



programme de recherche finalisée  
thermalisme : eaux sulfurées des Pyrénées

rapport de synthèse final

Ph. Jean  
J.-C. Soulé

étude subventionnée par :  
Conseil Régional Midi-Pyrénées  
Ministère de l'Industrie  
et de l'Aménagement du Territoire

avril 1990  
R 30 881

MPY 4S 90

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**  
Agence Midi-Pyrénées

Avenue Pierre-Georges-Latécoère - 31400 TOULOUSE - France  
Téléphone : (33) 61.52.12.14 - Télécopieur : (33) 61.25.67.76

*Ce programme de recherche a été conduit par une équipe du B.R.G.M. toulousain avec la participation et l'appui technique de spécialistes de différents départements thématiques et laboratoire du B.R.G.M.*

CONCEPTION, COORDINATION

CHEF DE PROJET                      J.C. SOULE  
BRGM/ Midi-Pyrénées (Toulouse)

CONSEIL SCIENTIFIQUE              J.P. SAUTY  
M. LOPOUKHINE  
BRGM/Département Eau (Orléans)

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

F. IUNDT (Orléans)	Hydrochimie
Ph. JEAN (Orléans)	Simulation mathématique
M. NARTET (Toulouse)	Mesures in situ
J.C. SOULE (Toulouse)	Hydrogéologie
Y. TERNET (Toulouse)	Géologie

LABORATOIRE D'ANALYSES

Laboratoire de l'Eau de Toulouse    : analyses chimiques

Laboratoires du BRGM                : analyses éléments traces  
mesures isotopiques  
datations au carbone 14

PROGRAMME DE RECHERCHE FINALISEE

THERMALISME : EAUX SULFUREES DES PYRENEES

RAPPORT DE SYNTHESE FINAL

ETUDE SUBVENTIONNEE PAR LA REGION MIDI-PYRENEES

R 30881  
MPY 4S 90

AVRIL 1990  
Ph. JEAN  
J.C. SOULE

RESUME

Les circulations hydrothermales en milieu de socle (sulfurées et carbo-gazeuses) représentent 50% des sites hydrothermaux français. Dans les Pyrénées les eaux sulfurées sodiques liées aux massifs granitiques de la Chaîne Axiale constituent la matière première des plus célèbres stations thermales.

Pour mieux maîtriser cette ressource, le BRGM/Midi-Pyrénées a entrepris, sur cofinancement du Conseil Régional Midi-Pyrénées et du Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire, un programme de recherche sur ces systèmes hydrothermaux. Le présent rapport expose les principaux résultats obtenus; il fait suite à un rapport de synthèse intermédiaire publié en décembre 1988.

Le programme a débuté par la sélection du site le plus représentatif. Le système hydrothermal sulfuré de Cauterets a été choisi après examen d'une dizaine de corps granitiques.

Les données structurales du granite et les données hydrogéologiques ont permis de bâtir un modèle mathématique conceptuel représentant une circulation en U. Puis les études hydrochimiques et isotopiques ont conduit à proposer l'existence de deux circuits en U emboîtés, l'un donnant les sources de Cauterets Nord et l'autre celles de Cauterets Sud. Une seconde modélisation a été entreprise en introduisant les données nouvelles (âges de l'eau, altitudes d'infiltration, chimie...), et en particulier en simulant deux circuits. Le modèle mathématique a alors permis de vérifier la cohérence des hypothèses hydrodynamiques et thermiques émises pour expliquer la formation des deux circuits emboîtés à Cauterets.

.../..

---

Réalisation du rapport ..... Ph. Jean  
..... J.C. Soulé  
Outre ce résumé ce rapport contient 21 pages de texte, 7 fig et 2 pl.

Le schéma proposé par ce modèle est valable pour tous les sites sulfurés des Pyrénées. Complété par d'autres observations, il montre la particularité de ces systèmes :

- les eaux s'enfoncent jusqu'à plus de 5 km pour atteindre des températures de 80 à 130°C en moyenne,
- le circuit en U s'établit sur de faibles distances horizontales (quelques km qui correspondent au diamètre du corps granitique),
- le temps que met une molécule d'eau qui s'infiltré pour parcourir le U et jaillir à la source est compris entre 500 et 16000 ans,
- mais le système étant captif et de faibles dimensions, aura des réactions immédiates par transmission de pression. Ainsi la pluie qui s'infiltré provoque le jour même une surcharge qui fait varier le débit.

Ces connaissances nouvelles permettent de mieux capter et gérer ces ressources. Elles offrent la possibilité de prévoir les variations de débits et d'assurer un label de constance de qualité à l'eau.

## TABLE DES MATIERES

- 1 - Introduction
- 2 - Programme de recherche
  - 2.1. Moyens mis en oeuvre
  - 2.2. Déroulement du programme
- 3 - Schéma hydrogéologique du système hydrothermal
  - 3.1. Modèle mathématique conceptuel
  - 3.2. Rappel des données nouvelles recueillies
  - 3.3. Système thermo-minéral de Cauterets
- 4 - Modélisation mathématique des écoulements
  - 4.1. Schéma de circulation et modélisation
  - 4.2. Présentation du programme
  - 4.3. Description du modèle
  - 4.4. Présentation des simulations
  - 4.5. Conclusion
- 5 - Conclusions

\*  
\* \*

## TABLE DES PLANCHES ET FIGURES

- Pl. 1 - Organigramme du projet
- Pl. 2 - Schéma du système hydrothermal de Cauterets
- Fig. 1 - Principe de discrétisation
- Fig. 2 - Schéma des circulations
- Fig. 3 - Répartition des perméabilités horizontales
- Fig. 4 - Répartition des potentiels calculés
- Fig. 5 - Répartition des températures en °C, à 1000 ans
- Fig. 6 - Répartition des températures en °C, à 10 000 ans
- Fig. 7 - Répartition des températures en °C, à 100 000 ans

\*  
\* \*

## 1 - INTRODUCTION

Le programme de recherche "Eaux sulfurées des Pyrénées" a été cofinancé par le Conseil Régional Midi-Pyrénées et le Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire. La réalisation a été confiée au Service Géologique Régional Midi-Pyrénées du Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Ce programme pourra s'appliquer à de nombreuses stations thermales des Pyrénées : Argelès-Gazost, Ax-les-Thermes, Barèges, Caunterets, Luchon, Luz-St. Sauveur, St. Lary ... Il a pour objectif l'amélioration de la connaissance sur l'origine, la nature et le mode circulation de ces eaux dans le sol. Ceci afin de permettre de capter l'eau thermale plus profondément donc d'obtenir une eau protégée des éventuels mélanges avec des eaux de surface et des risques de pollution. Ces eaux plus pures et plus chaudes fourniront à la fois un produit plus stable pour les usages médicaux et un fluide plus chaud, ce qui peut contribuer, en diminuant le coût du chauffage, à la rentabilité des établissements thermaux, qu'ils soient de soins ou de loisirs.

Ce programme de recherche s'intègre totalement dans l'activité économique du Thermalisme régional, parce qu'il a été bâti pour répondre à un besoin exprimé par les exploitants des principales stations thermales pyrénéennes. La participation active des exploitants s'est exprimée, sous forme de facilitation du travail des équipes de recherche, elle a été accompagnée par une collaboration avec le corps médical tant au niveau de l'Université de Toulouse que dans les stations, pour tous les aspects touchant à la qualité du fluide thermo-minéral.

Le programme de recherche fait appel aux moyens les plus évolués pour atteindre les objectifs fixés : modèle mathématique conceptuel, analyses physico-chimiques des majeurs et des traces, analyses isotopiques, datation des eaux, analyse des gaz libres, mesures in situ de l'évolution du soufre, mesure de la conductivité thermique des roches, mesure par enregistreur automatique des variations de débit des sources.

Le présent document est le rapport de synthèse final. Il donne donc les résultats atteints, il complète et confirme les résultats intermédiaires qui avaient été communiqués dans les rapports BRGM 88 SGN 915 MPY "Eaux sulfurées des Pyrénées : Rapport de synthèse intermédiaire" par F. Iundt, Ph. Jean, J.C. Soulé, Y. Ternet).

## 2 - PROGRAMME DE RECHERCHE

### 2.1. Moyens mis en oeuvre

Le programme a été conduit par une équipe d'ingénieurs et de spécialistes du B.R.G.M., basée à Toulouse, aidée en appui technique par les spécialistes des laboratoires du Centre scientifique du B.R.G.M. à Orléans.

La collaboration a été recherchée avec des Laboratoires scientifiques français soit pour leurs moyens techniques soit pour la compétence de leurs spécialistes. Les relations les plus marquantes concernent la chimie des eaux, notamment avec les laboratoires suivants :

- . Laboratoire national de la Santé
- . Laboratoire de géochimie de l'Université de Paris VII
- . Laboratoire de l'Eau de Toulouse

Des collaborations scientifiques internationales ont pu s'établir également à cette occasion avec l'Académie des Sciences de Sofia (Bulgarie) pour les échanges chimiques eau-roche, avec le Service Géologique de Catalogne pour la typologie des sources pyrénéennes.

### 2.2. Déroulement du programme

Ce programme pluriannuel a été élaboré en 1984 et a débuté en 1985 par des séries de mesures hydrogéologiques (débit des sources, analyses chimiques des eaux) et des relevés géologiques de terrain.

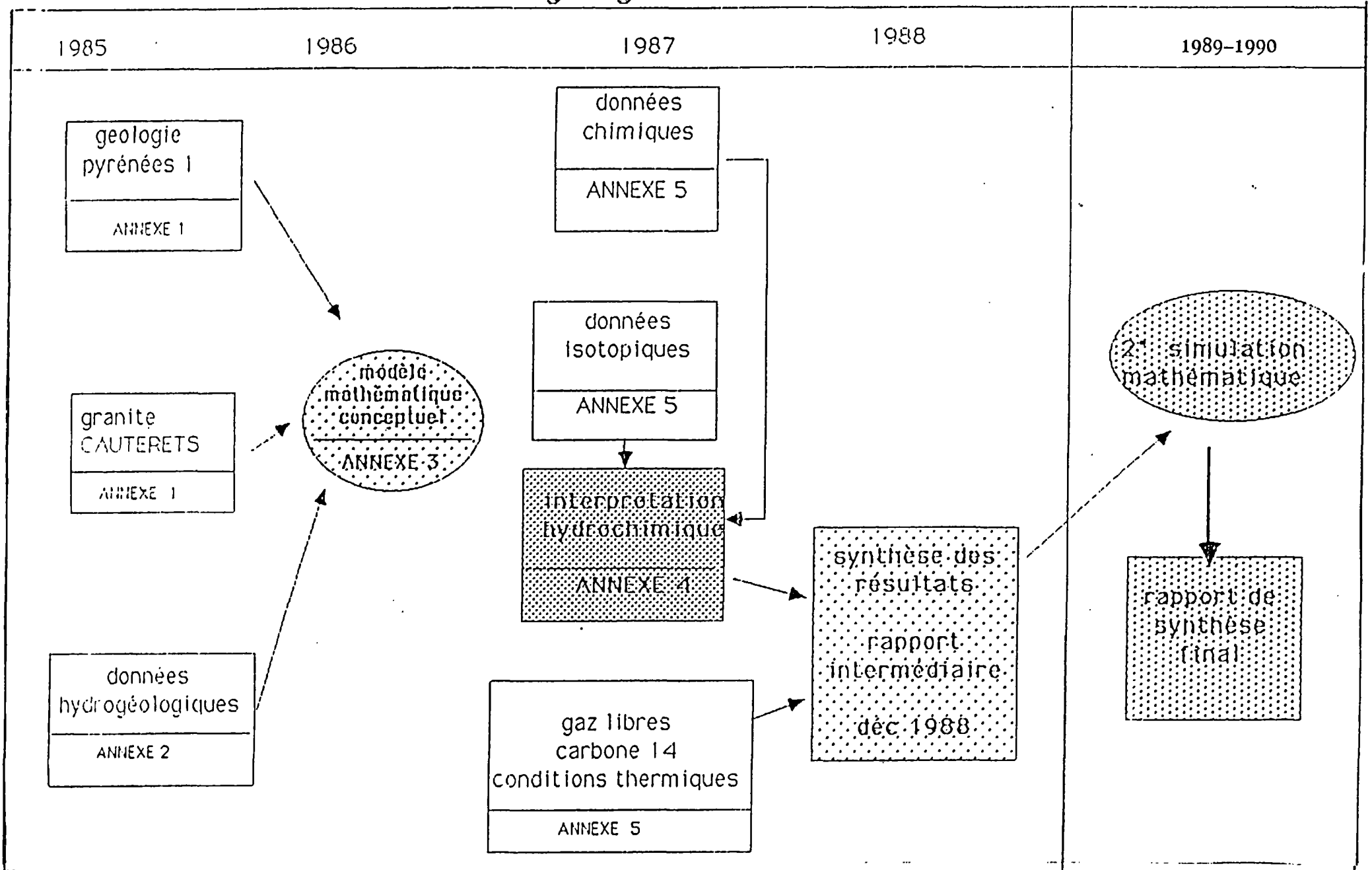
L'organigramme (pl.1) montre l'enchaînement des opérations et leur déroulement chronologique.

#### Commentaires :

L'examen de dix corps granitiques pyrénéens a permis une sélection du ou des cas les plus représentatifs, afin de servir de sites pilotes (cf. annexe 1 du rapport intermédiaire). Deux sites pilotes ont été identifiés :

- le site de Luchon, remarquable par l'abondance et la qualité des mesures faites sur les écoulements et la chimie des eaux, mais les conditions de gisements sont difficiles à modéliser, car le granite qui donne naissance aux eaux de Luchon, le massif de Bosost, est mal connu.
- le site de Cauterets, qui ne dispose pas d'un suivi fiable des écoulements, mais offre l'avantage de conditions de gisement simples : la géométrie et le faciès du massif granitique qui donne naissance aux sources sont bien identifiés.

# organigramme



En conséquence c'est le massif granitique de Cauterets qui a été choisi pour un examen géologique complémentaire (cf. annexe 2 du rapport intermédiaire).

Le premier modèle conceptuel (cf. annexe 3 du rapport intermédiaire) a été établi à partir des données géologiques de Cauterets et des quelques données hydrogéologiques acquises en 1985 par mesures in situ.

Puis les analyses chimiques et isotopiques mettent en évidence l'existence de deux circuits emboîtés à Cauterets, ce qui ne remet pas en cause le modèle conceptuel, mais nécessite de refaire des simulations nouvelles.

En 1987, des mesures complémentaires, concernant essentiellement l'âge de l'eau viennent confirmer l'existence des deux circuits.

L'établissement du rapport intermédiaire permet de présenter le schéma hydrogéologique de circulation des eaux thermo-minérales sulfurées des Pyrénées à partir de cet ensemble de mesures.

La deuxième simulation mathématique des écoulements faite à partir du modèle conceptuel, et prenant en compte les données nouvelles - notamment l'existence de deux circuits emboîtés - permet de tester la cohérence des explications et d'envisager la généralisation du schéma à l'ensemble des sources sulfurées des Pyrénées. Condition nécessaire pour une meilleure maîtrise du captage des eaux sulfurées.

### 3 - SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE DU SYSTEME HYDROTHERMAL

#### 3.1. Modèle mathématique conceptuel

Le premier modèle mathématique a été construit à partir d'un schéma hydrogéologique comprenant un seul circuit d'eau se divisant en deux à la sortie, et en prenant pour les paramètres essentiels les valeurs suivantes relatives au massif de Cauterets :

- dimensions du batholithe de granite : un cône renversé de 8 km de diamètre et de 8 km de profondeur.
- un débit à l'émergence de 2 000 m<sup>3</sup>/jour
- température à l'émergence : 60°C
- température de fond : 130°C (cette valeur ne correspond pas à celle du site de Cauterets, qui n'était pas calculée à cette date, mais à une valeur trouvée sur plusieurs sites pyrénéens, dont Luchon).

#### 3.2. Rappel des données nouvelles recueillies (cf. annexes 3 et 5 du rapport intermédiaire).

En plus des données déjà utilisées pour l'élaboration du premier modèle conceptuel, un certain nombre de données nouvelles acquises ultérieurement apportent des précisions sur les circulations dans le cas du site pilote de Cauterets.

Ces données nouvelles entrées dans le modèle mathématique permettront d'effectuer de nouvelles simulations des écoulements, basées sur les vraies grandeurs mesurées à Cauterets.

Ces données nouvelles concernent essentiellement les paramètres suivants :

#### Débit des sources et existence de mélanges

Le débit des sources et la température de l'eau ont été mesurés en continu grâce à la mise en place d'appareils enregistreurs. Malgré les difficultés techniques dues aux conditions climatiques particulièrement difficiles (atmosphère de vapeurs sulfurées, variations de température de l'air, destruction d'un appareil par la foudre) nous avons pu retirer des valeurs d'enregistrement suffisantes pour mettre en évidence les situations particulières aux sources de Cauterets.

	débit capté mesuré m3/jour	débit total estimé m3/jour
débit moyen du Groupe Sud	1 150	1 500 (à 1 900)
débit moyen du Groupe Nord	370	500 (à 600)
débit moyen total	1 520	2 000 (à 2 500)

Les valeurs à retenir pour la simulation sont le débit total estimé ; ces valeurs ne modifient pas celles prises dans le modèle conceptuel, elles permettent de répartir les circuits en deux groupes Nord et Sud.

o Conductivité thermique

Les paramètres mesurés sont peu différents de la valeur prise lors de la conception du modèle.

o Datation au carbone 14

La datation des eaux au carbone 14 révèle l'existence de deux circuits à Cauterets :

- . le circuit qui aboutit aux sources du Groupe Sud : l'eau est âgée de 500 ans.
- . le circuit qui aboutit aux sources du Groupe Nord : l'eau est âgée de 5 000 ans.

Ces âges sont conformes à ceux qui ont été mesurés sur d'autres sites sulfurés pyrénéens :

Luchon 5 000 et 16 000 ans  
Barèges 9 000 ans

D'autres mesures faites antérieurement sur d'autres sites sulfurés donnaient des valeurs comprises entre 5 000 et 15 000 ans.

Le circuit granitique de Cauterets est donc représentatif des temps de circulation des eaux sulfurées en milieu granitique mais il se situe parmi les circuits les plus rapides.

o Géothermomètre

Le calcul de la température maximale atteinte peut être effectué à partir de la connaissance de certaines concentrations chimiques caractéristiques dites géothermomètres.

Un calcul a été effectué à partir des teneurs de gaz libres dans l'eau, mais les difficultés de captation des gaz dans les sources, rendent cette mesure incertaine ; les valeurs trouvées n'ont pas été retenues.

Par contre, les calculs effectués à partir de différents géothermomètres chimiques permettent de calculer les températures maximales atteintes :

85 à 90°C pour le Groupe Nord  
75 à 80°C pour le Groupe Sud.

#### o Analyses physico-chimiques

Les eaux thermales de Cauterets sont représentatives de la famille des eaux sulfurées sodiques. Les caractéristiques chimiques sont principalement :

- une faible minéralisation (0,18 g/l)
- la présence de sulfures (6,8 mg/l environ)
- la dominance des teneurs en sodium (généralement plus de 90% des cations)
- de faibles teneurs en magnésium (< 0,01 mg/l) pour les eaux chaudes.

L'élément caractéristique de ces eaux, le soufre, se présente sous une forme réduite, qui fait à la fois la noblesse et la fragilité de ces eaux.

Les eaux sulfurées sont très fragiles et au contact de l'atmosphère ou de certains matériaux il peut se produire des modifications importantes des espèces réduites du soufre (oxydation ou précipitation des sulfures dissous). Cette instabilité naturelle de ces eaux nécessite impérativement la réalisation de mesures et d'analyses in situ des espèces réduites du soufre.

Les résultats de ces analyses (tableau ci-après) montrent que l'espèce chimique majoritaire est représentée par les formes sulfures  $\Sigma H_2S$  ( $H_2S$ ,  $HS^-$ ,  $S^{2-}$ ). Les sulfures organiques (RS) et les thiosulfates ( $S_2O_3$ ) sont beaucoup plus faibles.

Les teneurs en sulfures totaux varient de 6,46 mg/l pour la Raillère à 5,78 mg/l pour les Oeufs. Ces variations des teneurs en sulfures de l'ordre de 10% environ sont liées principalement à la qualité des captages.

Source	H <sub>2</sub> S totaux en mg/l	Σ H <sub>2</sub> S	RS en 10 <sup>-4</sup> mole/l	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	temp. °C	débit m <sup>3</sup> /h
Mahourat H	6,12	0,15	0,03	0,04	45,2	1,58
Mahourat B	6,12	0,16	0,02	0,04	51,1	1,34
Oeufs	5,78	0,14	0,03	0,03	54,1	18
Raillère	6,46	0,17	0,02	0,06	38,4	4,5
St. Sauveur	6,18	0,13	0,05	0,03	33,5	0,91

Les analyses physico-chimiques ont donné lieu à des études interprétatives.

Toutes les droites de relation construites à partir des teneurs caractéristiques mettent en évidence l'existence de deux groupes de sources homogènes et distincts qui correspondent au groupe Nord et au groupe Sud. Le groupe Nord étant plus minéralisé que le groupe Sud.

#### o Analyses isotopiques

Les analyses isotopiques ont mis en évidence deux faits importants :

- le Tritium (isotope de l'hydrogène, dont l'existence dans l'atmosphère en quantité notable est due essentiellement à l'explosion de bombes atomiques atmosphériques) montre si une eau sulfurée est mélangée ou pas (l'eau sulfurée est âgée de plus de 500 ans, et le Tritium révèle la présence d'eau âgée de moins de 30 ans). Ainsi, certaines sources ont été révélées pures au moment de la mesure tandis que d'autres étaient un mélange d'eau sulfurée et d'eau plus jeune,
- l'oxygène 18 et le deutérium donnent, par une loi empirique, l'altitude d'infiltration des eaux de pluie à l'origine du circuit thermo-minéral.

#### Résultat :

- 2 300 m pour le groupe Sud
- 2 100 m pour le groupe Nord.

### 3.3. Système thermo-minéral de Cauterets

Le schéma hydrogéologique initial élaboré sur le site de Cauterets qui a servi à établir le modèle conceptuel n'est pas remis en cause.

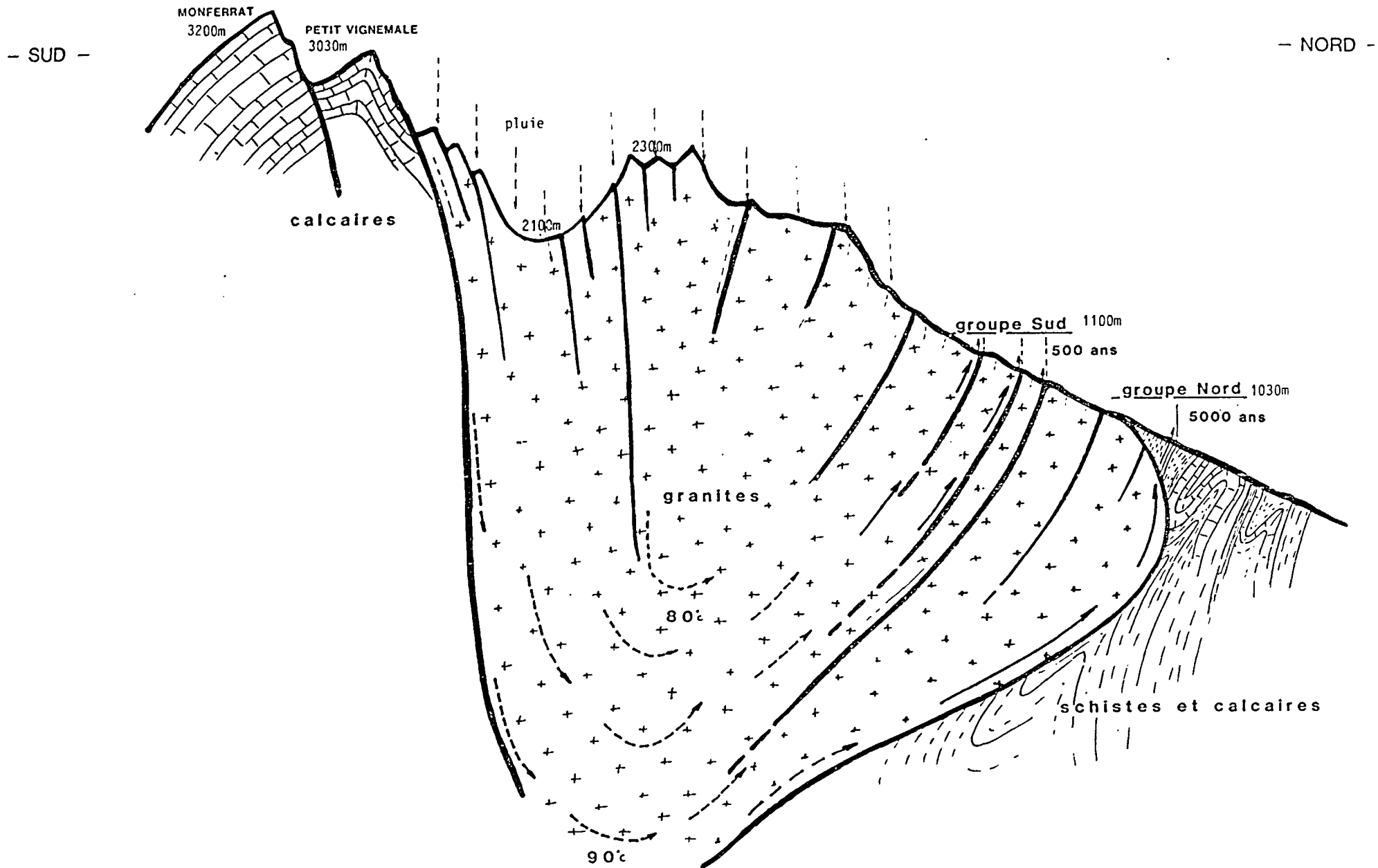


Schéma du système hydrothermal de Cauterets

Toutes les mesures faites ultérieurement apportent seulement des précisions et des éléments pour aboutir à un modèle qui permettra de simuler les écoulements de Cauterets tels qu'il sont connus aujourd'hui.

*Une des modifications principales est due à la révélation de l'existence de deux circuits thermo-minéraux emboîtés.*

Le nouveau schéma de principe devra intégrer les données nouvelles suivantes :

- le circuit Sud est emboîté dans le circuit Nord et chacun des circuits est caractérisé par les paramètres suivants :

	CAUTERETS	
	Sources du groupe Sud	Sources du groupe Nord
Altitude d'infiltration de l'eau	2 300 m	2 100 m
Température maximale atteinte	75 - 80°C	85 - 90°C
Température à l'émergence	53°C	46°C
Age	500 ans	5 000 ans
Altitude d'émergence	1 050 à 1 150 m	environ 1 030 m
Minéralisation	plus élevée au Nord qu'au Sud	
Débits	1 500 à 1 900 m <sup>3</sup> /jour	500 à 600 m <sup>3</sup> /jour

Ces paramètres nouveaux seront donc introduits dans le schéma de Cauterets puis dans le modèle mathématique pour effectuer une simulation des écoulements basés sur les grandeurs mesurées. Les autres paramètres restent inchangés.

#### 4 - MODELISATION MATHEMATIQUE DES ECOULEMENTS

Le premier modèle mathématique réalisé en 1986 avait permis de représenter différents schémas de circulation du système hydrothermal. Les informations dont on disposait alors conduisaient à diviser le domaine en deux parties : une zone d'alimentation et une zone de remontée unique (source thermale).

Des mesures précises des temps de circulation et des paramètres hydrochimiques du fluide hydrothermal ont conduit à proposer un nouveau schéma de circulation de l'eau permettant de dissocier deux circuits séparés.

Ces nouvelles hypothèses ont été introduites dans le modèle pour en tester la cohérence hydrodynamique et thermique.

##### 4.1. Schéma de circulation et modélisation

Le massif granitique oriental de Causerets a une forme circulaire ; dans l'espace sa forme est proche d'un cône dont le sommet fictif se situerait à - 7,5 km sous le niveau de la mer. Il est intrusif dans des schistes que l'on peut considérer comme une limite à flux nul. Le granite est affecté de fractures de grande extension verticale dues entre autres à l'orogénèse pyrénéenne.

La circulation des eaux d'origine météorique est de type "milieu fissuré" que l'on pourra, à l'échelle du modèle, traiter comme un milieu continu mais hétérogène et anisotrope. Les sources thermales de Causerets situées à la limite nord du massif constituent le point d'exhaure du système.

Les eaux s'infiltrent en altitude (zone d'alimentation). Les circulations s'établissent dans des plans verticaux ou subverticaux excepté peut être dans la zone de décompression superficielle. La zone des sources est limitée en surface, aussi si l'on admet que l'ensemble du massif est le siège d'une nappe plus ou moins continue, l'écoulement est sensiblement radial convergent.

Le système hydrothermal sera représenté en axisymétrie comme un demi cylindre dont l'axe figure les sources. Dans une première hypothèse nous considérons que le principal mécanisme de circulation est une différence de potentiel hydraulique et que la convection naturelle est négligeable c'est-à-dire que les contrastes de densités dus aux variations de température de l'eau ne sont pas un moteur essentiel des écoulements.

Le comportement hydraulique peut être assimilé à un régime permanent, mais il est nécessaire de simuler les phénomènes thermiques en transitoire.

#### 4.2. Présentation du programme

Les simulations ont été réalisées avec le programme ESTHER (Etude d'un stockage Thermique en Ecoulement Radial). Ce programme conçu pour l'étude de stockage thermique permet le calcul des transferts de chaleur dans un aquifère multicouche représenté suivant un plan de symétrie cylindrique. Il est donc bien adapté au problème posé tel que nous l'avons schématisé.

##### 4.2.1. Champs d'application du programme

Les transmissivités sont indépendantes de la charge hydraulique, l'aquifère est de type captif ou, s'il est libre, ses fluctuations sont négligeables.

Dans les couches aquifères, les échanges se font par conduction (échange d'énergie par vibration des molécules) et par convection (transfert de la chaleur entraînée par l'eau en mouvement). Dans les épontes, les échanges thermiques sont uniquement dus à la conduction.

Les limites du système peuvent être isothermes ou adiabatiques.

Il est possible de prendre en compte l'anisotropie des perméabilités, de même que l'on peut introduire des conductivités horizontales et verticales différentes.

Les principales données sont : les perméabilités, les débits, les charges initiales, les conductivités thermiques, les capacités calorifiques, les températures initiales et aux limites, les rayons, les profondeurs et l'emplacement des limites hydrauliques et thermiques.

#### 4.2.2. Equations générales

La dynamique du système est régie par les deux équations couplées :

$$(1) \quad \text{div } \vec{K} \cdot \vec{\text{grad}} H + q = S \frac{\delta H}{\delta t}$$

$$(2) \quad \text{div } (\vec{\lambda} \cdot \vec{\text{grad}} \theta) - \phi \rho_L C_L \vec{v}_{\text{eau}} \cdot \vec{\text{grad}} \theta = \rho_a C_a \frac{\delta \theta}{\delta t}$$

avec les notations suivantes :

- $\vec{K}(r, z, \theta)$  : tenseur de perméabilité en m/s  
 $H(r, z, t)$  : potentiel hydraulique en mètres d'eau  
 $q(r, z, t)$  : débit (en m<sup>3</sup>/s/m<sup>3</sup>) par unité de volume  
 $S(r, z)$  : coefficient d'emménagement

et les variables indépendantes :

- $r$  : coordonnées spatiales (en m)  
 $t$  : temps en secondes  
 $\vec{\lambda}(r, z, t)$  : tenseur de conductivité thermique (en cal/m/d°/s)  
 $\theta(r, z, t)$  : température (en °C)  
 $\phi(r, z)$  : porosité (porosité totale et efficace sont assimilées à cette valeur  $\phi$ )  
 $\rho_L C_L$  : capacité calorifique du liquide (eau) (en cal/m<sup>3</sup>/d°)  
 $\rho_a C_a$  : capacité calorifique de l'aquifère (en cal/m<sup>3</sup>/d°)  
 $\rho_a C_a = \phi \rho_L C_L + (1 - \phi) \rho_R C_R$   
 $\vec{v}_{\text{eau}}$  = vitesse de l'eau :  $\vec{v}_{\text{eau}} = \frac{1}{\phi} \vec{K} \cdot \vec{\text{grad}} H$ .

La première équation régit les mouvements de l'eau, la seconde les transferts thermiques. Ces deux équations sont couplées et doivent, dans le cas général, être résolues simultanément. En effet :

- le paramètre  $\vec{K}$  de (1) dépend de  $\theta$  résultant de (2)
- le paramètre  $\vec{v}_{\text{eau}}$  de (2) dépend de  $H$  résultant de (1).

### 4.2.3. Discretisation

Les équations hydrauliques et thermiques sont résolues par une méthode aux différences finies.

Le système est découpé en  $n$  mailles rectangulaires. Les mailles "pourtour" du domaine sont placées au mieux pour suivre la géométrie des limites (les limites hydrauliques sont indépendantes des limites thermiques) (fig. 1).

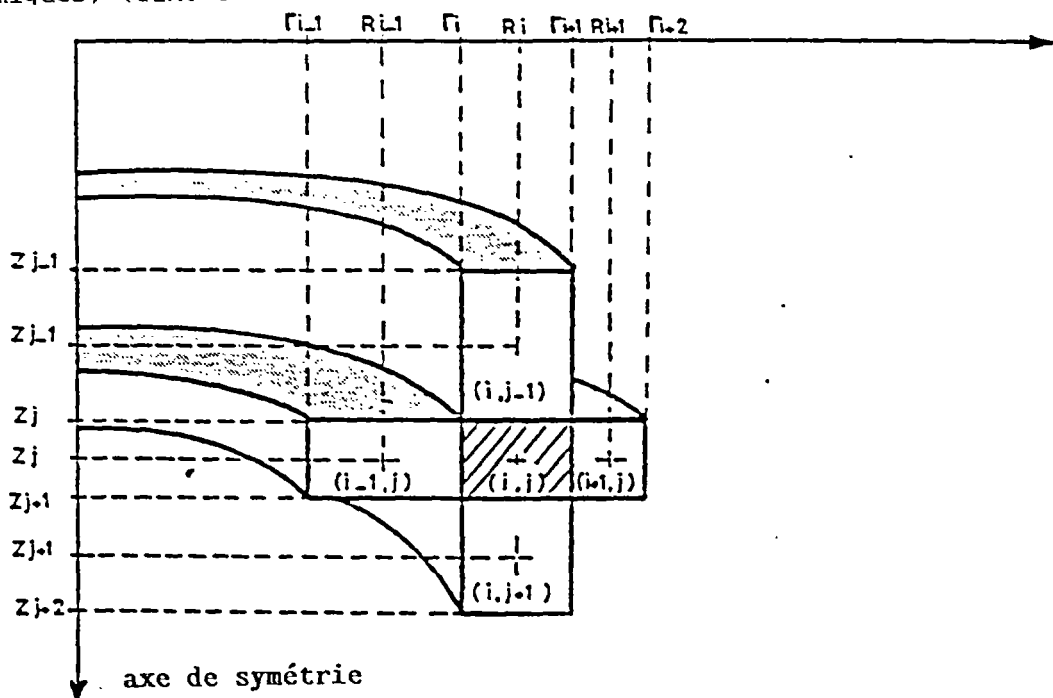


FIGURE 1 : PRINCIPE DE LA DISCRETISATION

Définitions :  $i$  indice de colonne  
 $j$  indice de ligne.

Pour la maille  $(i,j)$ , on a les paramètres suivants :

- $K_{i,j}^H$  : perméabilité horizontale
- $K_{i,j}^V$  : perméabilité verticale
- $Q_{i,j}$  : débits pompés (<0) ou injectés (>0)
- $H_{i,j}$  : charge hydraulique
- $\lambda_{i,j}^H$  : conductivité horizontale
- $\lambda_{i,j}^V$  : conductivité verticale
- $\phi_{i,j}$  : porosité
- $\rho_L C_L$  : capacité thermique volumique de l'eau
- $\rho_R C_{R,i,j}$  : capacité thermique volumique de la roche
- $\theta_{i,j}$  : température
- $\theta_{inj,i,j}$  : température de l'eau injectée
- $\alpha_L$  : coefficient de dispersion longitudinale
- $\alpha_T$  : coefficient de dispersion transversale

### 4.3. Description du modèle

#### 4.3.1. Maillage du modèle

Le maillage permet de modéliser un domaine de 8 km de rayon sur une épaisseur de 8 km. Il est subdivisé en quatre zones (figure 2) pour représenter deux circuits hydrauliques emboîtés avec alimentation et points d'exhaure distincts :

Zone 1 : circuit hydraulique externe, alimenté par la périphérie du massif, présentant une circulation profonde, alimentant les "sources Nord".

Zone 2 : circuit hydraulique interne, alimenté par la zone centrale du massif, présentant une circulation moins profonde et alimentant les "sources Sud".

Zone 3 : zones supposées peu actives du point de vue hydraulique (faible perméabilité).

Zone 4 : Substratum peu perméable.

La discrétisation du maillage (taille des mailles) est identique aux simulations précédentes.

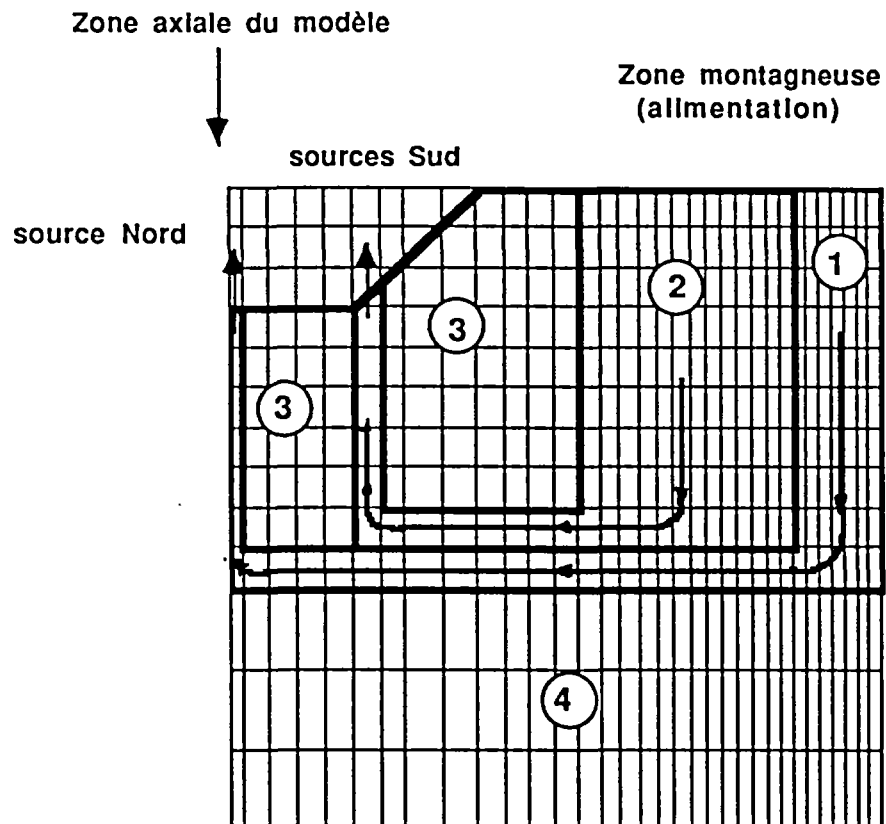


Fig. 2 SCHEMA DES CIRCULATIONS

Zone 1 : circuit externe

Zone 2 : circuit interne

Zone 3 : domaine à faible circulation

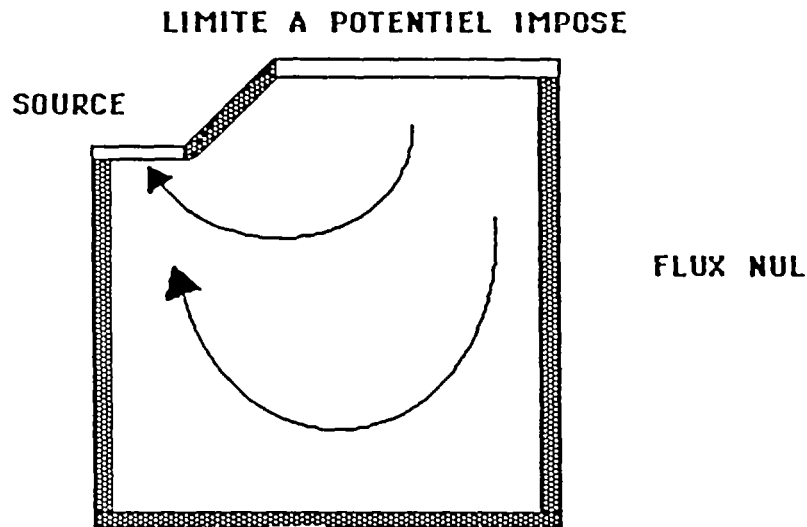
Zone 4 : substratum

#### 4.3.2. Schéma hydraulique

Le comportement hydraulique du système est supposé stable, les conditions de référence seront donc un régime permanent.

L'étalonnage du modèle est réalisé à partir du débit mesuré des sources auquel s'ajoutent 25 à 50% de pertes inconnues soit 1 500 m<sup>3</sup>/jour pour le groupe Sud et 600 m<sup>3</sup>/jour pour le groupe Nord.

Le sommet des zones montagneuses est à potentiel imposé (2100 m) de même que le périmètre des sources (1100 m pour le groupe Sud, 1030 m pour le groupe Nord). On suppose la zone de pente intermédiaire à flux nul de même que les autres limites (cf. schéma).



On a considéré que la nappe dans la zone montagneuse était généralisée à la cote 2100 m même si les altitudes d'infiltration sont différentes (zone des crêtes à 2300 m).

Pour toutes les simulations, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- rapport d'anisotropie des perméabilités constant :

$$K_y/K_x = 10 \text{ dans tout le domaine,}$$

(perméabilité verticale plus forte puisque résultant de la composition de familles de fractures toutes plus ou moins sub-verticales)

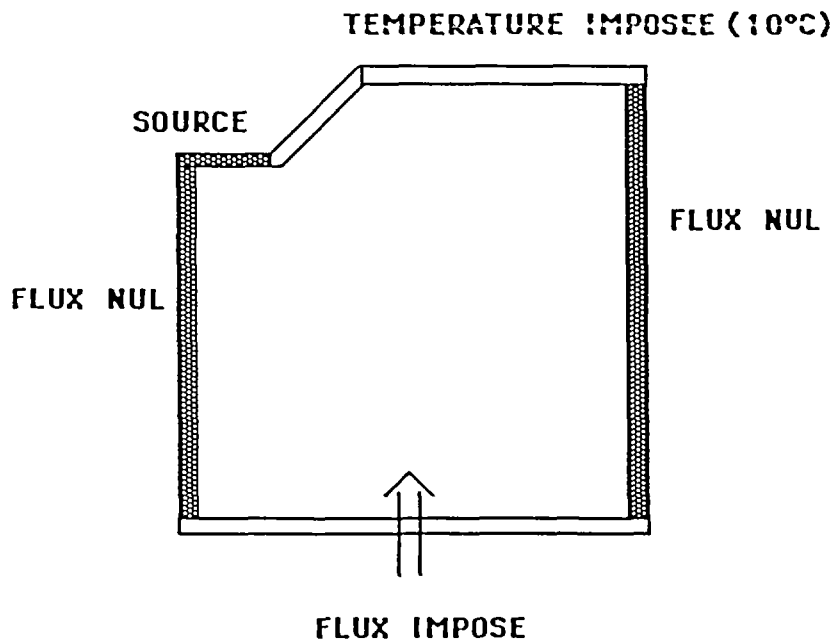
- perméabilité du substratum égale à  $10^{-11}$  m/s
- erreur maximale sur les débits  $2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s

#### 4.3.3. Schémas thermiques simulés

Les capacités calorifiques et les conductivités thermiques du granite sont admises homogènes et identiques selon la verticale et l'horizontale. La conductivité est de  $3.0 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ , l'influence de la température sur sa variation est négligée.

Le flux géothermique estimé à  $90 \text{ mw.m}^{-2}$  est simulé par une condition de flux ou une température imposée à la base du substratum.

Sur l'ensemble du domaine superficiel (excepté les sources) la température moyenne interannuelle est imposée ( $10^\circ\text{C}$ ). Les autres limites sont adiabatiques.



La température des sources est un paramètre d'étalonnage, l'analyse des géothermomètres a également montré qu'une partie de l'eau avait atteint la température  $75\text{-}80^\circ\text{C}$  pour les sources Sud et  $85\text{-}90^\circ\text{C}$  pour les sources Nord.

La répartition des températures initiales est préalablement calculée ; pour cela, on simule un état purement diffusif en régime permanent. On suppose donc que la convection s'est surimposée à un régime, où seule la conduction contrôlait la répartition des températures. Le régime thermique transitoire simulé à partir de cet état initial stable correspond donc à la perturbation thermique résultant des écoulements dans le massif.

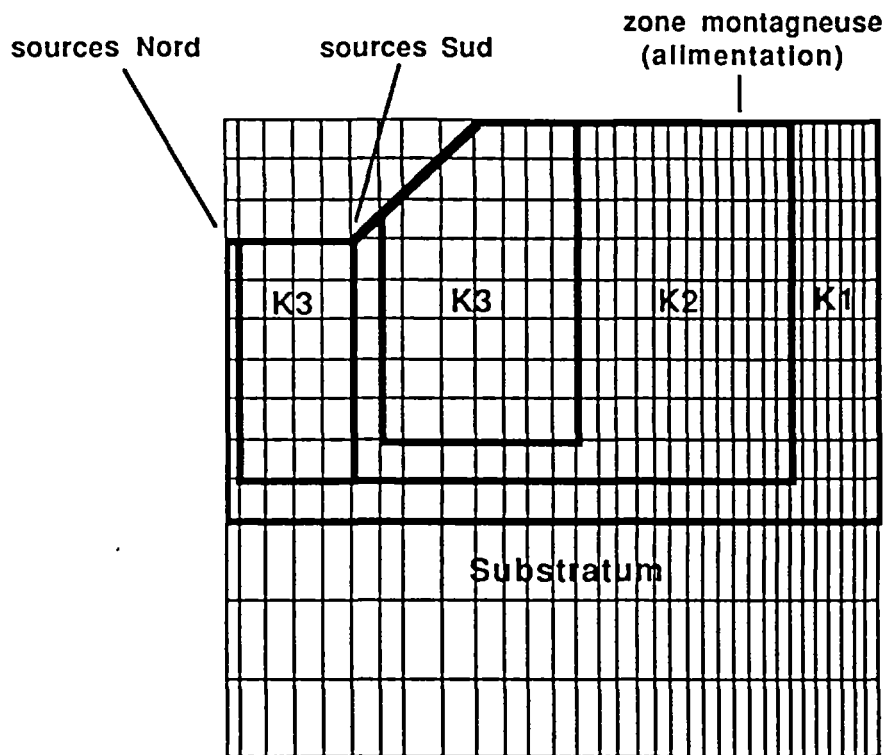


FIG. 3 REPARTITION DES PERMEABILITES HORIZONTALES

K1 :  $9 \cdot 10^{-8}$  m/s

K2 :  $3 \cdot 10^{-9}$  m/s

K3 :  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s

#### 4.4. Présentation des simulations

##### 4.4.1. Simulation hydraulique

La répartition après calage des perméabilités fait l'objet de la figure 3. On observe une augmentation de la perméabilité du centre vers l'extérieur du massif ( $0,01$  à  $9.10^{-8}$  m/s). Le débit calculé de la source Nord est de  $0,0176$  m<sup>3</sup>/s ( $1520$  m<sup>3</sup>/j), celui de la source Sud est de  $0,0074$  m<sup>3</sup>/s ( $639$  m<sup>3</sup>/j).

La figure 4 présente la répartition des potentiels calculés; elle permet de visualiser des écoulements privilégiés avec de forts gradients hydrauliques au droit des zones de source (écoulement vertical ascendant).

Comme dans la précédente étude, les gradients hydrauliques dans la zone de remontée sont très élevés.

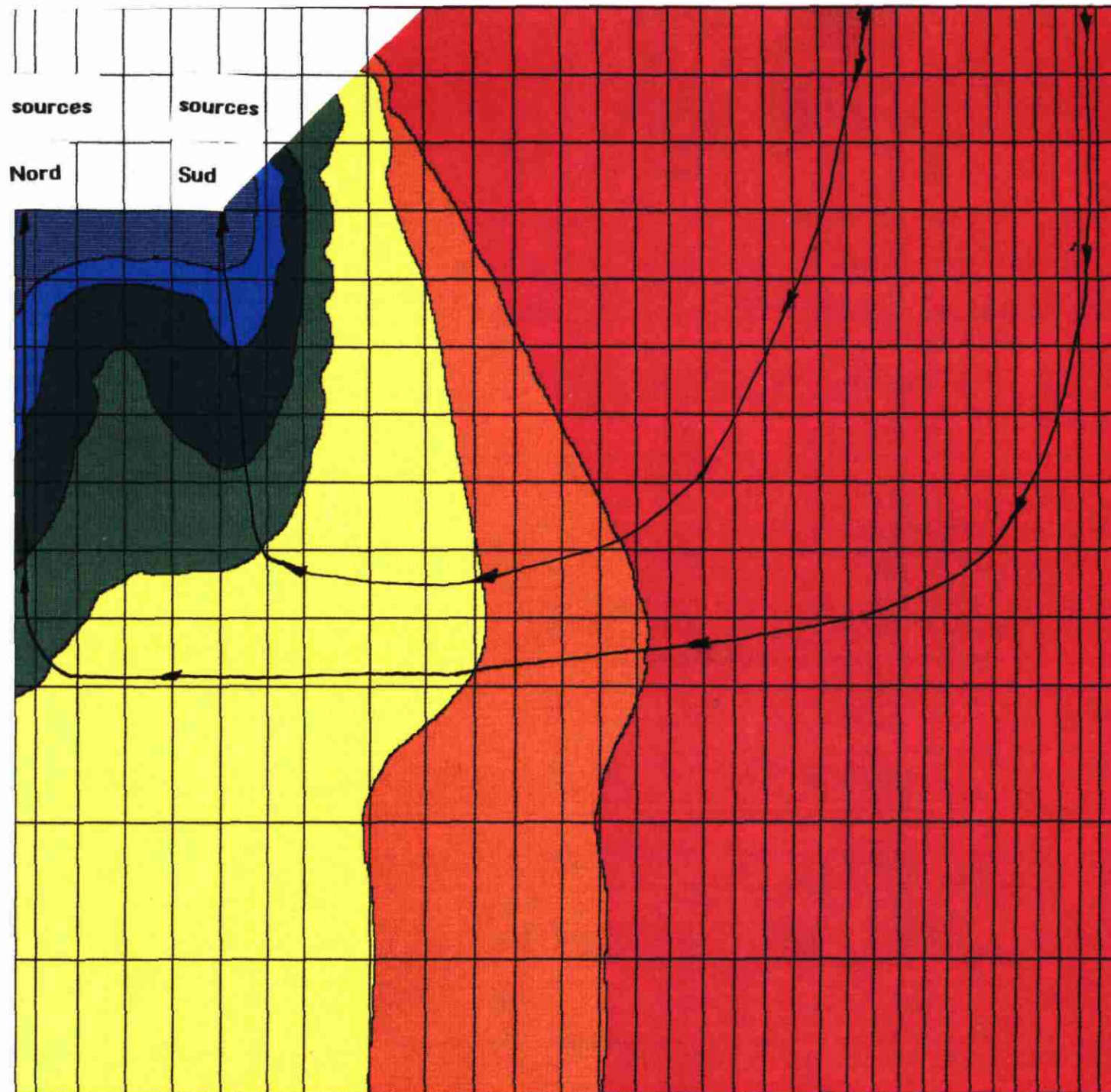


Fig 4. Repartition des potentiels  
calculés

#### 4.4.2. Simulations thermiques

La convection ou la circulation de l'eau pour un gradient de charge donné modifie notablement les isothermes.

Ces isothermes évoluent avec le temps; les figures 5 à 7 montrent la répartition des températures au bout de 1000, 10000 et 100000 ans pour le schéma proposé.

Les températures fournies par la maille supérieure, qui correspondraient aux températures aux sources sont respectivement :

Température en °C	Source Nord	Source Sud
1000 ans	77	24
10 000 ans	80	58
100 000 ans	89	76
mesurée à la source	46	53
température maximale atteinte*	85-90	75-80

\* calculé à partir de différents géothermomètres chimiques.

On constate que les températures calculées pour les sources Nord sont plus élevées que pour le groupe Sud et qu'un régime stabilisé est rapidement atteint. Les températures calculées sont cohérentes vis-à-vis des valeurs maximales atteintes pour une durée de vie de quelques milliers d'années mais plus élevées que les températures mesurées à la source.

Ces résultats sont bien sûr dépendants de l'hypothèse d'un gradient géothermique régional de 2.5°C/100 m.

Cette disparité est en grande mesure due à la schématisation excessive du conduit de remontée de l'eau thermale. Le modèle permet de représenter de façon satisfaisante l'infiltration et la montée en température du fluide thermal; par contre les caractéristiques réelles du conduit de remontée (diamètre, vitesse réelle de l'eau, échanges thermiques et hydrauliques) sont inconnues.

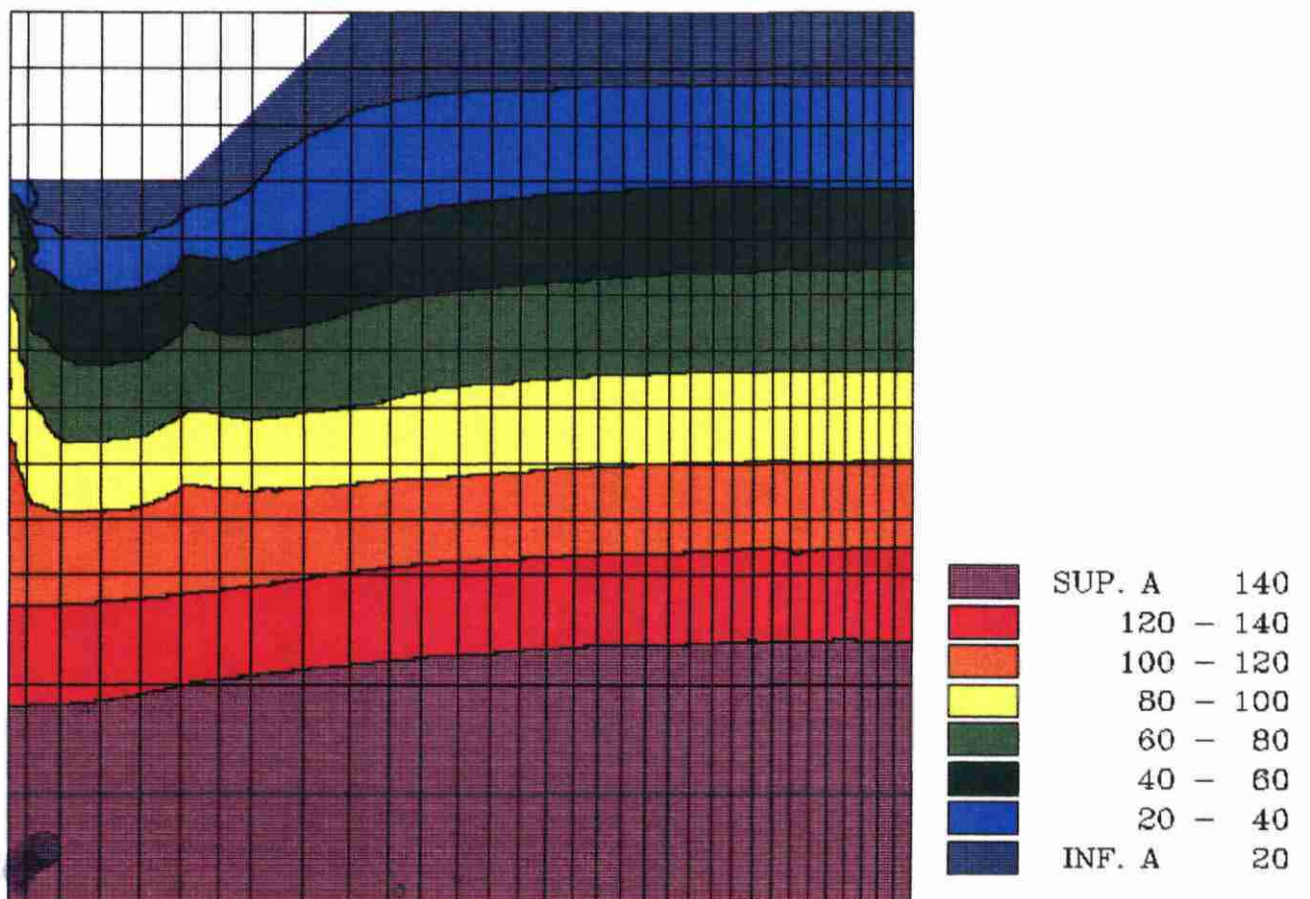
Le température anormalement basse mesurée au Nord pourrait s'expliquer par la complexité des émergences du Nord qui n'a pas pu être prise en compte par le modèle faute de pouvoir quantifier les paramètres modificateurs. En effet, alors que l'eau jaillit directement des granites au groupe Sud, elle doit emprunter des conduits particuliers pour atteindre le sol au groupe Nord. Ce trajet final dont on ne connaît pas la longueur s'effectue depuis le massif de granite jusqu'à la surface du sol par l'intermédiaire d'un filon de microgranodiorite, relayé peut-être par des bancs calcaires redressés. Ce conduit de petite taille freine vraisemblablement la remontée de l'eau, entraînant secondairement un refroidissement plus important dans la phase finale du parcours de l'eau.

# Repartition des temperatures en °C

Gradient geothermique 2,5 /100m

Fig.5

1000 ans

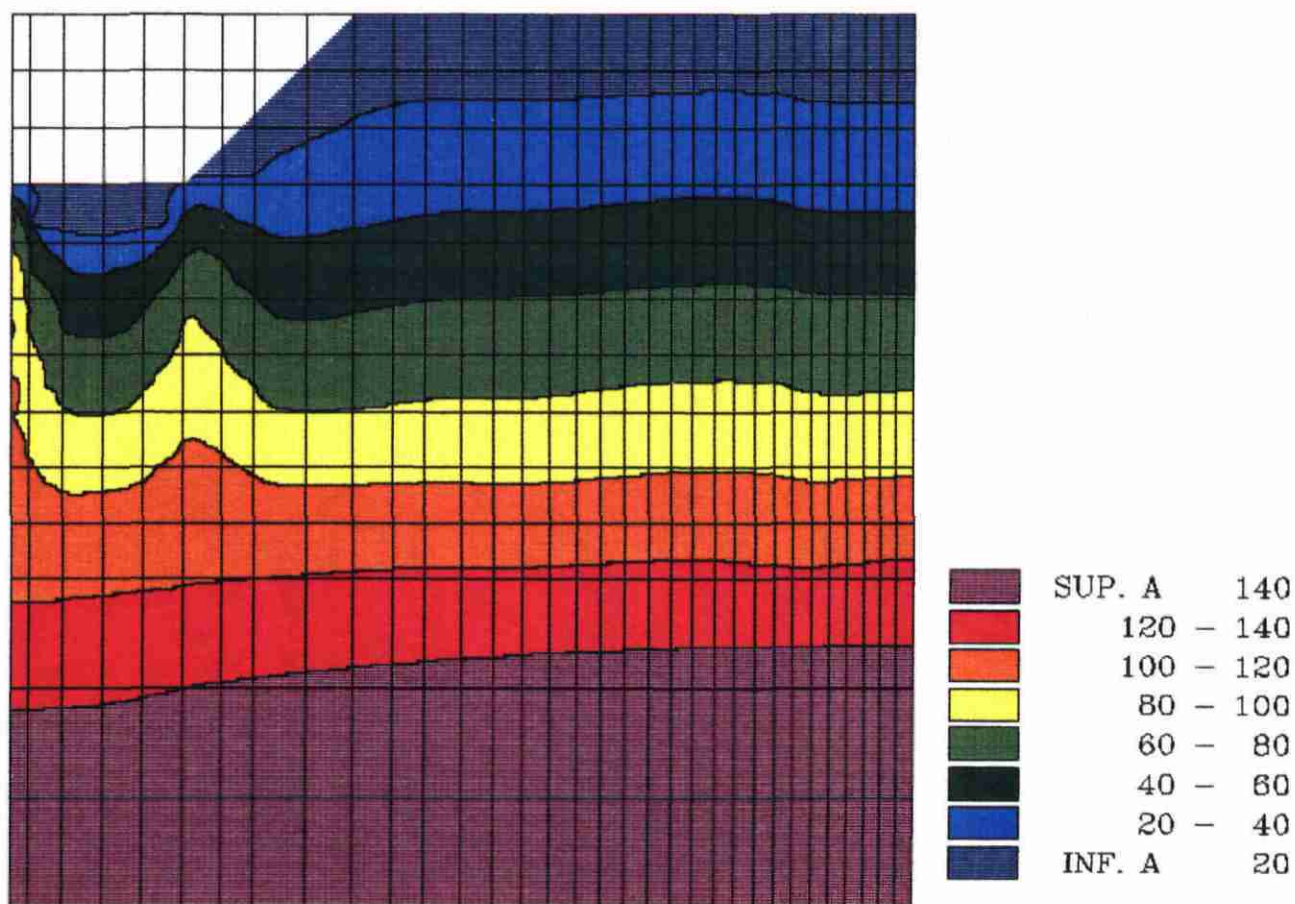


# Repartition des temperatures en °C

Gradient geothermique 2,5 /100m

Fig.6

10 000 ans

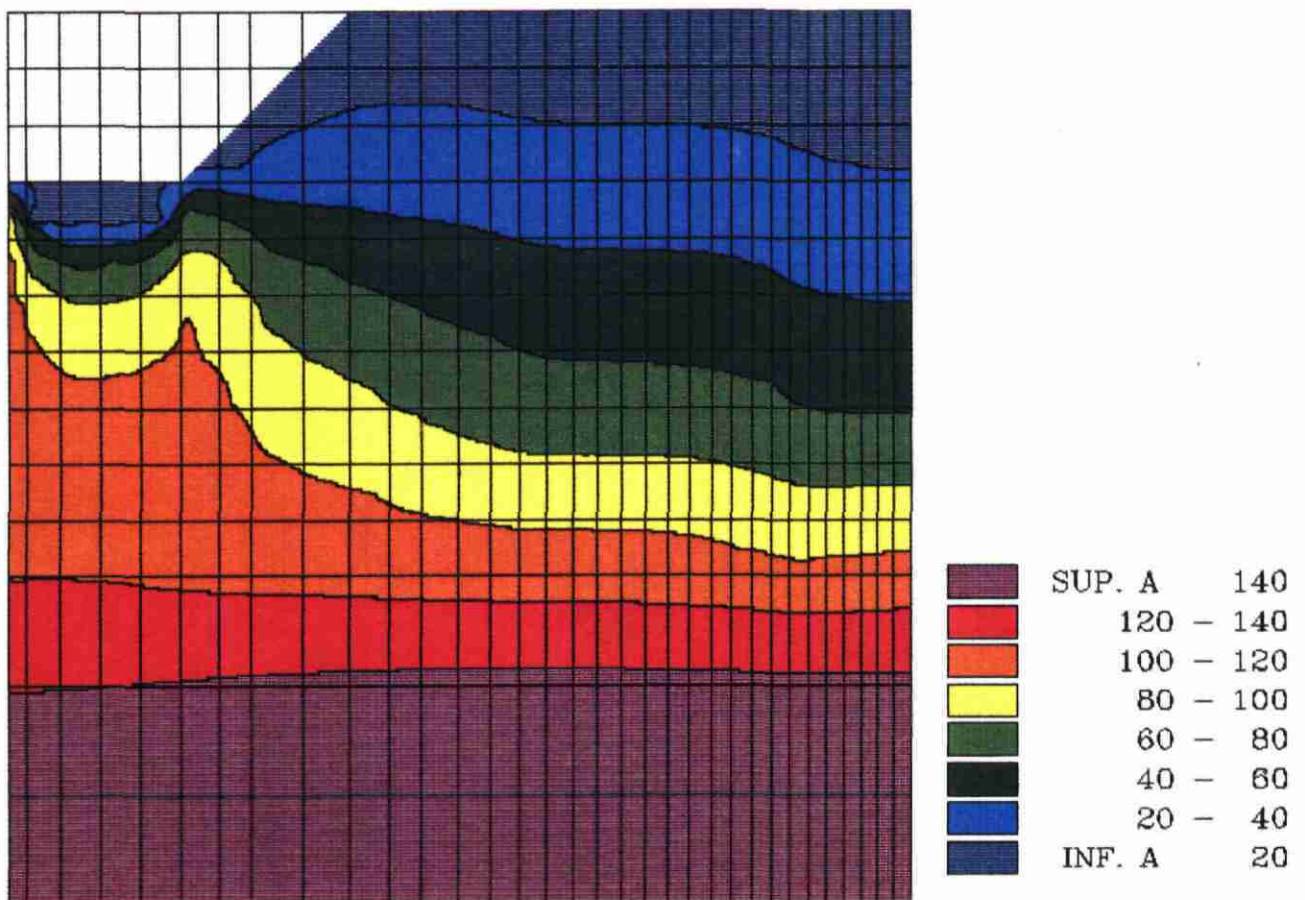


# Repartition des temperatures en °C

Gradient geothermique 2,5 /100m

Fig.7

100 000 ans



#### 4.5. Conclusion

La représentation du système hydrothermal de Cauterets par deux circuits distincts et emboîtés, a été simulée sur un modèle mathématique.

Les simulations ont permis de restituer les débits des deux groupes de sources. Les simulations thermiques confirment que le circuit le plus externe a atteint les températures les plus élevées. Les températures maximales atteintes en profondeur sont bien représentées par le modèle par contre les températures calculées aux sources sont plus importantes que les observations. Cet écart est significatif de la méconnaissance des vitesses de remontée de l'eau thermale et des caractéristiques du conduit dans lequel elle circule. Ces données sont difficilement accessibles.

Néanmoins les très forts gradients hydraulique et thermique dans la zone de remontée laissent penser que des perturbations locales affectent peu la circulation dans l'ensemble du système. Les phénomènes locaux sont prépondérants : mélanges avec les eaux superficielles, équilibres précipitation/dissolution liés à l'exploitation. Une description du système hydrothermal par un modèle plus sophistiqué ne pourra être envisagé qu'avec l'acquisition de données hydrauliques, thermiques et géochimiques aussi bien en surface qu'en profondeur.

## 5 - CONCLUSIONS

Le programme de recherche sur les circuits d'eau sulfurée des Pyrénées a permis de mieux identifier l'origine des sources sulfurées sodiques des Pyrénées.

La preuve de la minéralisation de ces eaux dans les granites n'est plus à faire. De nombreuses études hydro- et géochimiques ont mis en évidence la relation entre la minéralisation des eaux sulfurées et celles des granites traversés (cf. rapport BRGM : "Etude géochimique et géothermique des eaux sulfurées de Luchon, Pyrénées" par A. Criaud et F.D. Vuataz, décembre 1984).

Le programme de recherche actuel a consisté en une sélection des sites granitiques avec sources sulfurées les plus représentatifs et les plus aptes à une expérimentation. Après l'examen de dix massifs granitiques, le choix du massif-pilote s'est porté sur le massif de Cauterets bien identifié sur le plan géologique, avec un second massif-pilote celui de Luchon, riche d'un important historique de mesures hydrodynamiques mais dans un contexte géologique plus difficile à définir; notamment la géométrie du massif granitique est assez mal connue.

Le premier schéma de circulation proposé pour le massif granitique de Cauterets et ses émergences sulfurées, a permis l'élaboration d'un modèle conceptuel des écoulements (cf. rapport BRGM n° 88 SGN 915 MPY "Programme de recherche finalisée. Thermalisme : Eaux sulfurées des Pyrénées - rapport de synthèse intermédiaire" par F. Iundt, Ph. Jean, J.C. Soulé, Y. Ternet).

Puis, des mesures précises des différents paramètres de circulation, ont conduit à proposer un deuxième schéma qui précise les circulations et met en évidence l'existence de deux circuits bien séparés, l'un donnant naissance aux sources du groupe Sud, l'autre à celles du groupe Nord. Ces deux circuits donnent des eaux de composition chimique de même type, mais les eaux du groupe Nord sont plus minéralisées que celles du groupe Sud.

Toutes les sources d'un même groupe présentent des compositions chimiques identiques. Les deux groupes se différencient aussi par l'âge de l'eau, l'altitude d'infiltration, les températures maximales atteintes.

Ces nouveaux paramètres ont été retenus pour proposer un nouveau schéma de circulation, comprenant deux circuits différents.

Ces circuits ont été simulés par modélisation mathématique. La représentation du système hydrothermal de Cauterets en deux circuits distincts et emboîtés a permis de vérifier la cohérence des hypothèses émises et de caler le modèle à partir des paramètres hydrodynamiques et thermiques mesurés.

Les études entreprises sur le système granitique de Cauterets ont donc permis de proposer un schéma de circulation hydrothermal, dont la cohérence a été vérifiée par modélisation mathématique.

Les résultats les plus importants à retenir sont les suivants :

- les eaux sulfurées des Pyrénées circulent dans les massifs granitiques, sous forme de circuits en U qui peuvent être emboîtés (cas de Cauterets).
- ces circuits sont très profonds (5 à 8 km) et leur dimension horizontale est du même ordre de grandeur.
- l'eau circule essentiellement dans les fissures du granite, et elle acquiert sa minéralisation dans son parcours profond dans des conditions de température élevées (90°C à Cauterets, 130°C à Luchon), et pendant des temps de trajet très longs (500 ans pour les plus courts mesurés et 16000 ans pour les plus longs mesurés).
- la minéralisation de l'eau est caractéristique du trajet effectué dans le granite.
- lorsque l'émergence s'effectue en dehors du massif granitique par un parcours final dans une autre formation géologique, les températures d'émergence peuvent être abaissées légèrement.
- la minéralisation de ces eaux est invariable dans le temps, par contre le débit varie en fonction de la pression de l'eau qui s'infiltré en amont. Ainsi, l'eau qui sort aujourd'hui est agée de plusieurs centaines ou plusieurs milliers d'années. Elle aura un débit influencé par les pluies qui tombent aujourd'hui même sur le massif granitique, simplement par transmission de pression entre l'entrée et la sortie du système.

Commentaire : Cette différence de temps énorme entre le trajet d'une molécule d'eau (milliers d'années) et l'onde de pression qui conditionne le débit des sources (quelques centaines de secondes) permet d'expliquer en particulier pourquoi le débit varie alors que la qualité de l'eau reste constante.

Ce phénomène a été vérifié dans le cadre d'un programme de recherche complémentaire effectué à Luchon. On a pu dans ce cas grâce à 10 années de mesures continues mettre en évidence l'influence des précipitations atmosphériques actuelles sur le débit.

*Ce constat est de la plus grande importance pour la gestion de ces eaux : il permet d'expliquer, voire de prévoir les baisses de débits, et il nous permet d'être exigeants sur la constance de la qualité de l'eau.*

\*  
\* \*

Ce programme de recherche a permis de faire avancer sensiblement notre connaissance des systèmes thermo-dynamiques profonds des massifs granitiques, c'est-à-dire, des eaux sulfurées sodiques pyrénéennes. Les

résultats acquis permettent d'ores et déjà de mieux maîtriser les actions de captage et de gestion de cette ressource.

Ils permettent d'être plus audacieux dans les captages et surtout ils permettent d'assurer un label de qualité au produit thermal mieux identifié, en assurant la constance de sa qualité dès le captage grâce à la séparation qui est faite entre les eaux froides (non captées) et les eaux sulfurées chaudes (captées).

La modélisation globale qui a été faite a exploité toutes les données acquises. Pour une modélisation hydrothermale plus précise ou plus détaillée, il serait nécessaire d'acquérir des données complémentaires sur les paramètres physiques internes au système.

Toulouse, mai 1990

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

### Références :

F. DEBON (1972).

Massifs granitiques de Cauterets et Panticosa (Pyrénées occidentales). BRGM 37 pages, 6 fig. 3 pl. photos, 1 carte 1/50 000.

F. IUNDT et J.C. SOULE (1986).

Le système hydrothermal de Cauterets. (Journal Français d'Hydrologie, 1986, 17, fasc. 3, pp. 221-229.

F. IUNDT, PH. JEAN, J.C. SOULE et Y. TERNET (1988).

Thermalisme : Eaux sulfurées des Pyrénées. Rapport de synthèse intermédiaire (rapport BRGM, décembre 1988, n° 88 SGN 915 MPY, 11 p. et 5 ann).

E.N. PENTCHEVA et J.C. SOULE (1989).

Particularités microgéochimiques génétiques du système hydrothermal de Cauterets. Mémoires du XXV<sup>e</sup> Congrès de la Société Internationale des Techniques Hydrothermales. Bad Füssing (RFA), 1989.

