

**GÉOTHERMIE PROFONDE GÉNÉRALISÉE :
MESURES DE CONTRAINTES *IN-SITU***

D. Burlet, S. Gentier

BRGM

**Direction des Services Sol et Sous-sol
Département Ingénierie Géotechnique
(B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS cedex 2 - France)**

Contrat N° EN3G - 0056 - F (CD)

RAPPORT DE SYNTHÈSE

**Recherches financées en partie par
la Commission des Communautés Européennes
Programme R & D Energie Non-Nucléaire
(Energie Géothermique)**

Novembre 1990

R 31 930 GEG 4S 90

RÉSUMÉ

A la fin de l'année 1986, le BRGM s'est engagé dans un vaste programme de recherche ayant pour objectif principal d'améliorer la connaissance du champ de contrainte dans la croûte superficielle, à des profondeurs intéressant les projets d'exploitation de la chaleur du sous-sol. La technique retenue, qui consiste à tester des fractures artificielles (fracturation hydraulique) ou naturelles recoupant un forage, a été appliquée sur dix sites répartis sur tout le territoire français. A cette occasion, le BRGM a pu développer un équipement de mesure ainsi qu'une procédure de tests opérationnels dans des contextes géologiques très variés. Les données recueillies ont été interprétées par la méthode d'inversion "H.T.P.F." et la théorie "classique" de la fracturation hydraulique.

A l'exception des sites de Salau (Ariège) et Le Grais (Orne), l'application de la méthode "H.T.P.F." nous a permis de déterminer complètement le champ de contrainte local. A Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône) et Guerting (Moselle), où seuls des tests de fracturation hydraulique ont pu être effectués, le champ de contrainte défini se caractérise par une mauvaise résolution du module de la contrainte principale horizontale majeure σ_H . Pour les autres sites, le test de fractures pré-existantes d'orientations variées en plus des fractures hydrauliques s'est traduit par une bonne précision sur chacune des composantes du champ de contrainte.

Pour quatre sites, la méthode "H.T.P.F." et la théorie "classique" de la fracturation hydraulique ont pu être parallèlement appliquées. A l'exception du site de Saint-Sigismond (Maine et Loire), les résultats des deux méthodes sont comparables en ce qui concerne l'orientation de σ_H et le module de la contrainte principale horizontale mineure σ_h . En revanche, le module de σ_H résultant de l'une et l'autre méthode présente un écart significatif attribué à l'insuffisance du débit d'injection utilisé au cours des tests de réouverture des fractures hydrauliques.

A Saint-Sigismond, les deux méthodes ont conduit à des résultats significativement différents concernant l'orientation de σ_H . Ce désaccord est attribué à l'anisotropie du matériau (schiste).

Pour les sites de Chassolet (Puy-de-Dôme) et Jouac (Vienne), tous deux en milieu cristallin et localisés dans le Massif Central, une orientation de σ_H comparable a été déterminée (N 150° E). A Chassolet, la contrainte verticale qui est la contrainte maximum (régime distensif) est inférieure au poids des terrains. A Jouac, le champ de contrainte est caractéristique d'un régime compressif ($\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$). A Aix-en-Provence (formation sédimentaire stratifiée), la distribution des contraintes qui est étroitement liée à l'hétérogénéité mécanique des niveaux testés, présente un caractère très local. Cependant, la structure de ces hétérogénéités nous a permis de définir des directions principales de contraintes (σ_H orienté N-S) cohérentes avec la néotectonique régionale.

La confrontation des résultats acquis dans le cadre de cette étude avec d'autres déduits de mesures *in situ* et de mécanismes au foyer suggère l'existence d'un vaste domaine (Nord du Massif Central et Bassin Parisien) dans lequel l'orientation de σ_H est uniforme (N 145° E) contrairement au rapport de forme des contraintes principales.

En parallèle aux campagnes de mesures *in situ* précédemment citées, le BRGM a conduit une réflexion théorique sur la distribution des contraintes autour d'un forage dans un milieu anisotrope en vue de prendre en compte la pression de fracturation dans l'interprétation des essais. Cette étude a nécessité au préalable une synthèse bibliographique portant sur :

- la fracturation hydraulique dans les milieux anisotropes,
- le comportement mécanique de ces milieux (déformabilité et rupture).

Des solutions analytiques existant dans la littérature ont été intégrées dans un code de calcul. Pour valider ce code, des essais de fracturation hydraulique en laboratoire précédemment réalisés au BRGM ont été réinterprétés.

GÉOTHERMIE PROFONDE GÉNÉRALISÉE : MESURES DE CONTRAINTES *IN-SITU*

D. BURLET, S. GENTIER

Contractant : BRGM
Département 4S/GEG
BP 6009
45060 ORLÉANS Cedex 2

Contrat N° : EN3G-0056-F(CD)

1 - INTRODUCTION

La connaissance de l'état de contrainte en profondeur revêt un caractère particulièrement important dans un programme de recherches visant à étudier des circulations de fluides en milieu fracturé.

Parmi les techniques de mesure *in-situ*, la fracturation hydraulique apparaît à l'heure actuelle comme la plus adaptée pour accéder directement à ce type d'information dans les massifs peu perméables. Cette technique consiste à créer puis propager une fracture artificielle au sein d'une formation rocheuse en pressurant une portion de forage isolée par un double obturateur. Les pressions caractéristiques enregistrées en cours d'essai ainsi que l'orientation de la fracture créée dépendent en particulier des contraintes en place dans la formation. L'interprétation de tels essais au moyen de la théorie "classique" de la fracturation hydraulique nécessite de formuler un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, la fracture hydraulique est supposée se produire dans le plan perpendiculaire à la contrainte principale horizontale mineure. Or cette hypothèse est mise en défaut dès l'instant où le forage n'est plus parallèle à l'une des directions principales de contrainte (Daneshy, 1973) ou que la roche est anisotrope. Pour pallier à ces difficultés, Cornet et Valette (1984) ont proposé de tester les fractures naturelles qui recoupent le forage. Connaissant leur orientation, une méthode d'inversion permet de déterminer le tenseur local des contraintes et ses variations avec la profondeur.

Dans le cadre du programme présenté dans ce rapport, le BRGM a appliqué depuis 1986 cette méthode sur une dizaine de sites répartis sur tout le territoire national. La réalisation de ces mesures a permis de développer un équipement et une procédure de test opérationnels dans des contextes géologiques variés. En outre, une étude bibliographique et une réflexion théorique ont été conduites portant sur le rôle de l'anisotropie du matériau dans le processus de fracturation hydraulique.

Après avoir évoqué rapidement le problème de la détermination du champ de contrainte, le matériel et la procédure de test sont décrits.

Les résultats des expérimentations *in-situ* sont ensuite présentés et analysés en termes de champs de contrainte régionaux. Enfin les développements théoriques concernant le rôle de l'anisotropie sont résumés.

Notons que les résultats des expérimentations *in-situ* ainsi que les développements technologiques réalisés sur le système de mesure sont détaillés dans le rapport final n° 1 : Détermination du champ de contraintes régional en France à partir de tests hydrauliques en sondages. L'étude portant sur l'anisotropie est pour sa part détaillée dans le rapport final n° 2 : Fracturation hydraulique dans les matériaux anisotropes : étude bibliographique et théorique.

2 - LA MESURE DES CONTRAINTES *IN-SITU* A PARTIR DE TESTS HYDRAULIQUES EN SONDAGE

L'expérience accumulée dans le monde entier montre qu'on ne saurait transposer sans risque le champ de contrainte régional, connu par la tectonique, à un site particulier. Les caractéristiques structurales locales propres à ce site entraînent en effet très souvent des écarts importants par rapport au champ régional.

Des mesures spécifiques sont donc toujours nécessaires.

2.1 - PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'opération de base de la méthode consiste à isoler une courte portion de forage au moyen d'un double-obturateur et à y injecter de l'eau à débit constant. Sous l'effet de cette injection, la pression de l'eau augmente, jusqu'à fracturer le terrain s'il est exempt de fracture naturelle (il s'agit alors de fracturation hydraulique *sensu stricto*), ou à ouvrir une fracture existante dans le cas contraire.

A cet instant, la pression chute brutalement et tend ensuite à se stabiliser pendant la phase dite de "propagation de la fracture". Au bout d'un certain temps, l'injection est interrompue. La pression décroît et tend à rejoindre la pression interstitielle initiale.

Un tel essai, répété plusieurs fois, à débit croissant, est caractérisé par différentes valeurs de pression, en général facilement repérables sur les enregistrements pression-temps (fig. 1).

Ces pressions caractéristiques dépendent en particulier des contraintes dans le terrain et de l'orientation de la fracture. Ce dernier paramètre est déterminé par une prise d'empreinte de la paroi du sondage au niveau de la fracture testée (fig. 2).

2.2 - INTERPRÉTATION DES MESURES

En général, deux pressions caractéristiques sont identifiées :

- la pression de fermeture instantanée P_{si} (pression dans la chambre de test immédiatement après l'arrêt de l'injection), considérée comme une estimation de la contrainte normale s'exerçant sur la fracture à une certaine distance du trou ;
- la pression de réouverture à grand débit P_{rf} qui est considérée comme une estimation de la contrainte tangentielle s'exerçant au niveau de l'intersection du plan de fracture et de la paroi du trou.

La théorie "classique" de la fracturation hydraulique s'applique aux seuls essais en zones vierges. Si la roche est élastique linéaire, isotrope et le sondage parallèle à une des directions principales du tenseur des contraintes, une fracture coaxiale est initiée dans un plan perpendiculaire à la contrainte horizontale mineure. L'état de contrainte est parfaitement défini à une profondeur z par les relations suivantes (Haimson, 1968) :

$$\sigma_h = P_{si} \quad (1)$$

$$\sigma_H = 3 \cdot P_{si} - P_{rf} - P_o \quad (2)$$

$$\sigma_v = \rho g z \quad (3)$$

où σ_H et σ_h sont respectivement les modules des contraintes principales horizontales majeure et mineure, σ_v la contrainte verticale, ρ la masse volumique des matériaux sus-jacents, g l'accélération de la pesanteur et P_0 la pression interstitielle initiale.

La direction de σ_H est définie par l'orientation de la fracture.

Afin de supprimer les limitations introduites par les hypothèses de la théorie "classique", Cornet et Valette (1984) proposent d'activer des fractures pré-existantes d'orientations variées (méthode "H.T.P.F." = Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures). La pression de fermeture instantanée est simplement considérée comme une estimation de la contrainte normale σ_n exercée par le champ de contrainte local $[\sigma]$ sur le plan de fracture de normale n . Soit pour la i ème fracture :

$$\text{Psi} = [\sigma] \cdot n_i \cdot n_i \quad (4)$$

où $[\sigma]$ est un tenseur symétrique du deuxième ordre.

Connaissant les composantes des vecteurs n (orientation des fractures) et les valeurs des σ_n (Psi), une méthode d'inversion généralisée nous permet d'accéder aux composantes de $[\sigma]$ dans le repère géographique. Dans le cas où au moins six fractures d'orientations variées peuvent être successivement testées dans un intervalle restreint du sondage (quelques dizaines de mètres), la méthode fournit les six composantes de $[\sigma]$ et leur incertitude en un point (centre de l'intervalle de test).

Dans le cas contraire, on est amené à réaliser des essais à différentes profondeurs (ou à différentes distances dans le cas d'un sondage horizontal). Cette façon de procéder introduit de nouvelles inconnues, caractérisant les variations du champ de contraintes le long du forage. Si ces variations peuvent le plus souvent être négligées pour un sondage horizontal, il n'en est pas de même pour un sondage vertical du fait du poids des terrains. Le nombre des inconnues dépend alors de la complexité du modèle choisi pour décrire les variations des contraintes avec la profondeur. Soit pour des variations linéaires :

$$[\sigma] = [S] + z \cdot [a] \quad (5)$$

où $[S]$ et $[a]$ sont deux tenseurs symétriques du deuxième ordre traduisant respectivement l'état de contrainte à la surface et le gradient des contraintes dans la direction verticale z .

Si l'on fait l'hypothèse que la verticale est une direction principale et que la contrainte verticale est nulle en surface (pas d'effets de topographie) le nombre d'inconnues est réduit à sept ce qui nécessite un minimum de sept essais.

Mais en pratique, une campagne de mesures doit comporter au moins une douzaine de tests à différents niveaux, sur des fractures d'orientations variées. Compte tenu de l'incertitude qui règne sur l'interprétation de certains essais, ce nombre est très souvent porté à une vingtaine.

Ceci étant, il n'est pas toujours nécessaire de connaître la totalité des composantes du tenseur des contraintes. Pour un certain nombre de problèmes on peut se contenter de la valeur de la contrainte minimum. Un plus petit nombre d'essais est alors suffisant.

2.3 - DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES SUR LE MATÉRIEL DE MESURES DE CONTRAINTES *IN-SITU*

A l'issue d'une étude des différents appareillages existant sur le marché, le BRGM a fait l'acquisition, en 1987, du matériel "WIRELINE PERFRAC SYSTEM", construit et commercialisé par la Société MESY GmbH à Bochum (RFA), à partir d'une conception de base due pour l'essentiel au Professeur F. Rummel de l'Université de la Ruhr (Rummel *et al.*, 1983).

Cet équipement est apparu comme le meilleur pour les applications visées : réalisation de mesures dans des sondages de petit diamètre (76 mm à 122 mm), jusqu'à des profondeurs de 1 500 m en terrain peu perméable.

L'ensemble est installé sur un camion de 19 tonnes constituant une unité mobile parfaitement autonome (fig. 3). Ce système se compose d'un treuil équipé d'un câble de diagraphie à sept conducteurs, d'un diamètre de 3/8" et d'une longueur de 1500 m permettant la manœuvre des sondes et d'une pompe d'injection pouvant débiter 10 l/mn maximum à 40 Mpa. L'ensemble treuil + pompe est actionné par un groupe hydraulique.

La sonde de test hydraulique et la sonde de prise d'empreinte ont été entièrement reconstruite par rapport aux versions d'origine et sont décrits par la suite. La mesure du débit se fait en surface au moyen d'un débitmètre à effet de Coriolis.

L'ensemble des signaux délivrés par les différents capteurs est reporté et affiché dans une cabine installée sur l'unité mobile. Les paramètres (pression et débit) font l'objet d'un enregistrement analogique en continu et d'une acquisition numérique grâce à une centrale de mesure pilotée par un micro-ordinateur.

Les principales modifications et améliorations apportées à ce système vont être maintenant détaillées.

2.3.1 - PARTIE TREUIL - POMPE

Il faut souligner la très grande fiabilité de cette partie du système et sa remarquable souplesse d'utilisation. Cependant, afin de remédier à l'imprécision du dispositif de mesure de profondeur (compteur couplé à un galet entraîné par le câble diagraphie sur le treuil), on a installé au niveau de la poulie du tripode un codeur optique. Ce dispositif a par la suite donné entière satisfaction et permet de positionner la sonde dans le forage avec une précision de l'ordre de ± 10 cm.

2.3.2 - SONDE DE TEST HYDRAULIQUES

Cet ensemble comprend le double-obturbateur définissant la chambre de test, le distributeur hydraulique, ainsi que les capteurs de pression.

Les performances et la fiabilité de l'appareillage initial sont vite apparues comme insuffisantes en regard des exigences sur la précision nécessaire des mesures.

Les obturbateurs d'origine ont été remplacés par des obturbateurs TAM se rapprochant de la technologie utilisée par les pétroliers.

La partie inférieure de chacune des deux manchettes de la sonde peut coulisser sur la tige centrale ce qui permet à la pression dans les obturateurs de suivre parfaitement la montée en pression de la chambre d'injection. Dans ces conditions, l'ancrage des obturateurs au terrain nécessite seulement une surpression de l'ordre de 50 bar qui sera conservée tout au long de l'essai.

Le système de distribution hydraulique a été modifié pour permettre de contrôler simultanément la pression à l'intérieur des obturateurs et la pression à l'intérieur de la chambre d'injection au cours d'un essai. Ceci permet de déceler rapidement des anomalies de fonctionnement du distributeur ou des fuites dans le circuit hydraulique et les obturateurs. Un second capteur de pression a donc été rajouté dans la sonde.

Par ailleurs, une masse tige d'environ 25 kg a été adjointe à la tête de la sonde, afin de faciliter la manœuvre du distributeur dont le fonctionnement était sans cela très aléatoire surtout à grande profondeur.

2.3.3 - SONDE D'IMPRESSION

Cette sonde a été entièrement développée au BRGM à partir d'un obturateur TAM sur lequel est montée une manchette MAZIER en caoutchouc partiellement vulcanisé. A l'extrémité inférieure de l'obturateur, une boussole de type Pajari est logée dans un conteneur en bronze et donne l'azimut d'une génératrice repère de la sonde. En tête de l'obturateur sont montés deux inclinomètres à 90° l'un de l'autre qui fournissent l'azimut et l'inclinaison du forage.

2.3.4 - AMÉLIORATIONS PRENANT EN COMPTE L'ASPECT SÉCURITAIRE

Lors de la campagne de Guerting, la sonde de tests hydrauliques est restée coincée dans le forage à une profondeur de 720 m. On suppose que le distributeur s'est trouvé bloqué dans une position intermédiaire sans qu'il soit possible de le translater et donc de dégonfler les obturateurs. Rien n'ayant été prévu comme système d'accrochage, il n'a pas été possible de "repêcher" ne serait-ce que la partie supérieure de la sonde.

Cet incident nous a contraint à refabriquer entièrement une nouvelle sonde (obturateurs - distributeur hydraulique - conteneur des capteurs de pression). A cette occasion, plusieurs modifications ont été apportées permettant des opérations de récupération de tout ou partie de la sonde :

- le double-obturateur et la partie sonde proprement dite sont accouplés par deux pièces emboîtées pouvant se séparer par cisaillement d'une goupille tarée à 2,5 tonnes. On peut ainsi désolidariser la partie sonde du double-obturateur.
- une vanne motorisée a été installée dans la sonde et permet en cas de blocage du distributeur hydraulique de décompresser le fluide dans les obturateurs en court-circuitant le distributeur.
- une tête d'accrochage de type overshot a été prévue au sommet de la barre de charge afin de pouvoir tenter la récupération de la sonde avec un outil descendu aux tiges.

2.4 - PROCÉDURE DE TEST

La mise en œuvre optimale de la méthode interdit que l'on travaille "en aveugle". Un minimum de données sur la géologie du site sont nécessaires pour détecter les facteurs susceptibles de perturber les mesures. Le choix de la procédure d'essai découle de cette analyse. L'idéal est de disposer d'un sondage carotté dont les carottes peuvent être examinées. Ceci permet de sélectionner les niveaux à tester qui doivent être exempts de toute fracture ou recoupés par une seule fracture naturelle.

Il est ensuite procédé aux stimulations, en plusieurs cycles de débit croissant (fig. 1). Les débits utilisés sont fixés après un test préliminaire de perméabilité de la roche, à basse pression. Dans tous les cas, ils restent très limités (quelques litres par minute au maximum).

La quantité d'eau injectée dans une fracture est de l'ordre de 1 à 20 litres, pour l'ensemble des cycles, en roche peu perméable. Les fractures sollicitées ne sont pas ouvertes au-delà de quelques mètres du sondage.

La méthode utilisée n'a donc aucune commune mesure avec les techniques pétrolières, où les volumes injectés vont de quelques centaines de litres à quelques dizaines de mètres cubes.

Les cycles de stimulation sont le plus souvent complétés par des essais de réouverture quasi-statique (fig. 1). Ces essais, qui sont constitués d'une succession de paliers de pression croissantes, permettent de préciser les indications tirées des cycles de stimulation.

A la fin de chaque cycle, un test de "retour d'eau" est effectué de manière à déceler d'éventuelles fuites de la chambre d'injection.

Le dépouillement des enregistrements vise à déterminer les pressions caractéristiques, et l'incertitude sur leurs valeurs. L'utilisation de l'outil informatique permet de réduire ces incertitudes et d'accélérer cette phase de dépouillement.

Dans la même optique, les traces de fractures sur l'obturateur à empreinte sont reportées sur un calque puis numérisées. Leur traitement permet de définir les pendages et directions des plans qui se rapprochent le plus des traces originales.

2.5 - RÉSULTATS DES EXPÉRIMENTATIONS *IN-SITU*

Dix campagnes de mesures ont été réalisées dans le cadre de ce programme. Dans un seul cas (Fourons-le-Comte, Belgique) des difficultés liées à l'état du forage nous ont interdit d'effectuer le moindre essai complet.

Les sondages anciens utilisés pour ces mesures ont été, dans la majorité des cas, exécutés pour la recherche minière. Par conséquent les sites expérimentaux sont pour la plupart des bassins miniers en exploitation ou des zones de prospection (fig. 4).

2.5.1 - RÉSULTATS DE CHASSOLES (PUY-DE-DÔME)

Le sondage S2 testé est situé à 60 km au sud de Clermont-Ferrand dans le massif du Cézallier et recoupe sur 1400 m la formation gneissique de Saint-Alyre. Sur une vingtaine

d'essais réalisés entre 345 m et 850 m de profondeur, seuls treize ont été jugés valides, les autres ayant manifestement donné lieu à un contournement des obturateurs. L'application de la méthode "H.T.P.F." sur ces treize essais a permis d'obtenir une solution satisfaisante (tabl. 1, fig. 5) : l'écart entre la contrainte normale mesurée et la contrainte normale recalculée est inférieur pour tous les essais à 0,5 Mpa.

z (m)	σ_H (Mpa)	$\varepsilon\sigma_H$ (Mpa)	σ_h (Mpa)	$\varepsilon\sigma_h$ (Mpa)	σ_v (Mpa)	ψ (deg.)	$\varepsilon\psi$ (deg.)
350	10,7	1,3	8	0,6	8	107	7
450	11,3	1,1	8,9	0,7	10,3	124	13
550	12,3	0,8	9,4	0,6	12,6	138	21
650	13,6	1	9,7	0,6	15	146	22
750	15	1,5	9,9	0,9	17,2	151	21
850	16,4	2,1	10	1,2	19,5	154	20

Tableau 1 - Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur résultant de l'inversion à Chassoles.

(σ_H et σ_h sont respectivement les contraintes horizontales majeure et mineure, σ_v la contrainte verticale, ψ l'orientation de σ_H par rapport au Nord et ε l'incertitude associée à chaque grandeur).

L'interprétation des cinq essais de fracturation hydraulique en zones vierges par la théorie "classique" a conduit à des résultats comparables. Le gradient de la contrainte verticale résultant de l'inversion (0,0235 MPa/m) est inférieur au poids des terrains (masse volumique du matériau = 2,65 g/cm³). Cet écart est attribué à l'effet du relief. La tête du forage est localisée sur un plateau à 950 m d'altitude bordé par une vallée située 500 m plus bas. Le régime de contrainte défini en profondeur est de type distensif ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$). L'orientation de σ_H à 750 m (N 150° E) est cohérente avec les résultats de l'analyse de mécanismes au foyer répartis dans le Massif Central (Godefroy, 1980).

2.5.2 - RÉSULTATS DE SALAU (ARIÈGE)

Le sondage S14 qui a servi de cadre à ces mesures est localisé dans la zone centrale de la chaîne des Pyrénées. Il traverse 500 m de calcaires métamorphisés datés du Dévonien. Vingt et un essais ont été réalisés entre 100 m et 500 m de profondeur parmi lesquels quatre ont donné lieu à un contournement des obturateurs.

Le traitement des dix-sept essais valides par la méthode d'inversion a conduit à une solution irréaliste. Le tenseur obtenu est en effet incompatible avec la stabilité de la paroi du sondage. Deux facteurs peuvent mettre en défaut les hypothèses sur lesquelles la méthode "H.T.P.F." est fondée :

- la topographie : la tête du sondage est située au fond d'une vallée encaissée (fig. 6) ;
- l'inclinaison du sondage qui est de 18° au fond ;

Dans ce cas de figure, il est d'une part peu probable que l'axe du sondage soit une direction principale de contrainte et d'autre part que les composantes du tenseur soient des fonctions linéaires de la profondeur (Savages *et al.*, 1985). En conséquence, ni la méthode "H.T.P.F." ni la théorie "classique" de la fracturation hydraulique ne peuvent être appliquées aux données recueillies à Salau.

2.5.3 - RÉSULTATS D'AIX-EN-PROVENCE (BOUCHES-DU-RHÔNE)

Ces mesures ont été réalisées dans un sondage vertical (propriété des Houillères de Provence) situé à une vingtaine de kilomètres de la zone d'exploitation du gisement de lignite de Gardanne. Il recoupe sur 1130 m une puissante formation fluvio-lacustre constituée d'une alternance de bancs calcaires plus ou moins compacts avec des intercalations de lignite. La stratification est sub-horizontale.

Douze tests hydrauliques ont été réalisés entre 1029 m et 1065 m de profondeur.

L'application de la méthode H.T.P.F. ne permet pas l'obtention d'un tenseur unique qui soit cohérent avec l'ensemble des données. Ce résultat suggère une influence de l'hétérogénéité des matériaux sur la distribution des contraintes *in-situ*.

Le champ de contrainte, calculé par la méthode "classique" à partir des seuls essais en zone vierge, se caractérise par de brusques variations en module et en direction de ses composantes principales (tabl. 2, fig. 7).

z (m)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	σ_v (MPa)	ψ (deg.)
1 033,6	33,6	17,1	22,7	0
1 041,7	39,1	20,0	22,9	17
1 043,8	37,9	19,55	22,95	25
1 049,3	35,7	18,4	23,1	30
1 056,2	32,2	16,6	23,25	347
1 064	26,6	14,25	23,4	15

Tableau 2 - Evolution des contraintes principales avec la profondeur à Aix-en-Provence

(σ_H et σ_h sont respectivement les contraintes horizontales majeure et mineure, σ_v la contrainte verticale, ψ l'orientation de σ_H par rapport au Nord).

En moins de 30 m de profondeur, la contrainte horizontale majeure passe de la situation de contrainte maximum à celle de contrainte intermédiaire. Dans le même temps, les axes des contraintes horizontales subissent une rotation de 30° (l'orientation moyenne de σ_H étant N-S).

La mesure en laboratoire des caractéristiques mécaniques des matériaux testés met en évidence une étroite corrélation entre la raideur des bancs et la distribution des contraintes. En effet, le niveau où l'on observe la plus forte composante déviatorique du tenseur des contraintes (1041 m), se caractérise par un module élastique et une densité élevés. A l'inverse, le niveau 1065 m le plus riche en lignite (module élastique et densité inférieurs) présente la plus faible composante déviatorique.

La méthode "H.T.P.F." est appliquée aux essais situés dans la même "couche mécanique" c'est dire à des niveaux où les paramètres mécaniques ont des valeurs homogènes. La solution suivante est obtenue :

$$\begin{aligned}\sigma_H &= 36,5 \text{ MPa} \pm 12 \\ \sigma_h &= 13,9 \text{ MPa} \pm 0,4 \\ \psi &= 9^\circ \pm 4\end{aligned}$$

La mauvaise résolution de σ_H provient de la faible diversité des azimuts des fractures traitées (plans quasi-parallèles).

Les résultats obtenus à Aix-en-Provence illustrent le rôle déterminant que peut jouer l'hétérogénéité des matériaux sur la distribution des contraintes *in-situ*. Il apparaît hasardeux dans ce cas de figure, d'extrapoler à grande échelle l'amplitude des contraintes définies localement. En revanche, les directions principales de contraintes (σ_H orienté N-S) sont cohérentes avec des mécanismes au foyer voisins ce qui leur confère un caractère régional.

2.5.4 - RÉSULTATS DU GRAIS (ORNE)

Le site du Grais est localisé à 80 km au Sud de Caen, dans la partie normande du Massif Armoricaïn.

Le sondage BEA14 utilisé recoupe un complexe hydrothermal intrusif comprenant des microgranites et des rhyolites. La formation encaissante est constituée de schistes Briovériens. Le matériau testé se caractérise par un fort degré de fracturation (5 à 40 fractures par mètre).

Dix-neuf tests ont été réalisés entre 184 m et 285 m de profondeur. En raison du grand nombre de fractures recoupant chacune des passes de sondage testées, la détermination complète du tenseur local des contraintes est impossible. Les pressions caractéristiques fournissent une simple estimation de la contrainte horizontale mineure σ_h . En supposant la contrainte verticale égale au poids des terrains ($\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$) le rapport σ_h/σ_v vaut 2,3 à la cote 190 m, décroît rapidement puis tend asymptotiquement vers 1 en profondeur (fig. 8). Cette évolution suggère une influence du relief, la tête de puit étant située au sommet d'une colline. On doit également noter que le site du Grais se caractérise par une hydrothermalisation intense qui peut donner naissance à des minéraux gonflants susceptibles d'engendrer des contraintes horizontales élevées.

2.5.5 - RÉSULTATS DE GUERTING (MOSELLE)

Le site expérimental se trouve à proximité du siège de la Houve dans le bassin houiller lorrain. Le sondage vertical S971 de 800 m, propriété des Houillères du Bassin de Lorraine, recoupe des grès triasiques en surface et se termine dans les schistes du Carbonifère.

Il est à noter que l'intervalle de test est situé à une centaine de mètres de la zone d'exploitation.

Sept niveaux ont été testés entre 690 m et 710 m de profondeur. Tous les essais ont donné lieu à la création d'une fracture artificielle parallèle à l'axe du sondage.

Les données recueillies ont été interprétées par la méthode "H.T.P.F." et la méthode "classique". En raison du peu d'essais et de la faible extension de l'intervalle de test (20 m), les variations des contraintes avec la profondeur ont été négligées. Le tenseur obtenu est par conséquent représentatif de l'état de contrainte en un point (milieu de l'intervalle) :

$$\begin{aligned}\sigma_H &= 35,8 \text{ MPa} \pm 7,7 \\ \sigma_h &= 14,3 \text{ MPa} \pm 0,4 \\ \sigma_v &= 15,4 \text{ MPa} \\ \psi &= \text{N } 354^\circ \pm 3\end{aligned}$$

Les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparables. Les fractures traitées étant quasi-parallèles, la contrainte horizontale majeure est faiblement résolue. Son module est égal à 2,5 fois celui de la contrainte horizontale mineure et 2 fois celui de la contrainte verticale. Cette valeur élevée ne semble pas corrélée à la tectonique locale. Même si aucune relation ne peut être établie entre l'orientation des contraintes et la géométrie des ouvrages, seule la présence de ces derniers peut expliquer un tel déviateur.

2.5.6 - RÉSULTATS DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS

Les mesures réalisées dans le forage GPK1 de Soultz-sous-Forêts s'inscrivent dans le cadre d'un projet européen de géothermie "Roche Chaudes Sèches" (R.C.S.). Le concept RCS est fondé sur l'extraction de la chaleur terrestre au moyen d'un échangeur développé par stimulation hydraulique du réseau de fractures entre deux forages profonds. La connaissance du champ de contrainte *in-situ* est fondamentale pour situer le deuxième forage par rapport au premier.

Le forage GPK1 est implanté dans le graben rhénan, au droit de l'anomalie thermique du champ pétrolifère de Pechelbronn.

Cinq tests hydrauliques ont été réalisés entre 1458 m et 1972 m conjointement par la Société MESY (Bochum, RFA), le BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, RFA) et le BRGM. Le nombre d'essais étant insuffisant pour résoudre le système (4), deux hypothèses doivent être formulées afin de réduire le nombre d'inconnues de sept à cinq :

- la contrainte verticale σ_v est égale au poids des terrains ($\rho = 2,25 \text{ g/cm}^3$)
- il n'y a pas de rotation des axes des contraintes avec la profondeur.

Dans ces conditions, les composantes principales du tenseur de contraintes sont des fonctions linéaires de la profondeur.

La solution suivante est obtenue (tabl. 3, fig. 9).

$$\begin{aligned}\sigma_H \text{ (MPa)} &= -2 + 0,0192 \cdot Z \text{ (m)} \\ \sigma_h \text{ (MPa)} &= -9,5 + 0,0148 \cdot Z \text{ (m)} \\ \sigma_v \text{ (MPa)} &= 0,0223 \cdot Z \text{ (m)} \\ \psi \text{ (deg.)} &= 150\end{aligned}$$

z (m)	σ_H (Mpa)	$\varepsilon\sigma_H$ (Mpa)	σ_h (Mpa)	$\varepsilon\sigma_h$ (Mpa)	σ_v (Mpa)	ψ (deg.)	$\varepsilon\psi$ (deg.)
1 400	24,8	3,5	11,2	2,5	31,2	150	4
1 500	26,8	3,6	12,7	2,4	33,4	150	4
1 600	28,7	4	14,1	2,6	35,7	150	4
1 700	30,6	4,8	15,6	2,9	37,9	150	4
1 800	32,5	5,7	17	3,3	40,1	150	4
1 900	34,4	6,6	18,6	3,8	42,4	150	4
2 000	36,4	7,7	20	4,3	44,6	150	4

Tableau 3 - Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur.

(σ_H et σ_h sont respectivement les contraintes horizontales majeure et mineure, σ_v la contrainte verticale, ψ l'orientation de σ_H par rapport au Nord et ε l'incertitude associée à chaque grandeur).

Rummel et Baumgärtner (1989) ont analysé les mêmes données à l'aide d'une méthode dont le procédé de résolution diffère de celui utilisé ici. Leurs résultats concordent avec la solution mentionnée ci-dessus en ce qui concerne le module et la direction de σ_H . En revanche, la valeur du gradient de σ_h proposée par les deux auteurs (0,028 MPa/m) est notablement supérieure à la valeur obtenue par inversion (0,0148 MPa/m). Ce désaccord est à rapprocher du nombre d'essais traités qui correspond au strict minimum nécessaire à la résolution du système (4).

En conséquence, les résultats mentionnés doivent être considérés comme préliminaires. Notons toutefois que le régime distensif mis en évidence (σ_H orienté N 150°) concorde avec l'analyse statistique de la fracturation.

2.5.7 - RÉSULTATS DE SAINT-SIGISMOND (MAINE ET LOIRE)

Le site de Saint-Sigismond est localisé sur la bordure est du Massif Armoricain.

Le sondage SC5 sub-vertical ayant servi de cadre à ces mesures recoupe sur 350 m la série schisto-gréseuse de Saint-Georges-sur-Loire. Quatorze niveaux ont été testés entre 140 m et 260 m de profondeur.

L'application de la méthode "H.T.P.F." met en évidence de fortes contraintes horizontales au voisinage de la surface (tabl. 4, fig. 10).

z (m)	σ_H (Mpa)	$\varepsilon\sigma_H$ (Mpa)	σ_h (Mpa)	$\varepsilon\sigma_h$ (Mpa)	σ_v (Mpa)	ψ (deg.)	$\varepsilon\psi$ (deg.)
140	6,4	0,3	4,7	0,9	4,1	27	12
180	7,0	0,2	5,4	0,7	5,2	31	10
220	7,7	0,2	6,1	0,6	6,4	35	8
260	8,3	0,2	6,8	0,7	7,5	39	9

Tableau 4 - Evolution des contraintes principales avec la profondeur à Saint-Sigismond.

(σ_H et σ_h sont respectivement les contraintes horizontales majeure et mineure, σ_v la contrainte verticale, ψ l'orientation de σ_H par rapport au Nord et ε l'incertitude associée à chaque grandeur).

Jusqu'à 200 m de profondeur, les modules des contraintes horizontales sont supérieurs au module de la contrainte verticale. A 150 m, la contrainte horizontale majeure vaut 1,6 fois la contrainte verticale. A la cote 260 m, la contrainte verticale est intermédiaire. Son module est égal à la demi-somme des modules des contraintes horizontales.

Les tentatives d'essais de fracturation hydraulique en zones vierges ont donné lieu soit à l'ouverture de plans de schistosité, soit à la création de fractures coaxiales dont la direction s'écarte nettement de l'axe de σ_H solution de l'inversion (fig. 11). Ces phénomènes sont attribués au caractère fortement anisotrope du matériau.

Le régime des contraintes défini en profondeur, caractéristique d'un type de déformation en décrochement ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$), est parfaitement cohérent avec les manifestations d'une faille majeure active située à 20 km du sondage (fig. 12).

Le caractère compressif du champ de contrainte superficiel qui ne peut être attribué à la topographie (le relief étant inexistant) semble par conséquent étroitement lié à la tectonique locale.

Les mesures de Saint-Sigismond mettent en évidence l'effet dominant que peut avoir une structure tectonique active sur le champ de contrainte local et ceci sur un rayon de plusieurs dizaines de km. Cet effet peut se traduire par des variations dans le plan horizontal (rotation des axes des contraintes lorsque l'on s'approche de la faille) mais aussi, comme c'est le cas ici, selon la direction verticale. Dans un tel cas de figure, il devient hasardeux d'extrapoler en profondeur des mesures réalisées en surface.

2.5.8 - RÉSULTATS DE MÉRIFONS (HÉRAULT)

Le sondage vertical testé, mais à notre disposition par la Compagnie Générale des Matériaux, est implanté dans le bassin uranifère de Lodève. Il recoupe sur 1 000 m une formation très homogène constituée de pélites du Saxonien. Quinze essais ont été réalisés entre 250 m et 850 m de profondeur.

L'application de la méthode "H.T.P.F." a permis l'obtention d'une image très précise des variations du champ de contrainte avec la profondeur (tabl. 5, fig. 13).

z (m)	σ_H (Mpa)	$\varepsilon\sigma_H$ (Mpa)	σ_h (Mpa)	$\varepsilon\sigma_h$ (Mpa)	σ_v (Mpa)	ψ (deg.)	$\varepsilon\psi$ (deg.)
250	0,9	1,7	6,8	0,2	7,2	71	5
350	2,5	1,3	8	0,2	10,0	71	4
450	4,1	1	9,2	0,2	12,9	71	3
550	5,7	0,7	10,4	0,3	15,8	72	4
650	7,4	0,6	11,6	0,3	18,7	72	5
750	9,0	0,6	12,8	0,4	21,5	73	8
850	10,6	0,9	14	0,5	24,4	73	11

Tableau 5 - Evolution des contraintes principales avec la profondeur à MÉRIFONS.
(σ_H et σ_h sont respectivement les contraintes horizontales majeure et mineure, σ_v la contrainte verticale, ψ l'orientation de σ_H par rapport au Nord et ε l'incertitude associée à chaque paramètre).

Le régime de contrainte défini est en parfait accord avec la structure en graben du bassin de Lodève. La contrainte horizontale majeure (orientée N 70° E) est parallèle aux failles normales marquant la limite nord du bassin. Le résultat le plus surprenant concerne la contrainte horizontale mineure. Son module très faible est proche de la pression hydrostatique. A 850 m, ce module est 2,5 fois plus faible que la contrainte verticale.

A l'inverse des résultats obtenus à Aix-en-Provence, l'homogénéité des matériaux testés à MÉRIFONS s'est traduite par un très bon ajustement du modèle de variations des contraintes avec la profondeur sur les données *in-situ*. La méthode "H.T.P.F." a fourni dans ce cas un bon outil de prédiction de l'état de contrainte à l'échelle du bassin.

2.5.9 - RÉSULTATS DE JOUAC (VIENNE)

Cette campagne s'est déroulée dans la mine d'uranium du Bernardan, propriété de Total Compagnie Minière (division Nord Massif Central).

Le sondage vertical utilisé (\varnothing 76 mm), d'une profondeur de 120 m, est implanté au radier d'une galerie de 4 m de diamètre située à 218 m de la surface topographique (fig. 14). L'altitude de la tête du sondage est de 32 m par rapport au niveau de la mer.

La mine du Bernardan est localisée au Nord-Ouest du Massif central à proximité d'un accident ductile majeur appelé "dislocation de la Marche". Le gisement exploité se compose de cinq amas épisyénitiques inclus dans un granite à deux micas. L'ensemble appartient au massif granitique de la Marche.

En raison des conditions particulières d'accès au site, un équipement spécifique a été mis en œuvre (fig. 15).

Dix essais ont été réalisés entre 254,3 m et 301 m de profondeur (par rapport à la surface topographique). L'intervalle de test est intégralement situé dans le granite. La hauteur de cet intervalle étant réduit (43 m), on considère qu'il n'y a pas de rotation des axes des contraintes horizontales avec la profondeur. La solution suivante est obtenue (tabl. 6).

z (m)	σ_H (Mpa)	$\varepsilon\sigma_H$ (Mpa)	σ_h (Mpa)	$\varepsilon\sigma_h$ (Mpa)	σ_v (Mpa)	ψ (deg.)	$\varepsilon\psi$ (deg.)
250	15,2	1,3	8,8	0,6	6,5	150	6
260	15,3	1,3	8,9	0,6	6,8	150	6
270	15,5	1,2	9,0	0,6	7,0	150	6
280	15,6	1,2	9,0	0,6	7,3	150	6
290	15,7	1,3	9,1	0,7	7,5	150	6
300	15,8	1,3	9,1	0,9	7,8	150	6

Tableau 6 - Evolution des contraintes principales avec la profondeur à Jouac.
(σ_H et σ_h sont respectivement les contraintes horizontales majeure et mineure, σ_v la contrainte verticale, ψ l'orientation de σ_H par rapport au Nord et ε l'incertitude associée à chaque paramètre).

Le champ de contrainte déterminé à Jouac est caractéristique d'une compression N 150° E (orientation de σ_H). Notons que ce résultat est tout à fait cohérent avec le résultat des mesures du même type obtenues dans le forage profond d'Auriat situé à 70 km du site de Jouac (Cornet et Burlet, 1990).

3 - FRACTURATION HYDRAULIQUE EN MILIEU ANISOTROPE

Peu d'études ont été menées sur ce sujet. Ce sont pour l'essentiel des études effectuées à partir d'essais en laboratoire de fracturation hydraulique (Avasthi, 1981 ; Sardella, 1984 ; Bastide, 1984). Parmi ces auteurs, seul Bastide propose une approche empirique pour le passage essai laboratoire - essai *in-situ* mais manque de données *in-situ* pour appuyer sa démonstration.

L'interprétation de la fracturation hydraulique à partir de la pression de fracturation dans les milieux anisotropes ne dépend plus que de la résistance à la traction du matériau (cas des milieux isotropes). Elle dépend en outre des caractéristiques de déformabilité du milieu. Dans ce cas, il faut prendre en compte toute la géométrie du problème (orientation du forage par rapport aux directions de contrainte et par rapport aux directions d'anisotropie du matériau : déformabilité et résistance).

Peu de résultats significatifs ont été obtenus jusqu'à présent pour qu'une interprétation des essais de fracturation hydraulique basée sur la pression de fracturation soit possible dans les milieux anisotropes.

3.1 - COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MILIEUX ANISOTROPES

La connaissance du comportement mécanique des milieux anisotropes étant nécessaire pour une interprétation des essais de fracturation hydraulique basée sur la pression de fracturation, une étude bibliographique a été réalisée sur ce sujet. Elle porte sur les thèmes suivants :

- déformabilité
- résistance

sous les aspects résultats expérimentaux et lois de comportement.

Suite à cette étude, il s'avère qu'une bonne connaissance expérimentale du comportement des milieux anisotropes nécessite de nombreux essais. De plus, le terme milieu anisotrope regroupe une grande variété de roches. Il est donc difficile de comparer les résultats obtenus par les différents auteurs.

Le plus souvent, les auteurs interprètent les résultats expérimentaux en posant *a priori* une symétrie, en général élevée (isotrope transverse), parfois orthotrope.

La détermination de la symétrie à prendre en compte dans l'interprétation des essais est un problème important non encore vraiment résolu à l'heure actuelle. Les auteurs qui se sont intéressés à cet aspect proposent pour la plupart des carottages dans de multiples directions par rapport à la structure de la roche. Ceci est très lourd à mettre en œuvre et donc peu utilisé.

Les critères de rupture proposés par les auteurs pour les milieux anisotropes ne sont pas tous applicables en traction et sont établis pour des états de contrainte assez simples. Ils sont rarement validés par des essais en laboratoire suffisamment nombreux et pour une grande variété de matériaux anisotropes.

3.2 - DISTRIBUTION DES CONTRAINTES, DÉFORMATIONS ET DÉPLACEMENTS AUTOUR D'UN FORAGE EN MILIEU ANISOTROPE

Une solution analytique a été écrite par Amadei (1983) d'après les travaux de Leknitskii (1963). Elle permet la détermination des contraintes, des déformations et des déplacements au voisinage d'un forage de longueur infinie sous l'effet d'une mise sous pression du forage. L'axe du forage peut prendre n'importe quelle orientation par rapport au tenseur des contraintes appliquées à l'infini et par rapport aux directions d'anisotropie du matériau. Celui-ci est supposé homogène et avoir un comportement élastique linéaire avec au plus une symétrie orthotrope. Des plans de faiblesses ayant également un comportement élastique peuvent être introduits. Un code de calcul a été développé sur les bases de cette solution analytique. La Figure 16 montre un exemple d'une sortie dans un cas relativement simple.

Ce programme a été utilisé pour modéliser des essais de fracturation hydraulique en laboratoire sur échantillons cubiques de mylonite. Les distributions de contraintes calculées à la paroi du forage sont cohérentes avec les directions de fracture effectivement créées en laboratoire en dépit des hypothèses posées :

- trous de longueur infinie, échantillons supposés infinis bien que l'arête des cubes soit de 18 cm et le trou ait 9 cm de long ;
- critère de rupture en traction très simple (comparaison directe entre la valeur de contrainte tangentielle et la valeur de la résistance à la traction du matériau).

Moyennant une bonne connaissance du comportement mécanique du matériau et un critère de rupture adapté, cette solution analytique peut servir de base à l'interprétation d'essais de fracturation hydraulique basée sur la pression de fracturation.

4 - CONCLUSION

4.1 - MÉTHODOLOGIE DES TESTS HYDRAULIQUES EN SONDAGE

L'équipement de surface utilisé a fait preuve, en toutes circonstances, de performances et d'une fiabilité remarquable. En ce qui concerne l'équipement de fond, l'adoption du système "sliding-coupling" pour le double-obturateur a permis d'améliorer sa capacité d'étanchement de la chambre d'injection. La prise d'empreinte, si elle donne des résultats d'une précision satisfaisante, est un procédé dont la mise en œuvre nécessite beaucoup de temps. Des améliorations sont à envisager à ce niveau. A cet égard, l'utilisation de systèmes d'imagerie électrique de paroi qui restitue pendant l'injection l'image orientée de la fracture testée semble prometteuse (Mosnier et Cornet, 1989). Plus généralement, les difficultés majeures rencontrées avec l'équipement de mesure sont liées à sa nature "wireline". Pour minimiser le risque de blocage d'une sonde, il est donc indispensable de contrôler au préalable l'état de la paroi du trou.

Concernant la procédure des essais, la détection des fuites de la chambre de test pendant l'injection doit être le souci majeur de l'opérateur. Le suivi du niveau d'eau du sondage et le test de retour d'eau se sont avérés, à cet égard, des moyens de contrôle efficaces et complémentaires.

4.2 - DÉTERMINATION DU CHAMP DE CONTRAINTE

Pour sept des neuf sites où des essais ont pu être réalisés, l'application de la méthode "H.T.P.F." nous a permis de déterminer complètement le tenseur local des contraintes. La méthode a donné des résultats tout à fait satisfaisants dans les forages en massifs cristallins mais ne semble pas pouvoir s'appliquer à grande échelle dans les séries sédimentaires constituées de matériaux hétérogènes (Aix-en-Provence).

Pour quatre sites, les mesures ont été interprétées simultanément par la méthode "H.T.P.F." et la méthode "classique" de la fracturation hydraulique.

Les résultats sont comparables en ce qui concerne le module de la contrainte horizontale mineure (σ_h) et l'orientation de la contrainte horizontale majeure σ_H . En revanche, des écarts significatifs sont observés entre modules de σ_H résultant de l'une et l'autre méthode. Le phénomène a été attribué à l'insuffisance du débit mis en jeu lors des tests de réouverture à grand débit.

4.3 - ETAT DE CONTRAINTE DANS LA CROÛTE SUPERFICIELLE

Les mesures réalisées à Chassoles et Salau mettent en évidence une influence notable de la topographie sur le champ de contrainte *in-situ*.

Le régime des contraintes déterminé à plus de 750 m de profondeur (Chassoles, Aix-en-Provence) est cohérent avec des solutions de mécanismes au foyer localisées à proximité des sites expérimentaux.

La confrontation de tous les résultats obtenus avec d'autres issues de mesures *in-situ* suggère l'existence d'un vaste domaine (Nord du Massif central et Bassin Parisien) au sein

duquel la direction de σ_H est uniforme. En revanche, le régime des contraintes varie dans ce même domaine (fig. 17).

4.4 - DISTRIBUTION DES CONTRAINTES AUTOUR D'UN FORAGE DANS UN MILIEU ANISOTROPE

Le code de calcul établi à partir des solutions analytiques de Amadei (1982) est un élément important pour une interprétation des essais de fracturation hydraulique basée sur la pression de fracturation. Les essais de fracturation en laboratoire réinterprétés à l'aide de ce calcul laissent envisager de nouvelles possibilités pour l'interprétation des essais en forage moyennant l'application d'un critère de rupture réaliste.

RÉFÉRENCES

- AMADEI B. (1983) - Rock anisotropy and the theory of stress measurements. Berlin: Springer-Verlag ; XVII - 477 p. (Lecture Notes in Engineering. 2 ; Ph. D. Thesis University of California, Berkeley, USA).
- AVASTHI J.M. (1981) - Hydrofracturing in inhomogeneous, anisotropic and fractured rocks. Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, USA, 234 p.
- BASTIDE S. (1984) - Fracturation hydraulique de roches chaudes sèches et anisotropes. Montpellier, U.S.T.L., 148 p. (thèse 3ème cycle Génie civil, INSA, Toulouse).
- CORNET F.H. et VALETTE B. (1984) - *In-situ* stress determination from injection test data. J. Geophys. res., 89, nb B13, pp. 11 527-11 537.
- CORNET F.H. et BURLET D. (1990) - Regional stress field determinations in France by hydraulic tests in boreholes. J. Geophys. res., à paraître.
- DANESHY A.A. (1973) - A study of inclined hydraulic fractures. Soc. Pet. Eng. J., 13, pp. 61-68.
- GODEFROY P. (1980) - Apport des mécanismes au foyer à l'étude sismotectonique de la France : un exemple de distribution des contraintes en domaine intra-plaque. Rapport BRGM n° 80 SGN 032 GEG.
- HAIMSON B.C. (1968) - Hydraulic fracturing in porous and non porous rock and its potential for determining in-situ stress at great depth. Tech. rep. 4-68, U.S. Corps of Engineers, Omaha pub.
- LEKNITSKII S.G. (1963) - Theory of elasticity of an anisotropic elastic body. San Francisco, Holden Day, Inc.
- MOSNIER J. et CORNET F.H. (1989) - Apparatus to provide an image of the wall of a borehole during a hydraulic fracturing experiment. Proc. of the 4th Eur. geoth. Update, Florence. Klumer Academic, Publ. Dordrecht (Holland).
- RUMMEL F., BAUMGARTNER J. et ALHEID H.J. (1983) - Hydraulic fracturing stress measurements along the eastern boundary of the S-W german block. Proc. of Workshop on Hydraulic Fracturing and Stress Measurements. U.S. National Committee for Rock Mechanics, National Academy Press, pp. 3-17.
- RUMMEL F. et BAUMGARTNER J. (1989) - Hydraulic fracturing stress measurements in the GPK1 borehole, Soultz-sous-Forêts. Report EC-Contract n° EN3G-0055-D(B), Suppl. n° 2.
- SARDELLA E. (1984) - Contribution à l'étude de l'influence de l'anisotropie de texture et de contrainte sur l'initiation de fractures hydrauliques dans les roches. DESS, Université Pierre et Marie Curie, rapport interne BRGM, 84 SGN 374 GEG-IRG.
- SAVAGES W.Z., SWOLFS H.S. et POWERS P.S. (1985) - Gravitational stresses in long symmetric ridges and valleys. Int. J. Rock mech. Min. Sc. & Geomech. abs., 22, n° 5, pp. 291-302.

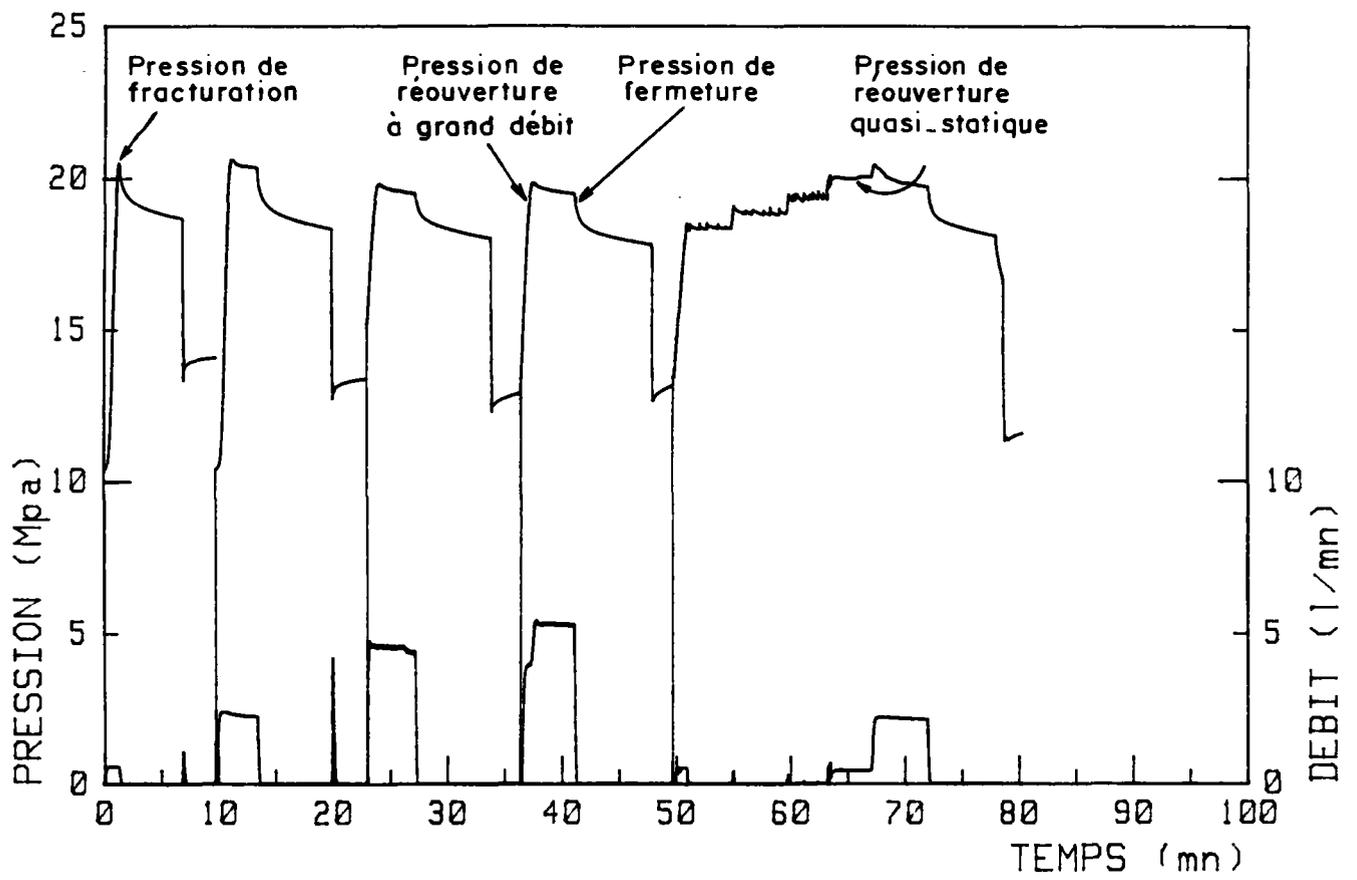
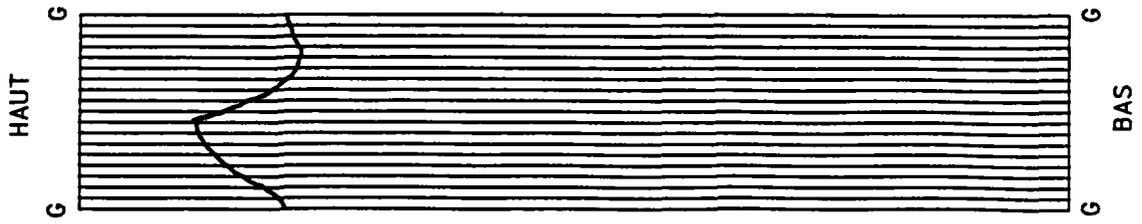


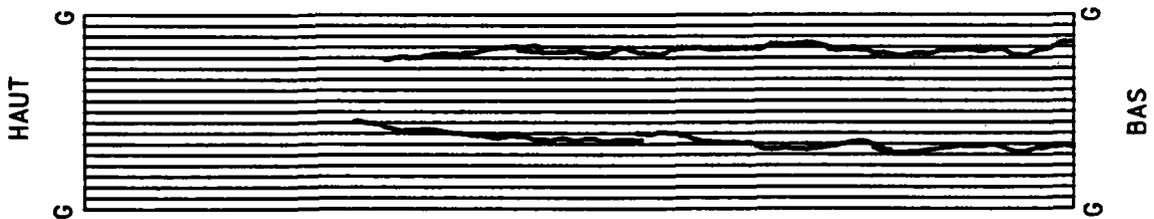
Figure 1 - Enregistrement d'un test hydraulique.



Fracture naturelle inclinée



Fracture hydraulique "interrompue"
par une fracture naturelle inclinée



Fracture hydraulique
(test d'une passe vierge du forage)

Figure 2 - Exemples d'empreintes de passes de sondage testées.

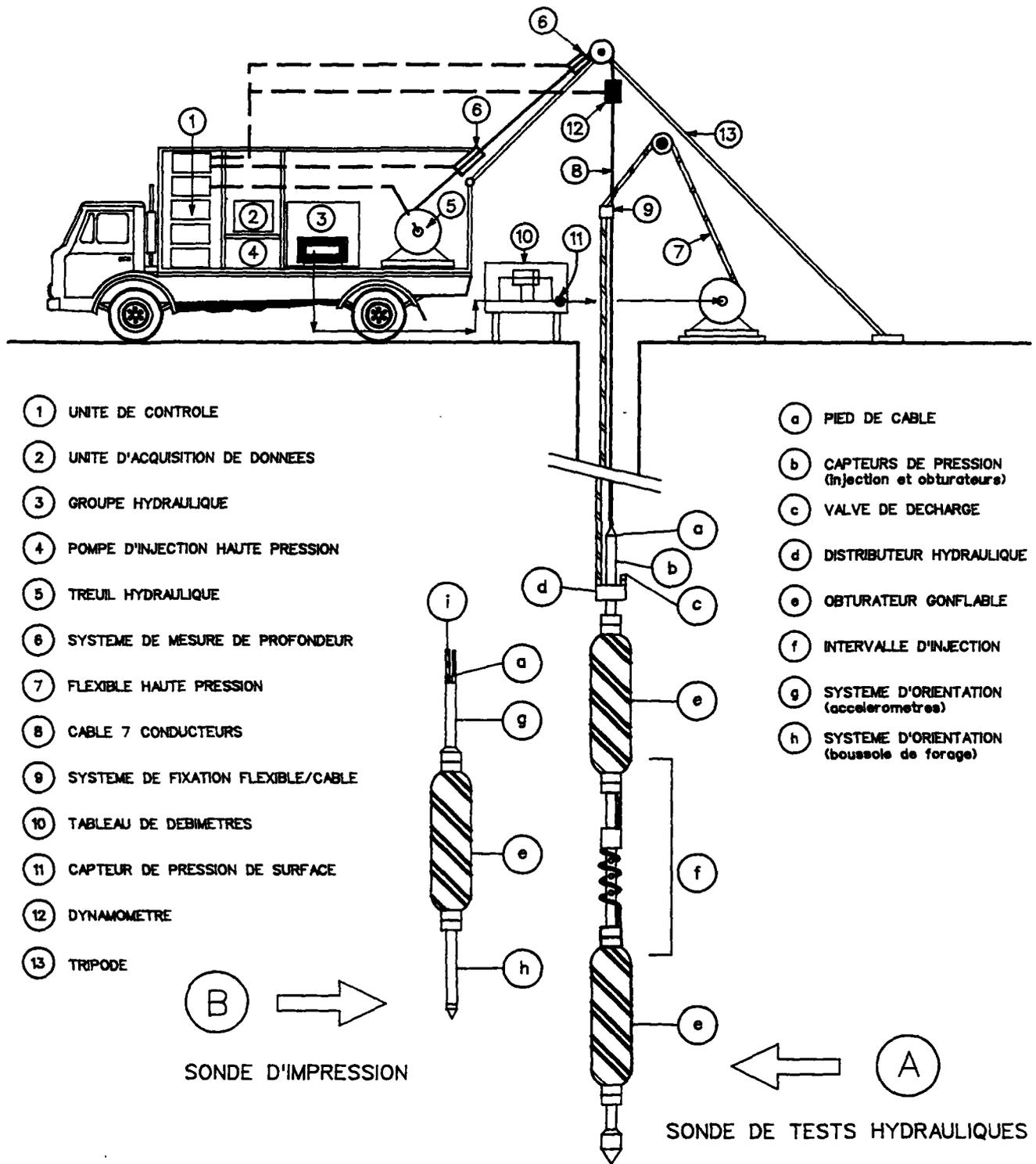
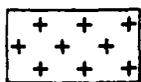
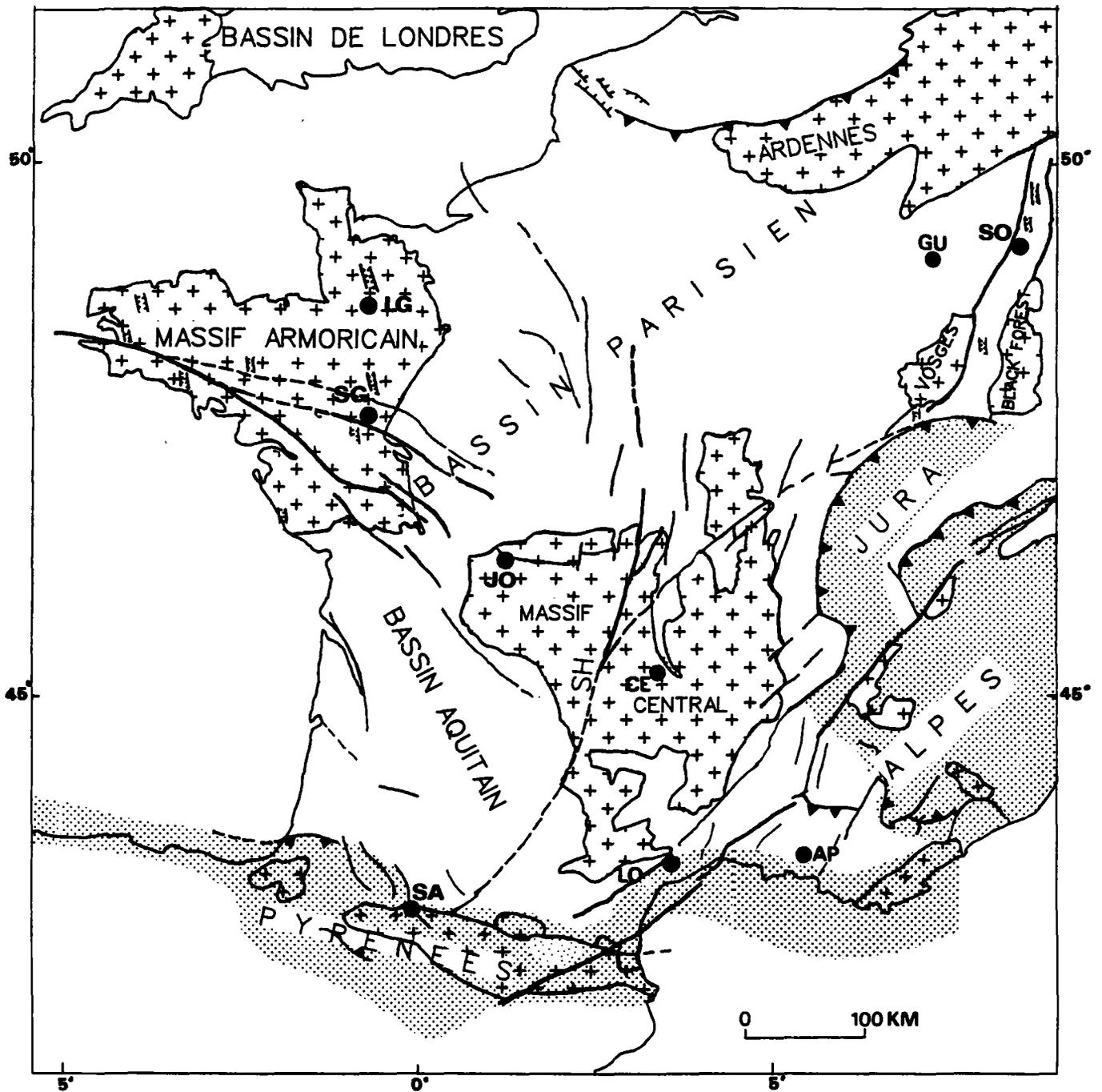


Figure 3 - Schéma du dispositif de mesure de contraintes *in-situ*.



Affleurement du socle



Failles actives



Graben actif



Zones d'orogenese alpine



Chevauchement



Localisation des sites de mesure

(CE-Chassoles, SA-Salau, AP-Aix, LG-Le Grès
 GU-Guerting, SO-Soultz, SG-St Sigismond,
 LO-Merfons, JO-Jouac)

Figure 4- Principales unités géologiques en France et localisation des sites expérimentaux.

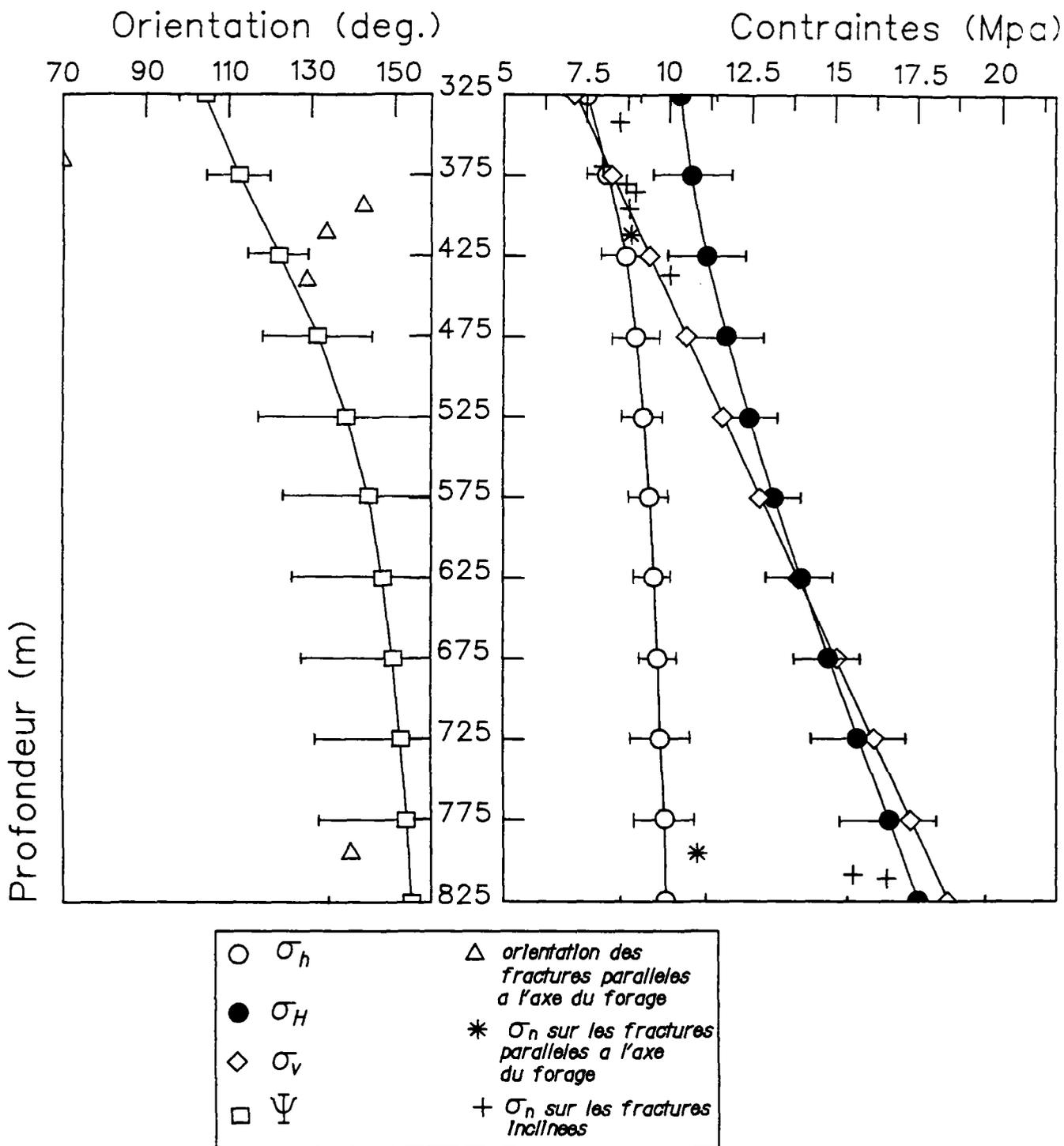


Figure 5- Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur à Chassoles (méthode H.T.P.F.).

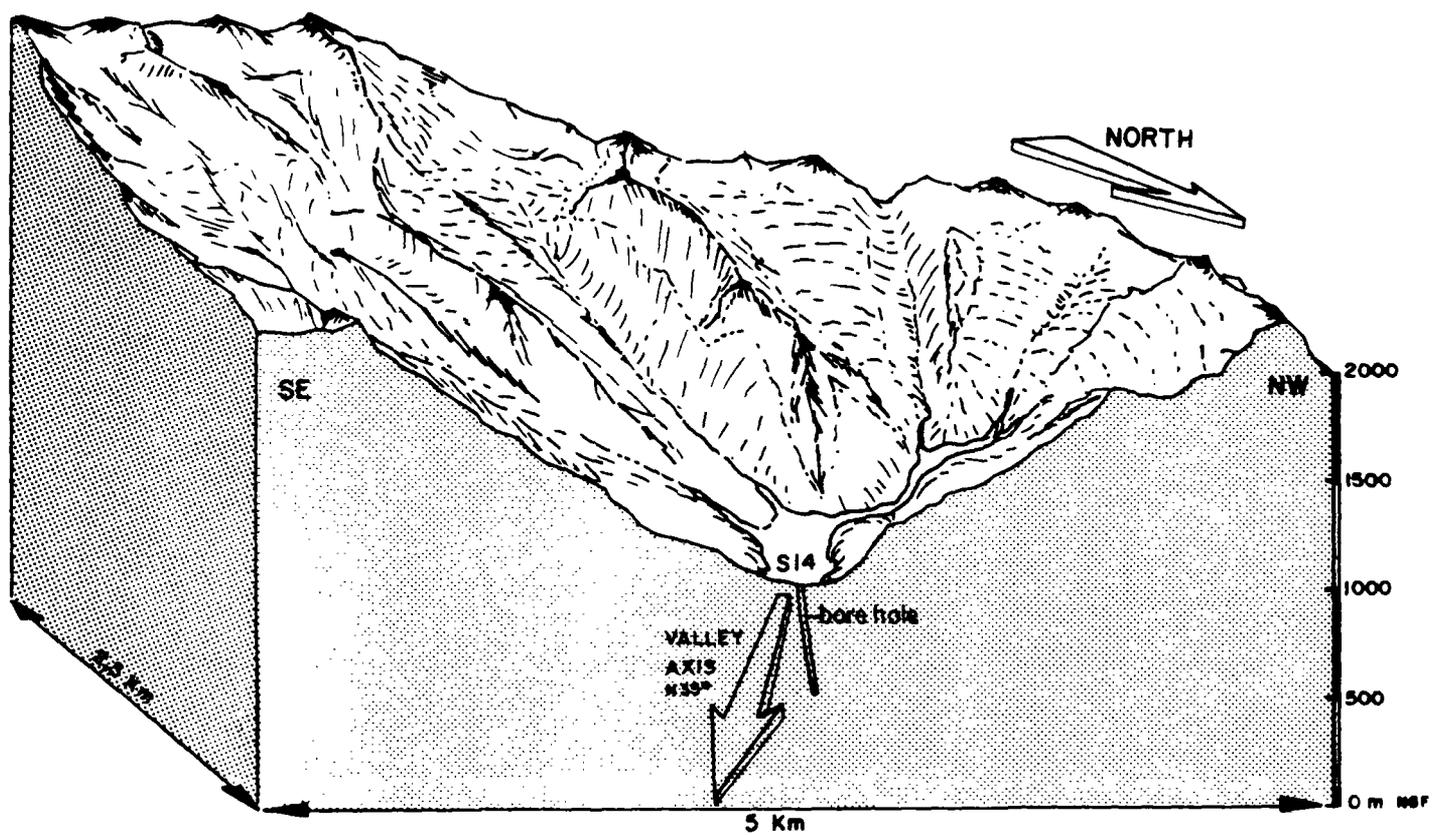


Figure 6 - Représentation schématique du site de Salau.

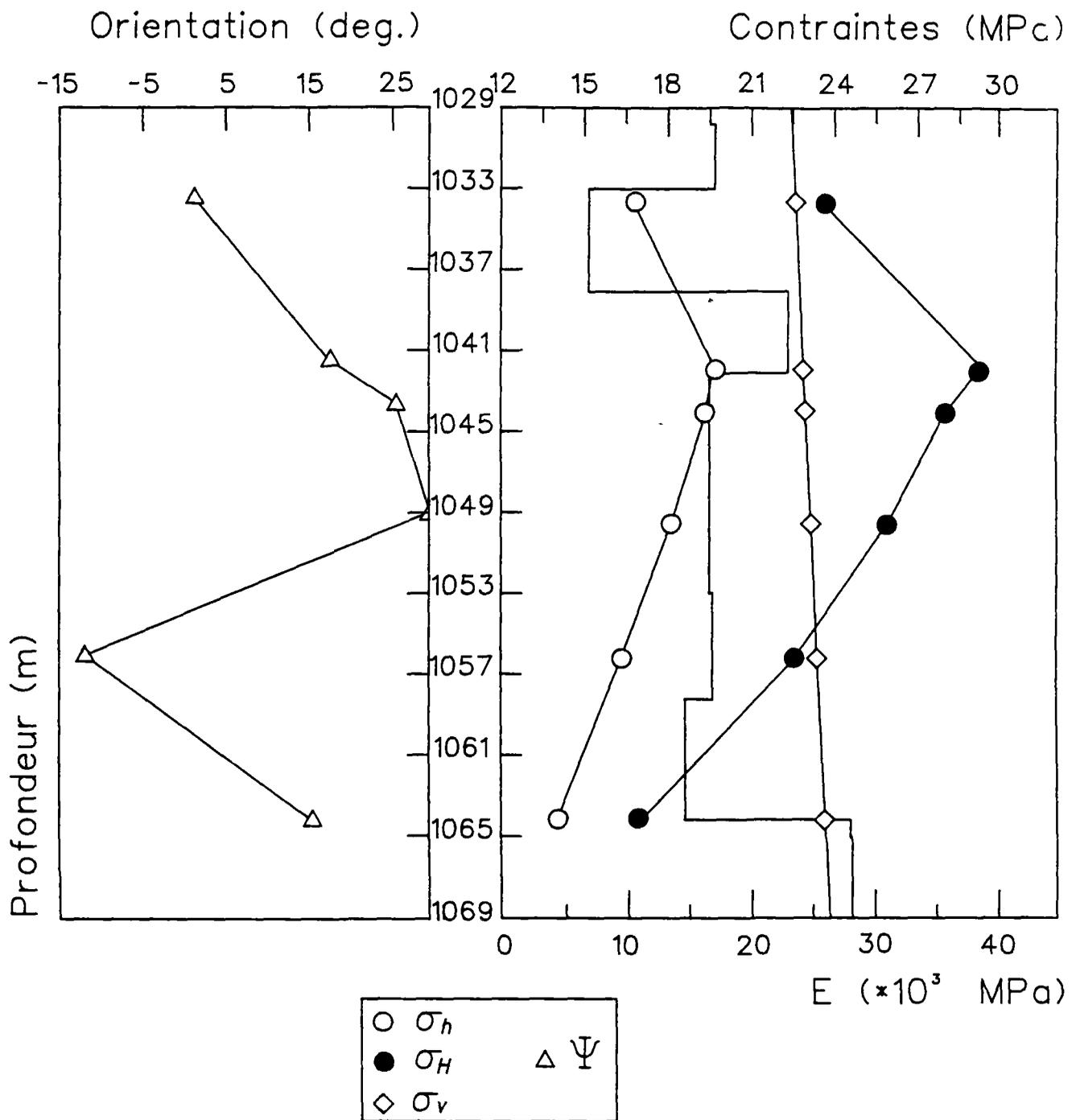


Figure 7 - Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur à Aix-en-Provence résultant de l'application de la théorie "classique" de la fracturation hydraulique.

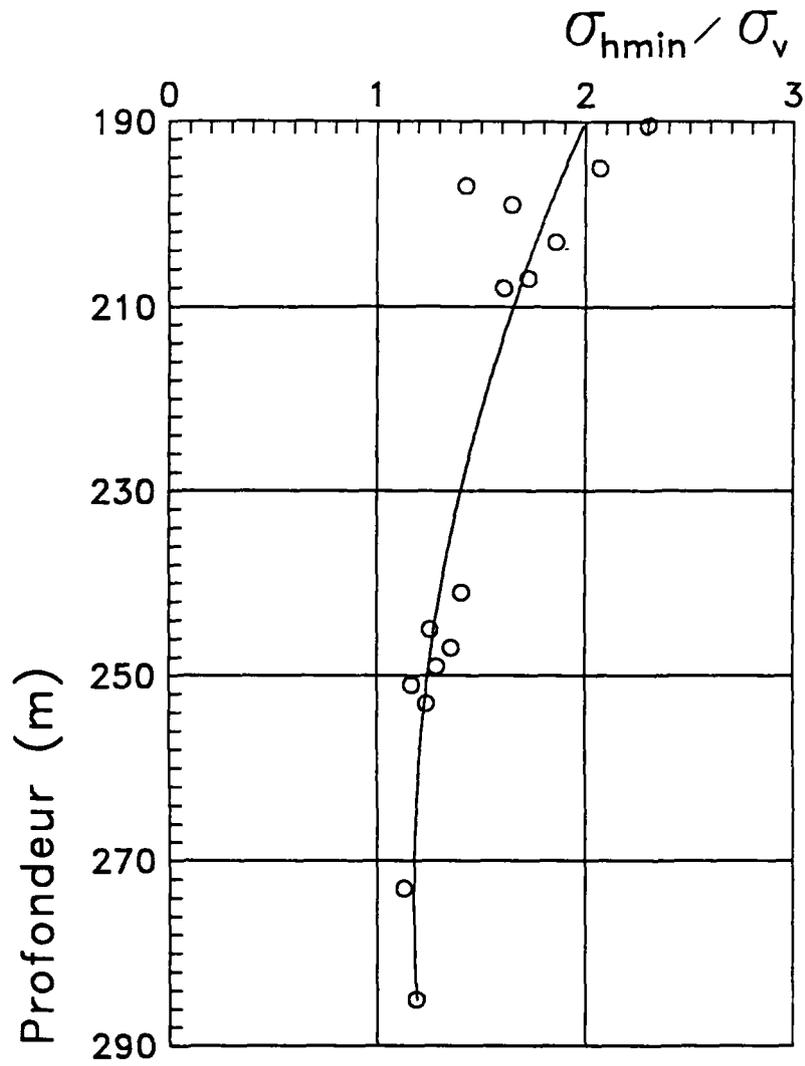


Figure 8 - Variations du rapport $\sigma_{h_{min}} / \sigma_v$ en fonction de la profondeur au Grais.

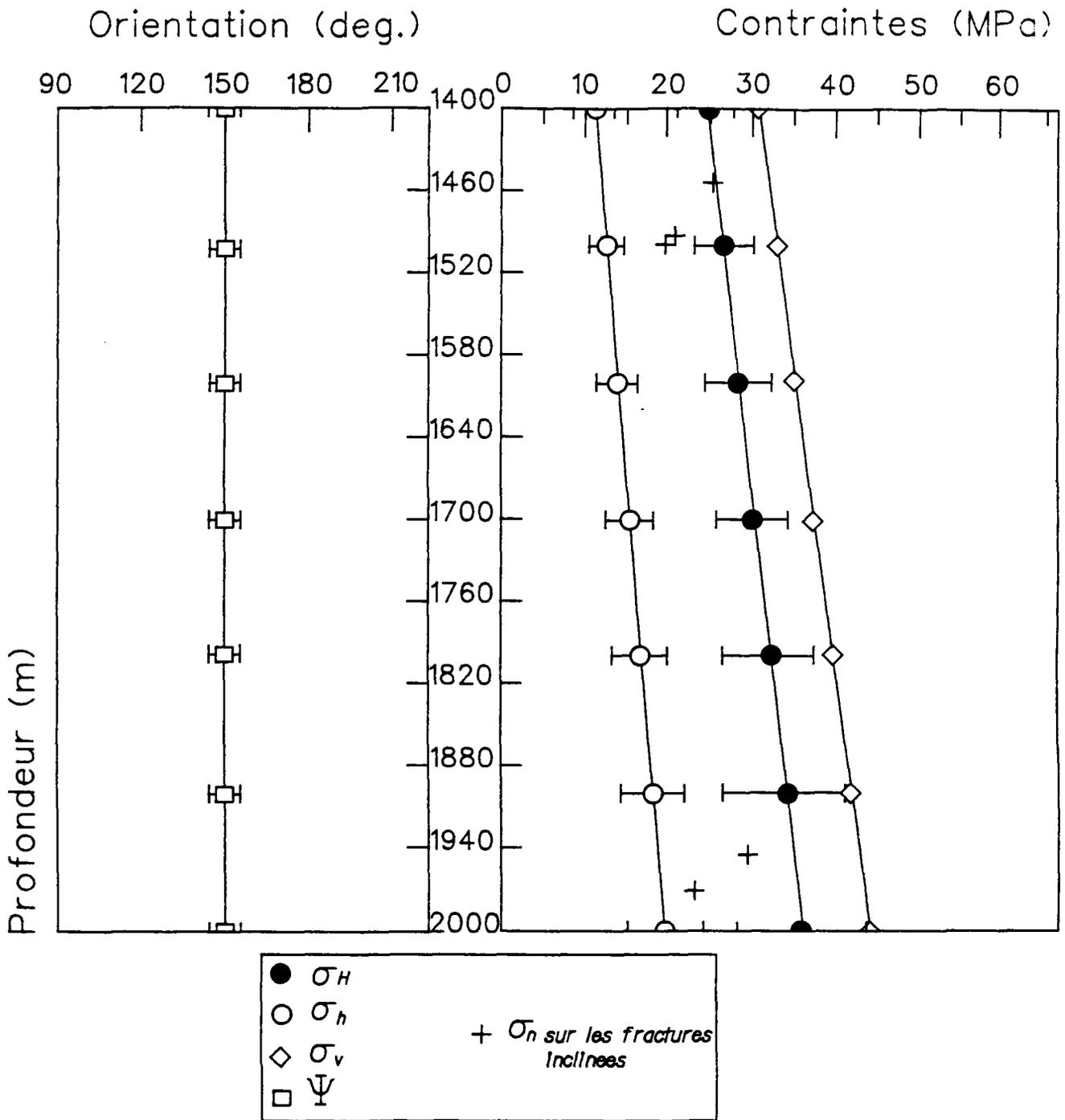


Figure 9 - Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur à Soutz (méthode H.T.P.F.)

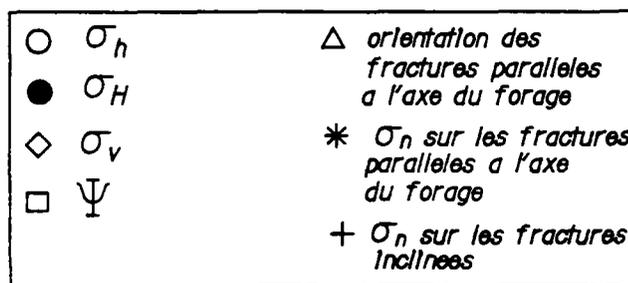
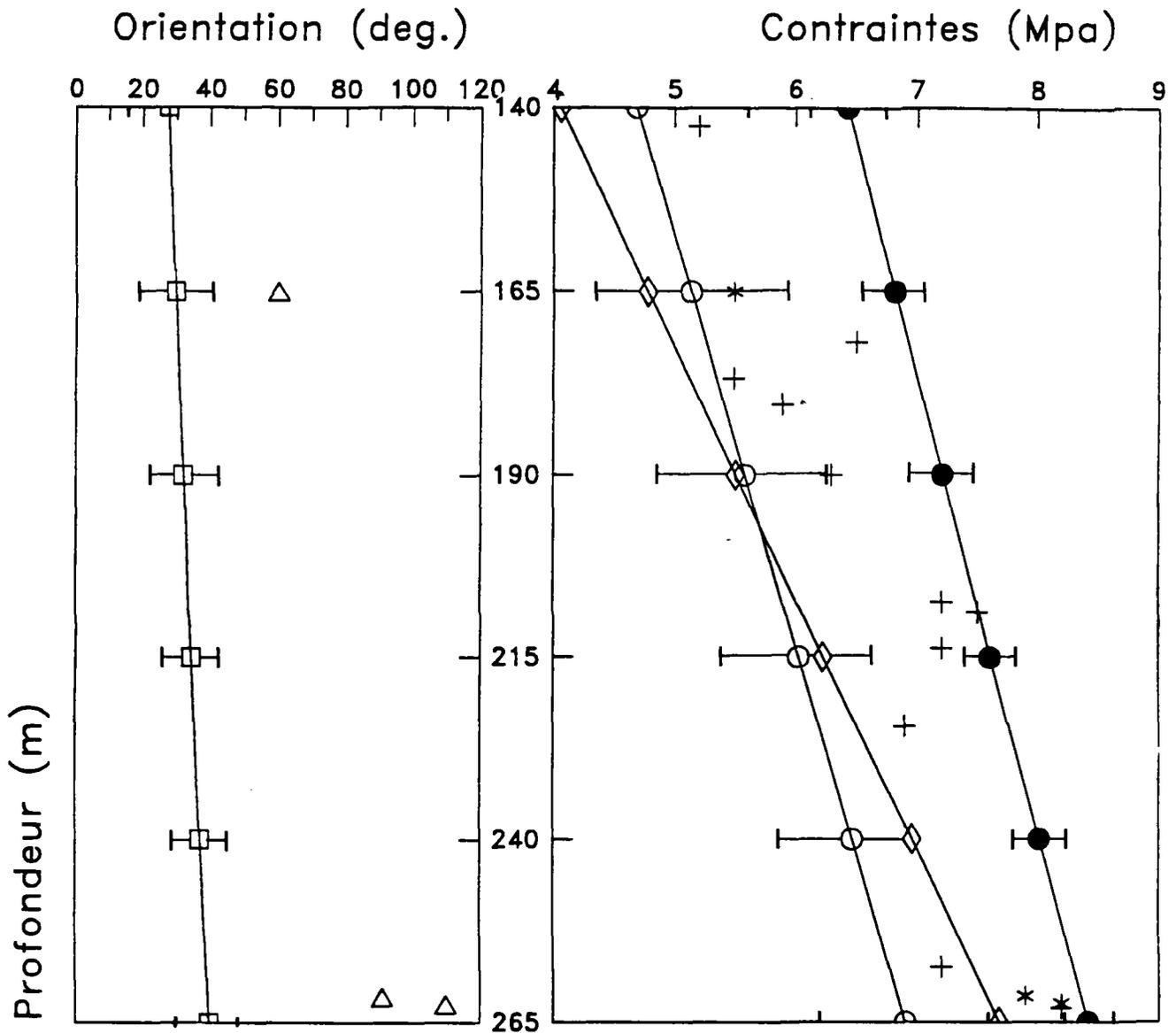


Figure 10 - Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur à Saint-Sigismond (méthode H.T.P.F.)

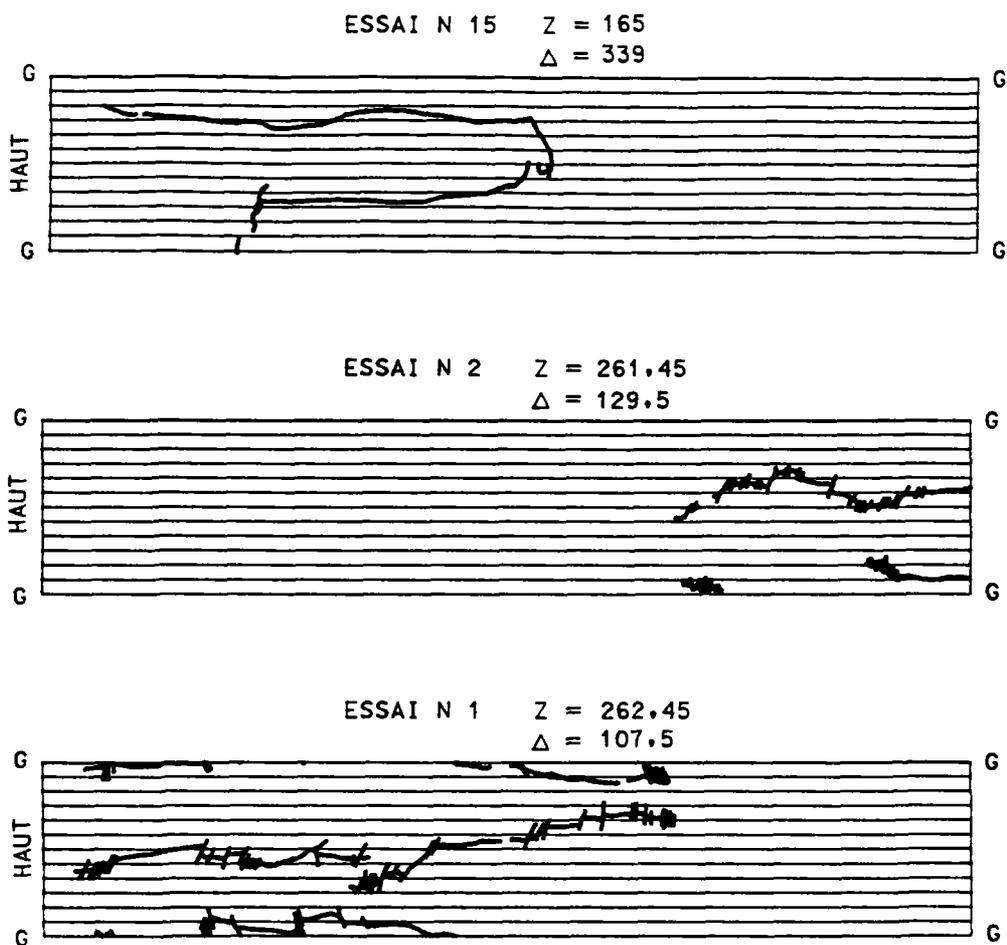


Figure 11 - Traces des fractures hydrauliques obtenues à Saint-Sigismond

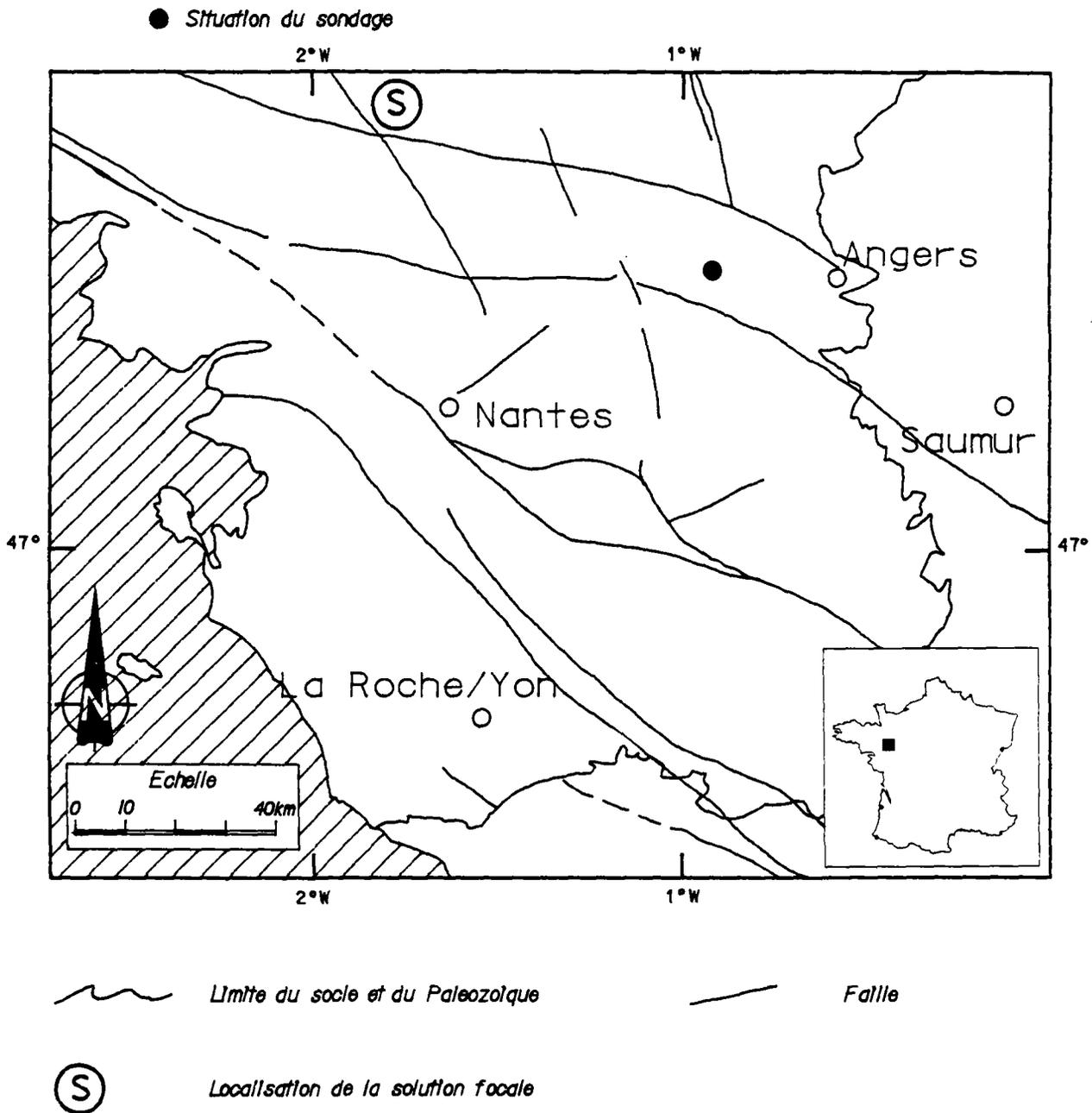


Figure 12 - Schéma structural de la région de Saint-Sigismond et localisation de la solution focale associée à la faille de Guer (Godefroy, 1980).

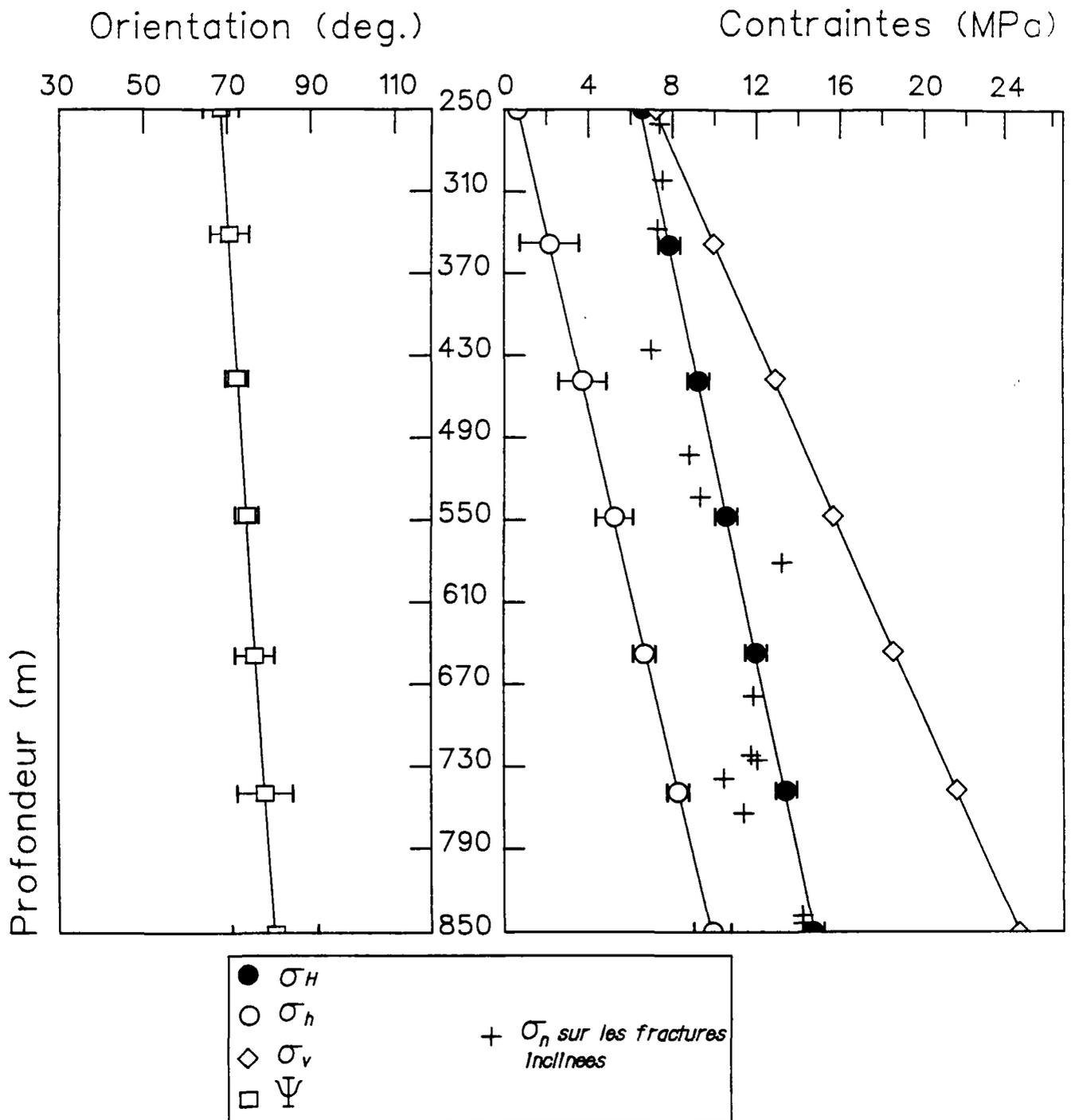


Figure 13- Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur à Méridons (méthode H.T.P.F.).

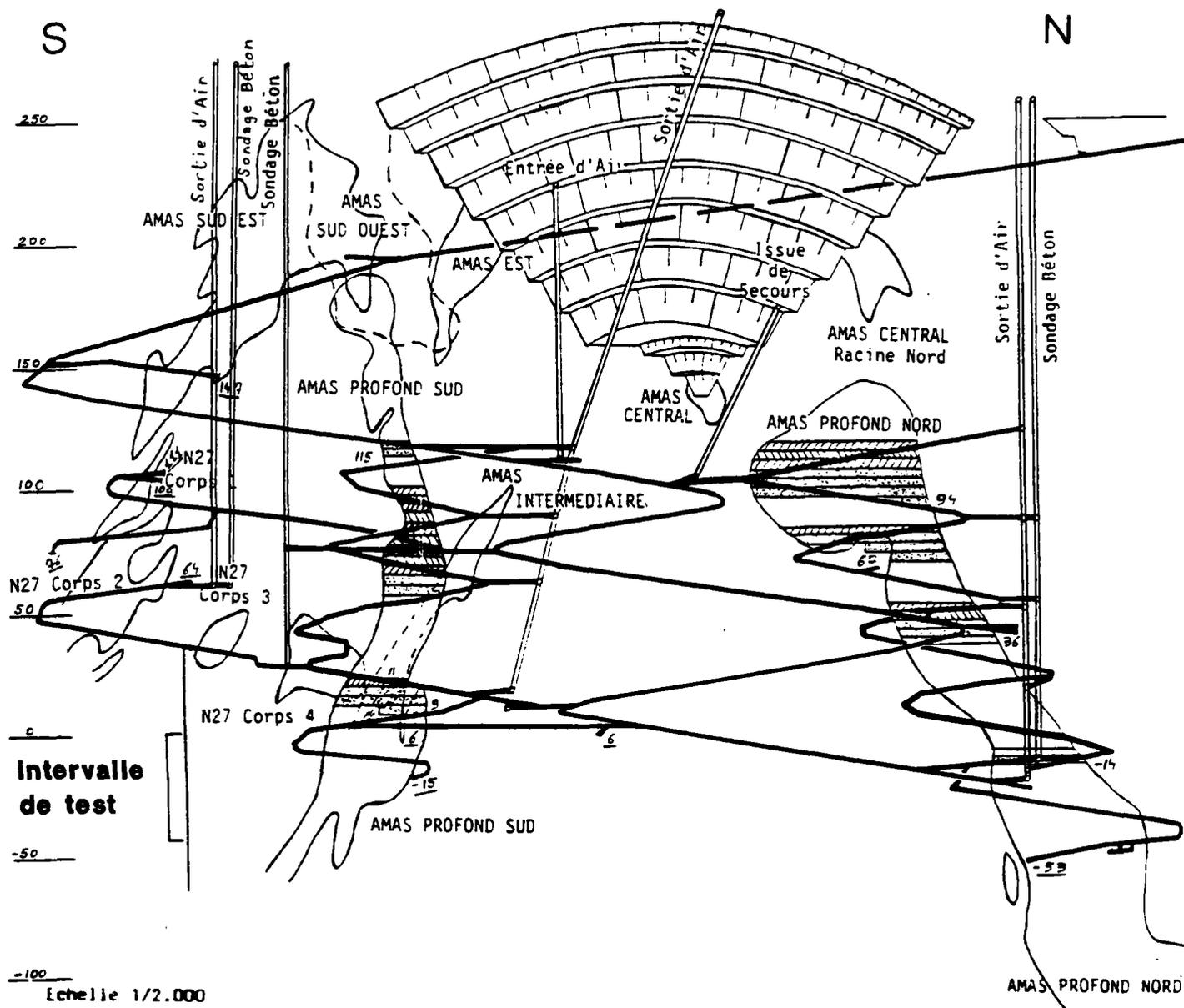


Figure 14 - Coupe N-S de la mine du Bernardan et localisation du sondage testé.

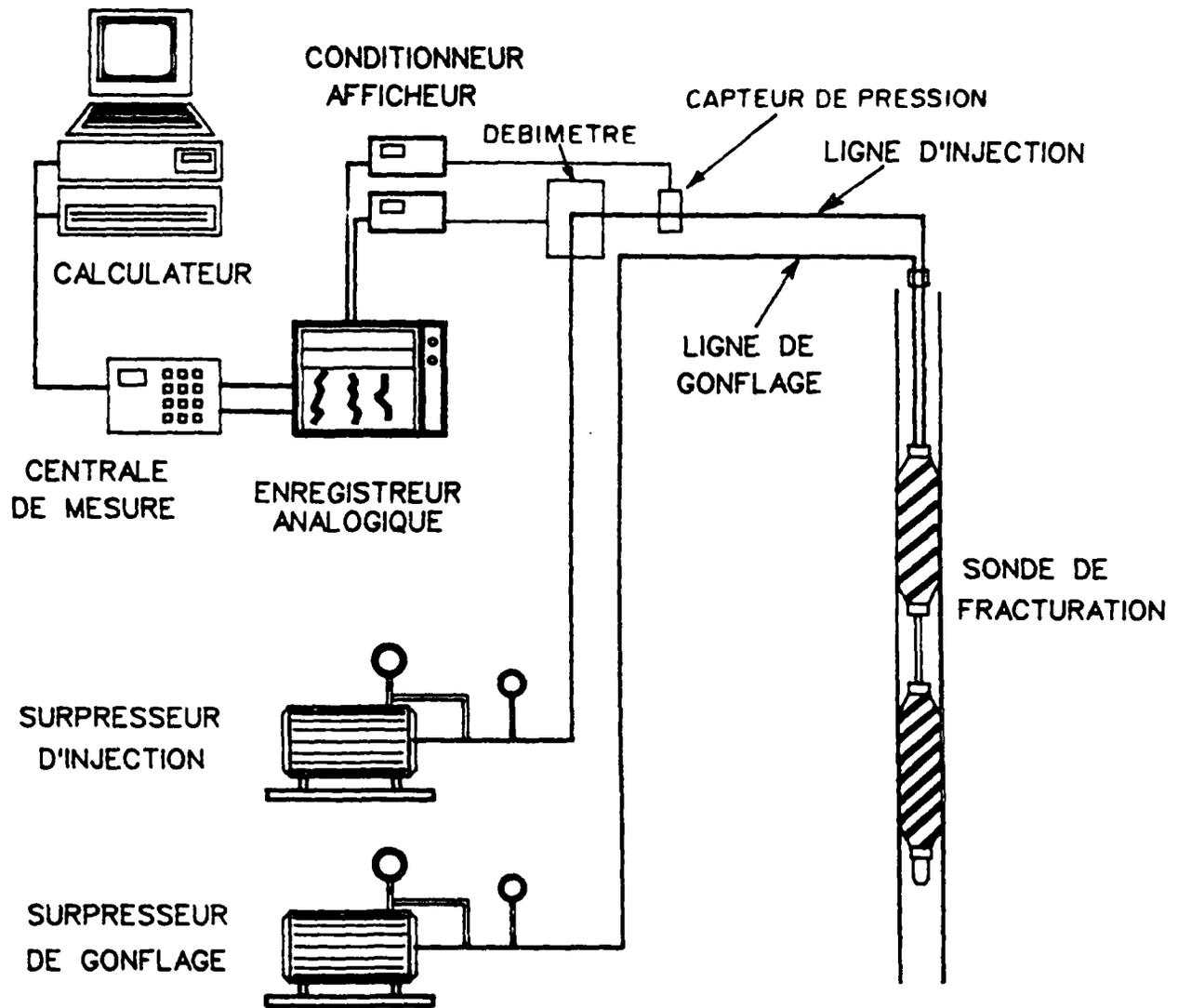
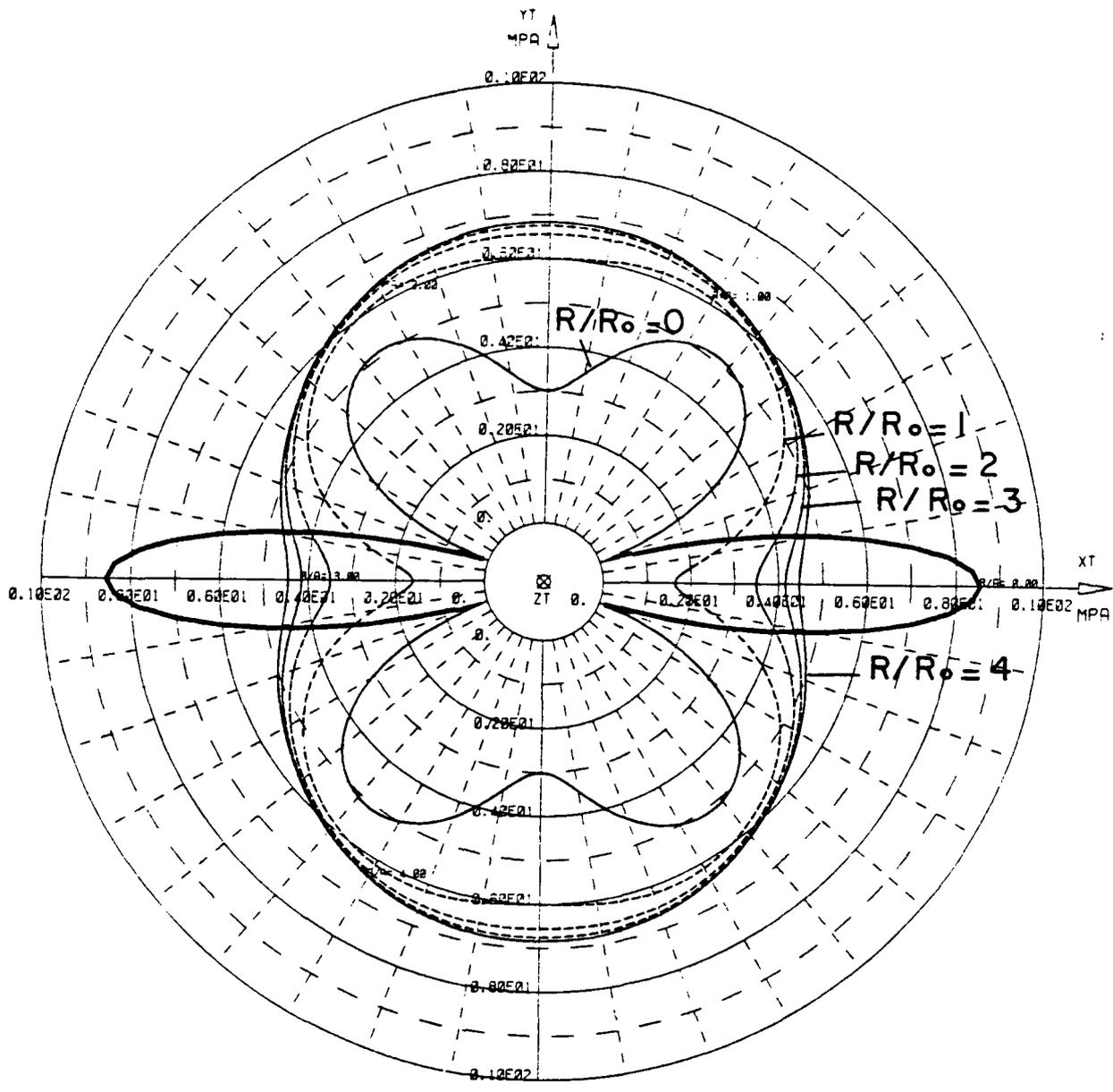
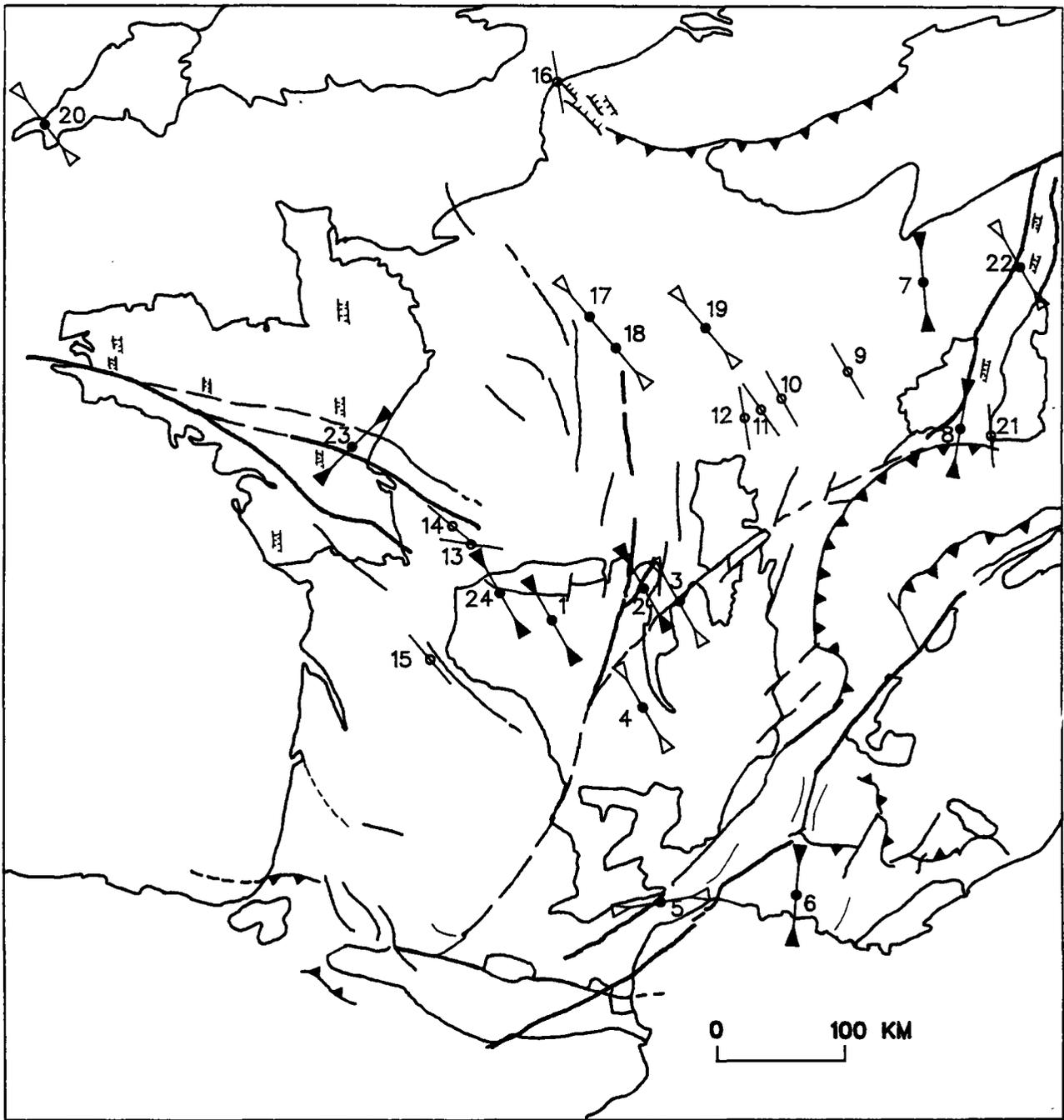


Figure 15 - Schéma du dispositif de mesures de contraintes *in-situ* en galerie.



— Compression
 - - - Tension

Figure 16 - Distribution des contraintes autour d'un forage dans un milieu anisotrope.



Chevauchement 
 Failles actives 
 Graben actif 

Orientation de σ_H déterminée à partir de mesures superficielles (ver/in plat et surcarottage) 
 Orientation de σ_H déterminée à partir de mesures >750m (regime distensif) 
 Orientation de σ_H déterminée à partir de mesures >750m (regime décrochant) 

Résultats obtenus dans le cadre du programme CCE-AFME: 4-Chassoles, 5-Merlfons, 6-Aix-en-Provence, 7-Guertling, 22-Soultz, 23-St-Sigismond, 24-Jouac

Figure 17 - Confrontation des résultats de mesures de contrainte *in-situ* réalisées en France.