



HAL
open science

Thermal transfer in a fissured medium

Jean-Marc Hosanski, F. Bernaudat, Emmanuel Ledoux, A. Ribstein

► **To cite this version:**

Jean-Marc Hosanski, F. Bernaudat, Emmanuel Ledoux, A. Ribstein. Thermal transfer in a fissured medium. Annales des mines - Série Responsabilité et environnement, 1984. ird-01230645

HAL Id: ird-01230645

<https://ird.hal.science/ird-01230645>

Submitted on 18 Nov 2015

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

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

Transferts thermiques en milieu fissuré

par J.M. HOSANSKI (1), F. BERNAUDAT (2), E. LEDOUX (3), A. RIBSTEIN (3)

Les transferts thermiques en milieu fissuré sont une préoccupation croissante de l'ingénieur, dont la théorie présente certaines difficultés du fait du rapport variable entre la maille de fracturation et l'échelle du problème posé. Le présent article propose une approche générale de l'écoulement et du transfert de chaleur dans le cas où le milieu ne pouvant être décrit en terme de milieu poreux équivalent, il convient d'individualiser la géométrie de chaque discontinuité. Deux exemples d'application sont donnés : le premier dans le domaine de l'exploitation de la chaleur des roches chaudes et sèches, le second dans celui de l'évacuation en formation géologique des déchets de l'industrie nucléaire.

INTRODUCTION : L'ENJEU

L'étude des transferts thermiques en milieu fissuré connaît, depuis la fin des années 60, un intérêt croissant dans les industries du secteur énergétique. Les domaines d'application de cette discipline encore balbutiante se multiplient, et l'enjeu économique va s'amplifiant. Parmi les principales « locomotives » de ce regain d'activité on peut citer :

- la récupération assistée d'huile (secondaire ou tertiaire) par injection de vapeur dans les gisements carbonatés fissurés ;
- la valorisation des roches chaudes et sèches (géothermie Hot Dry Rock) ;
- la sûreté des stockages de déchets nucléaires de haute activité en milieu cristallin ;
- la valorisation in situ des schistes bitumineux ;
- la gazéification souterraine du charbon ;
- etc.

Les phénomènes d'écoulement en milieu poreux font partie, depuis longtemps, du domaine des préoccupations de l'ingénieur. Que ce soit à une fin de *mise en valeur* ou de *prévision de risques*, il a été amené à élaborer des modèles prévisionnels du comportement mécanique, hydraulique et thermique de ce milieu. Il s'est servi, dans cette tâche, des outils mathématiques dont il disposait, et en particulier, de l'analyse des espaces continus. Or, la « topologie » du milieu rocheux fracturé n'a pas la régularité des espaces mathématiques puisqu'elle est essentiellement *anisotrope*, *hétérogène* et surtout *discontinue*.

Ce n'est que récemment qu'un certain nombre de catastrophes (telles que la rupture du barrage de Malpasset) ont fait prendre conscience de la nécessité de définir des approches spécifiques du milieu fissuré. La principale difficulté rencontrée dans cette tentative tient au caractère *intermédiaire* de l'échelle de l'investigation de l'ingénieur, entre l'échelle du laboratoire où l'on est capable de décrire finement la géométrie du milieu et d'établir des lois déterministes, et l'échelle de la formation géologique sur laquelle peuvent s'appliquer des lois statistiques.

Des techniques, parfois sophistiquées, de reconnaissance du milieu permettent à l'hydraulicien des roches, de même qu'au mécanicien ou au thermicien, de se faire une idée de la répartition et des caractéristiques des discontinuités, mais la description complète d'un massif fissuré nécessite des moyens, tant en durée qu'en coût, qui apparaissent parfois disproportionnés par rapport aux objectifs fixés. Les incertitudes inévitablement liées à cette description deviennent très importantes pour une roche faiblement fissurée, où la présence de quelques discontinuités majeures, qui auraient échappé à la reconnaissance, peut transformer radicalement l'amplitude et parfois même la nature des phénomènes.

L'étude des transferts de chaleur en milieu fissuré n'échappe pas à cette difficulté.

(1) Compagnie française des pétroles, direction production, département techniques réservoirs.

(2) Commissariat à l'énergie atomique, IRDI, département recherches et développements déchets.

(3) Ecole nationale supérieure des mines de Paris, Centre d'informatique géologique.

PREMIÈRE PARTIE

DESCRIPTION DES ÉCOULEMENTS EN MILIEU FISSURÉ

L'étude des transferts thermiques est fortement conditionnée par celle des écoulements dont le milieu est le siège. Il est donc essentiel de définir quelques notions fondamentales qui permettent d'appréhender ces écoulements.

I. CARACTÉRISATION « GÉOMÉTRIQUE » DU MILIEU FISSURÉ

On englobe généralement sous les termes « fissures » ou « discontinuités » toute surface de séparation provoquant une discontinuité des propriétés de la roche (propriétés hydrauliques, mécaniques ou thermiques). Il peut s'agir aussi bien d'un joint, d'origine sédimentaire, que d'une fracture, d'une diaclase ou d'une faille d'origine tectonique.

L'observation montre que ces discontinuités ne se répartissent pas de manière quelconque dans le massif, mais peuvent être regroupées en familles ou systèmes de plans plus ou moins parallèles (souvent 2 ou 3). L'ensemble de ces familles constitue le réseau de fissures. Les dimensions des blocs délimités par ce réseau définissent la maille du réseau.

Une fissure sera décrite géométriquement lorsque l'on aura déterminé :

- son orientation moyenne, c'est-à-dire son azimut et son pendage ;
- son extension spatiale ;
- son degré de séparation, c'est-à-dire le rapport entre la surface ouverte à l'écoulement et sa surface totale ;
- son ouverture moyenne ;
- les propriétés de ses surfaces (micro et macrorugosité).

La description d'une famille de fissures nécessitera en outre la détermination de la maille de fracturation, distance moyenne entre deux discontinuités.

La reconnaissance de l'ensemble de ces paramètres s'avère en pratique très difficile et souvent impossible. L'essentiel des informations disponibles provient :

- des relevés structuraux de surface, effectués sur des affleurements ou sur des exploitations minières à ciel ouvert ;
- des mesures en forage : étude de carottes, vidéo-carottages, diagraphies acoustiques, spectrographie « gamma », etc. ;
- des mesures en ouvrages souterrains (mines ou carrières).

Ces informations sont généralement réparties de manière peu uniforme, difficilement corrélables, et

n'atteignent au mieux qu'un nombre restreint de paramètres (orientation, ouverture moyenne, micro-rugosité). L'extension, le degré de séparation et la macrorugosité des discontinuités restent presque toujours indéterminés.

II. LOIS D'ÉCOULEMENT DANS UNE FRACTURE ÉLÉMENTAIRE

Ces lois ont fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales [7, 8]*. Elles s'écrivent de manière générale :

$$V = - K_{jf} \text{ pour un écoulement laminaire } \quad (1)$$

$$V = - K'_{jf} \alpha \text{ pour un écoulement turbulent } \quad (2)$$

$$(0,5 < \alpha < 1)$$

en posant V : vitesse moyenne de filtration de l'eau dans la fissure ;

j_f : projection du gradient de charge hydraulique j sur le plan de la fracture (gradient hydraulique actif).

Les valeurs de la conductivité hydraulique K_f et de α dépendent du nombre de Reynolds de l'écoulement, de la rugosité de la fracture et des caractéristiques du remplissage éventuel. Dans le cas d'un écoulement laminaire dans une fracture ouverte, lisse, à faces parallèles, K_f est proportionnel à e^2 et la transmissivité hydraulique $T (= K_f \times e)$ proportionnelle à e^3 .

On a, dans ce cas, $T (\text{Darcy.m}) \approx 83 e^3$ (e en mm), i.e. : une seule fracture ouverte de 0,5 mm possède la même capacité conductrice que 100 m de milieu poreux à 100 mD!! Cette loi cubique est à l'origine de la forte sensibilité des caractéristiques hydrauliques d'une fracture aux sollicitations mécaniques auxquelles elle est soumise (contraintes naturelles et pression interne) qui est un des traits les plus spécifiques du milieu fracturé.

III. LES APPROCHES POSSIBLES DE L'HYDRAULIQUE EN MILIEU FISSURÉ

1. Notion de volume représentatif élémentaire (VRE)

Lorsque l'on établit les lois de l'hydraulique en milieu poreux, on est amené à définir un volume représentatif élémentaire de milieu poreux qui soit :

* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie in fine.

- suffisamment grand pour qu'il soit possible d'y définir des grandeurs macroscopiques moyennes de grandeurs microscopiques, qui ne soient pas influencées par les fluctuations d'un pore à l'autre;
- suffisamment petit pour que les variations de ces grandeurs macroscopiques d'un volume à l'autre puissent être approchées par des fonctions continues, justiciables de l'analyse infinitésimale.

Si la dimension du VRE d'un milieu poreux est typiquement centimétrique à décimétrique, les caractéristiques des discontinuités planes d'un milieu fissuré conduisent à des VRE décamétriques, voire hectométriques.

Le choix du modèle descriptif à utiliser sera finalement dicté par une comparaison entre :

- l'échelle du VRE (fonction de la maille de fracturation),
- et l'échelle du phénomène étudié.

2. Un premier cas favorable: le milieu peut être décrit comme continu

C'est le cas :

- si le milieu est intensément fissuré;
- si l'on s'intéresse à une échelle kilométrique (domaine de l'hydrogéologue).

La notion de VRE se transpose sans difficulté et le milieu pourra être considéré comme un milieu poreux, anisotrope, mais continu (fig. 1a) :

Ses caractéristiques hydrauliques (tenseur de perméabilité) se déduisent par analyse statistique (justifiée dans ce cas) des propriétés des différentes familles de fractures et des blocs matriciels.

Du fait du contraste élevé de perméabilité et de porosité entre blocs matriciels et fissures, la cinétique des écoulements dans les deux milieux peut être très différente. Si l'échelle de temps considérée est courte, on peut être amené à définir, au sein d'un même VRE, des moyennes de grandeurs physiques (par exemple de pression) différentes dans les deux milieux. On peut, dans ce cas, utiliser des modèles dits « à double porosité » où le milieu réel est simulé par la superposition de deux milieux continus fictifs superposés (un milieu « bloc matriciel » à forte porosité et faible perméabilité et un milieu « fissures » aux caractéristiques inverses), tous deux sièges d'un écoulement et échangeant un flux de matière fonction d'un coefficient de transfert, lui-même fonction de la densité volumétrique de surface de fractures.

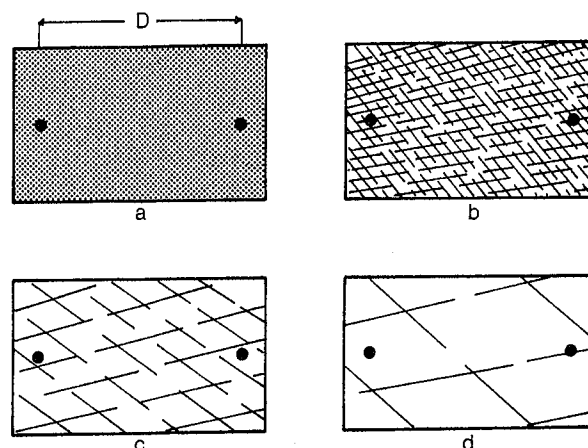


Fig. 1. — La maille de fracturation et l'échelle du phénomène (D: distance entre deux forages).

3. Un cas un peu moins favorable: le milieu est faiblement fracturé

A l'échelle du phénomène étudié, le VRE perd toute signification (fig. 1d). Le milieu doit alors être traité comme un milieu discontinu, ce qui suppose :

- une description analytique de chaque famille de fissures;
- la définition de grandeurs différentes dans les fissures et dans les blocs matriciels.

Cette modélisation de détail suppose que les fractures soient correctement reconnues, ce qui limite dramatiquement son emploi. Elle reste néanmoins toute désignée dans les cas assez fréquents où un nombre limité de fractures a été activé artificiellement et canalise l'essentiel de l'écoulement.

4. Les cas intermédiaires

C'est à l'échelle de l'ingénieur (et donc dans la plupart des domaines d'application pratique) que la description du milieu fissuré est la plus délicate. Pas assez fissuré pour justifier une description continue équivalente, trop fissuré pour permettre une modélisation analytique fine, le milieu échappe pour l'instant à toute description rigoureuse (fig. 1b et 1c).

De manière subjective, l'ingénieur peut alors :

- soit choisir le moins mauvais des modèles précédents;
- soit faire appel à des modèles « composites » dont le meilleur exemple est le modèle développé par A.C. Gringarten pour l'interprétation des essais de puits en réservoir fracturé [2].

DEUXIÈME PARTIE

LES MÉCANISMES DU TRANSFERT THERMIQUE

On ne s'intéressera ici qu'aux cas où le milieu ne peut pas être décrit en terme de milieu poreux équivalent.

De même que la discontinuité du massif nous a amené à distinguer nettement les lois de l'hydraulique dans chacun des milieux (fissure et matrice), l'étude du transfert de chaleur ne peut être menée à bien qu'en s'appuyant sur une investigation :

- du transfert de chaleur dans la fissure,
- du transfert de chaleur dans la matrice,

la juxtaposition de ces deux milieux se traduisant par des conditions aux limites à leur frontière commune (fig. 2).

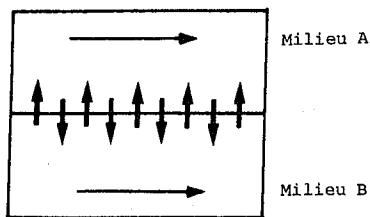


Fig. 2. — Schématisation du milieu peu fissuré.

Nous ne nous intéresserons qu'au cas de la fissure élémentaire : les configurations plus compliquées se ramèneront toujours au découpage du problème en une somme de problèmes élémentaires reliés par un système de conditions aux limites.

On se limitera aux fluides monophasiques peu compressibles, et on supposera d'autre part :

- la fissure plane, indéformable et d'épaisseur e , avec ou sans remplissage ;
- la matrice rocheuse homogène, isotrope en toutes caractéristiques ;
- les phénomènes radiatifs négligeables.

I. TRANSPORT DANS LA FISSURE ÉLÉMENTAIRE

Plaçons-nous dans le cas de la fissure avec remplissage, le cas de la fissure vide s'en déduisant aisément. La fissure est alors constituée de deux phases qui participent chacune au transfert :

- une phase solide : le matériau de remplissage ;
- une phase liquide : le fluide saturant.

Les températures θ_f et θ_s des phases fluide et solide seront supposées constamment égales, ce qui

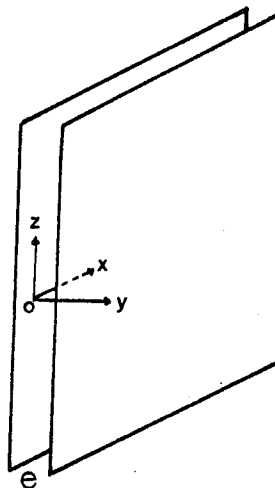


Fig. 3. — Schématisation d'une fissure élémentaire.

ne sera vérifié en toute rigueur que si les variations de températures sont suffisamment lentes : $\theta_f = \theta_s = \theta$.

Etant donné la petitesse de e devant les autres dimensions de la fissure, θ sera supposé homogène sur tout le profil y . On se ramène donc à un problème bidimensionnel.

Le transfert de chaleur dans la fissure est le résultat de la superposition de deux mécanismes :

1. Propagation de la chaleur par conduction

Les deux phases participent à ce transfert, et l'on est amené à définir un tenseur de conductivité thermique équivalente $\bar{\lambda}^*$ pour le milieu (fluide + remplissage). Ce tenseur est fonction de :

- $\bar{\lambda}_f$: tenseur sphérique de conductivité du fluide,
- $\bar{\lambda}_s$: tenseur de conductivité du solide,

et dépend de la texture du milieu.

On supposera également que le matériau de remplissage est isotrope. Dans ce cas, le tenseur $\bar{\lambda}^*$ est sphérique, et peut être représenté par un scalaire λ^* .

La densité de flux thermique $\vec{\phi}_{\text{cond}}$ associé à ce mécanisme s'écrit suivant la loi de Fourier :

$$\vec{\phi}_{\text{cond}} = - \lambda^* \vec{\text{grad}} \theta \tag{3}$$

Si la fissure est sans remplissage, $\lambda^* = \lambda_f$, conductivité du fluide.

2. Propagation suivant le mouvement du fluide

Ce mécanisme, auquel seule la phase liquide participe, est la superposition d'un transport par convection et d'un transport par dispersion.

— Le transport par convection s'effectue suivant la vitesse moyenne de filtration \vec{V} .

La densité de flux thermique associé s'écrit :

$$\vec{\phi}_{\text{conv}} = \gamma_f \vec{V} \theta \quad (4)$$

— Le transport par dispersion rend compte des hétérogénéités de la vitesse microscopique u . On a l'habitude de le formuler par une loi de Fourier du type :

$$\vec{\phi}_{\text{disp}} = - \bar{\lambda}_d \text{grad } \theta \quad (5)$$

$\bar{\lambda}_d$: tenseur de dispersion, fonction de la vitesse de filtration.

La faible ouverture des fractures conduit souvent à des vitesses de filtration très élevées, en particulier au voisinage d'un point d'injection (convection forcée). Le terme de transport convectif est dans ce cas largement prédominant.

II. TRANSPORT DANS LA MATRICE

Les mécanismes du transport dans les blocs matriciels sont identiques. A l'inverse des fissures, le transport conductif est souvent prédominant, compte tenu des faibles vitesses de filtration.

III. ÉCHANGES THERMIQUES ENTRE LES DEUX MILIEUX

1. Echanges conductifs

Deux hypothèses sont possibles :

a. Hypothèse de continuité du champ de température à la frontière des deux milieux

Si les variations de θ ne sont pas trop rapides, on peut admettre que l'équilibre entre la température θ_r du massif et θ de la fracture est constamment établi.

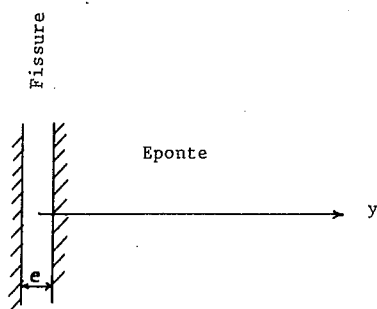


Fig. 4. — Schématisation des échanges fissure-matrice.

Dans ce cas, le vecteur densité de flux thermique échangé (sortant de la fissure) s'écrit :

$$\vec{\phi}_{\text{ep}}^{(1)} = - [\lambda_r (\text{grad } \theta_r)_{y=e/2} \times \vec{n}] \vec{n} \quad (6)$$

\vec{n} : vecteur unitaire, normal à la fracture,

λ_r : conductivité thermique des épontes.

b. Hypothèse de discontinuité à la frontière

Si les variations de θ sont extrêmement rapides, il est en toute rigueur nécessaire de prendre en compte le phénomène de conduction dans la couche limite.

On a alors l'habitude de représenter globalement l'échange entre la fissure et la matrice par l'intermédiaire d'un coefficient de transfert h_t , en écrivant :

$$\vec{\phi}_{\text{ep}}^{(1)} = h_t (\theta - \theta_r)_{y=e/2} \vec{n} \quad (7)$$

Cette formulation masque en fait la réalité en représentant de manière globale les phénomènes d'échange dans la couche limite. h_t dépend d'un grand nombre de paramètres, en particulier des conditions hydrodynamiques de l'écoulement. Nous nous placerons généralement dans la première hypothèse.

2. Echange convectif

La densité de flux associée s'écrit :

$$\vec{\phi}_{\text{ep}}^{(2)} = - \gamma_f q_{\text{ep}} \vec{\theta} \quad (8)$$

q_{ep} étant le débit surfacique filtrant de la fissure vers l'éponte.

IV. LES ÉQUATIONS DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

Elles se déduisent de l'analyse précédente.

1. Dans la fissure, on a, de manière générale :

$$\begin{aligned} & \underbrace{\text{div} ((\lambda^* + \lambda_d) \text{grad } \theta)}_{\text{terme conductif et dispersif}} - \underbrace{\gamma_f \text{div} (V\theta)}_{\text{terme convectif}} + \underbrace{Q_{\text{EXO}}}_{\text{terme d'apport exothermique}} \\ &= \underbrace{\gamma^* \frac{\partial \theta}{\partial t}}_{\text{emmagasinement}} - \underbrace{\frac{2\lambda_g}{e} \left(\frac{\partial \theta_r}{\partial y} \right)_{y=e/2}}_{\text{flux sortant par conduction vers les épontes}} + \underbrace{\frac{2\gamma_f q_{\text{ep}}}{e} \theta}_{\text{flux sortant par convection vers les épontes}} \quad (9) \end{aligned}$$

TRANSFERTS THERMIQUES EN MILIEU FISSURE

(Q_{EXO} est nul si la fissure n'est le siège d'aucune réaction exo ou endothermique).

On peut, dans de nombreuses applications, simplifier considérablement ce bilan.

Exemple :

- matrice imperméable;
- termes de conduction, de dispersion, et d'emmagasinement négligeables;
- pas de réaction exothermique.

On a alors simplement :

$$\gamma_f \operatorname{div}(\vec{V}\theta) = \frac{2\lambda_g}{e} \left(\frac{\partial \theta_r}{\partial y} \right)_y = c/2 \quad (10)$$

2. Dans la matrice

Dans le cas le plus général :

$$\operatorname{div}((\lambda_r^* + \lambda_{d,r}) \operatorname{grad} \theta_r) - \gamma_f \operatorname{div}(\vec{U}\theta_r) + Q_{\text{EXO}} = \gamma_r^* \frac{\partial \theta_r}{\partial t} \quad (11)$$

et, si la matrice est imperméable :

$$\lambda_r \nabla^2 \theta_r = \gamma_r \frac{\partial \theta_r}{\partial t} \quad (12)$$

Comme nous venons de le voir, la difficulté de l'analyse d'un problème de transfert thermique en milieu fissuré ne tient pas tant à la description des mécanismes élémentaires du transport, qui sont, somme toute, identiques à ceux d'un milieu poreux continu, qu'à la nécessité de décrire simultanément ces phénomènes dans deux milieux à géométrie complexe, et dont les propriétés thermiques s'opposent :

- un milieu « bidimensionnel » à forte conductivité mais faible pouvoir capacitif;
- un milieu « tridimensionnel » à faible conductivité et fort pouvoir capacitif.

La résolution du problème passe, dans la plupart des cas, par de nombreuses simplifications portant

V. COUPLAGE DE L'ÉQUATION DE L'ÉNERGIE ET DE L'ÉQUATION DU MOUVEMENT

L'étude de l'écoulement simultané de fluide et de chaleur dans un milieu fissuré se ramène finalement à la résolution du système suivant :

- deux équations de conservation de la masse fluide (fissure et matrice);
- deux équations du mouvement (du type Darcy par exemple);
- deux équations de l'énergie;
- des lois de comportement du fluide, essentiellement :

$$\rho = \rho(\theta)$$

$$\mu = \mu(\theta)$$

variations de la densité et de la viscosité en fonction de la température.

Ces lois de comportement introduisent un couplage entre les équations du mouvement et les équations de l'énergie. En l'absence de tout mouvement de convection forcée d'origine hydrodynamique (injection, pompage, écoulement régional), des gradients de température peuvent provoquer des mouvements gravitaires du fluide, dits de convection naturelle. Dans le cas général, le mouvement réel du fluide résulte de la superposition de ces modes de convection (forcée et naturelle). Suivant leur importance relative, on pourra :

- soit négliger la convection naturelle; dans ce cas, la résolution du problème hydraulique est indépendante de la résolution du problème thermique;
- soit la prendre en compte; ce sera en particulier nécessaire lorsque n'existe pas de convection forcée.

TROISIÈME PARTIE

DEUX EXEMPLES CONCRETS

sur la prédominance de l'un ou l'autre des mécanismes et la géométrie des fractures.

Cette démarche est illustrée dans les deux exemples que nous allons détailler.

I. PREMIER EXEMPLE: LE COMPORTEMENT DES DOUBLETTS HYDROTHERMIQUES DU TYPE HOT DRY ROCK

Les résultats présentés ici ont été obtenus dans le cadre des expériences in situ, coordonnées par l'Institut national d'astronomie et de géophysique (INAG), réalisées au Mayet de Montagne entre 1978 et 1982 par l'Ecole des mines de Paris et l'Institut

de physique du Globe de Paris, avec la participation de la Commission des Communautés européennes [6].

1. Rappels sur la géothermie Hot Dry Rock

Les unités d'extraction d'énergie géothermique en nappe profonde exploitent l'énergie thermique du massif par l'intermédiaire du fluide contenu naturellement dans les pores du milieu: l'eau chaude est, dans ce cas, exploitée comme une ressource minière. Malheureusement, les réservoirs suffisamment perméables pour être exploités de cette manière ne sont pas universellement répandus et sont, à terme, d'importance limitée.

A l'inverse, les massifs cristallins imperméables, chauds et secs, sont pratiquement inépuisables, mais difficilement exploitables. Les processus d'extraction imaginés consistent tous à suppléer l'absence de vecteur naturel de chaleur par une circulation forcée d'eau prélevée en surface à travers des surfaces d'échange obtenues par fracturation artificielle.

Deux modes de fracturation ont pu être envisagés:

- la fracturation par explosifs;
- la fracturation hydraulique.

Cette seconde méthode, couramment employée dans l'industrie pétrolière pour accroître la productivité des gisements, permet un meilleur contrôle de la fracturation et semble la plus prometteuse.

L'eau froide injectée transite dans la ou les fractures, se réchauffe au contact de la matrice avant d'être produite par un deuxième forage sous forme de vapeur ou de liquide. La valorisation de l'énergie extraite peut être soit électrique, soit thermique.

Il faut souligner que ce n'est pas le flux géothermique naturel qui est exploité, mais l'énergie accumulée dans le massif au cours des millénaires: il ne s'agit donc pas d'une énergie renouvelable, du moins à l'échelle de temps considérée, mais d'une énergie épuisable. Dans la pratique, ceci se traduit par un refroidissement progressif du fluide produit: le doublet hydrothermique vieillit. La cinétique de ce vieillissement est le paramètre essentiel qui conditionne la viabilité économique de l'exploitation.

Les perspectives ouvertes par le concept HDR ont été jugées suffisamment intéressantes pour que plusieurs pays consacrent un effort important à son étude sur le terrain.

Des expériences in situ en vraie grandeur sont en cours aux Etats-Unis (projet de Los Alamos National Laboratory) et au Royaume-Uni (pilote de Rosemanowes conduit par la Camborne School of Mines). En France, le groupement Energeroc (INAG, EdF,

CFP, Jeumont-Schneider, Creusot-Loire) a développé un projet qui n'a pas pour l'instant recueilli l'appui d'un financement public.

2. Etude du vieillissement — Hypothèses

Les schémas d'exploitation envisagés à l'heure actuelle conduisent à limiter l'étude aux conditions suivantes:

- la circulation d'eau est concentrée dans un faible nombre de plans conducteurs (une ou plusieurs fractures parallèles), ce qui implique une description discontinue du milieu;
- la formation cristalline a une perméabilité de matrice négligeable;
- les débits d'injection sont importants (plusieurs centaines de m³/h pour un doublet industriel); ceci conduit à simplifier le bilan thermique de la fracture en négligeant les termes d'emménagement et de conduction face aux termes de convection et d'échange avec les épontes.

Bien que les gradients de température produits par l'injection puissent être importants, on néglige, dans une première approche, la distorsion de l'écoulement introduit par les phénomènes de convection naturelle: on s'intéresse à un problème de convection forcée pure.

3. Le cas de base: circulation dans une fracture unique

On choisit comme configuration de base le cas d'un doublet connecté hydrauliquement par une fracture plane unique, limitée transversalement et d'épaisseur uniforme (la forme réelle des fractures hydrauliques sans injection est en fait déterminée par des considérations de stabilité hydromécanique que nous n'aborderons pas ici).

Le problème hydraulique peut être résolu analytiquement [5]. On peut donc calculer le champ des potentiels et des lignes de courant. Le problème thermique associé doit être résolu numériquement.

On peut montrer que le vieillissement du doublet, c'est-à-dire le rapport entre la puissance thermique produite à un instant t et la puissance initiale, n'est fonction que:

- d'un temps adimensionnel:

$$t_{ad} = \frac{Q^2 \gamma_f^2 t}{\lambda_r \gamma_f D^4}$$

- du rapport de forme: $A = \frac{ZL}{D}$

avec Q : débit transitant dans la fracture,
 γ_f : capacité calorifique volumétrique du fluide,
 λ_r : conductivité thermique de la matrice,

TRANSFERTS THERMIQUES EN MILIEU FISSURE

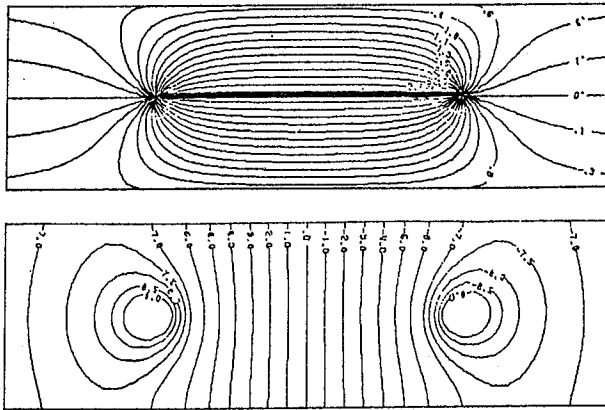


Fig. 5. — Ecoulement dans une fracture limitée transversalement. Lignes de courant et potentiels.

γ_r : capacité calorifique de la formation,
 D : distance entre les forages,
 Z_L : dimension transversale de la fracture.

Il est remarquable que ce vieillissement ne dépende pas de l'ouverture de la fracture.

Les abaques de vieillissement correspondantes, établies à partir d'un modèle numérique, sont données sur la figure 6.

Ces abaques permettent d'estimer la surface de fractures à activer pour obtenir un vieillissement compatible avec l'amortissement des investissements.

A titre d'exemple, un doublet implanté à 4 500 m, pour une température initiale de 200 °C, une puissance thermique initiale de 70 MW (soit un débit de 400 m³/h) doit posséder une surface d'échange de l'ordre du km² pour que son vieillissement reste inférieur à 30% durant 15 ans.

A partir de cette configuration de base, plusieurs types d'exploitation plus sophistiqués (doublets en parallèle ou en série) ont pu être évalués [1].

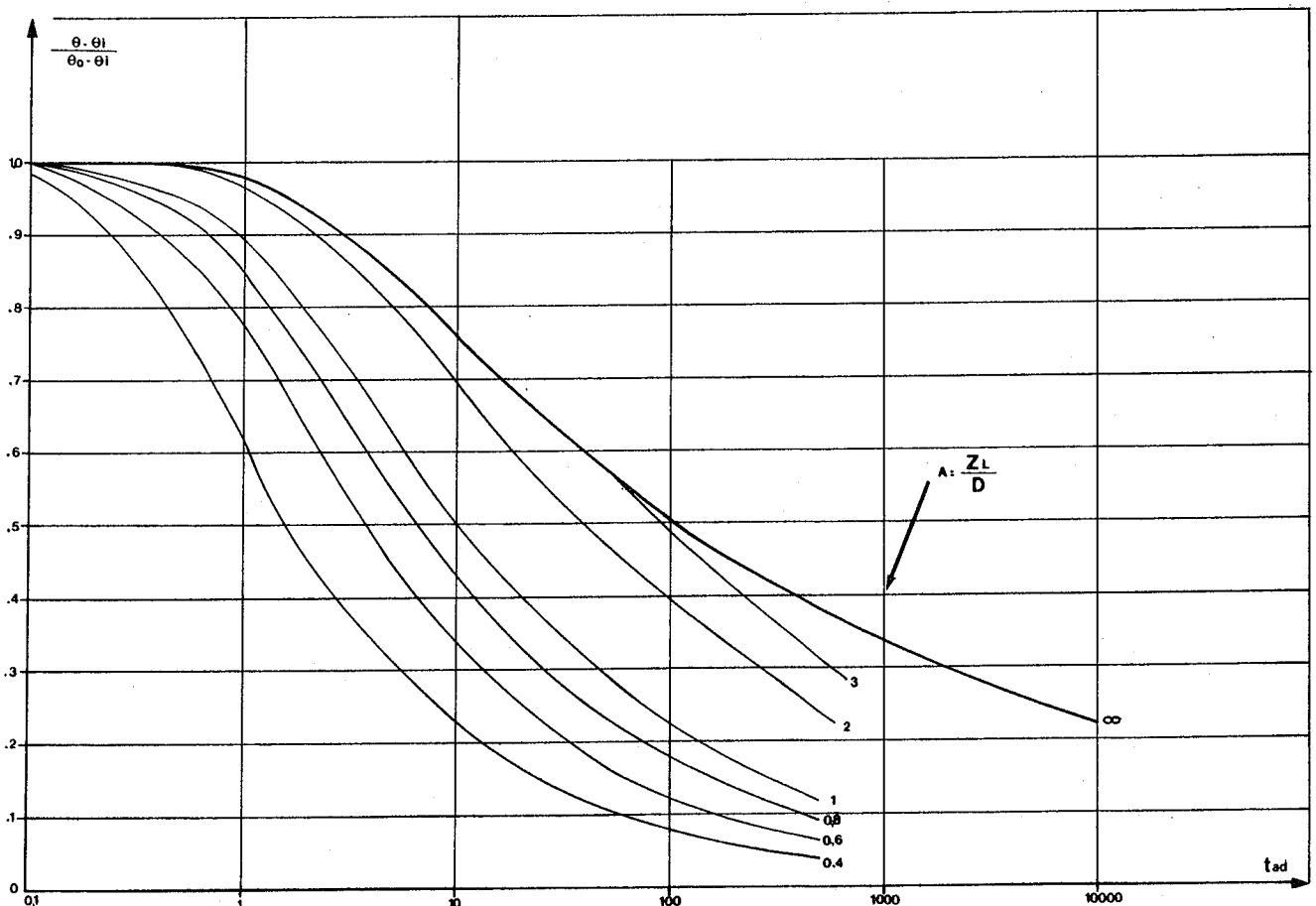


Fig. 6. — Abaques de vieillissement d'un doublet.

II. DEUXIÈME EXEMPLE : INCIDENCES THERMIQUES SUR LE MASSIF ROCHEUX DUES A L'ENFOUISSEMENT DE DÉCHETS RADIOACTIFS

Les résultats dont il va être fait état ont été obtenus à l'occasion d'études réalisées dans le cadre de contrats à frais partagés entre le Commissariat à l'énergie atomique et la Commission des Communautés européennes [9].

1. Position du problème

L'enfouissement dans les formations géologiques profondes peu perméables telles que les massifs cristallins est une des solutions actuellement envisagées pour l'évacuation des déchets radioactifs à longue durée de vie.

Parmi les perturbations apportées à la roche réceptrice, le dégagement thermique du stock de déchets dû à l'activité de la matière radioactive est l'un des plus lourds de conséquences car ses effets se manifestent non seulement à proximité immédiate du dépôt où la température peut exercer une action directe sur le milieu, mais aussi à grande distance par l'intermédiaire de l'eau souterraine. L'élévation de la température diminue la masse volumique du fluide occupant les fissures, ce qui engendre des mouvements de convection thermique même si l'eau était préalablement au repos. Dans la mesure où les mouvements de convection peuvent intervenir dans la migration d'éventuels polluants vers l'environnement, il est important de tenter d'évaluer l'ampleur de tels phénomènes.

A titre d'illustration, la théorie générale exposée précédemment sera appliquée au calcul de l'évolution dans le temps des perturbations thermiques et des vitesses de l'eau dans le cas d'un stockage de déchets de haute activité. On se limitera pour cette étude théorique à une configuration simple caractérisée par des valeurs vraisemblables des paramètres.

2. Configuration étudiée

L'échelle de l'étude concerne l'ensemble d'un massif granitique fissuré intercalé entre le stock de déchets et l'environnement humain. On assimilera, du point de vue du dégagement thermique, le dépôt à un parallélépipède rectangle de dimensions horizontales prépondérantes situé à une profondeur de 1 000 m. Le massif rocheux est supposé parcouru par un système de fractures subverticales équidistantes qui interceptent les déchets (fig. 7).

Les dimensions du dépôt, ainsi que la puissance thermique dissipée (fig. 8), correspondent à un projet type élaboré par la Société Géostock. Toutes les fissures possèdent des propriétés identiques et uniformes dans l'espace, caractérisées par une épaisseur

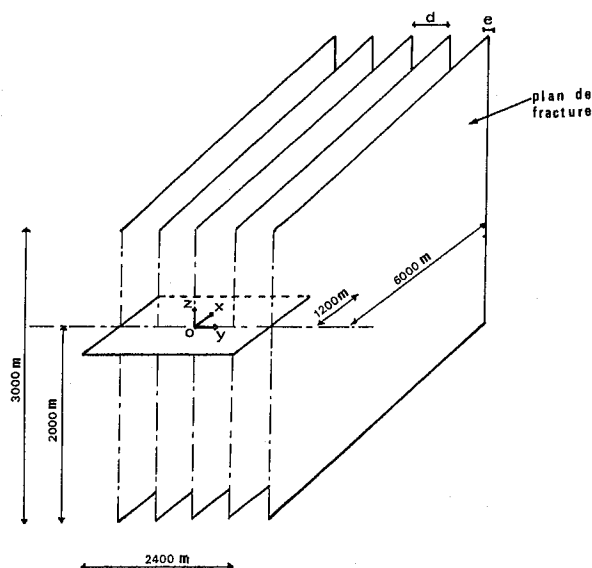


Fig. 7. — Configuration du massif fissuré.

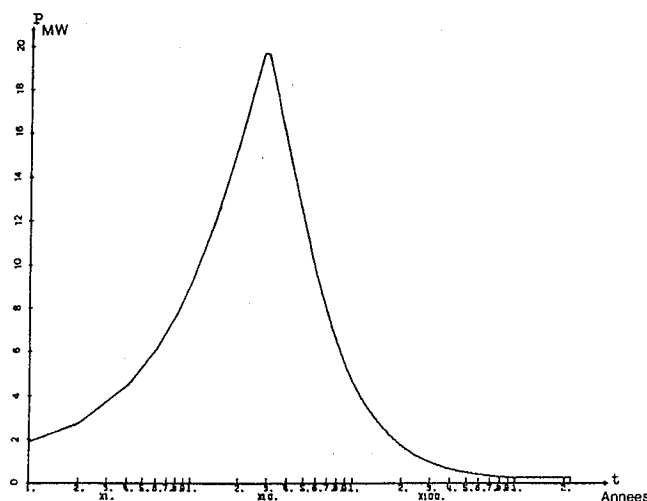


Fig. 8. — Evolution de la puissance thermique dissipée par les déchets.

de 1 mm et une conductivité hydraulique de 10^{-8} m^2 .

Le fluide est initialement au repos dans un milieu dont le gradient géothermique vertical moyen est de $0,03$ $^{\circ}C/m$.

3. Résultats des simulations

Les équations du transfert de la chaleur couplées à celles du mouvement de l'eau sont résolues numériquement par la méthode des différences finies.

Champ des vitesses du fluide et champ de température dans les fissures

La fig. 9 montre les lignes de courant dans le plan vertical des fissures mille ans après la fermeture du dépôt. On constate la présence de deux cellules convectives contrarotatives centrées sur les extrémités du dépôt. La vitesse d'écoulement est maximum le long du segment M N à la verticale du stock entre la source de chaleur et l'environnement.

La durée du parcours de l'eau entre le dépôt et la surface du massif fissuré est dès cinquante ans inférieure à 1 an; ce résultat ne prend toutefois pas en compte l'interaction entre les polluants et la roche dont l'effet est de retarder les transferts.

La vitesse du fluide continue à augmenter alors que la perturbation thermique est en régression après cent ans, sous l'effet de l'extension du front thermique (fig. 10).

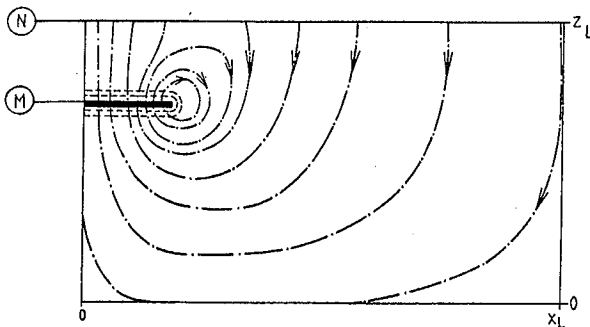


Fig. 9. — Lignes de courant et perturbation thermique dans une fracture 1000 ans après l'enfouissement des déchets.

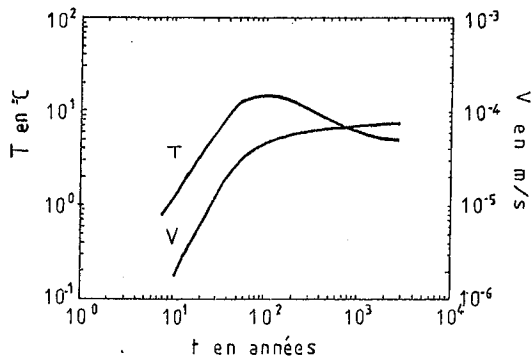


Fig. 10. — Evolution de la vitesse d'écoulement (V) et de la température (T) au voisinage des déchets (point M de la figure 9).

Influence du mouvement convectif sur le champ de température

En comparant les résultats des différentes simulations effectuées, il a été mis en évidence que le champ thermique calculé en considérant uniquement la matrice rocheuse est identique à celui obtenu en distinguant la matrice et les fissures, et en tenant compte de l'échange entre ces deux milieux selon la théorie générale. Le champ thermique est donc indépendant des caractéristiques thermiques des fissures et du champ de vitesse dans le fluide, ce qui permet de simplifier notablement les calculs. Ce résultat, vérifié pour la configuration étudiée et pour la gamme de paramètres considérée, est d'autant plus vrai que l'épaisseur et la conductivité hydraulique des fissures sont faibles et que la distance entre les fractures est grande.

L'exemple qui vient d'être évoqué met en évidence l'importance des mécanismes de convection naturelle sur les circulations souterraines à grande échelle. La configuration étudiée garde cependant un caractère théorique qu'il conviendrait de raffiner avant de tirer des conclusions définitives sur les conséquences à long terme du dégagement thermique d'un stock de déchets radioactifs. Il conviendrait notamment de tenir compte de l'effet de la convection forcée induite par le gradient hydraulique régional. Dans l'état actuel des connaissances, on ne doit retenir de tels résultats que les ordres de grandeur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. BERNAUDAT (1983) — Contribution à l'étude de l'exploitation de la chaleur des roches chaudes sèches. Thèse de docteur-ingénieur, Ecole des mines de Paris.
- [2] A.C. GRINGARTEN, P.A. WITHERSPOON (1972) — A method for analyzing pump test data from fractured aquifers. Symp. of Int. Soc. for Rock mechanics, Stuttgart.
- [3] A.C. GRINGARTEN, P.A. WITHERSPOON, Y. OHNISHI (1975) — Theory of heat extraction from fractured hot dry rocks. J. of Geophys. Res., March 1975.
- [4] F.H. HARLOW, W.E. PRACHT (1972) — A theoretical study of geothermal energy extraction. J. of Geophys. Res., December 1972.
- [5] J.M. HOSANSKI (1980) — Contribution à l'étude des transferts thermiques en milieu fissuré. Thèse de docteur-ingénieur, Université P. et M. Curie-Ecole des mines de Paris.
- [6] J.M. HOSANSKI, E. LEDOUX (1982) — Etude in situ d'un doublet hydrothermique dans un massif granitique artificiellement fracturé. Annales de Géophysique, t. 38, fasc. 3, pp. 449-458.
- [7] Cl. LOUIS (1976) — Introduction à l'hydraulique des roches. Thèse d'Etat, Université Paris VI.
- [8] Y.N. MAINI (1971) — In situ hydraulic parameters in jointed rocks. Their measurements and interpretation. Ph.D. thesis, Imperial College, London, University microfilms, Pen, Bucks (GB).
- [9] A. RIBSTEIN-COUDRAIN (1983) — Contribution à l'étude des massifs rocheux fissurés: transferts de fluide, de chaleur et de matière associés. Thèse de docteur-ingénieur, Ecole des mines de Paris, Université Paris VI.