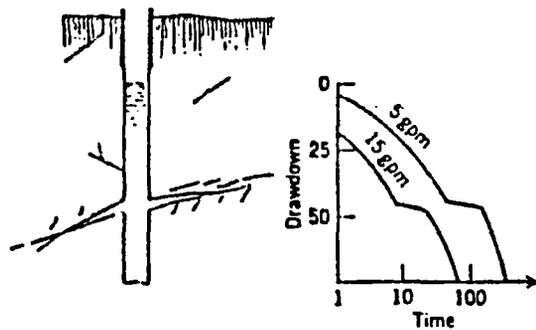


Figure 6 - Grandes fractures d'extension limitée

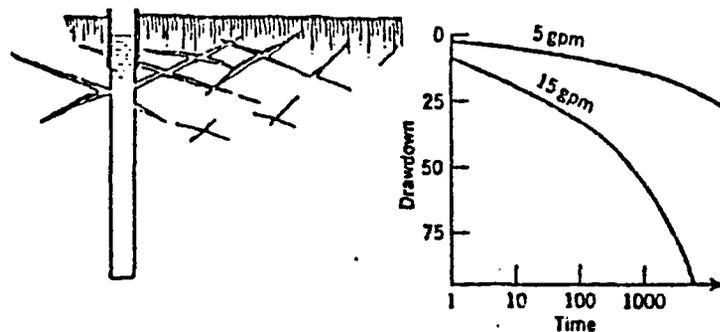


Figure 7 - Fractures larges mais peu étendues drainant la roche altérée ou le sol

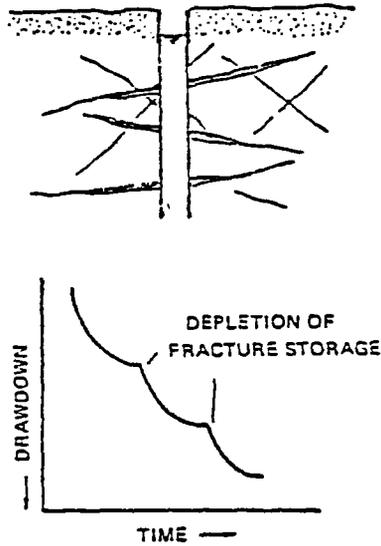


Figure 8 - Fractures larges mais d'extension limitée. Phénomène de fractures successives

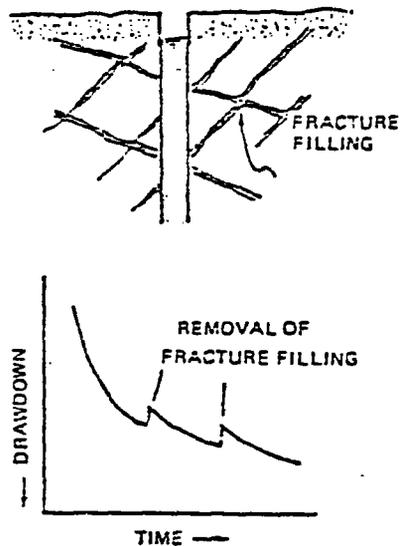


Figure 9 - Fractures larges, partiellement remplies de matériaux fins. La mobilisation du remplissage induit des petits pics dans la courbe de rabattement. Si l'exploitation s'effectue avec des débits forts, le départ de fines va augmenter de manière significative le rendement du puits et va induire des communications avec un plus grand nombre de fractures qu'avant le développement du puits.

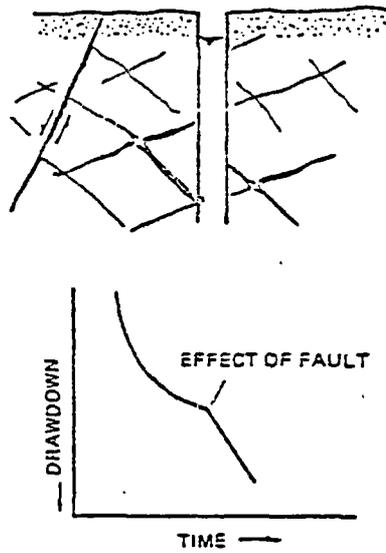


Figure 10 - Effet de limite étanche

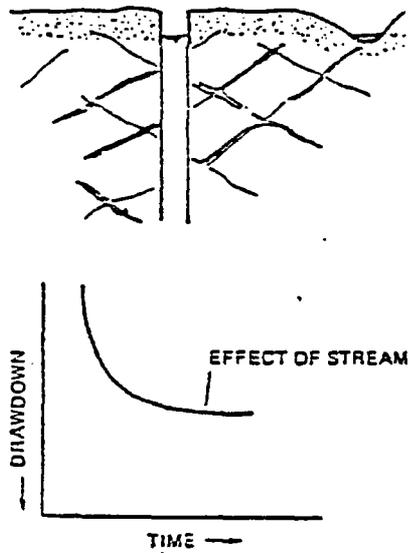


Figure 11 - Effet de limite alimentée

III - LE MILIEU FISSURE EST CONSIDERE COMME UN SYSTEME A DOUBLE POROSITE : LE MODELE DE WARREN & ROOT, SES DERIVES

III.1 - A LA BASE DU MODELE DE WARREN & ROOT : LA THEORIE DU MILIEU A DOUBLE POROSITE DEVELOPPEE PAR BARENBLATT ET AL. (1960)

Barenblatt a reconnu, lors de modélisations d'écoulement en milieu fissuré, **deux perméabilités et deux porosités coexistant dans le milieu.**

La théorie du milieu à double porosité de Barenblatt se fonde sur l'existence de ces deux porosités et ces deux perméabilités pour expliquer le comportement particulier de l'écoulement en milieu fracturé par un **rééquilibrage de la pression différentielle entre fissures et blocs** par un déplacement du fluide depuis les blocs vers les fissures.

III.2 - LE MODELE DE CONTINUTE DE BARENBLATT ET AL. (1960)

Le milieu est constitué par des blocs de dimensions irrégulières séparés par des fissures (fig. 12).

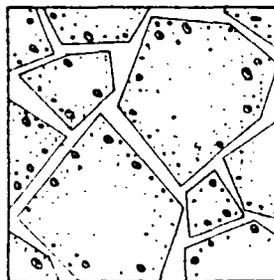


Figure 12 - Le modèle de continuité de Barenblatt

Il est supposé que chaque volume de roche, infiniment petit, est constitué par un grand nombre de blocs poreux et un grand nombre de fissures de distribution, de taille et d'orientation quelconques.

Pour un même point du milieu à double porosité (dont on ignore la position : matrice ou fracture) situé à une distance r d'un puits de pompage, on affecte, au temps t , deux rabattements :

- un rabattement de fissure s_1
- un rabattement de bloc poreux s_2 .

Barenblatt établit :

- une forme de distribution du rabattement de fissure
- une formule donnant la partie de la courbe de rabattement en début de pompage
- les courbes-types correspondantes (fig. 13 et 14).

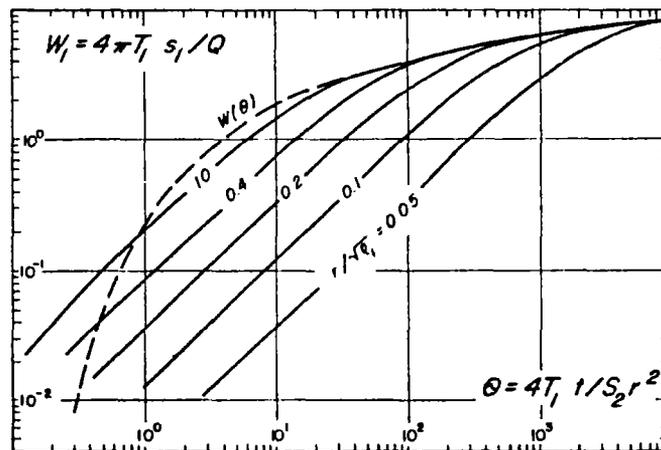


Figure 13 - Courbes-types de la fonction de rabattement $W_1 = 4 \pi T_1 s_1 / Q$
Représentation bilogarithmique

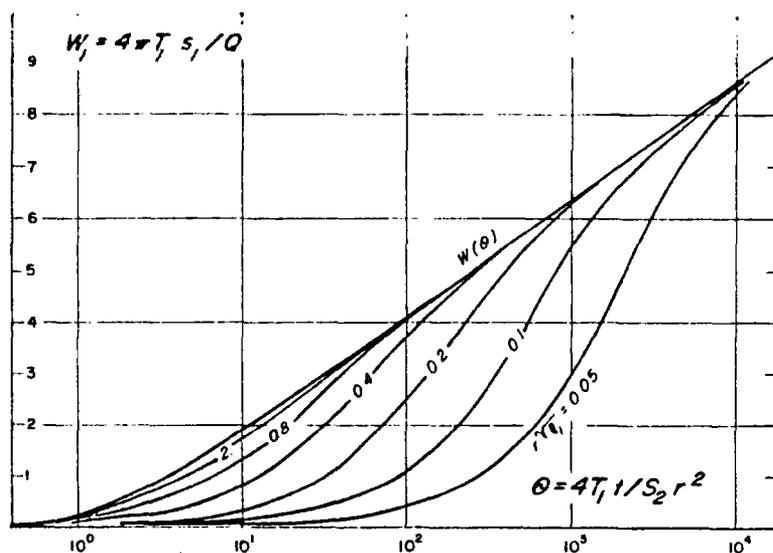


Figure 14 - Courbes-types de la fonction de rabattement $W_1 = 4 \pi T_1 s_1 / Q$
Représentation semi-logarithmique

III.3 - LE MODELE DE WARREN & ROOT (1963)

Cette recherche a été conduite dans le but d'approfondir la description d'une formation contenant deux types de porosité que les auteurs définissent ainsi :

- une porosité primaire ϕ_1 , intergranulaire, interconnectée, que l'on peut corrélérer avec la perméabilité
- une porosité secondaire ϕ_2 , surimposée à la précédente, faiblement interconnectée, que l'on ne peut pas corrélérer avec la perméabilité.

- *Hypothèses du modèle*

- Le matériau contenant la porosité primaire est homogène et isotrope et est constitué d'une série de parallélépipèdes rectangles identiques entre eux.
- La porosité secondaire est constituée d'un système orthogonal continu de fractures orientées de façon à ce que chacune d'elles soit parallèle à l'un des axes principaux de perméabilité (fig. 15).
- L'ensemble de ces deux constituants forme un milieu homogène anisotrope.

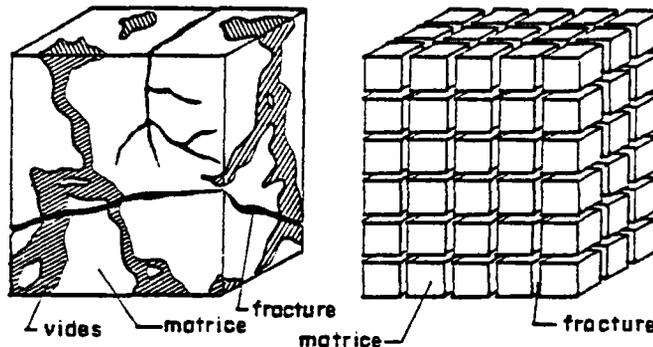


Figure 15 - Modèle à double porosité

- Le réservoir est horizontal et d'extension infinie.
- La porosité primaire contribue de manière significative au volume de pores mais de manière négligeable à la capacité d'écoulement, ce qui revient à dire que la matrice a une grande capacité d'emménagement mais une faible transmissivité.

- Il se produit un écoulement pseudo-permanent de la matrice vers les fractures, mais l'écoulement radial du réservoir vers le puits est supposé venir uniquement du réseau de fractures (Hypothèse validée par Barenblatt et al., 1960).
- Le débit est constant et les "effets de gravité" sont négligeables.
- Les gradients de pression verticaux sont négligeables.

- Relation entre les porosités

$$\begin{cases} \phi_1 = (1 - \phi_2) \phi_m (1 - S_{wc})_m \\ \phi_2 = \phi_f \end{cases}$$

ϕ_f : porosité de fracture

ϕ_m : porosité de matrice

S_{wc} : saturation en eau connée.

Warren & Root définissent deux pressions moyennes P_1 et P_2 , respectivement dans la porosité primaire et dans la porosité secondaire (fig. 16).

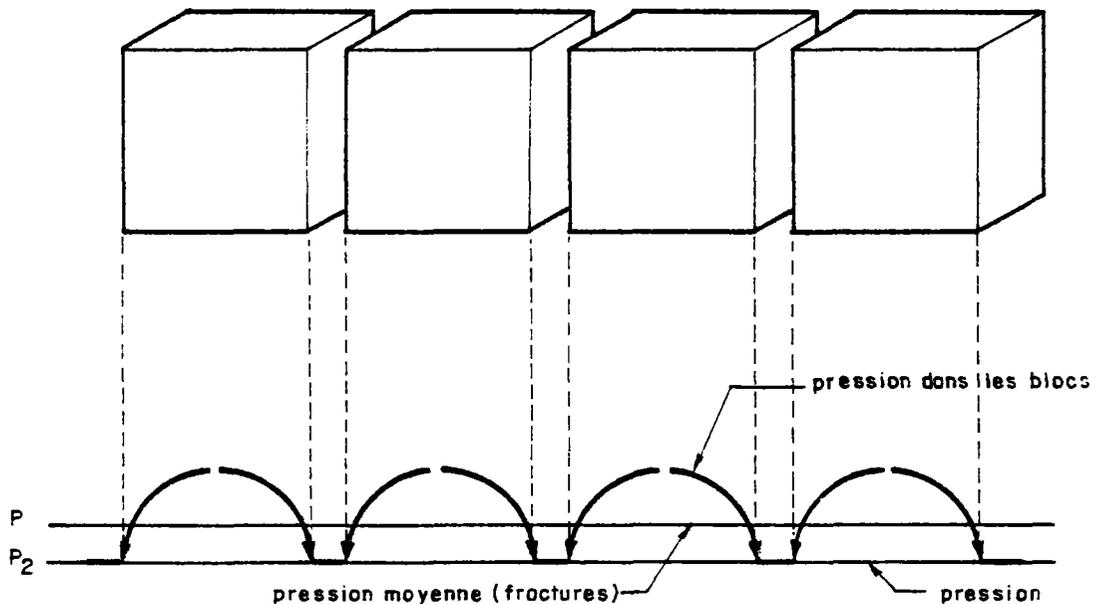


Figure 16 - Représentation schématique de la distribution des pressions dans le modèle de Warren & Root

L'écoulement entre les deux porosités est décrit par la formule :

$$\phi_1 r_1 \frac{\delta_{p1}}{\delta t} = \frac{\alpha k_1}{\mu} (p_2 - p_1)$$

C_1 : compressibilité totale de la porosité primaire

α : paramètre dépendant de la géométrie du bloc de matrice

k_1 : perméabilité de la matrice

μ : viscosité

L'écoulement du réservoir vers le puits (uniquement grâce au réseau de fractures) est décrit par :

$$\frac{k_{2x}}{\mu} \frac{\delta_{p2}}{\delta x^2} + \frac{k_{2y}}{\mu} \frac{\delta_{p2}}{\delta y^2} - \phi_1 C_1 \frac{\delta_{p1}}{\delta t} = \phi_2 C_2 \frac{\delta_{p2}}{\delta t}$$

k_{2x}, k_{2y} : perméabilité associée à la porosité secondaire, selon les directions x et y

C_2 : compressibilité totale de la porosité secondaire

La baisse de pression P_{wf} recherchée, dans le cas d'un réservoir infini, est de la forme :

$$P_{wf} = f(w, \lambda)$$

où :

$$w = \frac{\phi_2 C_2}{\phi_1 C_1 + \phi_2 C_2}$$

paramètre sans dimension décrivant la capacité d'emménagement de la porosité secondaire par rapport à celle de l'ensemble du système.

$$\lambda = \frac{\alpha k_1 r^2 w}{k_2}$$

paramètre d'écoulement interporosité, sans dimension.

\bar{k}_2 : perméabilité moyenne équivalente des fractures.

L'évolution des rabattements en fonction du temps au puits de pompage est traduite par les courbes suivantes (fig. 17).

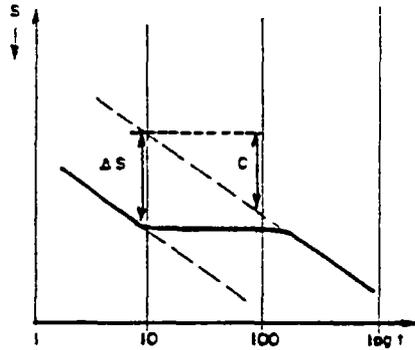


Figure 17 - Evolution des rabattements au puits de pompage - descente

On peut décrire cette courbe comme étant constituée de deux segments de droite parallèles, dont on peut calculer les équations respectives, séparés par une courbe de raccordement traduisant un palier.

De la même façon, on détermine P_{ws} décrivant le rabattement résiduel après arrêt du pompage. Les courbes obtenues ont la même allure que celles obtenues lors du pompage (fig. 18).

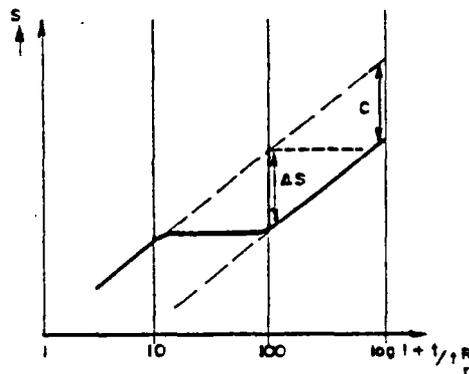


Figure 18 - Evolution des rabattements au puits de pompage : remontée

Une analyse de données expérimentales, réalisée par Crawford - Hagedorn - Pierce (1976) confirme le modèle de Warren & Root.

III.4 - LE MODELE DE ODEH (1965)

Ce modèle est sensiblement identique à celui de Warren & Root. Néanmoins, Odeh conclut que les effets de fractures sont négligeables et que la réponse en pression pour un réservoir fracturé uniformément est semblable à celle que l'on obtiendrait pour un réservoir homogène.

Malheureusement, Odeh fondait cette conclusion sur des calculs utilisant des données d'un réservoir fracturé particulier pour lequel, effectivement, ces effets étaient négligeables. Il concluait donc que les fractures pouvaient être négligées dans le cas d'une fracturation homogène.

A la suite de cet article, Warren & Root (1965) ont publié des données montrant que les effets d'écoulement entre fracture et matrice peuvent être prédominants sur la réponse en remontée de pression.

III.5 - LE MODELE DE KAZEMI (1969)

Kazemi assimile un réservoir fracturé naturellement à un système stratifié, composé d'une couche fine à forte conductivité, représentant la fracture, et d'une couche épaisse à faible conductivité et forte capacité d'emmagasinement, représentant la matrice.

Les réponses obtenues sont comparables à celles de Warren & Root et Kazemi conclut que le modèle de Warren & Root est valable pour des réservoirs à distribution de fracture uniforme et pour des grands contrastes de capacité d'écoulement entre matrice et fracture.

III.6 - LE MODELE DE BOULTON - STRELTSOVA (1977-1978)

Ce modèle considère (fig. 19) des blocs horizontaux séparés par des fissures d'extension illimitée dans toutes les directions du plan horizontal.

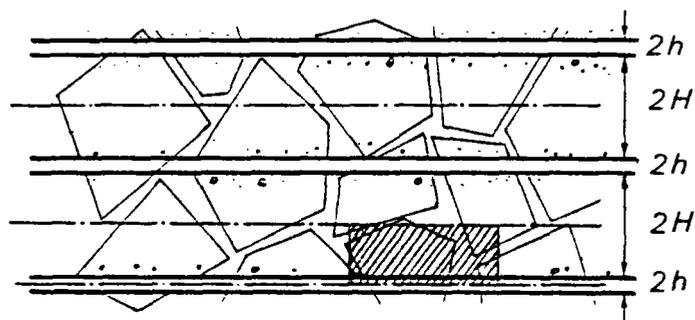


Figure 19 - Modèle de Boulton-Streltsova

III.6.1 - ETUDE DE L'ÉCOULEMENT CONFINÉ DANS UNE FORMATION FISSURÉE

a - Écoulement vertical dans les blocs poreux

- Hypothèses de départ

- Le puits de pompage traverse totalement l'aquifère considéré
- chaque unité bloc/fissure est composée d'un bloc d'épaisseur $2H$, de perméabilité k_2 , et d'une fissure horizontale d'épaisseur $2h$, de perméabilité k_1
- fissures et blocs sont compressibles
- le pompage s'effectue à débit constant
- le rayon du puits est supposé insignifiant
- l'écoulement s'effectue verticalement dans les fissures et obéit à la loi de Darcy
- la différence de pression entre blocs et fissures se traduit par des échanges de fluide entre les deux porosités.

Du fait qu'il n'existe pas de composante verticale d'écoulement traversant le plan médian d'un bloc ou d'une fissure, il est donc simplement nécessaire de considérer l'écoulement dans une unité bloc/fissure choisie entre deux lignes centrales d'un bloc et d'une fissure (fig. 20).

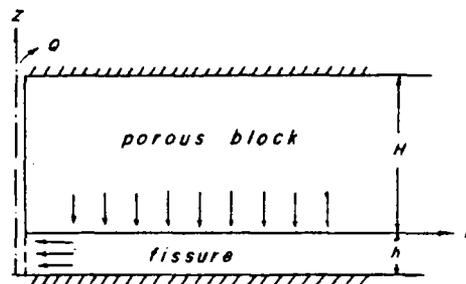
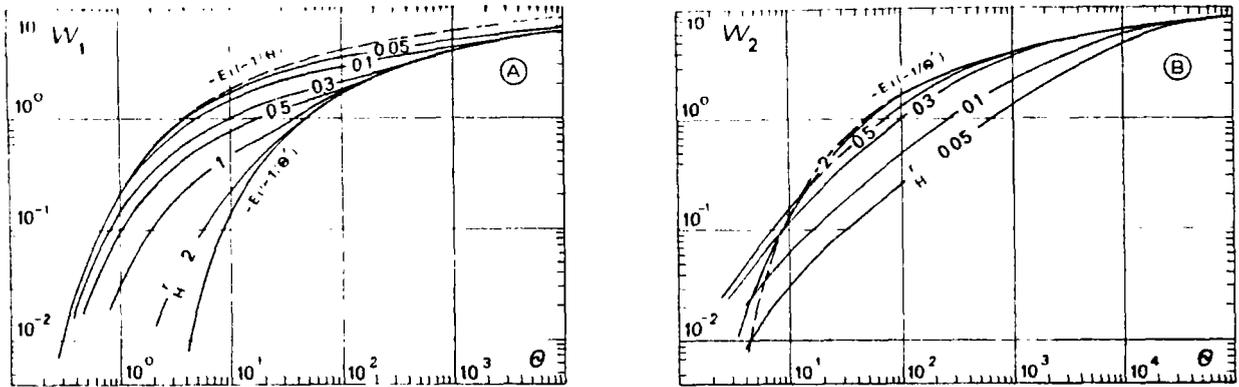


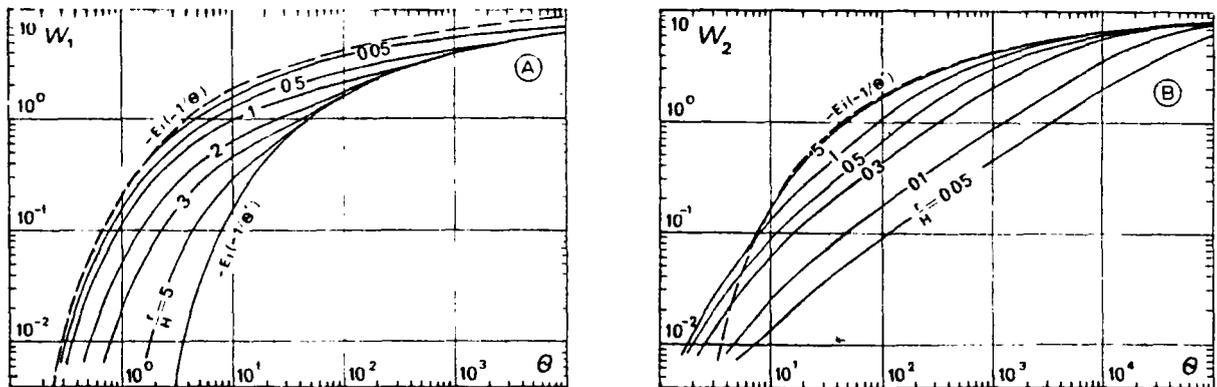
Figure 20 - Simplification du modèle

Après avoir déterminé les équations du rabattement dans le bloc rocheux et dans les fissures, les auteurs établissent des abaques de courbes-types (fig. 21 à 25) pour le rabattement dans la fissure, en fonction de deux paramètres :

$$b = \frac{K_2}{K_1} = \frac{T_2/\delta_2}{T_1/\delta_1} \quad C = T_2/T_1$$



**Figure 21 - Courbes-type décrivant le rabattement dans la fissure $W_1 = 4 \nabla T_{S1}/Q$ (A), et le rabattement dans le bloc poreux $W_2 = 4 \nabla T_{S2}/Q$ (B).
Paramètres : $b = 10^{-1}$ $c = 1$ ($T_1 = 1$, $T_2 = 1$, $S_1 = 10^{-4}$, $S_2 = 10^{-3}$)**



**Figure 22 - Courbes-type décrivant le rabattement dans la fissure $W_1 = 4 \nabla T_{S1}/Q$ (A), et le rabattement dans le bloc poreux $W_2 = 4 \nabla T_{S2}/Q$ (B).
Paramètres : $b = 10^{-2}$ $c = 10^{-1}$ ($T_1 = 10$, $T_2 = 1$, $S_1 = 10^{-4}$, $S_2 = 10^{-3}$)**

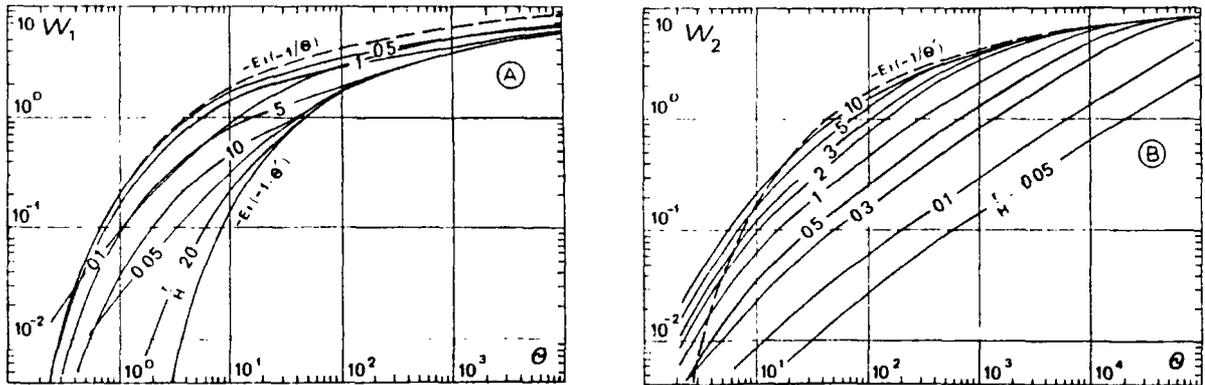


Figure 23 - Courbes-type décrivant le rabattement dans la fissure $W_1 = 4 \nabla T_{s1}/Q$ (A),
 et le rabattement dans le bloc poreux $W_2 = 4 \nabla T_{s2}/Q$ (B).
 Paramètres : $b = 10^{-3}$ $c = 10^{-2}$ ($T_1 = 100$, $T_2 = 1$, $S_1 = 10^{-4}$, $S_2 = 10^{-3}$)

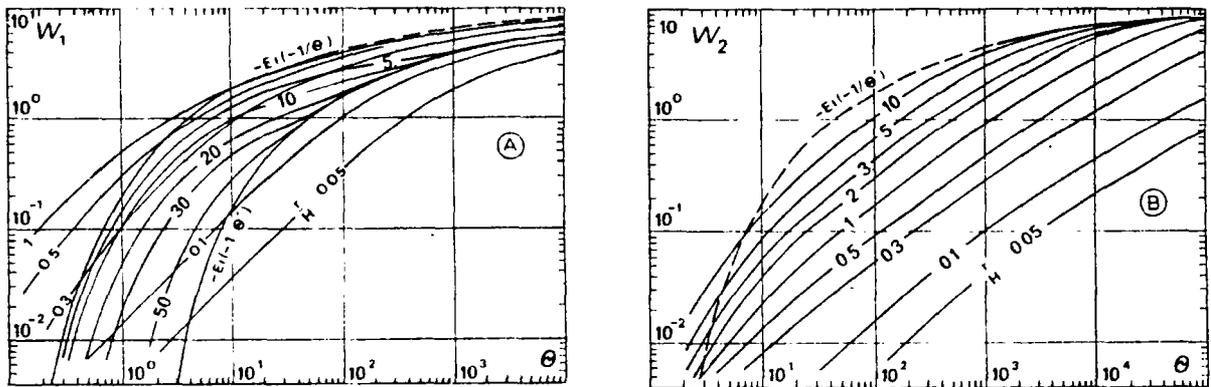


Figure 24 - Courbes-type décrivant le rabattement dans la fissure $W_1 = 4 \nabla T_{s1}/Q$ (A),
 et le rabattement dans le bloc poreux $W_2 = 4 \nabla T_{s2}/Q$ (B).
 Paramètres : $b = 10^{-4}$ $c = 10^{-3}$ ($T_1 = 1000$, $T_2 = 1$, $S_1 = 10^{-4}$, $S_2 = 10^{-3}$)

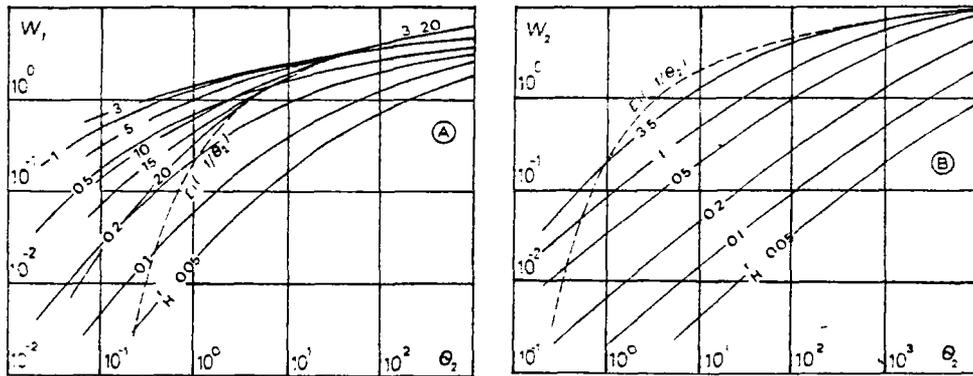


Figure 25 - Courbes-type décrivant le rabattement dans la fissure $W_1 = 4 \uparrow T_{s1}/Q$ (A), et le rabattement dans le bloc poreux $W_2 = 4 \uparrow T_{s2}/Q$ (B). La fissure est supposée être incompressible. $b = 0, c = 10^{-2}$

b - l'écoulement dans le bloc a des composantes horizontale et verticale

La démarche est identique à celle du cas précédent.

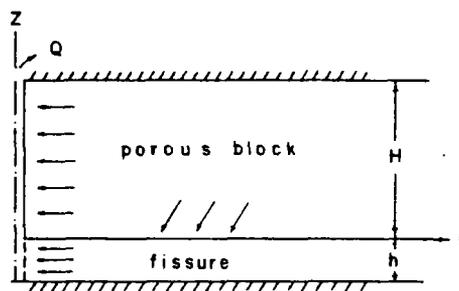


Figure 26 - Modèle simplifiée

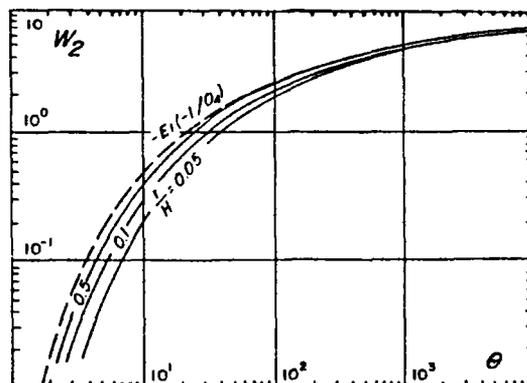


Figure 27 - Courbes de rabattement calculées pour différentes valeurs de $\theta = 4 T_1 t / S_1 r^2$ et r/H ; $C = T_2 / T_1 = 1, W_2 = 4 \uparrow T_{s2} / Q$

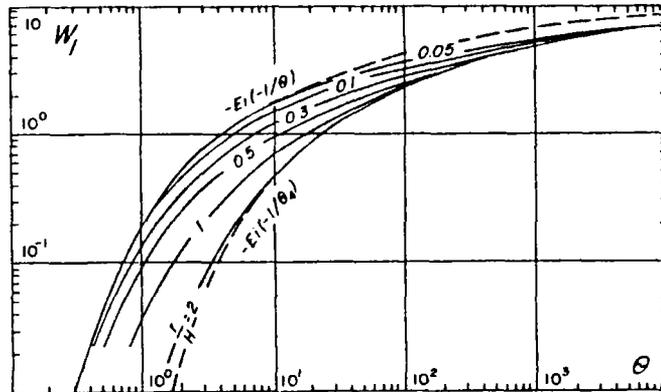


Figure 28 - Courbes de rabattement calculées pour différentes valeurs de $\theta = 4 T_1 t / S_1 r^2$ et r/H ; $C = T_2 / T_1 = 1$, $W_1 = 4 \uparrow T_{s1} / Q$

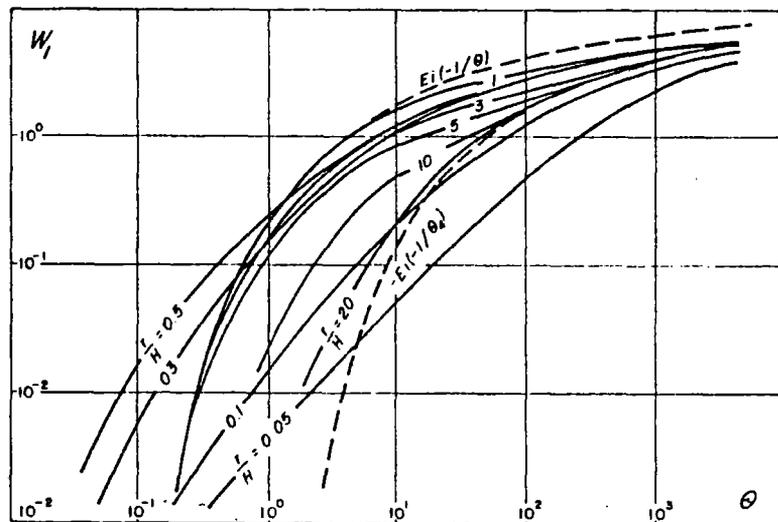


Figure 29 - Courbes de rabattement calculées pour différentes valeurs de $\theta = 4 T_1 t / S_1 r^2$ et r/H ; $C = T_2 / T_1 = 1$, $W_1 = 4 \uparrow T_{s1} / Q$

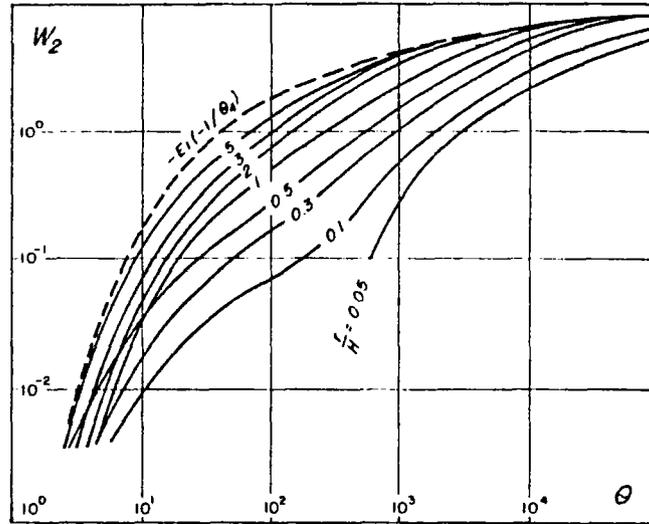


Figure 30 - Courbes de rabattement calculées pour différentes valeurs de $\theta = 4 T_1 t / S_1 r^2$ et r/H ; $C = T_2 / T_1 = 0,01$, $W_2 = 4 \uparrow T_{s2} / Q$

III.6.2 - ECOULEMENT NON CONFINE EN MILIEU FISSURE

Démarche identique à celle des cas précédents

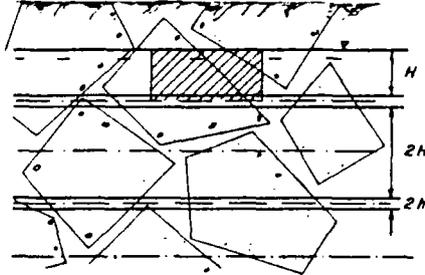


Figure 31 - Le niveau statique est confondu avec le plan médian d'un bloc

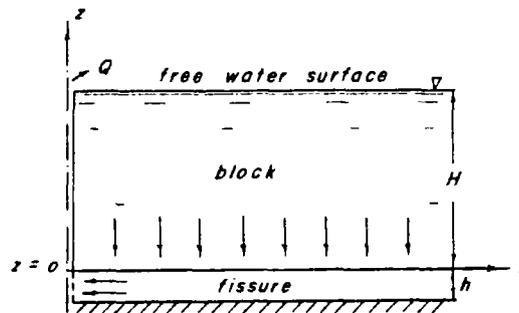


Figure 32 - Modèle simplifié

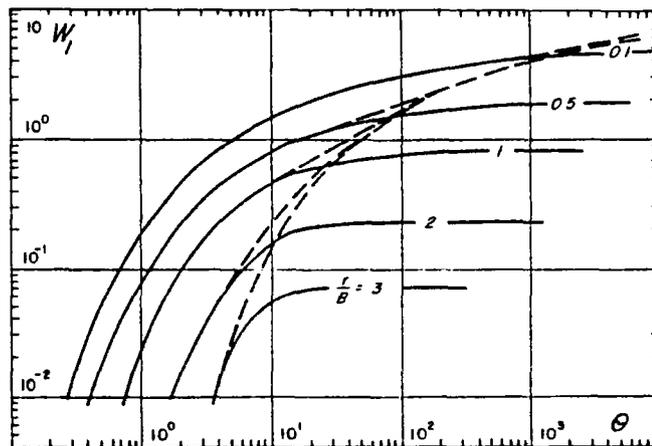


Figure 33 - Courbes-types calculées pour un rapport $S_1/S_2 = 0,1$ et pour différentes valeurs de r/B , $B = H/c$ et $\theta = 4 T_1 t / S_1 r^2$, $W_1 = 4 \pi T_1 s_1 / Q$

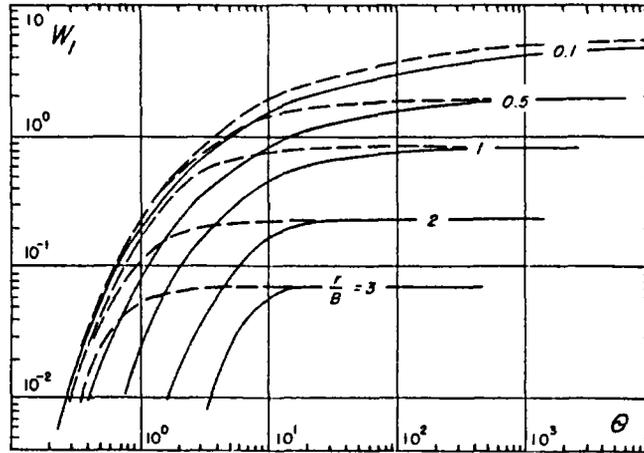


Figure 34 - Courbes-types calculées pour un rapport $S_1/S_2 = 0,1$ et pour différentes valeurs de r/B , $B = H/c$ et $\theta = 4 T_1 t / S_1 r^2$, $W_2 = 4 \nabla T_2 s_2 / Q$

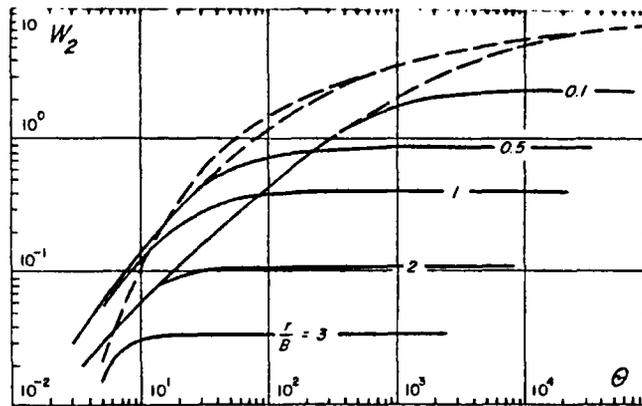


Figure 35 - Courbes-types calculées par rapport $S_1/S_2 = 0,1$ et pour différentes valeurs de r/B , $B = H/c$ et $\theta = 4 T_1 t / S_1 r^2$, $W_1 = 4 \nabla T_1 s_1 / Q$
 Comparaison avec les courbes de Boulton de "type A"

IV - LE MILIEU FISSURE EST CONSIDERE COMME UN MILIEU POREUX HOMOGENE ANISOTROPE

Dans l'expérience de Darcy, on admet implicitement que le coefficient de perméabilité K , ou encore la perméabilité intrinsèque k , sont des propriétés isotropes du milieu poreux indépendantes de la direction de l'espace ($v = k.i$) : ceci est rarement le cas en milieu fissuré pour lequel la **direction du gradient de charge et la vitesse d'écoulement ne sont plus confondues**. L'écoulement a tendance à suivre les directions de perméabilités les plus grandes et on est amené à considérer la perméabilité comme une **propriété tensorielle**, ce qui est la simple traduction mathématique de cette observation.

Par rapport à celle d'un milieu homogène, la conductivité augmente lorsque l'écoulement est parallèle aux fractures, alors qu'elle varie peu lorsque l'écoulement leur est perpendiculaire. La perméabilité maximale dans un milieu fissuré doit donc correspondre à la perméabilité de fracture, tandis que la perméabilité minimale doit représenter la perméabilité de matrice, en particulier lorsqu'il existe une direction prépondérante de fissuration.

Une telle méthode d'étude a été développée par Papadopulos (1965).

IV.1 - METHODE DE PAPADOPULOS

Le but de la méthode est d'établir une équation donnant la répartition du rabattement de la nappe autour d'un puits, dans lequel on pompe à débit constant, foré dans un aquifère fissuré considéré comme un milieu poreux, homogène et anisotrope.

A cet effet, on doit pouvoir disposer de données de pompages d'essai réalisés avec trois piézomètres.

IV.1.1 - PRINCIPE DE LA METHODE

L'expression du tenseur de transmissivité, en milieu homogène anisotrope et en écoulement bidimensionnel, est :

$$T = \begin{vmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{vmatrix}$$

(x, y) : repère de coordonnées ayant son origine au puits de pompage.

Il est possible d'utiliser la méthode de **Theis** (ou de **Jacob** quand le "régime de **Jacob**" est atteint) pour chaque piézomètre.

Le calage des ordonnées (ou la pente de la droite de **Jacob**) permet de calculer :

$$T = \sqrt{T_{xx} T_{yy} - T_{xy}^2}$$

Le calage des abscisses (ou la date d'intersection de la droite de **Jacob** avec l'axe des temps) permet de déterminer :

$$\frac{4 T^2}{S (y^2 T_{xx} - 2 xy T_{xy} + x^2 T_{yy})}$$

L'équation du régime transitoire, ou de **Theis**, s'écrit alors :

$$s = \frac{Q}{4 \pi \sqrt{T_{xx} T_{yy} - T_{xy}^2}} W(u'_{xy}) \quad (1)$$

$$\text{avec } u'_{xy} = \frac{4t}{S} \left[\frac{T_{xx} T_{yy} - T_{xy}^2}{y^2 T_{xx} + x^2 T_{yy} - 2 xy T_{xy}} \right] \quad (2)$$

et, pour $u'_{xy} > 10$, l'approximation logarithmique de **Jacob** devient :

$$s = \frac{0,183 Q}{\sqrt{T_{xx} T_{yy} - T_{xy}^2}} \log \left[\frac{2,25 t}{S} \left(\frac{T_{xx} T_{yy} - T_{xy}^2}{y^2 T_{xx} + x^2 T_{yy} - xy T_{xy}} \right) \right] \quad (3)$$

IV.1.2 - MODE OPERATOIRE : EXEMPLE DE LA METHODE DE THEIS

On procède à l'interprétation, pour chaque piézomètre, par la méthode d'identification, en utilisant la courbe-type de **Theis**. On définit ainsi trois couples (M, Ma) :

$$\begin{array}{cc} M \left\{ \begin{array}{l} s \\ 1/t \end{array} \right. & \text{courbe expérimentale} \\ Ma \left\{ \begin{array}{l} W(u'_{xy}) \\ u'_{xy} \end{array} \right. & \text{courbe-type} \end{array}$$

On reporte les trois couples de valeurs ($s, W(u'_{xy})$) dans l'équation (1) : on obtient trois valeurs de $(T_{xx} \cdot T_{yy} - T_{xy}^2)$ en principe très voisines.

On reporte les couples (u'_{xy}, t) dans l'équation (2). On obtient un système de trois équations dont la résolution fournit $S \cdot T_{xx}, S \cdot T_{yy}, S \cdot T_{xy}$.

On calcule S en reportant T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} exprimés en fonction de S dans les $(T_{xx} \cdot T_{yy} - T_{xy}^2)$ calculés précédemment.

S étant connu, on calcule T_{xx}, T_{yy}, T_{xy} à partir des valeurs de $S \cdot T_{xx}, S \cdot T_{yy}, S \cdot T_{xy}$.

IV.2 - INTERPRETATION D'UN POMPAGE D'ESSAI EN MILIEU ANISOTROPE EN UTILISANT PLUS DE TROIS PIEZOMETRES (Thiery, 1980)

Cette méthode reprend l'esprit de la méthode de **Papadopoulos** mais permet, grâce à la méthode des moindres carrés, d'utiliser tous les piézomètres dont on peut disposer à la fois pour obtenir ainsi une identification stable et fiable des directions de transmissivité principales et du coefficient d'emmagasinement.

V - LE MILIEU FISSURE EST CONSIDERE COMME UN MILIEU ISOTROPE AFFECTE D'UNE FISSURE UNIQUE

Des solutions permettant de représenter le comportement d'un puits de pompage en communication avec une fracture d'épaisseur négligeable, horizontale (**Gringarten et Ramey, 1974**), verticale (**Gringarten et al., 1974**), ou inclinée (**Cinco et al., 1975**).

Ces solutions considèrent des fractures à **conductivité infinie**, ou "à flux uniforme" (le débit par unité de surface de fracture est uniforme).

Dans ces différents cas, l'écoulement au début d'un essai à débit constant s'effectue de la matrice vers la fracture et perpendiculairement à celle-ci. La variation de pression au puits est alors proportionnelle à la racine carrée du temps, ce qui se traduit par une ligne droite de pente 0,5 sur graphique bilogarithmique de modules égaux.

Au fur et à mesure que l'essai se prolonge, le rabattement devient identique à celui prévu par la solution de Theis, à une constante près qui dépend du point de mesure et de la direction de fracture.

V.1 - FRACTURE VERTICALE UNIQUE (Gringarten et al., 1974)

V.1.1 - HYPOTHESES DE DEPART

- Aquifère homogène, isotrope et d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage
- aquifère d'extension latérale infinie
- épontes imperméables
- la libération de l'eau par le milieu poreux, consécutivement à une baisse de pression, est instantanée
- puits parfait
- rayon du puits négligeable
- débit pompé constant.

On suppose que le puits de pompage est situé au milieu d'une fissure verticale de faible épaisseur par rapport à sa longueur et à sa distance aux piézomètres d'observation (fig. 36, 37).

On admet par ailleurs que la section horizontale de la fissure est faible et n'induit pas d'effets de capacité sensibles. Pour les calculs, on considère que le débit par unité de surface de fracture est constant en tout point. La fissure a une perméabilité équivalente pratiquement infinie.

Dans ces conditions, le niveau piézométrique est donc pratiquement le même dans toute la fissure ; en pompage, le niveau d'eau va baisser partout de la même façon dans la fracture, induisant un écoulement de l'aquifère vers la fracture : cette fracture ouverte est une surface de production plane qui n'est en fait qu'une extension du puits lui-même, d'où la notion de "puits étendu" ("extended well" de Jenkins-Prentice, 1982 - fig. 38).

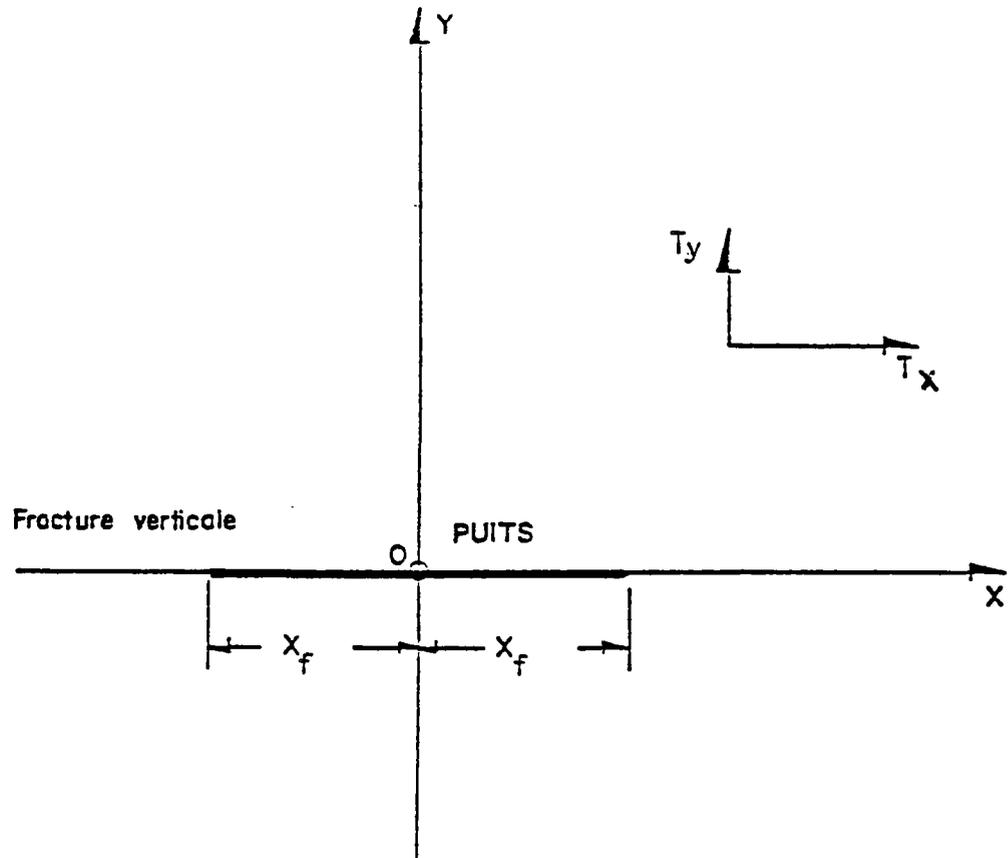


Figure 36 - Modèle de fracture verticale

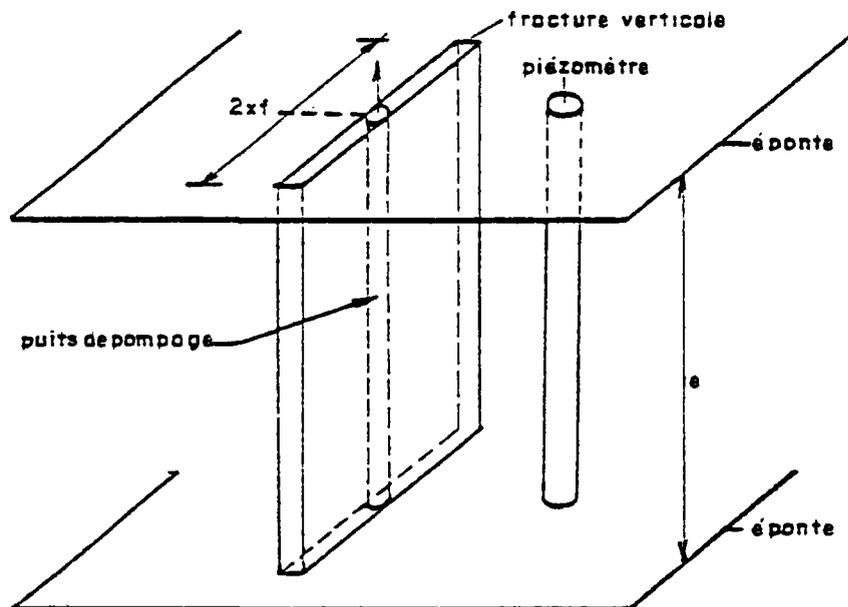


Figure 37 - Modèle de fracture verticale

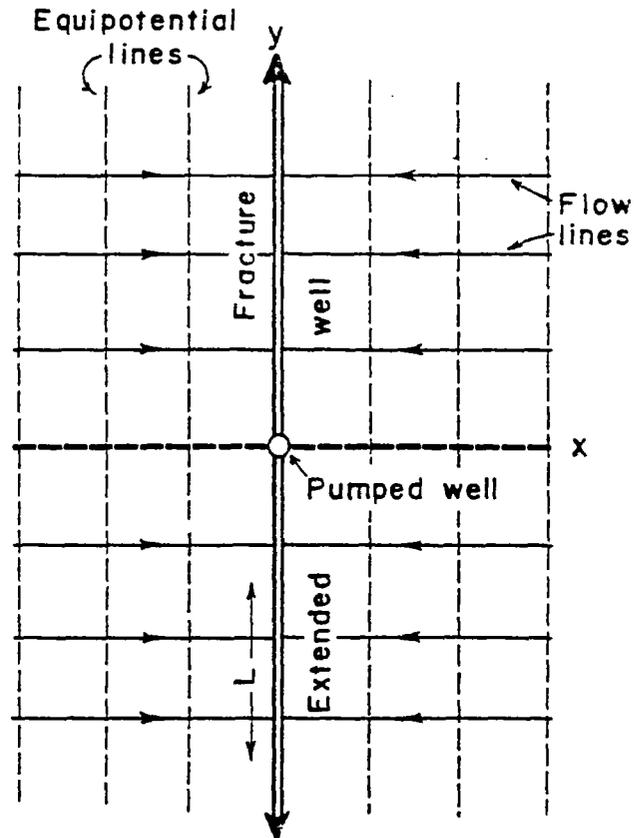


Figure 38 - Assimilation de la fracture ouverte à une extension du puits. Les lignes de courant sont parallèles entre elles et perpendiculaires au plan de fracture. Les lignes de flux sont parallèles entre elles ainsi qu'au plan de fracture. L'axe de la dépression coïncide avec l'axe de la fissure.

V.1.2 - PRINCIPE DE L'INTERPRETATION AU PUIITS DE POMPAGE

(Thiery - Vandenbeusch - Vaubourg, 1983)

Une courbe-type, construite à partir de variables réduites, illustre l'évolution du rabattement au puits de pompage, en coordonnées bilogarithmiques (fig. 39).

Le début de l'évolution du rabattement est représenté par une relation de la forme :

$$S = a\sqrt{t}$$

ce qui, en coordonnées bilogarithmiques, se traduit par une droite de pente 1/2, qui se maintient d'autant plus longtemps que :

- la fracture est étendue (X_f grand)
- la transmissivité est faible.

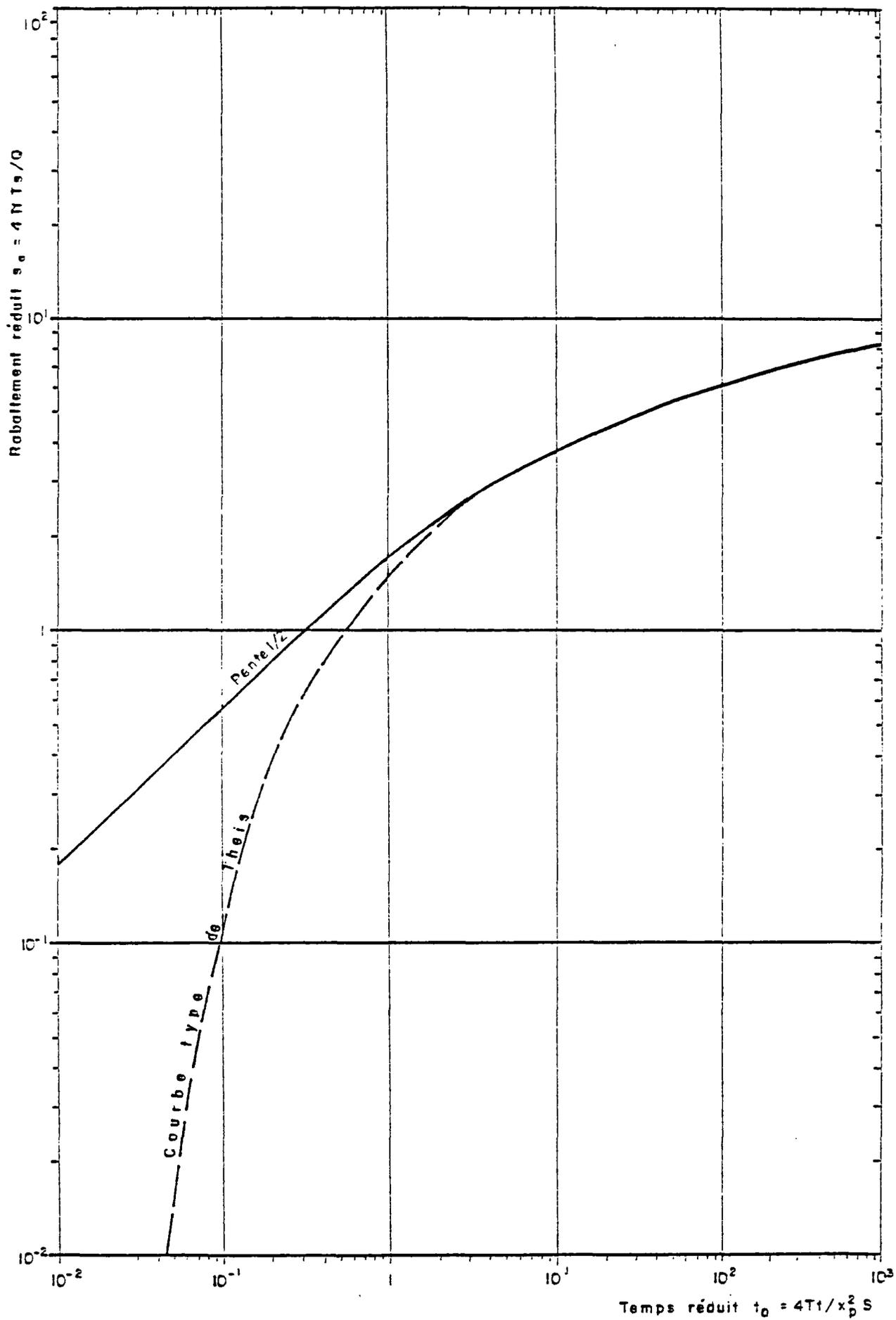


Figure 39 - Courbe-type : fracture verticale - Pompage au centre de la fracture verticale

- Mode opératoire

a - Correction à l'origine des pertes de charge singulières

Le rabattement, lorsque ces pertes de charge existent, a pour expression :

$$S = a \sqrt{t + s_0}$$

et ne se représente plus dans ce cas par une droite de pente 1/2 en coordonnées bilogarithmiques.

Ceci nécessite une correction à l'origine qui correspond à annuler :

- un décalage dans l'origine des temps
- un décalage dans l'origine des temps, et un effet de perte de charge ou de capacité.

b - Calcul de T et S

Après correction, on porte sur un papier bilogarithmique de même module que la courbe-type, les rabattements (ou les rabattements corrigés) en fonction du temps (corrigé s'il y a lieu).

On procède à l'interprétation par la méthode d'identification en relevant un point de coïncidence (M, M_a).

$$\begin{array}{ccc}
 M & \left\{ \begin{array}{l} s \\ a \end{array} \right. & M_a & \left\{ \begin{array}{l} s_a \\ t_a \end{array} \right. \\
 \text{courbe} & & \text{courbe-type} & \\
 \text{expérimentale} & & &
 \end{array}$$

$$T = \frac{Q}{4\pi} \frac{s_a}{s}$$

$$S \cdot X_f^2 = 4T \frac{t}{t_a} = \frac{Qt}{\pi t_a} \frac{s_a}{s}$$

En l'absence de piézomètres, les valeurs de S et X_f ne peuvent être dissociées. Seul le produit S · X_f² peut être calculé.

V.1.3 - PRINCIPE DE L'INTERPRETATION DANS LES PIEZOMETRES

(Thiery - Vandenbeusch - Vaubourg, 1983)

Des courbes-type, en variables réduites, ont été tracées en coordonnées logarithmiques pour représenter le rabattement en un piézomètre situé :

- dans l'axe de la fracture (fig. 40)
- sur l'axe perpendiculaire à la fracture (fig. 41)
- dans une direction à 45° de l'axe de la fracture (fig. 42)

Courbes-types : rabattements réduits (s_a) exprimés en fonction du temps réduit (t_a).

$$s_a = \frac{4 \pi T}{Q} s. \quad t_a = \frac{4 T t}{X^2 S}$$

graduées en X_D :

$$X_D = \frac{X}{X_f}$$

X étant la distance entre le puits de pompage (supposé au milieu de la fracture) et le piézomètre.

On remarque que, dès que X_D est supérieur à 3 ou 5, il n'y a plus qu'une seule courbe : la courbe de Theis. L'influence de la fissure verticale n'est donc plus perceptible au-delà d'une distance X supérieure à 3 ou 5 fois sa demi-longueur X_f .

- Mode opératoire

On trace les rabattements s en fonction du temps t sur du papier en coordonnées bilogarithmiques de même module que celui de la courbe-type.

On procède à l'interprétation par la méthode d'identification en relevant un point de coïncidence (M, Ma).

Si on dispose de plusieurs piézomètres, on essaiera de déterminer, de manière unique, les dimensions et la position de la fissure unique équivalente

- détermination de T et S

$$T = \frac{Q}{4 \pi} \frac{s_a}{s}$$

$$S = \frac{4T}{X^2} \frac{t}{t_a} = \frac{Q}{\pi X^2} \cdot \frac{t}{t_a} \cdot \frac{s_a}{s}$$

- calcul de X_f

$$X_f = \sqrt{\frac{(S \cdot X^2)}{S}}$$

← terme calculé au puits de pompage
↑
calculé au piézomètre

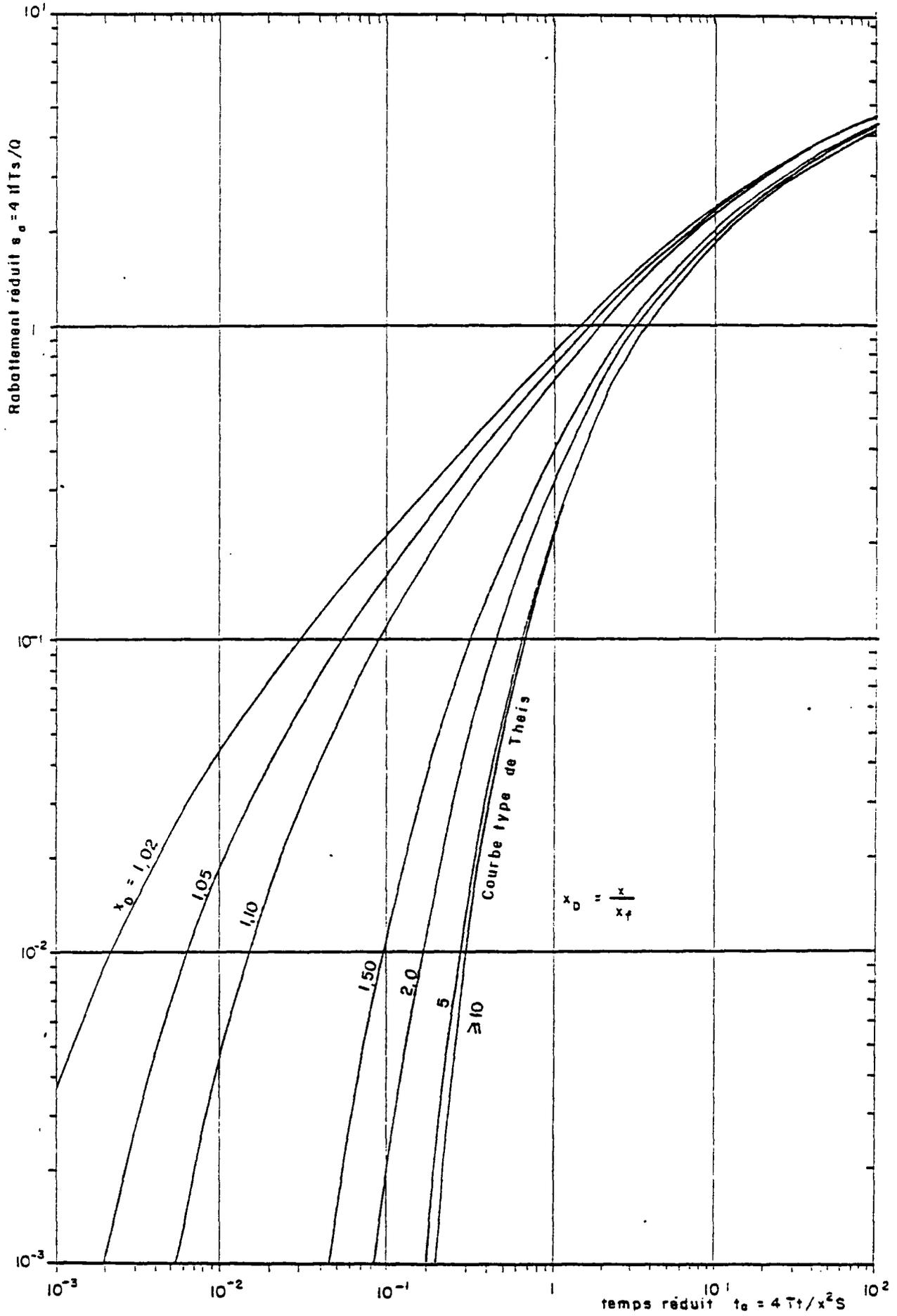


Figure 40 - Courbe-type : fracture verticale - Piézomètre dans l'axe de la fracture

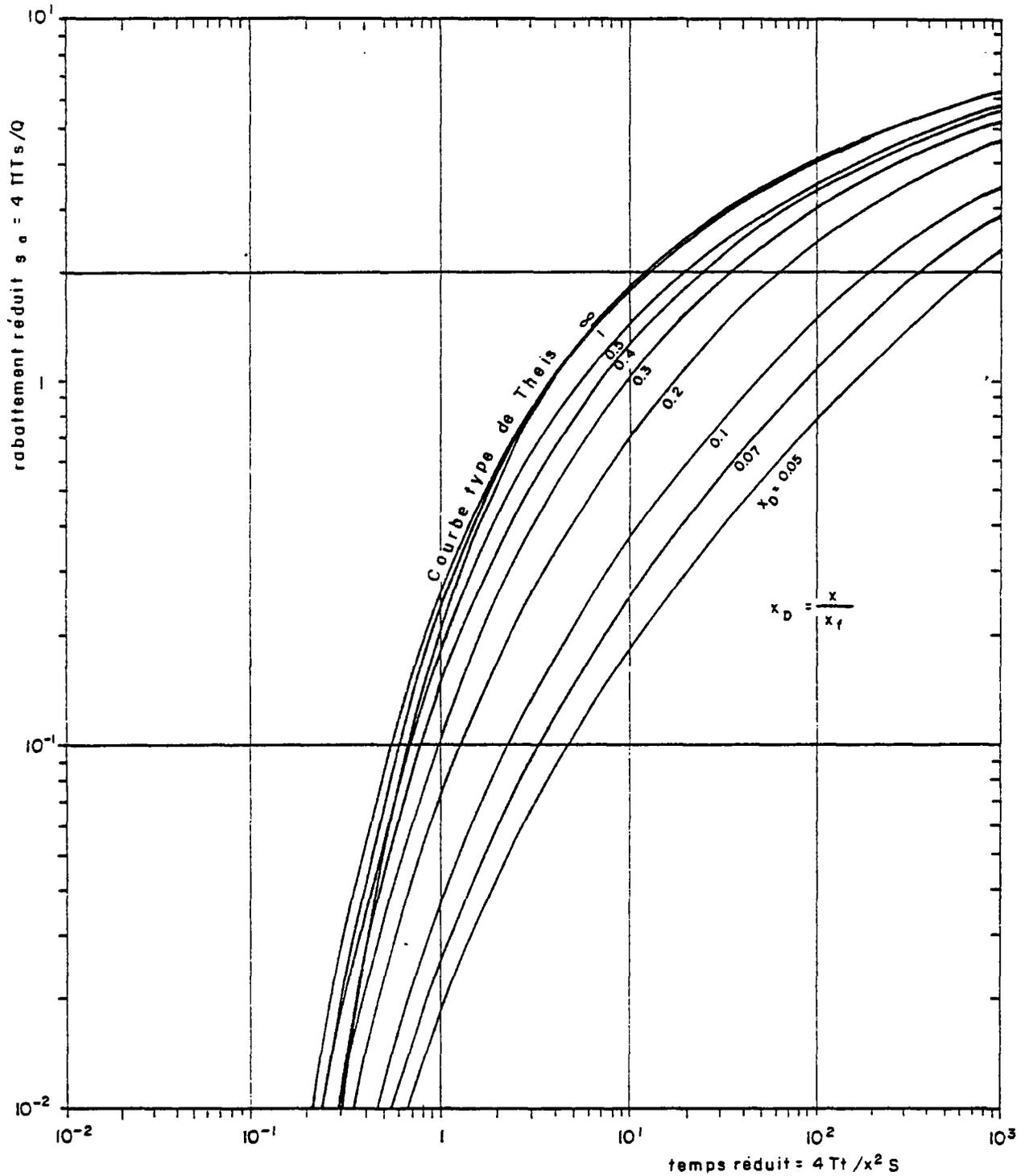


Figure 41 - Courbe-type : fracture verticale - Piézomètre situé sur l'axe perpendiculaire à la fracture

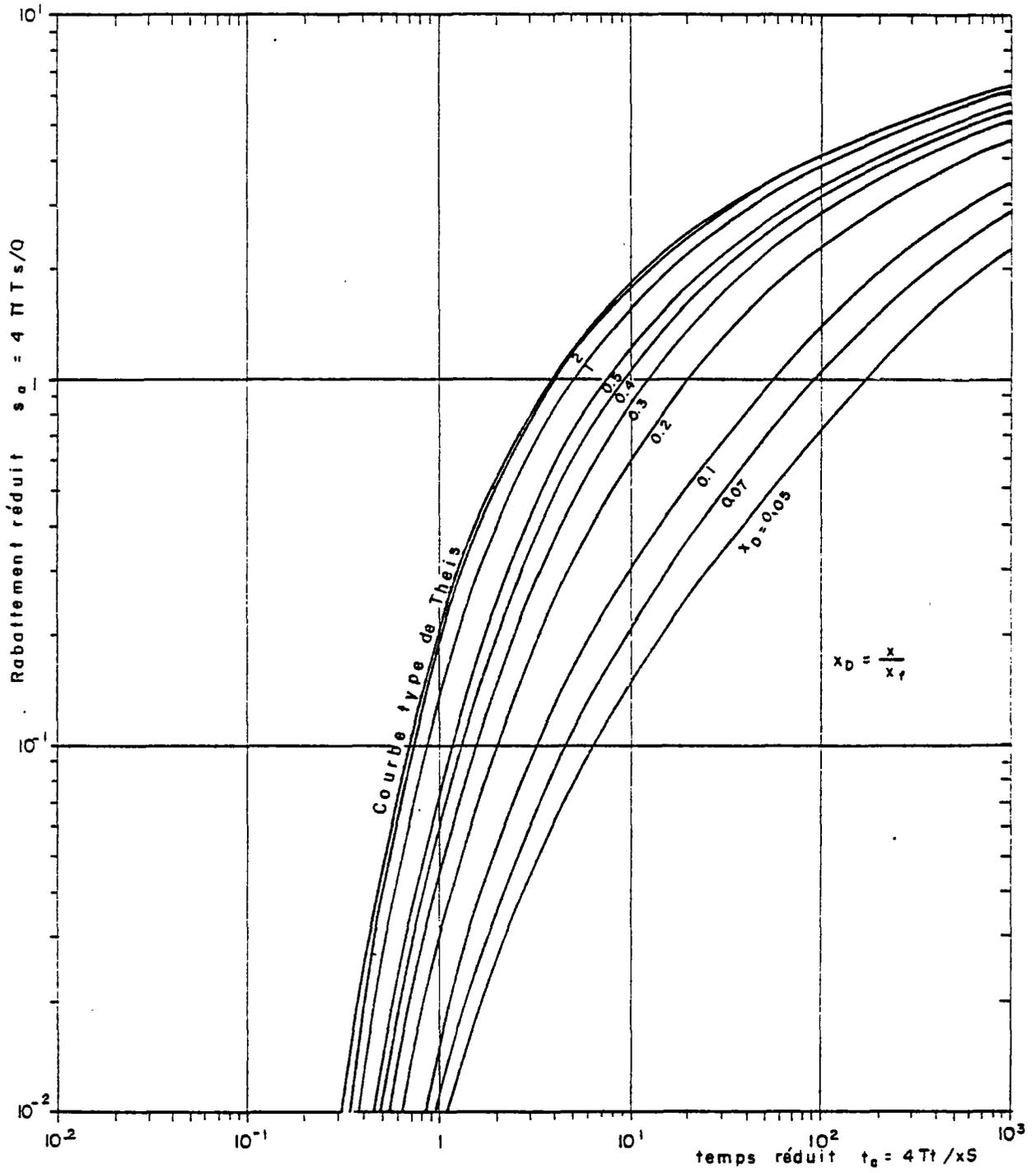


Figure 42 - Courbe-type : fracture verticale - Piézomètre situé à 45° par rapport à l'axe de la fracture

**V.1.4 - EXPRESSION DES SOLUTIONS ANALYTIQUES DE LA FORMULE DE
Gringarten (A.C.) (Leblanc - Thiery, 1985)**

La formule générale donnée par Gringarten (A.C.), par utilisation des formules de Green, s'écrit :

$$s_d = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^{T_x t / (S \cdot x_f^2)} \left[\operatorname{erf} \frac{1 - x/x_f}{2\sqrt{\tau}} + \operatorname{erf} \frac{1 + x/x_f}{2\sqrt{\tau}} \right] \frac{e^{-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{y}{x_f} \right)^2 \frac{T_x}{T_y}}}{\sqrt{\tau}} d\tau$$

avec :

$$s_d = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{T_x \cdot T_y}}{Q} \cdot S = \frac{4 \cdot \pi \cdot T}{Q} S$$

en notant $T = \sqrt{T_x \cdot T_y}$ moyenne géométrique des
transmissivités principales

- τ : variable muette d'intégration
- t : Temps (T)
- s_d : Rabattement adimensionnel
- s : Rabattement (L)
- x, y : Coordonnées du point d'observation (L) par rapport au puits de pompage, l'axe de la fracture correspondant à l'axe des x
- x_f : Demi-longueur de fracture (L)
- T_x : Transmissivité selon l'axe de la fracture (L^2/T)
- T_y : Transmissivité perpendiculairement à l'axe de la fracture (L^2/T)
- S : Coefficient d'emménagement (adimensionnel)
- Q : Débit prélevé au puits de pompage (L^3/T)
- erf : Fonction "erreur"
- W : Fonction "puits"

V.1.4.1. - Solution analytique au puits de pompage

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases}$$

Après intégration par parties, la solution analytique obtenue a pour expression :

$$s_d = \sqrt{\pi} \sqrt{t_d} \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{t_d}} + W\left(\frac{1}{t_d}\right)$$

$$t_d = \frac{4 \cdot T_x \cdot t}{x_f^2 S} \quad \text{temps adimensionnel}$$

- **Remarque 1.** Si t_d est grand :

$$\operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{t_d}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{1}{\sqrt{t_d}}} e^{-\tau^2} d\tau = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{1}{t_d}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_d}} = \frac{2}{\sqrt{\pi} \sqrt{t_d}}$$

$$\text{d'où : } s_d = 2 + W \left(\frac{1}{t_d} \right)$$

c'est-à-dire l'équation de Theis (à la distance équivalente X_f) + une constante (égale à 2).

- **Remarque 2**

a - Si on modifie X_f et T_x , tout en ne modifiant pas le rapport $S \cdot X_f^2 / T_x$, le rabattement réduit s_d à une date donnée t est inchangé.

b - Si de plus on modifie T_x et T_y sans modifier $T = \sqrt{T_x \cdot T_y}$, le rabattement réel s à une date donnée t est inchangé.

V.1.4.2 - Solution analytique pour un piézomètre situé dans l'axe de la fracture

$$y = 0$$

Après intégration par parties, la solution analytique obtenue a pour expression :

$$s_d = \frac{1 - x/x_f}{2} \cdot \left[\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{t_{d-}} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{t_{d-}}} \right) + W \left(\frac{1}{t_{d-}} \right) \right] \\ + \frac{1 + x/x_f}{2} \cdot \left[\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{t_{d+}} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{t_{d+}}} \right) + W \left(\frac{1}{t_{d+}} \right) \right]$$

avec :

$$t_{d-} = 4 T_x t / (x_f - x)^2 \cdot S$$

$$t_{d+} = 4 T_x t / (x_f + x)^2 \cdot S$$

On vérifie bien que :

. a si $x = 0$, $t_d^- = t_d^+ = 4 T x t / x^2 \cdot S$

d'où : $s_d = \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{t_d} \operatorname{erf} (1 / \sqrt{t_d}) + W (1/t_d)$

qui est bien l'expression au centre de la fissure.

. b si $x \rightarrow \infty$

$t_d^- = t_d^+ = 4 T x t / x^2 \cdot S = t_{dp}$ (temps adimensionnel de Theis pour un piézomètre).

d'où :

$$s_d = \sqrt{\pi} \sqrt{4T_x t / x^2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{T t / S}} \right) + W \left(\frac{1}{t_{dp}} \right)$$

qui tend bien vers la solution de Theis correspondant à un point situé à la distance x du centre de la fissure.

V.2 - FISSURE HORIZONTALE UNIQUE (Gringarten - Ramey, 1974)

La démarche suivie est semblable à celle utilisée pour le cas précédent.

V.2.1 - HYPOTHESES SUPPLEMENTAIRES

- Le forage traverse, en son centre, une fissure circulaire, de rayon r_f , située à mi-hauteur de la couche aquifère (fig. 40)
- la fissure est de faible épaisseur par rapport à son rayon et à l'épaisseur e de l'aquifère
- le débit est capté par la fissure et non par le puits
- la perméabilité équivalente de la fissure est infinie
- la charge est égale en tout point de la fissure à celle existante dans le puits.

V.2.2 - PRINCIPE DE L'INTERPRETATION AU PUIITS DE POMPAGE

Semblable au cas précédent, X_f étant remplacé par r_f .

Courbe-type : figure 44.

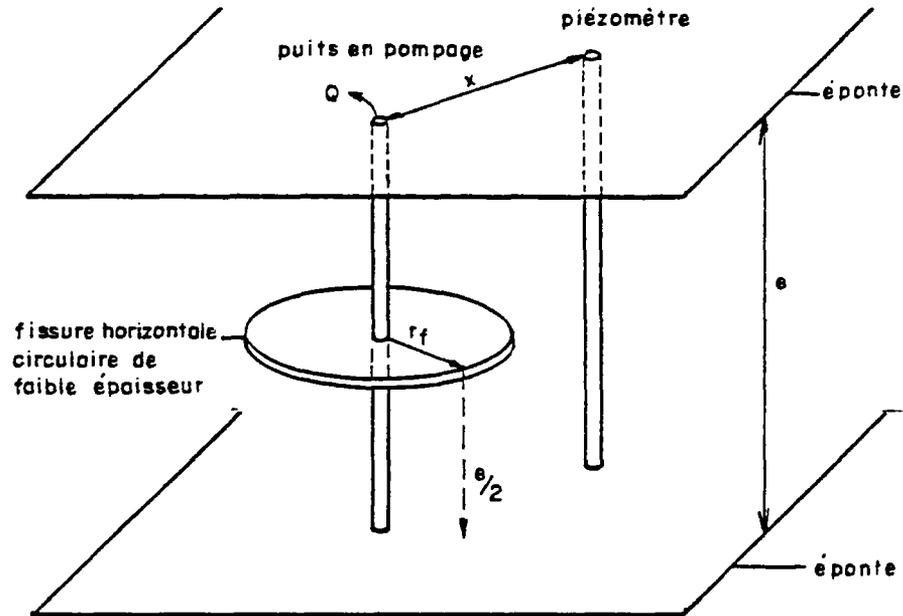


Figure 43 - Modèle de fracture circulaire horizontale

- Mode opératoire

. a - Correction à l'origine

Semblable au cas précédent

. b - Calcul de T et S

Semblable au cas précédent.

- X_f remplacé par r_f
- Détermination de T et S - r_f^2 .

V.2.3 - PRINCIPE DE L'INTERPRETATION AU PIEZOMETRE

Courbe-type : figure 45.

Les variables réduites sont identiques à celles du cas précédent.

- Calcul de T et S
- Calcul de r_f .

V.3 - FISSURE OBLIQUE

Cinco et al., 1975 - Articles non reçus.

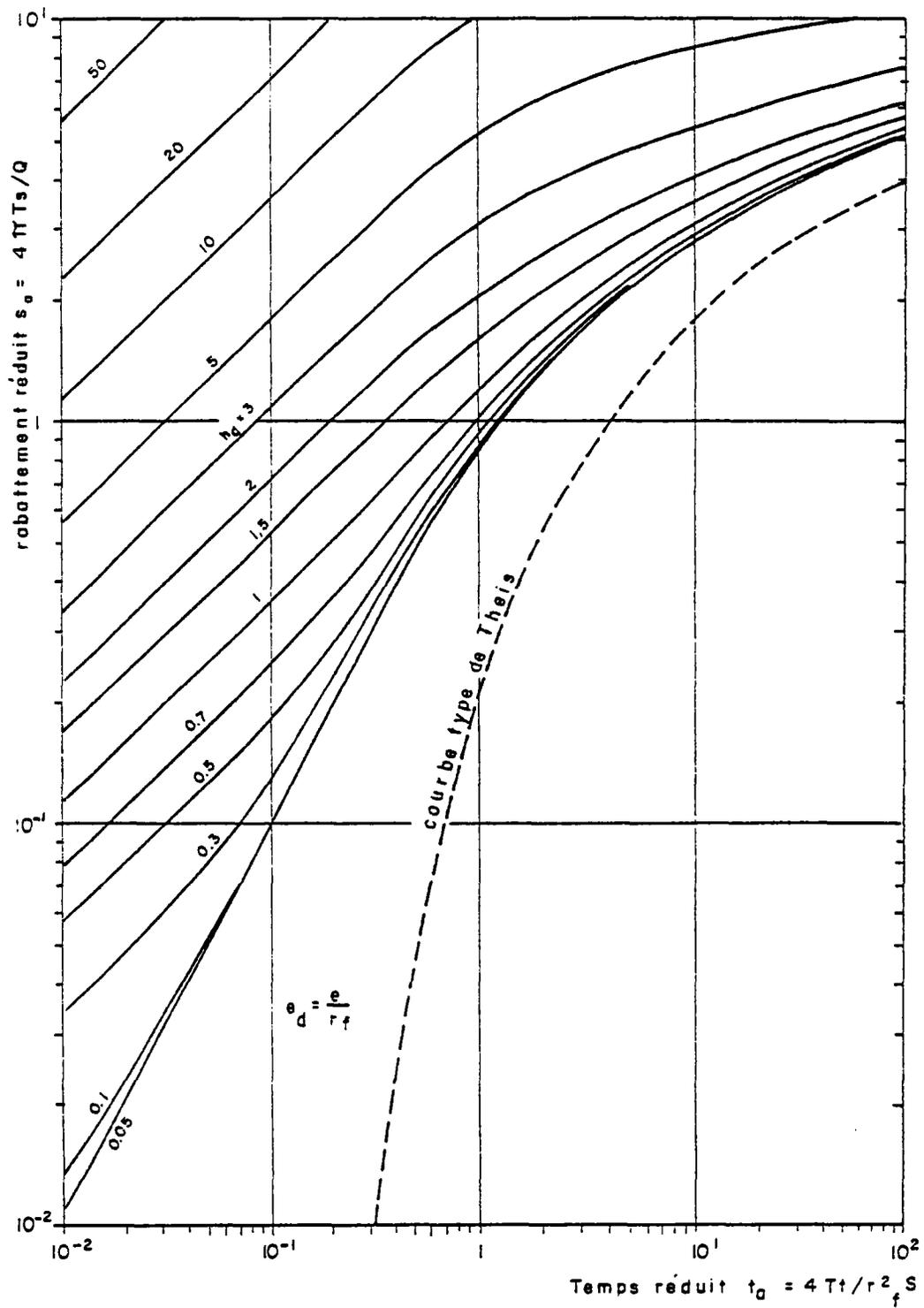


Figure 44 - Courbe-type : fracture circulaire horizontale -
Puits de pompage

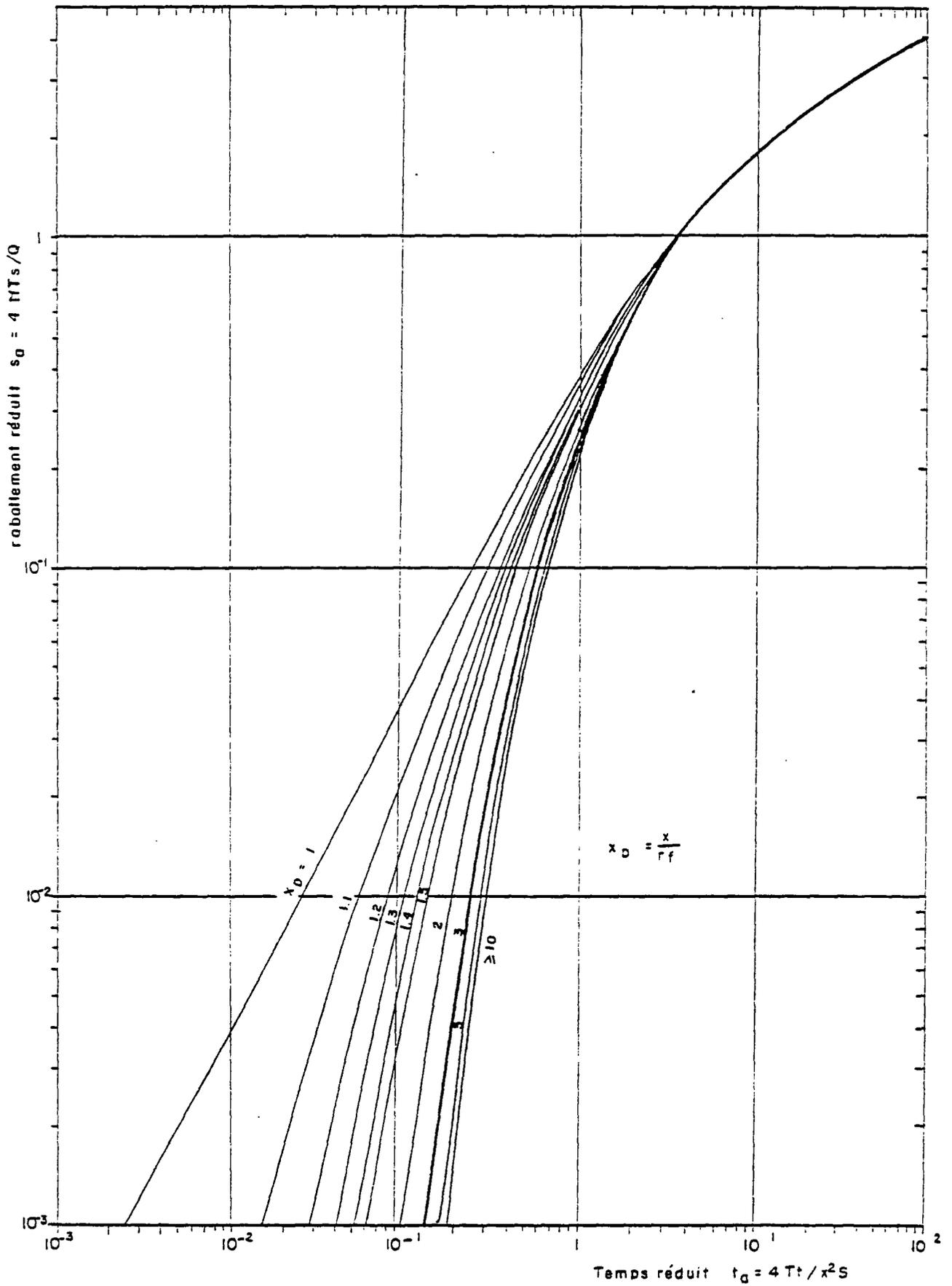


Figure 45 - Courbe-type : fracture circulaire horizontale -
Rabattement dans un piézomètre

VI - ARTICLES TRAITANT PLUS PARTICULIEREMENT DE LA SIMULATION NUMERIQUE DE L'EXPLOITATION DES RESERVOIRS FISSURES

Les différents auteurs y reprennent généralement les modèles de base décrits précédemment, ou des variations proches.

VI.1 - KIRALY (1971)

Kiraly présente une étude des relations existant entre la géométrie de fracture et le tenseur. L'auteur propose de simuler chaque tenseur de perméabilité par deux familles de fractures orthogonales dont on choisit, pour chaque système :

- f_i : nombre de fractures par mètre
- n_i : normale au plan de chaque fracture
- d_i : ouverture des fractures

et ceci pour $N = 2$ systèmes de fractures.

Si l'on suppose les hypothèses suivantes :

- écoulement dans les fissures de type Darcy
- fissures planes et continues dans un volume élémentaire
- conductivité hydraulique isotrope selon le plan de fissure.

La perméabilité a pour expression, dans un repère d'axes (e_1, e_2) (les normales aux deux familles de fractures sont parallèles à e_1 et e_2) :

$$K_e = \sum_{i=1}^N K_i = \frac{g}{12\nu} \sum_{i=1}^N f_i d_i^3 \left[I = n_i \otimes n_i \right]$$

En changeant la géométrie de fracture de place en place, on pourra simuler le champ hétérogène anisotrope de perméabilité d'un aquifère.

La matrice K_e est alors réécrite dans un nouveau repère (g_1, g_2), après rotation d'un angle α :

$$K_g = A K_e A^{-1} \quad \left| \begin{array}{cc} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{array} \right|$$

L'étude a été réalisée en deux dimensions, et le modèle est **analogique électrique** (papier conducteur).

VI.2 - NARASIMHAN (1982)

L'auteur remplace les équations intégrales, généralement utilisées dans le cas des conceptualisations classiques du milieu fissuré, par des équations de discrétisation fondées sur la méthode des différences finies.

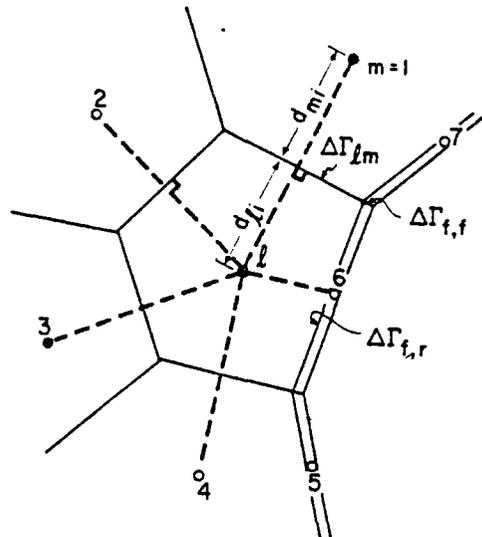


Figure 46 - Schéma de discrétisation spatiale pour la méthode des différences finies

- Application de la méthode à quelques systèmes fracturés

a - Puits interceptant une fracture horizontale unique
(programme Terzaghi)

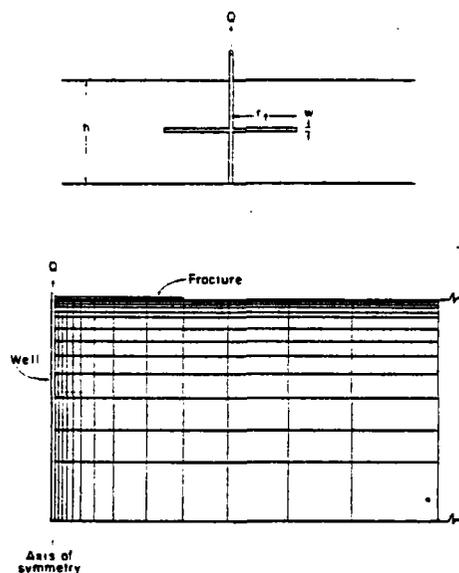


Figure 47 - Modèle de fracture horizontale unique

Les résultats obtenus sont semblables à ceux de la solution analytique de Gringarten et Ramey.

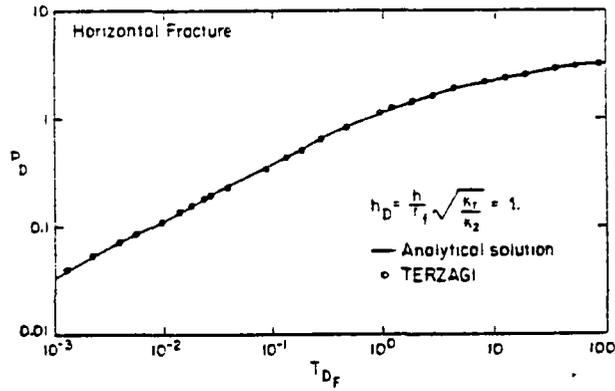


Figure 48 - Comparaison des résultats des solutions analytiques et numérique

. b - Puits interceptant une fracture verticale unique

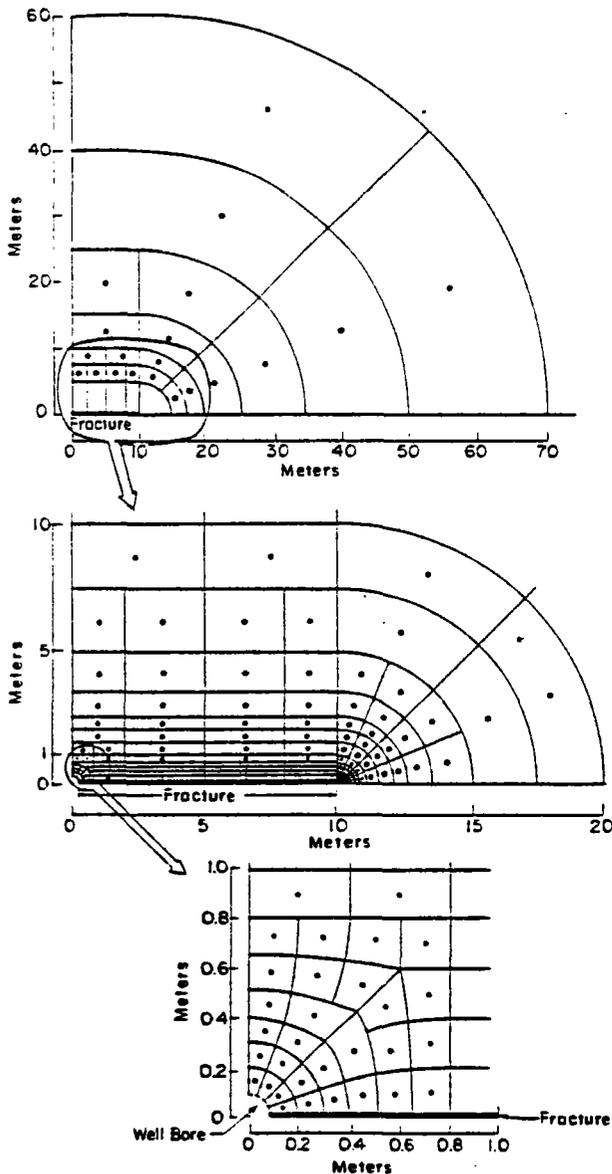


Figure 49 - Modèle de fracture verticale unique

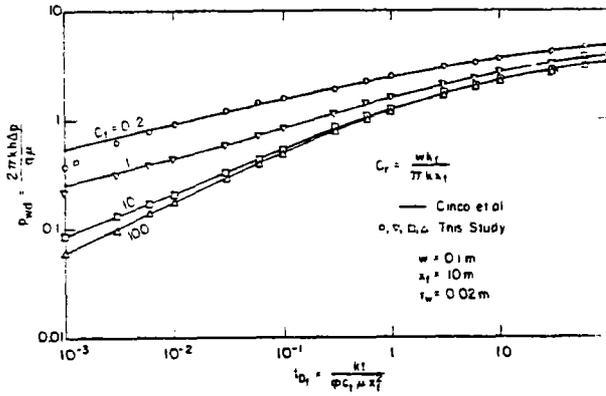


Figure 50 - Comparaison des résultats des solutions analytique (Cinco et al.) et numérique

VII - KOHUT ET AL. (1983) : UN EXEMPLE D'EFFETS DE POMPAGE DANS UN TERRAIN GRANITIQUE FRACTURE

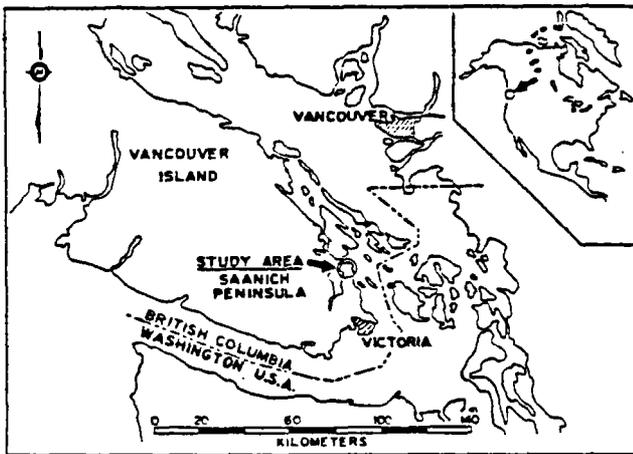


Figure 51 - Localisation de la zone d'étude

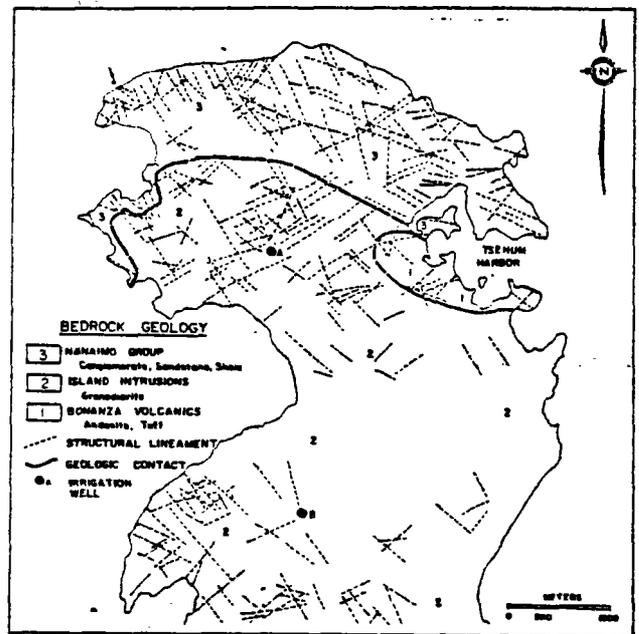


Figure 52 - Localisation de la zone d'étude

VII.1 - POMPAGE EN SITE A (fig. 53 et 54)

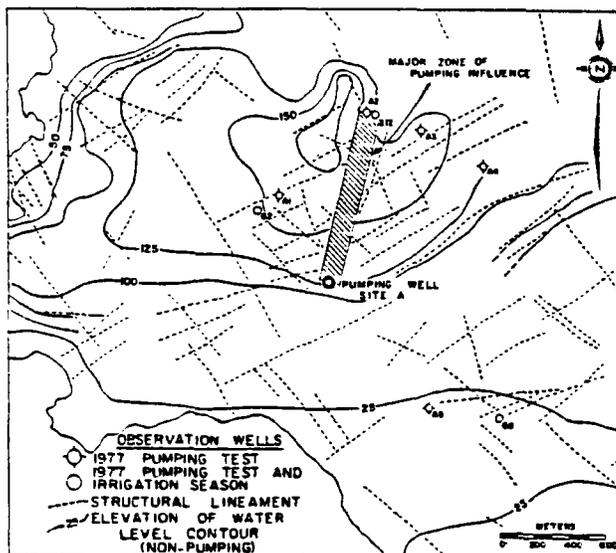


Figure 53 - Effet directionnel du pompage en site A

Les résultats du pompage d'essai ont montré un effet majeur le long d'une zone étroite qui n'est parallèle avec aucune des deux directions principales de fracturation. Le rabattement semble avoir une extension préférentielle selon la direction du gradient piézométrique local.

De plus, les piézomètres qui sont le plus affectés par le pompage sont localisés sur la région topographique et piézométrique séparant deux bassins versants.

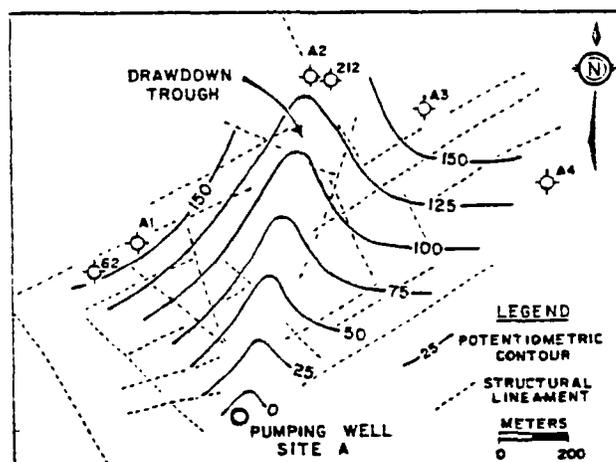


Figure 54 - Surface piézométrique, après 18,5 mn de pompage

Cet axe longitudinal, qui correspondrait à l'axe de transmissivité maximale, semble être parallèle à la bissectrice de l'angle obtu que forment les deux familles de fractures.

Nota : Selon Snow (1969), les directions des axes de perméabilité sont liés aux intersections des fractures et non aux fractures elles-mêmes.

VII.2 - POMPAGE EN SITE B (fig. 55)

Observations semblables au cas précédent, mais l'axe longitudinal obtenu est parallèle à la bissectrice de l'angle aigu que forment les deux familles de fractures.

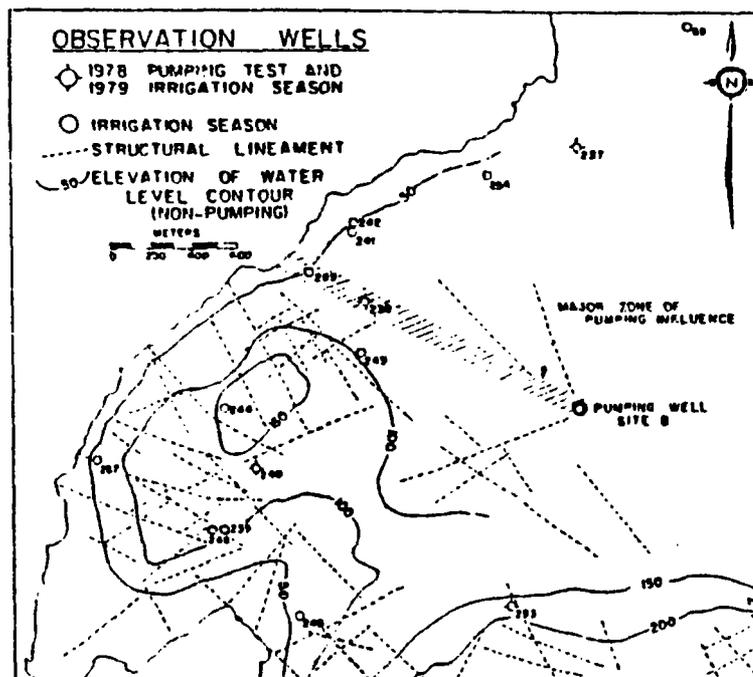


Figure 55 - Effet directionnel du pompage en site B

BIBLIOGRAPHIE

- Andersson (J.), Shapiro (A.M.), Bear (J.)** 1984.- A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information.- *Water Resour. Res.*, 20, n°1, p. 79-88.
- Assouma (D.)** 1982.- Analyse statistique des facteurs influençant la productivité des forages hydrauliques en région de socle au Togo.- Rapport DEA -Univ. Orléans.
- Ausseau (J.Y.), Kanehiro (B.), Sauty (J.P.)** 1984.- Modélisation des transferts de masse dans un milieu fracturé. Analyse bibliographique et présentation du programme "MODEL".- Rapport BRGM 84 SGN 175 EAU.
- Baca (R.G.), Arnett (R.C.), Langford (D.W.)** 1984.- Modelling fluid flow in fractured-porous rock masses by finite element technique.- *Basalt waste Isolation Project WA, USA.- Int. j. numer. methods fluid*, GBR, 4, n°4, p. 337-348.
- Bannerman (R.R.)** 1984.- Some critical issues with monitoring crystalline rock aquifers for groundwater management in rural areas.- *AISH*, n°144, p. 47-56.
- Barenblatt (G.E.), Zhelton (L.P.), Kochina (L.N.)** 1960.- Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks.- *J. appl. Math. Mech. Engl. Transl.*, 24 (5), p. 1286-1303.
- Barker (J.A.)** 1984.- Pumping tests using large diameter observation wells.- *J. Hydrol.*, 67, p. 375-379.
- Bertrand (L.), Feuga (B.), Noyer (M.L.), Thiery (D.)** 1980.- Hot Dry Rocks.- Contribution à la méthodologie de la détermination des caractéristiques hydrauliques des milieux rocheux fracturés naturellement ou artificiellement.- Rapport BRGM 80 SGN 029 GEG.
- Bertrand (L.), Gringarten (A.C.)** 1978.- Détermination des caractéristiques hydrauliques des aquifères fissurés par pompage d'essai en régime transitoire.- Application aux nappes de la craie.- Rapport BRGM 78 SGN 669 GEG.

- Black (J.H.) 1984.-** Treating granites as fissured porous media.- Field measurements in geomechanics.- International symposium, Zurich, NLD, Rotterdam : A.A. Balkema, 2, p. 1299-1308.
- Boulton (N.S.) 1954.-** The drawdown of the water-table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation.- Inst. of Civil Eng., Proc., t. 3 (part 3) n°2, p. 564-579.
- Boulton (N.S.), Streltsova (T.D.) 1978.-** Unsteady flow to a pumped well in an unconfined fissured aquifer.- J. Hydrol, 37, p. 349-363.
- Boulton (N.S.), Streltsova (T.D.) 1978.-** Unsteady flow to a pumped well in a fissured water bearing formation.- J. Hydrol., 35, p. 257-259.
- Castillo (E.) 1972.-** Mathematical model for two dimensional percolation through fissured rock. Proc. of the Symposium "Percolation through fissure rock" - Stuttgart.
- Choi (S.L.) 1975.-** Groundwater from fractured crystalline rocks in Korea.- J. of the Geol. Soc. of Korea, vol. 11, n°4, p. 215-232.
- Cinco (L.H.), Ramey (H.J. Jr), Miller (F.G.) 1975.-** Unsteady-state pressure distribution created by a well with an inclined fracture.- SPE-AIME 50th annual fall technical conference and exhibition, paper 5591 - Dallas.
- Cinco (L.H.), Samaniego (V.F.), Dominguez (A.N.) 1976.-** Transient pressure behavior for a well with a finite conductivity vertical fracture.- SPE-AIME 51th annual fall technical conference and exhibition, paper 6014 - New Orleans.
- Cosan (Y.) 1978.-** Une méthode d'étude des caractéristiques hydrogéologiques des nappes de fissures.- Ann. Soc. Géol. Belgique, t. 101, p. 37-45, 1978.
- Crawford (G.E), Hagedorn (A.R.), Pierce (E.) 1976.-** Analysis of pressure built up tests in a naturally fractured reservoir.- SPE, n°4558.

- Crosnier (B.), Portales (J.L.), Fras (G.), Jouanna (P.)** 1983.- Reconnaissance par pompage harmonique de milieux rocheux.- *Matériaux et Constructions*, vol. 16, n°92, p. 71-83.
- Degallier (R.)** 1982.- Interprétation de pompages à débit variable en milieu fissuré.- Doc. BRGM n°45, p. 267-281.
- Duguid (J.), Abel (J.)** 1974.- Finite element Galerkin method for flow in fractured porous media in "finite element Methods in flow problems", edited by **Oden (J.T.), Zienkiewicz (O.C.), Gallagher (R.H.) and Taylor (C.)**, p. 599-615, University of Alabama Press - Huntsville.
- Duguid (J.O.), Lee (P.C.Y)** 1977.- Flow in fractured porous media.- *Water Resour. Res.*, 13 (3), p. 558-566.
- Dupuy (M.), Lefebvre du Pray (E.), Marle (C.)** 1970.- Les modèles de gisements fissurés.- Etat des connaissances et des outils disponibles.- IFP, n°18774.
- Earlougher (R.C. Jr)** 1977.- Advances in well test analysis.- *Soc. Pet. Engr. AIME Monograph.*, V.5, 264 p.
- Edelhorst (W.I.M.)** 1984.- The role of modelling in the development of African groundwater resources.- *AISH*, n°144, p. 185-191.
- Elkins (L.F.), Skov (A.M.)** 1960.- Determination of fracture orientation from pressure interference.- *Trans. AIME*, p. 219-301.
- Faillat (J.P.)** 1985.- Hétérogénéités et effets d'échelle dans les aquifères fissurés.- Approche par pompages d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest).- USTL de Montpellier.
- Feuga (B.), Noyer (M.L.), Thiery (D.)** 1980.- Well testing of low to very low permeability fractured media. a review.- In / "Advances in European geothermal research".- *Proc. 2nd Int. Seminar Geothermal Energy Research - Strasbourg.*
- Feuga (B.), Vaubourg (P.)** 1980.- Principales méthodes de reconnaissance des milieux fissurés.- Etat des connaissances.- *Rapport BRGM 80 SGN 855 EAU.*

- Forkasiewicz (J.)** 1972.- Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères.- Aide-mémoire (2ème édition).- Rapport BRGM 72 SGN 273 AME.
- Freeze (R.A.)** 1975.- A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media.- *Water Resour. Res.*, 11 (5), p. 725-741.
- Gale (J.E.)** 1977.- A numerical, field, and laboratory study of flow in rocks with deformable fractures.- *Sci. Ser 72, Island waters Dir., Water Resour. Branch - Ottawa.*
- Glover (R.E.), Moody (W.T.)** 1976.- Drawdown to pumping in an anisotropic aquifer.- *Water Resour. Bull. V. 12, n°5, p. 941-950.*
- Gringarten (A.C.), Bourded (D.P.), Landel (P.A.), Kniazeff (V.J.)** 1979.- A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis.- *SPE-AIME, 54th annual fall technical conference and exhibition - Las Vegas, Nevada.*
- Gringarten (A.C.), Ramey (H.J.)** 1973.- The use of source and green's functions in solving unsteady flow problems in reservoirs.- *Soc. Pet. Eng. J.*, p. 185-298.
- Gringarten (A.C.), Ramey (H.J.)** 1974.- Unsteady state pressure distribution created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration or restricted entry.- *Soc. Pet. Eng. J.*, p. 413-426.
- Gringarten (A.C.), Ramey (H.J.Jr), Raghavan (R.)** 1974.- Unsteady-state pressure distribution created by a well with a single infinite conductivity vertical fracture.- *Soc. Pet. Eng. J.*, p. 347-360.
- Gringarten (A.C.), Ramey (H.J.Jr), Raghavan (R.)** 1975.- Applied pressure analysis for fractured wells.- *J. Pet. Tech.*, p. 887-892.
- Gringarten (A.C.), Witherspoon (P.A.)** 1972.- A method of analysis pump test data from fractured aquifers.- In "Percolation through fissured rock". *Proc. of the Int. Soc. for Rock Mech. Symp.- Stuttgart. T3B, p. 19.*

Handtush (M.S.), Thomas (R.G.) 1966.- A method of analysing a drawdown test in anisotropic aquifers.- *Water Resour. Res.*, vol. 2, n°2, p. 281-285.

Jacob (C.E.), Lohman (S.W.) 1952.- Non steady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer.- *TAGU*, p. 559-569.

Jenkins (D.N.), Prentice (J.K.) 1982.- Theory for aquifer test analysis in fractured rocks under linear (non radial) flow conditions.- *Groundwater*, V. 20, n°1, p. 12-21.

Jouanna (P.), Louis (C.) 1984.- Ecoulements dans les milieux fissurés.-*Méthodologie d'étude et de modélisation.- Annales des Mines*, p. 41-50.

Kazemi (H.) 1969.- Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution.- *Soc. Pet. Eng. J.*, 12, *Trans. AIME* 246, p. 451-462.

Kazemi (H.), Seth (M.S.), Thomas (G.W.) 1969.- The interpretation of interference tests in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution.- *Soc. Pet. Eng. J.*, p. 463-471.

Kiraly (L.) 1971.- Groundwater flow in heterogeneous anisotropic fractured media : a simple two-dimensional electric analog.- *J. of Hydrology*, vol. 12, n°3, p. 255-261.

Kohut (A.P.), Foweracker (J.C.), Johanson (D.A.), Tradewell (E.H.), Hodge (W.S.) 1983.- Pumping effects of wells in fractured granitic terrain.- *Groundwater*, vol. 21, n°5, p. 564-572.

Huyakorn (P.S.), Lester (B.H.), Faust (C.R.) 1983.- Finite element techniques for modelling groundwater flow in fractured aquifers.- *Water Res. Res.*, 19 (4), p. 1019-1083.

Leblanc (Ph.), Thiery (D.) 1985.- Solutions analytiques pour un pompage dans une fracture verticale unique.- *BRGM/Dépt. EAU*, note technique n°85/14.

Lefebvre du Prey (E.), Bossie-Codreanu (D.N.) 1975.- Simulation numérique de l'exploitation des réservoirs fissurés.- *IXème Congrès mondial du Pétrole*, Pannel discussion n°13 - Tokyo.

- Lenk (P.P.)** 1977.- Données nouvelles sur l'hydrogéologie des régions à substratum métamorphique et éruptif.- Enseignements tirés de la réalisation de 900 forages en Côte d'Ivoire.- C.R. Acad. Sc. Fr. Paris, t. 299, série D.
- Lohman (S.W.)** 1979.- Groundwater hydraulics.- USGS, paper 708, 70 p.
- Najurieta (H.L.)** 1981.- A theory for pressure transient analysis in naturally fractured reservoirs.- J. Pet. Tech., p. 1241-1250.
- Narasimhan (T.N.)** 1982.- Multidimensional numerical simulation of fluid flow in porous media.- Water Resour. Res., vol. 18, n°4, p. 1235-1247.
- Narasimhan (T.N.), Palen (W.A.)** 1979.- A purely numerical approach for analysing flow to a well intercepting a vertical fracture.- Paper presented at the California Regional Meeting Soc. Pet. Eng. AIME, Ventura, 1979.
- Neuman (S.P.)** 1982.- Statistical characterization of aquifer heterogenities: An overview in "Recent Tends in Hydrology".- Geol. Soc. Am. Spec. pap., 184, p. 81-102.
- Odeh (A.S.)** 1965.- Unsteady state behavior of naturally fractured reservoirs.-Soc. Pet. Eng. J., 60.
- Papadopulos (I.S.)** 1965.- Nonsteady flow to well in an infinite anisotropic aquifer.- AISH - Actes du colloque de Dubrovnick. "Hydrologie des roches fissurées", p. 21-31.
- Parsons (R.W.)** 1966.- Permeability of idealized fractured rock.- Soc. Pet. Eng. J., 237, p. 126-136.
- Pitard (J.)** 1976.- Contribution à l'interprétation des essais par pompages dans les roches fissurées.- Thèse USTL Montpellier, 83 p., 1976.
- Raber (E.), Lord (D.E.), Burklund (P.W.)** 1984.- Hydrologic test system for fracture flow studies in crystalline rock.- Groundwater, vol. 22, n°4.
- Raghavan (R.)** 1977.- Pressure behavior of wells intersecting fractures.-International well testing symposium - proceedings - Berkeley (Californie, USA).

- Ramey (H.J. Jr), Gringarten (A.C.) 1975.-** Effect of high volume vertical fractures on geothermal steam well behavior.- Paper presented at the second United Nations Symposium on the Use and Development of Geothermal Energy., San Francisco, vol. 3, p. 1759-1762.
- Rasmuson (A.), Narasimhan (T.N.), Neretnieks (L.) 1982.-** Transport in a fissured rock : validation of a numerical model.- Water Resour. Res.
- Rayneau (C.) 1972.-** Contribution à l'étude des écoulements autour d'un forage en milieu fissuré.- Thèse Doct.-Ing., USTL Montpellier.
- Reed (J.E.) 1980.-** Type curves for selected problems of flow to wells in confined aquifers.- Techniques of Water Resources Investigations of the USGS, 106 p.
- Rofail (N.) 1967.-** Analysis of pumping tests in fractured rocks.- AISH, Proc. Symp. on Hydrology of fractured rocks, Dubrovnik, vol. 1, n°73, p. 81-88.
- Russel (D.G.), Truitt (N.E.) 1964.-** Transient pressure behavior in vertically fractured reservoirs.- J. Pet. Technol., 10, p. 1159-1170.
- Saidi (A.M.) 1975.-** Mathematical simulation model describing Iranian fractured reservoirs and its application to Haft Kel Field.- IXème Congrès mondial du Pétrole, pannel discussion n°13 - Tokyo.
- Scott (J.O.) 1963.-** The effect of vertical fracture on transient pressure behaviour of wells.- J. Pet. Technol., 12, p. 1365-1369.
- Shapiro (A.M.), Andersson (J.) 1983.-** Steady-state fluid response in fractured rock : a boundary element solution for a coupled, discrete fracture continuum model.- Water Resour. Res., 19 (4), p. 959-970.
- Stalkup (F.J.), Breitenbach (E.A.), Heisler (L.), Tsutsumi (G.) 1975.-** Advances in simulation of petroleum reservoirs by mathematical methods.- IXème Congrès Mondial du Pétrole, pannel discussion, vol. 4.- Tokyo. p. 247-249.
- Streltsova (T.D.) 1976.-** Hydrodynamics of groundwater flow in fractured formation.- Water Resour. Res., vol. 12, n°3, p. 405-414.

- Streltsova-Adams (T.D.)** 1978.- Well hydraulics in heterogeneous aquifer formations.-
Advances in Hydrosience, vol. 11, p. 357-423.
- Strobel (C.J.), Gulati (M.S.), Bamey (H.J. Jr)** 1976.- Reservoir limit tests in naturally fractured reservoirs.- A field-case study using type curves.- J. Pet. Technol. 9, p. 1097-1106.
- Theis (C.V.)** 1935.- The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage.- TAGU, p. 619-624.
- Thiery (D.)** 1980.- Interprétation d'un pompage d'essai en milieu anisotrope.- Utilisation de plus de trois piézomètres.- BRGM - dépt. Hydrogéologie, Note technique 80/2, 6 p.
- Thiery (D.)** 1982.- Etude détaillée des débits et des venues d'eau dans les forages en région de socle fissuré.- Application à la Bretagne et à la Corse.- Rapport BRGM 82 SGN 921 EAU.
- Thiery (D.), Vandenbeusch (M.), Vaubourg (P.)** 1983.- Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère.- Doc. du BRGM, n°57.
- Uhl (V.W.), Sharma (G.K.)** 1978.- Results of pumping tests in crystalline rock aquifers.- Groundwater, vol. 16, n°3, p. 192-200.
- UNESCO** 1979.- Water in crystalline rocks.
- Uraiet (A.), Raghavan (R.), Thomas (G.W.)** 1977.- Determination of the orientation of a vertical fracture by interference tests.- J. of Pet. Tech., p. 73-80.
- Vanden-Berg (A.)** 1977.- Pump testing in heterogeneous aquifers.- J. of Hydrol., 34, p. 45-62.
- Warren (J.E.), Root (P.J.)** 1963.- The behavior of naturally fractured reservoirs.- Society of Petroleum Engineers Journal. p. 245-255.
- Warren (J.E.), Root (P.J.)** 1965.- Discussion Society of Petroleum Engineers Journal.

Welchert (W.T.) 1975.- Analysis of shallow hard rock well pumping and recovery test data.- *Groundwater*, vol. 12, n°5.

Wilson (C.R.), Witherspoon (P.A.) 1974.- Steady state flow in rigid networks of fractures.- *Water Resour. Res.*, (10), 2, p. 328-335.

Wilson (C.R.), Witherspoon (P.A.) 1976.- Flow interferences effects at fracture intersections.- *Water Resour. Res.*, (12), p. 102-104.

THEME 3

METHODOLOGIE

DE PROSPECTION DES EAUX SOUTERRAINES

ET

D'IMPLANTATION DES FORAGES EN MILIEU FISSURE

(Thème non développé)

I - ORIENTATION DE LA RECHERCHE (Engalenc, 1978)

L'orientation de la recherche de l'eau est fonction du type d'aquifère à capter, du type de l'ouvrage de captage, et des débits recherchés.

Ces trois facteurs sont étroitement dépendants les uns des autres, le type d'aquifère imposant un mode de captage et conditionnant la fourchette des débits disponibles.

II - METHODOLOGIE

La méthodologie de la prospection peut se décomposer en quatre phases :

II.1 - UNE ETUDE DOCUMENTAIRE

Une simple lecture de la carte géologique et de la carte topographique permet de connaître :

- le type de terrain
- le type prédominant de fracturation
- les unités morphologiques.

II.2 - UNE ETUDE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Permet le relevé des fractures par observations géomorphologiques :

- alignements morpho-structuraux
- densité de végétation
- géométrie du réseau hydrographique
- repérage des noeuds de fractures
- repérage des poches altérées.

II.3 - UNE ÉTUDE GÉOPHYSIQUE, ÉLECTRIQUE, ÉLECTROMAGNÉTIQUE, SISMIQUE

Cette étude vient, après la photo-interprétation, pour confirmer les observations précédentes :

- confirmation de l'existence des poches altérées
- localisation topographique des fractures.

II.4 - IMPLANTATION DES FORAGES DE RECONNAISSANCE ET DES FORAGES D'EXPLOITATION.

BIBLIOGRAPHIE

- Armand (C.)** 1982.- Prospection hydrogéologique dans un contexte de socle défavorable.- Alimentation en eau de la ville d'Aribinda (Sahel, Haute-Volta).- Doc. BRGM n°45, p. 13.
- Assouma (D.), Biscaldi (R.), Lelong (F.), Martin (A.), Sawadogo (J.), Scanvic (J.Y.)** 1982.- Recherche de critères d'implantation de forages hydrauliques productifs en formations de socle d'Afrique intertropicale.- Doc. BRGM n°45, p. 25-47.
- Avias (J.V.)** 1982.- Sur la méthodologie d'étude de la décompression superficielle, morphologique et tectonique des milieux fissurés.- Application à la recherche et à l'exploitation des aquifères de ces milieux.- Doc. BRGM n°45, p. 47-52.
- Benatlour (A.)** 1975.- Utilisation de la géophysique pour la recherche des eaux souterraines dans les régions de socle cristallin.- CIEH 8ème réunion Ouagadougou.
- Berard (P.)** 1982.- Interprétation des images satellites en complément à la photo-interprétation traditionnelle pour la définition des structures hydrogéologiques au Niger et en Haute-Volta.- Doc. BRGM n°45, p. 67-82.
- Bernardi (A.), Mouton (J.)** 1981.- Les recherches d'eau dans le socle africain.- Apport de la géophysique.- Bull. BRGM (2), III, n°4, p. 293-309.
- Engalenc (M.)** 1978.- Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest.- Géohydraulique.
- Engalenc (M.)** 1982.- Rôle de la photo-interprétation dans la détermination des facteurs influençant la productivité des fractures du socle cristallin.- Doc. BRGM n°45, p. 291-299.
- Engalenc (M.), Sawadogo (A.N.)**- Rôle de la fracturation dans la recherche des eaux souterraines dans les granites de l'Afrique occidentale.- CIEH Bull. de liaison n°20.
- Faillat (J.P.), Leblond (P.)** 1982.- Premiers résultats des essais menés sur une station de pompage expérimentale en Côte d'Ivoire. Doc. BRGM n°45 p. 301-314.

- Faillat (J.P.), Leblond (P.), Prevot (J.)** 1980.- Essai d'adaptation de la méthode des résistivités aux recherches d'eau dans les terrains cristallins fissurés et fortement altérés de Côte d'Ivoire.- 26ème C.G.I., Vol. III, Paris.
- Florquist (B.A.)** 1973.- Techniques for locating water wells in fractured crystalline rocks.- Groundwater, V. 11-3.
- Géohydraulique** 1983.- Méthode d'étude et de recherches de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest.- Atlas de photo-interprétation.- CIEH - Ouagadougou.
- Girousse (B.)** 1984.- Critères d'implantation et productivité des forages d'eau en milieux fissurés.- Rapport BRGM 84 SGN 209 EAU.
- Guiraud (R.)** 1975.- Eléments pour une orientation nouvelle de la recherche des eaux souterraines dans les régions de socle de l'Afrique occidentale.- AIH Congrès Porto Alegre - Brésil.
- Guiraud (R.), Lenck (P.)** 1975.- Sur l'intérêt hydrogéologique majeur des zones de failles dans le socle métamorphique et éruptif de l'Afrique Occidentale.- CIEH 8ème réunion Ouagadougou.
- Mouret (Cl.)** 1977.- L'apport des méthodes géophysiques à l'investigation hydrogéologique des aquifères fracturés en milieu volcanique et volcano-sédimentaire.- BRGM Colloque de Nice, tome II, p. 457-471.
- Sawadogo (S.)** 1982.- Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation. Application à l'hydrogéologie du socle en milieu intertropical (Haute-Volta).- Thèse 3ème cycle, UER Sciences fondamentales - Orléans, 238 p.
- Scanvic (J.Y.)** 1977.- Contribution de l'analyse linéamentaire des données spatiales à la géologie appliquée.- Journées de Télédétection "Utilisation des satellites en télédétection" - St Mandé.
- Vaubourg (P.)** 1983.- Techniques de prospection des eaux souterraines en milieu fissuré.- In "Alimentation en eau des zones rurales des pays en voie de développement".- Compte-rendu du séminaire tenu à Orléans, les 7 et 8 septembre.- Rapport BRGM 83 SGN 917 EAU.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

OUVRAGES GENERAUX

- CEFIGRE - ITCWRM 1983.**- Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin, cristallophyllien et du sédimentaire ancien d'Afrique de l'Ouest.- Série documents.
- Karrenberg (H.) 1981.**- Hydrogeologie der nicht verkastungsfähigen Festgesteine.- Springer-Verlag.
- Kikietta (A.) 1978.**- Contribution à l'étude hydrogéologique des massifs granitiques et cristallins basiques en Afrique intertropicale.- Thèse 3ème cycle, INPL - Nancy.
- Labey (D.) 1983.**- Recherche et exploitation de l'eau souterraine dans les terrains de socle ancien. Application à une étude statistique de forages hydrauliques réalisés dans diverses régions d'Afrique occidentale.- Diplôme d'ingénieur en géologie, CNAM.
- Lacroix (D.) 1984.**- Recharge des nappes en pays arides et semi-arides.- Rapport BRGM 84 SGN 204 EAU.
- Larsson (I.) 1963.**- Tectonic and morphologic studies in Precambrian rocks at groundwater prospecting in Saubh Sweden.- Geologiska Föreningens i Stockholm För handlingar, vol. 85, Stockholm, p. 320-340,
- Larsson (I.) 1972.**- Groundwater investigations in a granite area of Sardinia, Italy. Nordic hydrology, n°3.
- Le Nir (M.), Napias (J.C.), Pointet (T.), Vaubourg (P.) 1983.**- Alimentation en eau des zones rurales des pays en voie de développement.- In Rapport BRGM 83 SGN 917 EAU.
- Ousmane (B.) 1978.**- Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle au Sahel.- Thèse 3ème cycle - Univ. Montpellier.
- Reboucas (A.C.) 1975.**- Conditions générales d'alimentation des zones aquifères du socle cristallin de la région semi-aride du Brésil.- AIH réunion de Porto Alegre, (Brésil) - Mémoires.
- Reiss (L.H.) 1980.**- Réservoir engineering en milieu fissuré.- Technip - Paris.

Roche (P.A.) 1984.- Etude des possibilités de recourir aux eaux souterraines en zone de socle pour les réseaux d'alimentation en eau potable. Le cas de la Bretagne en France.- Rapport BRGM 84 SGN 010 EAU.

Roche (P.A.), Talbo (H.), Thiery (D.) 1983.- Aspects quantitatifs des ressources en eau en région de socle ; méthodes récentes appliquées au cas de la Bretagne, France.- Symposium UNESCO - Coblence.

réalisation
service
reprographie
du BRGM

