

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 69 (1977)  
**Heft:** 11-12

**Artikel:** Etude des transferts de masse et de chaleur dans les nappes souterraines  
**Autor:** Mathey, Bernard / Recordon, Edouard / Saugy, Bernard  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-941510>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 04.04.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Zusammenfassung

Die Kenntnis der Gesetze und Parameter des Wärme- und Massentransports in einem porösen Medium führt zu einem besseren Verständnis unterirdischer Abflusssysteme. Dieses Kenntnis beruht zunächst auf Geländeuntersuchungen und Laborversuchen. Die Entwicklung mathematischer Modelle, z. B. aus isoparametrischen, dreidimensionalen, finiten Elementen  $(x, y, z, t)$ , erlaubt es, die räumliche und zeitliche Ausbreitung der thermischen oder chemischen Störungen vorherzusagen. Dabei werden hydraulischer, thermischer und chemischer Fluss gekoppelt. Die wichtigsten gegenseitigen Beeinflussungen werden diskutiert.

## Résumé

La connaissance des lois et paramètres des transferts de masse et de la chaleur dans les milieux poreux assure une meilleure compréhension des systèmes d'écoulement souterrains. Développée par des études de terrain et de laboratoire elle permet de prévoir l'extension spatiale et temporelle de perturbations thermiques ou chimiques (provoquées ou accidentelles) grâce au développement de modèles mathématiques par éléments finis isoparamétriques tridimensionnels  $(X, Y, Z, t)$  avec couplage des flux hydrauliques, thermiques ou chimiques. On évoque en particulier les principales interactions possibles.

## 1. Introduction

En 1971 s'est créé un groupe de recherches sur les écoulements souterrains comprenant l'Institut de production d'énergie et le laboratoire de géotechnique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) ainsi que le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Ses objectifs sont le développement des connaissances et l'application des modèles mathématiques aux transferts de masse et de chaleur dans les milieux poreux saturés et non saturés. Le présent article reflète les méthodes de travail et quelques-unes des activités récentes de ce groupe pluridisciplinaire.

## 2. Contexte de l'étude

La connaissance des champs thermiques et chimiques d'un aquifère est en mesure de compléter avec profit notre

## Abstract

Knowledge of the parameters and laws of mass and heat transfer in porous media assures a better understanding of ground water flow systems. Developed through field and laboratory studies, it foresees propagation of thermal or chemical disturbances (provoked or accidental) in space and time thanks to the development of mathematical models by isoparametric tridimensional finite elements  $(X, Y, Z, t)$  simulating hydraulic flux coupled with thermal or chemical flux. In particular, the principal interactions are invoked.

compréhension des systèmes d'écoulements souterrains, particulièrement dans les milieux à forte hétérogénéité. Elle permet par conséquent d'améliorer la fiabilité de la résolution du problème inverse (estimation du champ des perméabilités à partir des flux et des potentiels). D'autre part un nombre croissant de systèmes techniques (climatisation, pompes à chaleur, centrales thermiques, industries) impliquent en fonctionnement normal ou accidentel des rejets thermiques ou chimiques dans le milieu souterrain. La prévision des dommages et de l'extension spatiale et temporelle des zones perturbées exige donc une connaissance approfondie des lois et mécanismes de transfert de masse et de chaleur dans le milieu souterrain.

La diminution des ressources énergétiques à haut potentiel accroît l'attrait des industries et des particuliers pour les ressources thermiques et la grande capacité d'accumulation de chaleur des nappes souterraines, soit pour l'exploitation de l'énergie géothermique, soit pour le stockage d'énergie solaire. L'évaluation des possibilités d'exploitation exige une connaissance approfondie des conditions aux limites et des lois du comportement des nappes concernées en vue d'en assurer une gestion rationnelle et équilibrée.

## 3. Objectifs

La résolution des problèmes liés au contexte défini ci-dessus exige d'abord que par des études expérimentales de terrain ou de laboratoire on mette en évidence les principales lois qui gouvernent les transferts d'eau, de masse

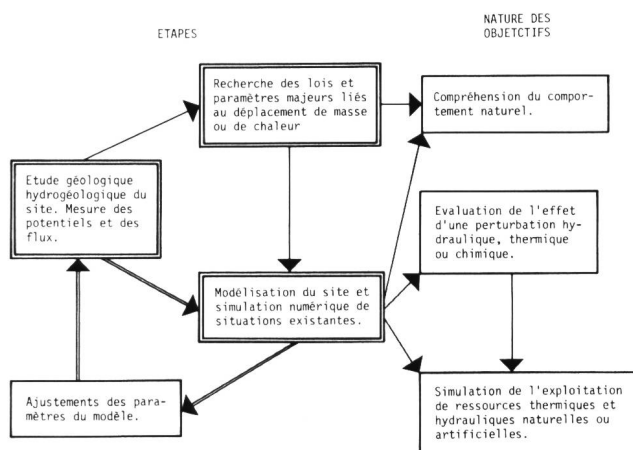


Figure 1. Représentation schématique des étapes conduisant à la réalisation des objectifs envisagés pour l'étude des transferts de masse et de chaleur.

### Exemple d'objectif concret:

- Recherche des systèmes d'écoulement au sein d'un aquifère.
- Vérification d'hypothèses sur la nature des conditions aux limites hydrauliques, thermiques ou chimiques.
- Prévision de l'extension de la zone touchée par un rejet thermique ou chimique.
- Fournir les données techniques nécessaires à circonscrire ou à éliminer un rejet (emplacement des puits, débits).
- Recherche d'un système de stockage souterrain de l'énergie solaire.
- Simulation de l'exploitation d'un champ géothermique.

et de chaleur dans les milieux poreux et que l'on estime la valeur des coefficients liés à chacune de ces lois et à leurs interactions.

Parallèlement, le développement de modèles numériques déterministes réalisant un couplage des phénomènes hydrauliques, thermiques et chimiques, facilite la vérification des hypothèses en permettant la simulation des cas étudiés expérimentalement. La fiabilité des modèles étant garantie ils permettent alors d'assurer la prévision de l'exploitation hydraulique ou thermique de l'aquifère et de simuler tout «accident» hydraulique, thermique ou chimique durant celle-ci. Le scientifique, l'ingénieur ou le praticien disposent alors des données et de l'outil de calcul nécessaires aux études de sites.

#### 4. Lois et paramètres principaux, leurs interactions

Les principaux phénomènes régissant les transferts de masse ou de chaleur dans un milieu poreux en absence d'interaction sont bien caractérisés par leurs lois respectives:

- Le comportement mécanique du squelette est bien connu en mécanique des sols.
- A l'exception des hautes vitesses (jets turbulents, milieux fissurés) et de l'hystérésis liant la teneur en eau à la pression capillaire pour laquelle des lois déterministes font pour l'instant défaut, l'écoulement de l'eau en milieu poreux est régit par la loi de Darcy.
- Enfin la diffusion thermique et la diffusion chimique en absence de flux hydraulique sont décrites par des lois simples.

En revanche, l'importance relative des interactions entre les paramètres et par conséquent les flux et les potentiels hydrauliques, thermiques et chimiques qui sont source de non linéarités, reste mal connue. Certaines déviations, par rapport aux lois de base, secondaires dans des cas simples, peuvent devenir prépondérantes, particulièrement dans la zone non saturée.

	Pression grain à grain	Pression hydraulique	Température	Potentiel chimique
Modification du squelette	Compressibilité	Boulanges Colmatage	Dilatation	Précipitation Dissolution
Flux hydraulique	Modification de la perméabilité	Loi de Darcy	Modification de la viscosité Thermo-osmose Convection naturelle	Osmose Convection thermo-haline
Flux thermique	Modification de conductivité thermique Relaxation	Convection forcée Dispersion thermique	Diffusion thermique	Libération ou absorption de chaleur par réaction chimique
Flux chimique	Adsorption Désorption	Convection forcée Dispersion chimique	Modification du coefficient de diffusion	Diffusion chimique

Figure 2. Transferts de masse et de chaleur dans un milieu poreux saturé: quelques interactions possibles entre les phénomènes.

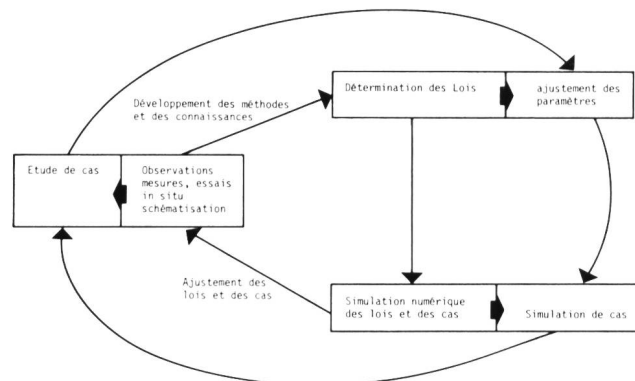


Figure 3. Démarche générale retenue en vue de la réalisation des objectifs et du contrôle de l'efficacité des moyens utilisés.

L'interaction principale correspond à la superposition de la diffusion thermique ou (et) chimique et du transport par le flux hydraulique, à laquelle s'ajoute l'effet de la gravité. Celle-ci est source d'instabilité (convection naturelle) lorsque les gradients thermiques ou (et) plus rarement chimiques provoquent des différences de densité qui dépassent certaines limites critiques. Parmi les autres interactions possibles citons:

- La variation de la perméabilité de Darcy ( $K_D$ ) en fonction de la viscosité du fluide, elle-même dépendante de la salinité et de la température.
- Les modifications des propriétés du squelette par le flux hydraulique (colmatage, boulanges).
- Les modifications des propriétés hydrauliques du terrain par précipitations ou dissolution de sels avec une constante de temps parfois très longue.
- Changement de phase du fluide (congélation, vaporisation).
- Modifications de contenu chimique et bactériologique de l'eau en fonction de la température.

Des études réalisées par le groupe, il ressort que la thermo-osmose (interaction directe entre le flux hydraulique et thermique) est négligeable en zone saturée dans un domaine de perméabilité supérieure à  $10^{-4}$  m/s.

Dans la zone non saturée, si la présence d'une phase gazeuse est déjà source d'importantes non linéarités, l'interaction des flux hydrauliques, thermiques (thermo-osmose) et chimique agit de manière prépondérante sur le mécanisme de transfert de masse et de chaleur. Dans le domaine des interactions, la recherche de lois déterministes (particulièrement pour le comportement de la zone non saturée) et par conséquent la possibilité de simulations numériques sont freinées par le manque de données expérimentales inhérent à la difficulté des conditions de mesure.

#### 5. Méthodologie

Lors du démarrage de l'étude en 1971, l'accent a été mis sur la nécessité de confronter et de compléter les méthodes de travail et les objectifs de groupes de travail de différentes disciplines orientées vers les sciences naturelles (hydrogéologues), les sciences exactes (géotechniciens, physiciens) et les systèmes de gestion et d'exploitation (ingénieurs).

Ainsi, au niveau du développement et de l'acquisition des connaissances et des méthodes d'analyse, l'organisation du groupe coïncide avec la démarche nécessaire à l'étude de cas réels.

En effet, les observations et mesures de terrain ainsi que les essais in situ permettent de sélectionner les principaux paramètres liés au transfert de chaleur et d'estimer les interactions les plus importantes (convection naturelle,

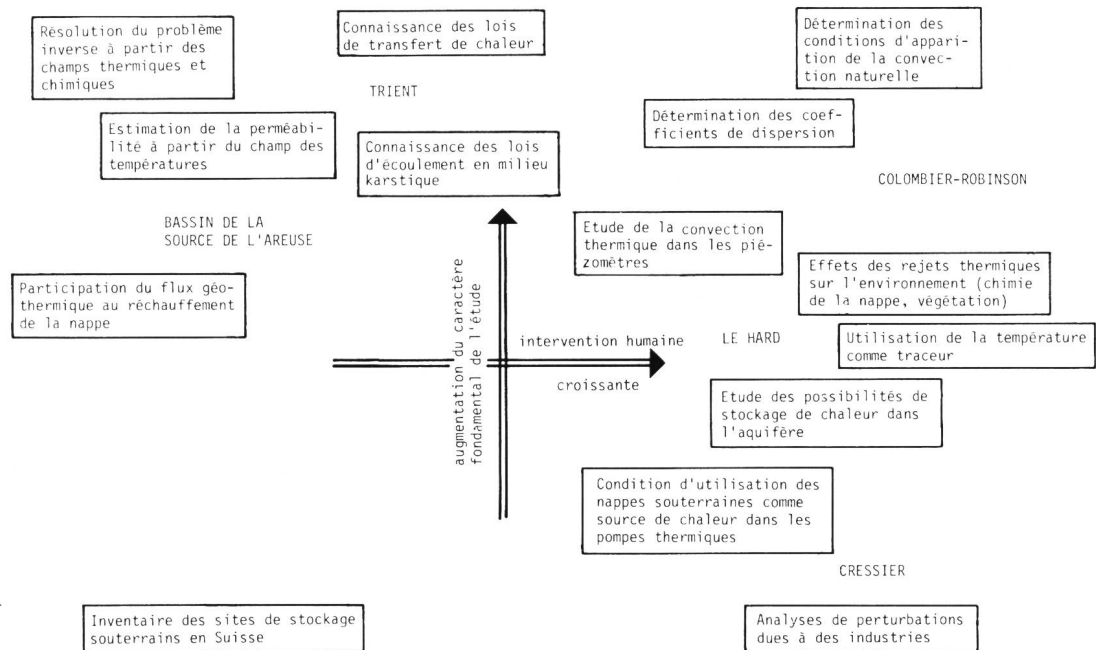


Figure 4. Domaines concernés par l'étude expérimentale des transferts de chaleur in situ.

variation des teneurs en oxygène et de la viscosité). La possibilité de reconstituer en laboratoire des conditions aux limites simples sur des échantillons ou des modèles réduits, permet la mesure des principaux coefficients ( $K_D$ ,  $S$ ,  $\lambda^*$ ,  $C_V$ ,  $K_{DF}$ ) et la vérification des lois de transfert. La simulation numérique assure alors le contrôle de la qualité de la schématisation du cas et des lois retenues qu'exige une prévision fiable. Ainsi les caractéristiques hydrauliques, la géométrie et les conditions aux limites de la nappe étudiée sont estimées in situ. Les paramètres hydrauliques et thermiques sont vérifiés en laboratoire et la simulation vient confirmer ou infirmer la qualité des hypothèses inhérentes à la schématisation du site. Cette procédure de contrôle en trois étapes est rendue indispensable par l'hétérogénéité très fréquente du terrain, par la complexité de la géométrie de l'aquifère, et par la difficulté de déterminer les conditions aux limites, celles-ci devant être estimées sur la base d'observations générales.

## 6. Résultats obtenus

### 6.1. Mesures et essais in situ

Cinq sites expérimentaux ont été retenus, marqués par des interventions humaines plus ou moins importantes (figure 4).

L'étude du gradient géothermique dans le bassin karstique de la source de l'Areuse révèle que la majeure partie du flux géothermique est interceptée par les eaux souterrai-

nes. Le régime thermique de la nappe confirme le schéma maintenant admis pour représenter la circulation de l'eau dans un massif à perméabilité hétérogène [8]. La simulation du déplacement d'une perturbation chimique dans le bassin a également été réalisée avec succès.

L'analyse des températures des venues d'eau dans une galerie de dérivation du massif granitique de Trient (Valais) a permis de construire le champ des perméabilités à l'intérieur du massif, valeurs qui ont été ajustées par le modèle mathématique thermo-hydraulique traçant ainsi la voie d'une solution générale du problème inverse en utilisant les températures (figures 5 et 15)

L'étude du champ des températures de la nappe phréatique sous une raffinerie de pétrole (Cressier/NE) révèle l'existence de points chauds (figure 6) dans les zones à fort rayonnement (fours, torchère basse, tanks de stockage de bitume) [10].

La recharge artificielle de la nappe du Hard (Bâle) avec un débit moyen de 400 l/s a permis de mesurer l'amortissement de l'onde thermique saisonnière. Après calage du modèle la simulation des injections et prélèvements de la nappe a permis de reconstituer avec précision l'évolution des températures de l'aquifère sur plusieurs cycles annuels (figure 7).

Une série d'essais de pompage et d'injection dans la nappe phréatique de Colombier-Robinson, avec contrôle du champ des températures ont permis d'estimer l'hétérogénéité et l'anisotropie de la perméabilité de l'aquifère, confirmées en laboratoire et vérifiées par modèle mathématique tridimensionnel thermo-hydraulique (figure 8) [2, 3]. L'injection d'eau à 45 °C provoque l'apparition de convection naturelle qui constitue alors un des paramètres majeurs régissant le déplacement de la perturbation thermique (figures 9 et 12). Un essai de pompage, 5 mois après l'injection, montre que la récupération de la chaleur injectée est possible avec des rendements de l'ordre de 50 %, mais son niveau énergétique est lié à l'importance de la perturbation thermique relativement à la masse de l'aquifère. Notons que l'injection d'eau chaude (ici 45 °C) dans un aquifère phréatique provoque une baisse rapide des teneurs en oxygène, suite à une augmentation de l'activité bactérienne. Un développement de la masse végétale en surface, dû à la diffusion de la chaleur au tra-

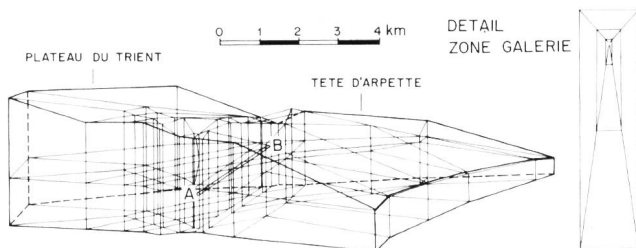


Figure 5. Massif de Trient: réseau d'éléments du modèle tridimensionnel. A—B: Galerie de dérivation. A droite une coupe verticale détaillée passant par la galerie. Le cercle indique la position de la galerie. Voir aussi figure 15.

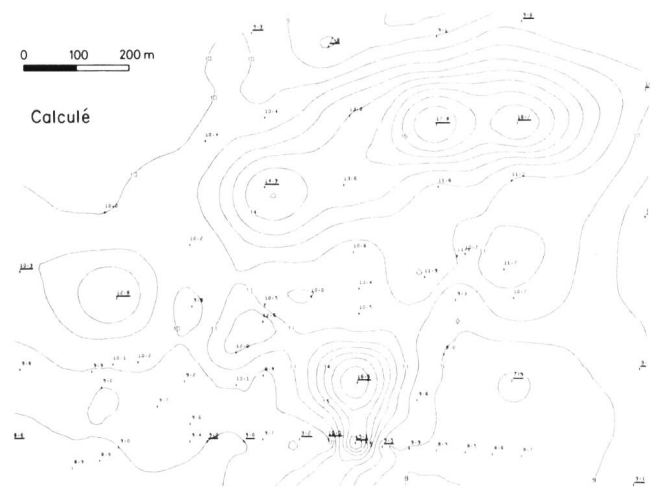
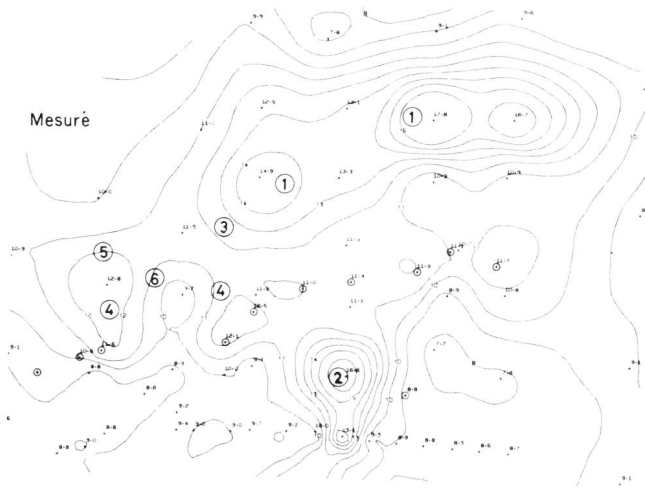
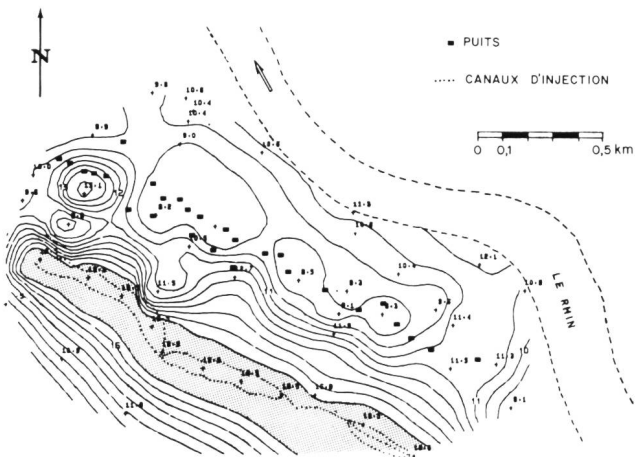


Figure 6. Nappe de la raffinerie de Cressier. Isothermes de la nappe mesurées et calculées par le modèle mathématique. + puits de pompage; 1. fours; 2. torchères basses; 3. réservoirs 80 °C; 4. réservoirs 130 °C; 5. réservoirs 200 °C; 6. réservoirs 25 °C.



A gauche

Figure 7. Isothermes de la nappe du Hard à l'est de Bâle mesurées à 4 mètres sous la surface de la nappe le 2 juillet 1973. La zone d'infiltration est marquée par un plateau thermique supérieur à 18 °C (trame), la zone des pompages par des températures inférieures à 9 °C (eaux infiltrées en mars—avril).

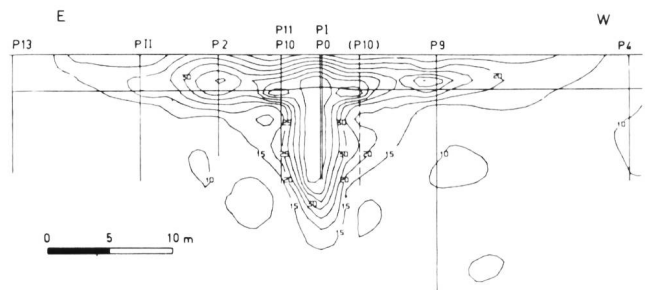


Figure 9. Coupe thermique (isothermes en °C) selon un axe E—W dans la nappe de Colombier-Robinson durant l'injection d'eau à 45 °C en présence de convection naturelle.

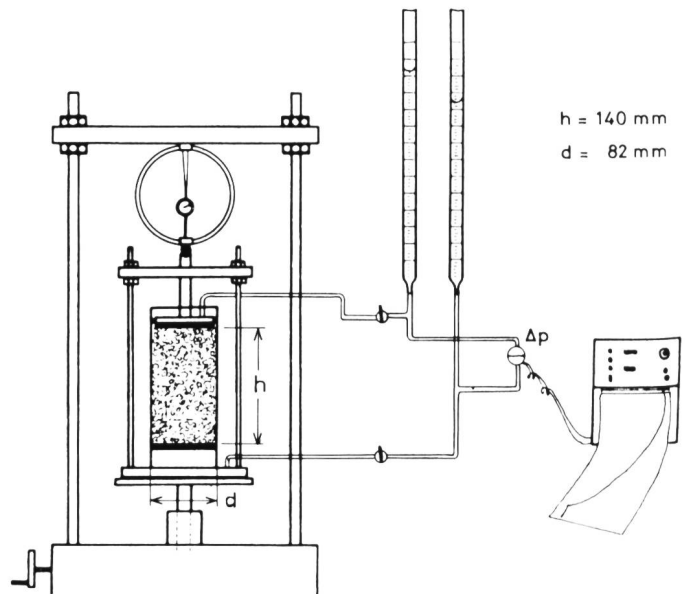
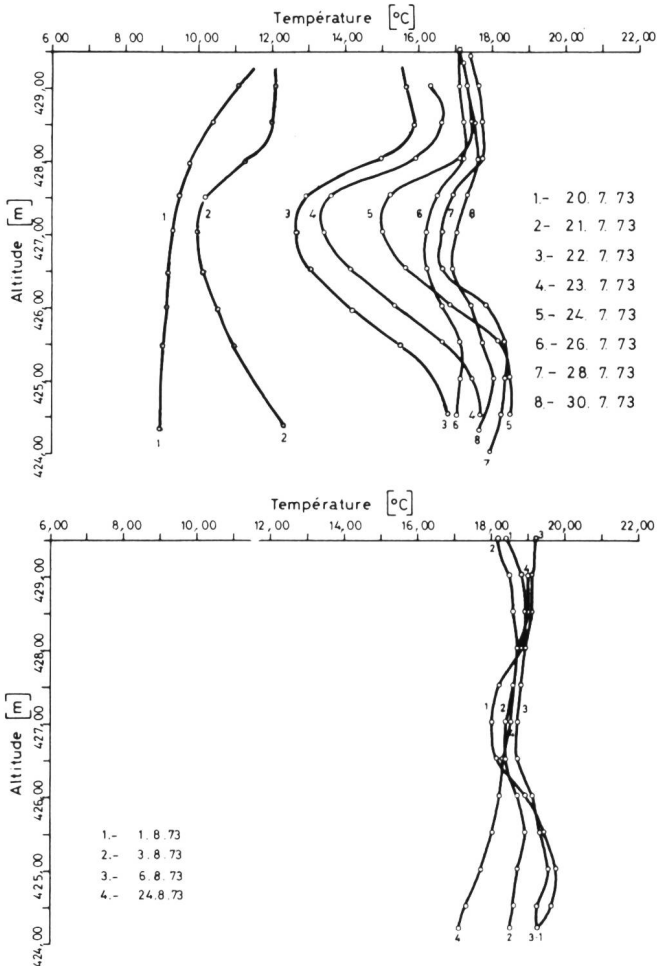


Figure 10. Schéma du dispositif de mesure du coefficient de perméabilité  $K_D$ .

A gauche

Figure 8. Profils thermométriques relevés dans le piézomètre no 2 à 8 m du puits au cours d'un essai d'injection d'eau à 20 °C (320 l/min) dans la nappe de Colombier-Robinson.

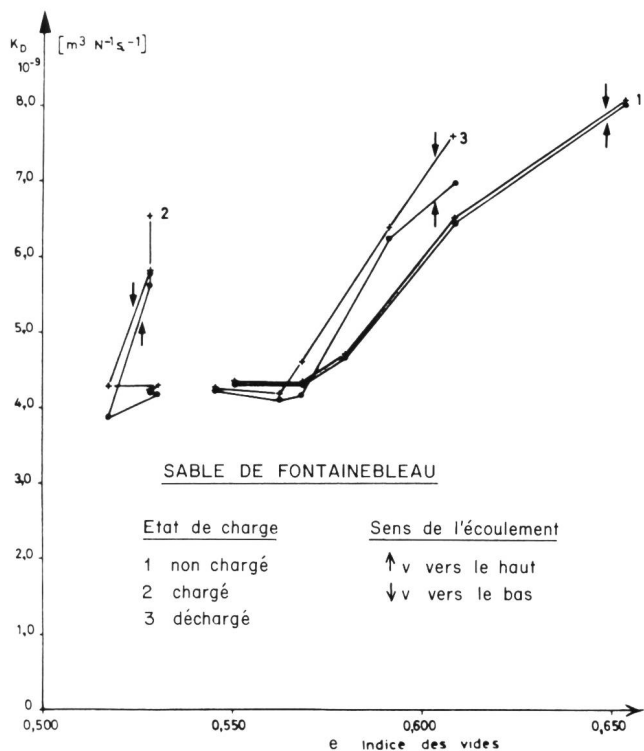


Figure 11. Coefficient de perméabilité en fonction de l'indice des vides pour 3 cas de charge dans les 2 sens d'écoulement.

vers de la zone non saturée (env. 2 m d'épaisseur), a pu être constaté.

### 6.2. Résultats obtenus en laboratoire

Les recherches en laboratoires ont pour objectif d'étudier expérimentalement les caractéristiques physiques des milieux poreux: le coefficient de perméabilité de Darcy  $K_D$ , le coefficient de conductivité thermique de Fourier  $\lambda^*$ , la capacité calorifique  $C$ , le coefficient de couplage des deux flux hydraulique et thermique  $K_{DF}$ .

Il s'agit d'une part de mettre au point des appareils permettant la mesure de ces coefficients sur des échantillons de sols provenant des sites étudiés et d'autre part d'examiner l'influence sur ces coefficients de divers paramètres tels que, par exemple: la compacité et la teneur en eau d'un sol.

Trois appareillages originaux ont été construits:

L'échantillon utilisé pour la mesure du coefficient de perméabilité  $K_D$  est placé dans un cylindre (figure 10) entre deux pierres poreuses. Une plaque rigide, posée sur la pierre poreuse supérieure permet d'exercer un effort vertical sur le squelette minéral, simulant ainsi les contraintes effectives dues au poids des couches supérieures. La différence piézométrique  $p$  est mesurée au moyen d'un capteur électronique et enregistrée sur bande de papier. L'essai consiste à introduire un  $\Delta p$  initial de l'ordre de 50 mm provoquant un écoulement non permanent jusqu'à annulation de  $\Delta p$ , par équilibrage des niveaux d'eau dans les tubes piézométriques.

La figure 11 donne quelques résultats et montre que pour le sable soumis aux essais, d'une granulométrie comprise entre 0,1 et 0,4 mm, le coefficient de perméabilité varie en fonction de l'indice des vides, c'est-à-dire du volume des interstices ou selon que l'échantillon est soumis ou non à une contrainte verticale de 5 kg/cm<sup>2</sup>. L'influence du sens de l'écoulement est moindre.

Le dispositif expérimental, représenté à la figure 12, permet la mesure du coefficient de conductivité  $\lambda^*$  et de la capacité calorifique  $C$ . L'originalité de la méthode réside dans le fait qu'en créant un flux thermique non permanent

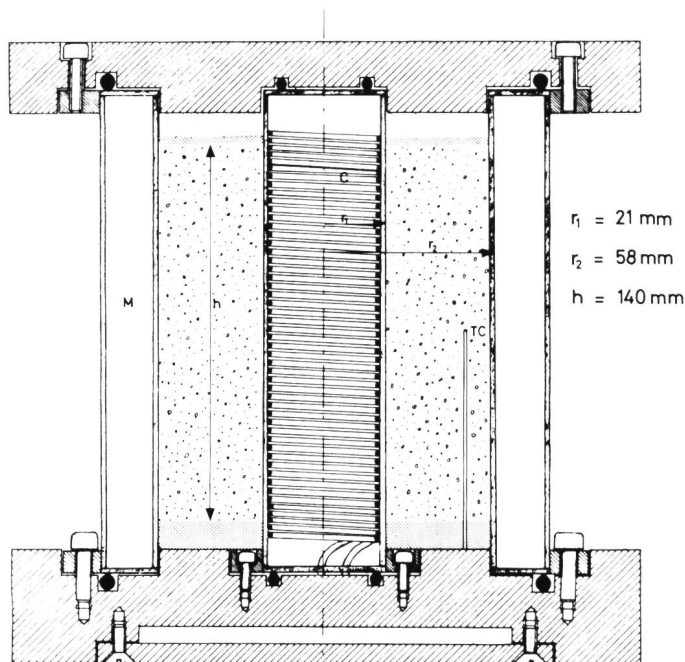


Figure 12. Schéma de la cellule de mesure des coefficients thermiques des terrains meubles. C corps de chauffe; M manchon d'eau à température constante; TC thermocouple.

et radial entre le corps de chauffe contenu dans le cylindre central de rayon  $r_1$  et le cylindre extérieur  $r_2$ , la valeur des températures enregistrées toutes les trois minutes pour les six thermocouples TC permet de déterminer les deux coefficients  $\lambda^*$  et  $C$  à l'aide d'un seul essai. De l'eau, à température déterminée, inférieure à celle du corps de chauffe, circule dans l'espace M.

La figure 13 donne quelques valeurs  $\lambda^*$  en fonction de la teneur en eau pour le sable de Fontainebleau et pour un échantillon provenant du site de Colombier-Robinson près de Neuchâtel. Ces résultats sont comparés aux résultats classiques de Kersten.

Le troisième dispositif expérimental (figure 14) a permis de vérifier que le coefficient de couplage  $K_{DF}$  est d'une valeur négligeable vis-à-vis des autres coefficients. Il est compris entre 0 et 10<sup>-3</sup>. L'appareil contient au-dessus et au-dessous de l'échantillon des serpentins dans lesquels circule de l'eau à température  $T_2$  et  $T_1$  créant un gradient thermique  $\Delta T/h$ . Si, en l'absence de tout écoulement hydraulique, ce gradient thermique crée une différence de pression  $\Delta p$ , on dit qu'il y a thermo-osmose. Ce phénomène est alors caractérisé par  $K_{DF}$ . Nos expériences ont montré que ce phénomène peut être négligé pour des milieux à perméabilité moyenne ou élevée.

Une description détaillée des appareillages et des résultats obtenus est donnée dans l'article [4].

### 6.3. Modèles numériques

La connaissance des lois et coefficients majeurs régissant les transferts de masse et de chaleur dans les milieux poreux étant fournis par les essais de laboratoire, on peut alors développer les moyens numériques nécessaires à la simulation des sites étudiés.

On sait que la géométrie du site et la distribution spatiale des caractéristiques physiques de l'aquifère sont déterminantes pour la prévision du déplacement des perturbations hydrauliques, thermiques ou chimiques. La méthode des éléments finis conduit à discrétiser la géométrie du site et permet de simuler le comportement de la nappe considérée par l'ajustement d'éléments juxtaposés dans

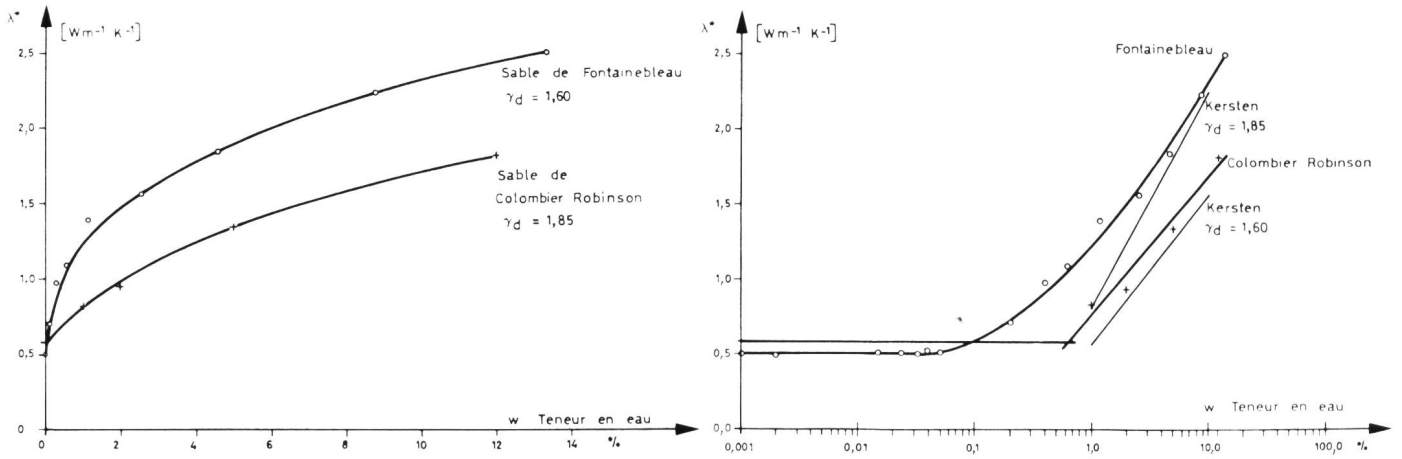


Figure 13. Conductivité thermique  $\lambda$  en fonction de la teneur en eau ( $\gamma_d$  = densité apparente).

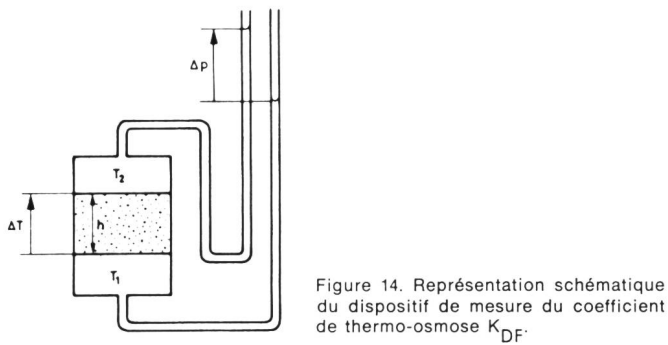


Figure 14. Représentation schématique du dispositif de mesure du coefficient de thermo-osmose  $K_{DF}$ .

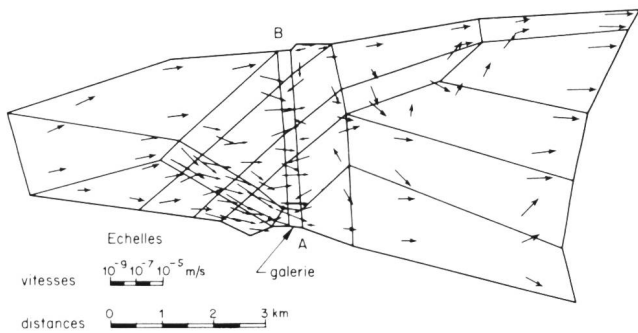


Figure 15. Massif de Trient: Coupe horizontale passant par la galerie A—B. Champs des vitesses de Darcy calculées par le modèle TRIDIH après ajustement des perméabilités à partir des données thermiques et hydrauliques, voir aussi figure 5. (D'après Favrod, Jamier, et Menjot dans [3].)

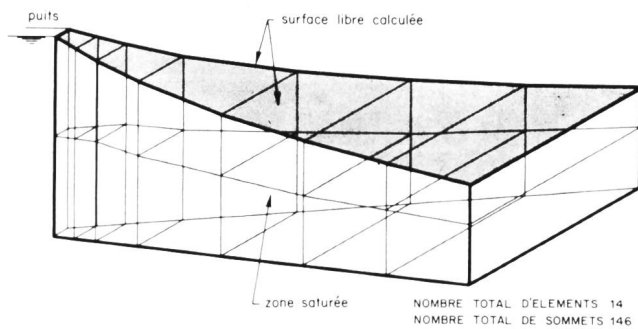
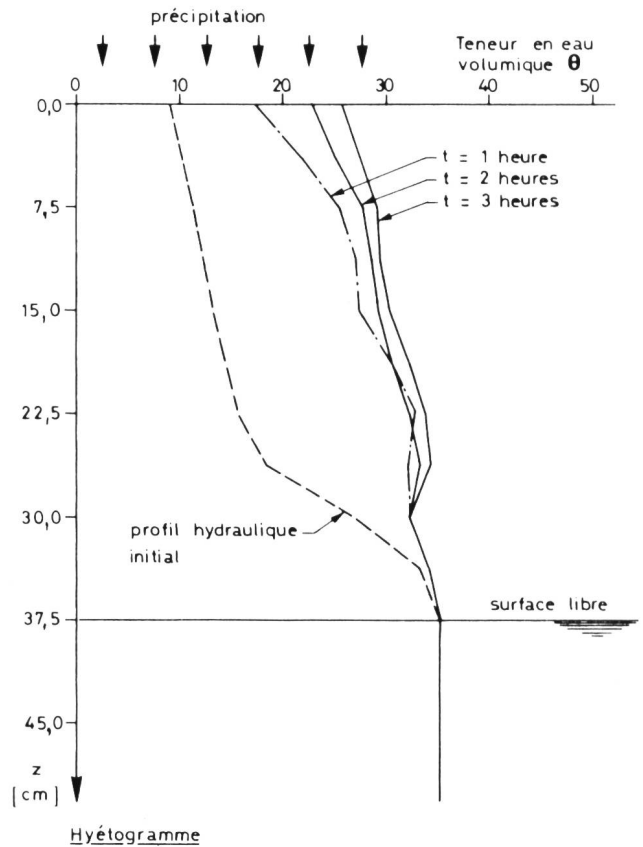


Figure 16. Ajustement du réseau d'éléments pour la recherche de la surface libre dans un milieu homogène et isotrope en symétrie radiale.



Hyétoqramme

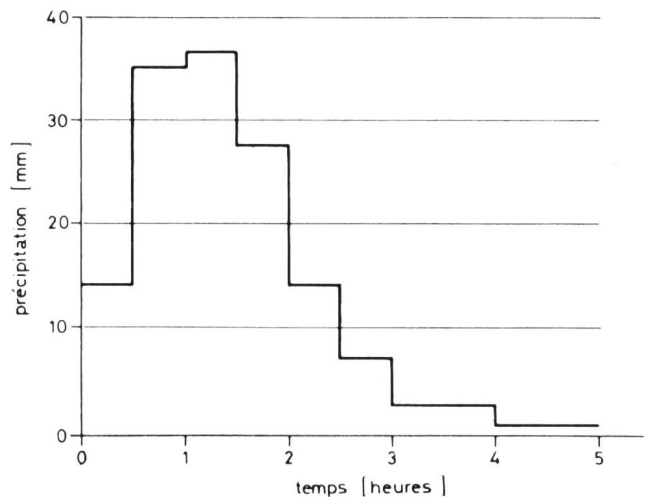


Figure 17. Modification du profil hydrique dans un sol (en haut) au cours d'une averse (en bas) calculé par le modèle THETA à l'aide d'un réseau de 12 éléments (d'après Favrod et Menjot dans [2]).

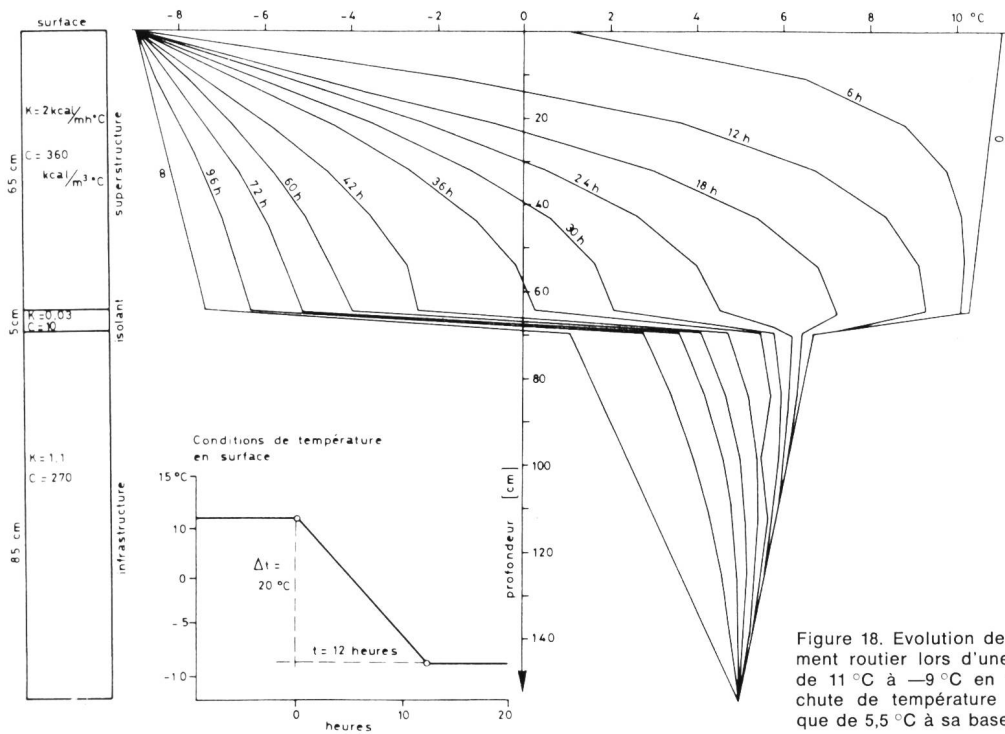


Figure 18. Evolution de la température dans un soussement routier lors d'une chute de la température de l'air de 11 °C à -9 °C en 12 heures. Au toit de l'isolant la chute de température est de 18 °C, alors qu'elle n'est que de 5,5 °C à sa base (Inédit dans [3]).

lesquels les écoulements sont régis par des lois et des coefficients propres à chacun de ces éléments. Les modèles développés ici utilisent des éléments tridimensionnels isoparamétriques à 60° de libertés s'adaptant facilement à des géométries complexes. Les programmes de calcul développés dans ce sens ont été conçus et réalisés par Favrod et Menjot [1, 2, 3].

Considérons d'abord un écoulement hydraulique en milieu saturé régi par la loi de Darcy et les conditions aux limites du modèle. Le programme TRIDIH détermine les vitesses d'écoulement pour une nappe captive ou une nappe libre dont la surface est connue. La figure 15 représente le champ des vitesses calculées selon une coupe horizontale dans le réseau d'éléments du massif de Trient (figure 5). L'étude successive de plusieurs hypothèses sur la distribution des perméabilités a permis d'ajuster celles-ci de façon à les rendre compatibles avec les conditions aux limites connues (ici débits de la galerie et à la périphérie du massif). Le champ de vitesse étant connu, le modèle est alors prêt pour simuler le comportement de la nappe vis-à-vis d'une perturbation hydraulique ou thermique. Dans le cas de la galerie de Trient, un calage plus fin des perméabilités a été obtenu par simulation thermique en ajustant les températures données par le modèle avec les températures des venues d'eau mesurées dans la galerie.

En régime transitoire, ou lorsqu'il s'agit de rechercher la surface libre d'un écoulement, le domaine de validité des lois d'écoulement en zone saturée, et par conséquent le domaine de calcul et les conditions aux limites sont constamment modifiées. La figure 16 fournit un exemple de recherche de la surface libre entre une tranchée et un puits.

Des tentatives ont été faites pour considérer globalement les zones saturées et non saturées dans un même modèle. Si la pression hydraulique régit l'écoulement dans la zone saturée, la succion capillaire, qui est fonction de la teneur en eau, détermine celui de la zone non saturée. Le recours à un modèle traitant simultanément les deux zones

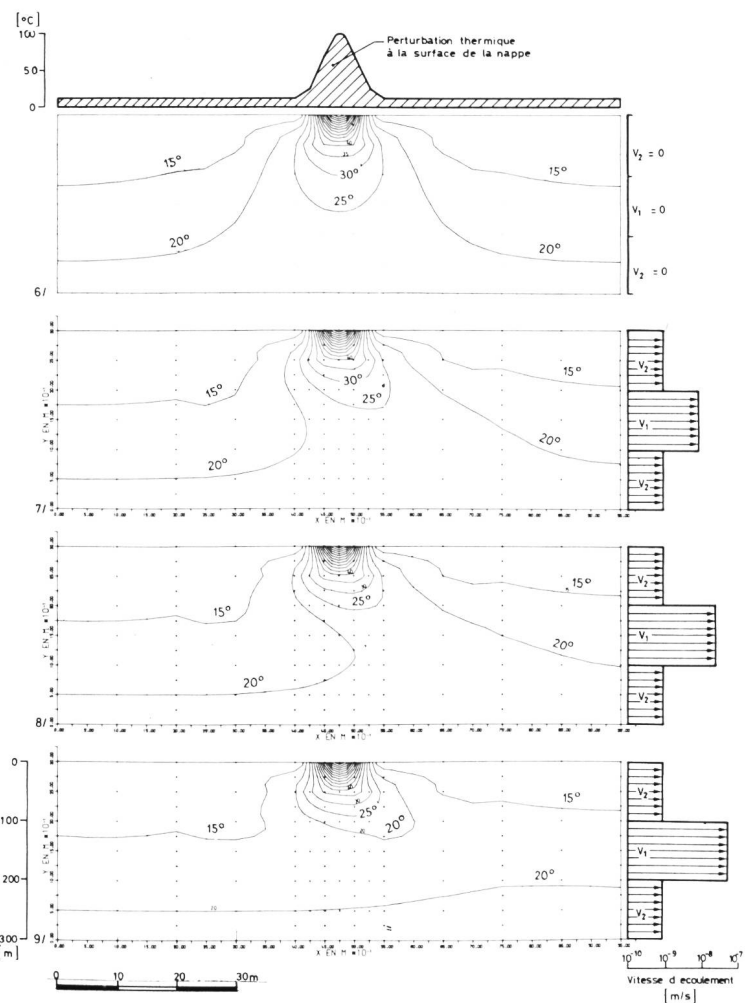


Figure 19. Influence du champ de vitesse sur l'extension d'une perturbation thermique dans un aquifère après établissement d'un régime permanent hydraulique et thermique. Une température constante de 22 °C est appliquée au mur de l'aquifère (d'après Favrod et Menjot, à paraître [7]).



est toutefois d'un intérêt pratique très limité en raison du nombre élevé d'éléments nécessaires à la définition précise de la surface libre. La figure 17 représente l'évolution d'un profil hydrique dans un sol au cours d'une averse, calculé en ne tenant compte que de la zone non saturée. En absence d'écoulement d'eau, les transferts thermiques ou chimiques sont purement diffusifs et suivent des lois analogues à la loi de Darcy, ce qui autorise l'utilisation des modèles hydrauliques sans modifications notables. La figure 18 illustre le calcul de l'évolution des températures dans une chaussée comportant une couche isolante, à la suite d'une forte chute de la température ambiante.

Lorsqu'à la diffusion thermique ou chimique s'ajoute un transport sous l'effet d'un flux hydraulique de vitesse régulière et modérée, le comportement de l'ensemble peut être simulé par le modèle TRIDITH développé à cet effet. La figure 19 représente un exemple théorique de perturbation thermique dans un milieu saturé avec ou sans écoulement. Les perturbations thermiques provoquées dans la nappe par la raffinerie de Cressier (figure 6) ont fait l'objet d'un calcul identique. On a également étudié le déplacement d'une zone à forte concentration de calcium dans le bassin alimentaire de la source de l'Areuse ( $S = 129 \text{ km}^2$ , débit moyen de la source  $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Un seuil souterrain situé à l'aplomb de la Brévine provoque une forte concentration des filets liquides dont l'effet est très net sur le développement de la perturbation.

Lorsque les vitesses d'écoulement s'accroissent, l'apparition d'instabilité numérique rend difficile la simulation en régime transitoire thermique. On doit alors recourir à un découpage fin des zones soumises à de fortes perturbations hydrauliques. C'est le cas, par exemple, pour la simulation de la nappe du Hard ou de celle d'un essai d'injection d'eau dans la nappe de Robinson-Colombier où il s'est avéré nécessaire de poursuivre l'étude thermique sur une partie seulement du site à l'aide d'un réseau plus fin (figure 20). Les résultats sont alors très satisfaisants.

### 7. Travaux en cours

En laboratoire les chercheurs du groupe développent une méthode de mesure des coefficients thermiques des sols (conductivité thermique et chaleur spécifique) à partir de l'effet Peltier. En effet l'impédance d'une cellule Peltier est fonction des propriétés thermiques du milieu qui l'entoure. Si la méthode se révèle assez précise on pourra suivre sur le terrain l'évolution de ces propriétés avec les variations de l'humidité du terrain. Le rôle de la dispersion thermique lorsque les vitesses du fluide sont élevées, et les conditions d'apparition de la convection naturelle dans le milieu à symétrie circulaire, sont actuellement étudiées sur le plan théorique et leur simulation envisagée. La possibilité d'utiliser de façon systématique le champ de température de la nappe comme élément de solution du problème inverse (recherche du champ des perméabilités à partir de la surface piézométrique) est testée au moyen des modèles et les premiers résultats sont très positifs.

Tout en poursuivant la simulation de cas réels, on s'attache à simuler les hétérogénéités de perméabilité que l'on rencontre dans les terrains fissurés par l'introduction d'éléments filiformes (barres) ou plans (coques). L'introduction de non linéarités comme la variation de la viscosité et de la masse volumique avec la température ou du coefficient de diffusion thermique avec la teneur en eau devraient améliorer la précision des modèles mathématiques. Un inventaire des aquifères qui, en Suisse, pourrait convenir

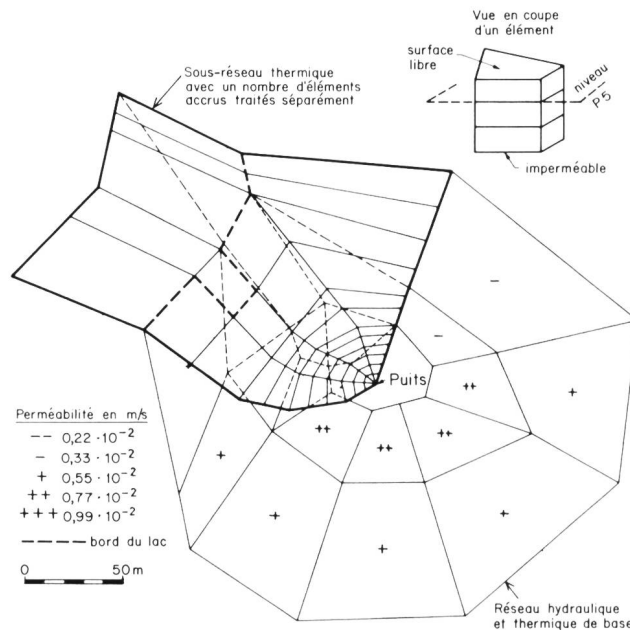


Figure 20. Nappe de Colombier-Robinson. Coupe horizontale au niveau  $P_5$  du réseau d'éléments avec jonction d'un sous-réseau destiné à améliorer la précision des solutions numériques. Une augmentation de la densité des éléments dans la zone du puits (non représentée) est également réalisée (d'après Favrod, Jamier, et Menjot dans [3]).

au stockage de chaleur produite durant l'été par des centrales thermiques ou solaires est en cours et la simulation d'une exploitation thermique sera réalisée.

Le caractère polyvalent des modèles devrait permettre de les employer prochainement à l'étude du déplacement d'hydrocarbure après leur mise en solution dans la nappe.

#### Quelques références bibliographiques aux travaux du groupe

- [1, 2, 3] Groupe d'étude sur le comportement thermique des nappes souterraines: Rapports d'activité I (1973), II (1974), III (1975). Inédit Lausanne-Neuchâtel.
- [4] Bovet D., Cotton L., Menjot A., Recordon E. (1976): Recherches expérimentales sur les propriétés thermiques et hydrauliques des sols. «Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.» No 350, Vol. 73.
- [5] Favrod J. D., Jamier D., Menjot A. (1975): Simulation des écoulements souterrains et de la thermique du massif de Trient (VS). Inédit dans [3].
- [6] Favrod J. D., Menjot A. (1975): Description des modèles mathématiques teneur en eau et potentiels hydrauliques de la zone non saturée. Inédit dans [3].
- [7] Favrod J. D., Menjot A. (1976): Simulation par modèle mathématique du comportement hydraulique et thermique des nappes souterraines. A paraître.
- [8] Mathy B. (1974 I): Gradient géothermique et hydraulique souterraine dans un aquifère karstique. «Bull. Soc. Neuchâtel. Sc. Nat.» (97) p. 301—314.
- [9] Mathy B. (1974 II): Utilisation des eaux souterraines comme source de chaleur dans les pompes thermiques. Inédit dans [2]. 38 p.
- [10] Mathy B., Menjot A., Saugy B. (1974): Modifications du champ des températures de la nappe souterraine sous une raffinerie de pétrole. Mém. AIH, TX-1, p. 94—99.
- [11] Mathy B. (1975): Le stockage de chaleur dans les nappes souterraines. (Application à l'énergie solaire.) II symp. SSES-EPFL Lausanne. 12 p.
- [12] Mathy B. (1977): Development and resorption of a thermal disturbance in a phreatic aquifer with natural convection. «Journal of Hydrology», 34, p. 315—334.

#### Remerciements

Nous remercions le Fond National Suisse de la Recherche Scientifique qui assure la majeure partie du financement de cette étude. MM. Favrod et Menjot de l'Institut de production d'énergie de l'EPFL, Bovet, Breton et Cotton du Laboratoire de géotechnique de l'EPFL et Claivaz, Jamier et Pasquier du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel ont participé activement aux travaux du groupe et contribué aux succès de la présente étude.

#### Adresses des auteurs:

B. Mathy, Centre d'Hydrogéologie de l'Université,  
11, rue E. Argand, 2000 Neuchâtel 7  
Prof. E. Recordon, Laboratoire de géotechnique de l'EPFL,  
22, rue de Provence, 1007 Lausanne  
B. Saugy, Institut de production d'énergie de l'EPFL,  
17, av. Dapples, 1006 Lausanne