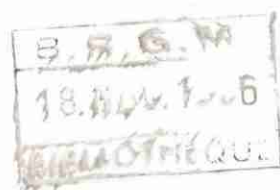


JR



la fracturation des roches dures et la prospection hydrogéologique





la fracturation des roches dures et la prospection hydrogéologique

rapport de stage de 3^e année
de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy
avril-mai 1986

S. Ronteix

août 1986
86 SGN 447 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

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

RESUME

Cette étude comprend une synthèse et une analyse des phénomènes induisant la fracturation. On y souligne le caractère d'ouverture ou de fermeture des fractures qui en résultent, afin de rechercher des critères favorables ou défavorables à la prospection hydrogéologique en milieu fissuré.

Dans cette optique, il est réalisé une présentation de la photographie aérienne comme outil de recherche de la fracturation et de son caractère. Une telle méthodologie trouve un intérêt pratique montré à travers quelques exemples.



AVANT-PROPOS

La recherche de forts débits dans les aquifères de socle (petite irrigation, AEP de petits centres) implique une revalorisation de la prospection. La réussite des projets suppose que cette prospection soit plus performante, plus scientifique, et conduit à admettre qu'elle doit être dotée de moyens importants, aussi bien en temps qu'en techniques et en compétence : il faut apprendre à reconnaître la structure d'un bâti fracturé et analyser plus attentivement le cycle souterrain de l'eau.

Cette structure est la marque sur le massif, des contraintes qui ont joué depuis sa mise en place, contraintes tectoniques pour la plupart, auxquelles se superposent des effets de surface pour ce qu'il nous est permis d'observer à faible profondeur. Mais c'est aussi le reflet de la nature préexistante du massif, en fonction de laquelle les manifestations d'un même champ de contraintes peuvent donner naissance à des réseaux de cassures très différents par leur densité, leurs interconnections et leur altération, autrement dit le degré de pénétration du massif rocheux duquel dérive la perméabilité hydraulique.

Définitions d'ordre général sur la fracturation, sur le jeu des causes externes et de l'altération sont l'objet du présent travail.

SOMMAIRE

	Page
1 - INTRODUCTION	1
1.1 - Définition du milieu fracturé	1
1.2 - La recherche d'eau en milieu fracturé	1
1.3 - Enjeu de la recherche d'eau en milieu fracturé	3
2 - LES MODES DE FRACTURATION	4
2.1 - Fractures d'origine tectonique	4
2.1.1 - Fractures de 1er ordre	4
2.1.2 - Fractures de 2ème ordre (s.l.)	9
2.1.3 - Fractures liées à la mise en place de plis	15
2.2 - Fractures non directement liées à la tectonique	17
2.2.1 - Fractures liées à la mise en place de diapirisme	17
2.2.2 - Fractures liées à la rétraction	17
2.3 - Fractures liées aux effets de surface	21
2.3.1 - Effet de relief	21
2.3.2 - Décompression superficielle	21
3 - INFLUENCE DE LA NATURE PREEXISTANTE DU MASSIF	25
3.1 - Influence de la pétrographie des roches	25
3.2 - Influence de la fracturation préexistante	26
4 - DEVENIR DE LA FRACTURATION	31
4.1 - Processus d'altération	31
4.1.1 - Altération chimique	31
4.1.2 - Altération mécanique	31
4.2 - Effets de l'altération	37
5 - UTILISATION DE LA PHOTOGRAPHIE AERIENE DANS LE CHOIX DES SITES DE FORAGES	39
5.1 - Problèmes liés à la détermination du caractère de la fracturation	39
5.2 - Interprétation des cartes de fracturation	39
5.2.1 - Longueur de la fracture	43
5.2.2 - Direction des fractures	43
5.2.3 - Noeud de fractures	43
5.2.4 - Analyse du réseau hydrographique	45

	Page
6 - ESSAI D'APPLICATION PRATIQUE	53
6.1 - Exemple du Togo, 5ème campagne d'hydraulique villageoise financée par le fonds européen de développement	53
6.1.1 - Proximité forage-village	53
6.1.2 - Zones favorables et zones défavorables	53
6.2 - Exemple d'utilisation du réseau hydrographique : région Cotonnière - Côte d'Ivoire	57
6.2.1 - Description des principaux types de réseaux hydrographiques	57
6.2.2 - Relation entre épaisseur altérée et structure du réseau	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61

Liste des figures

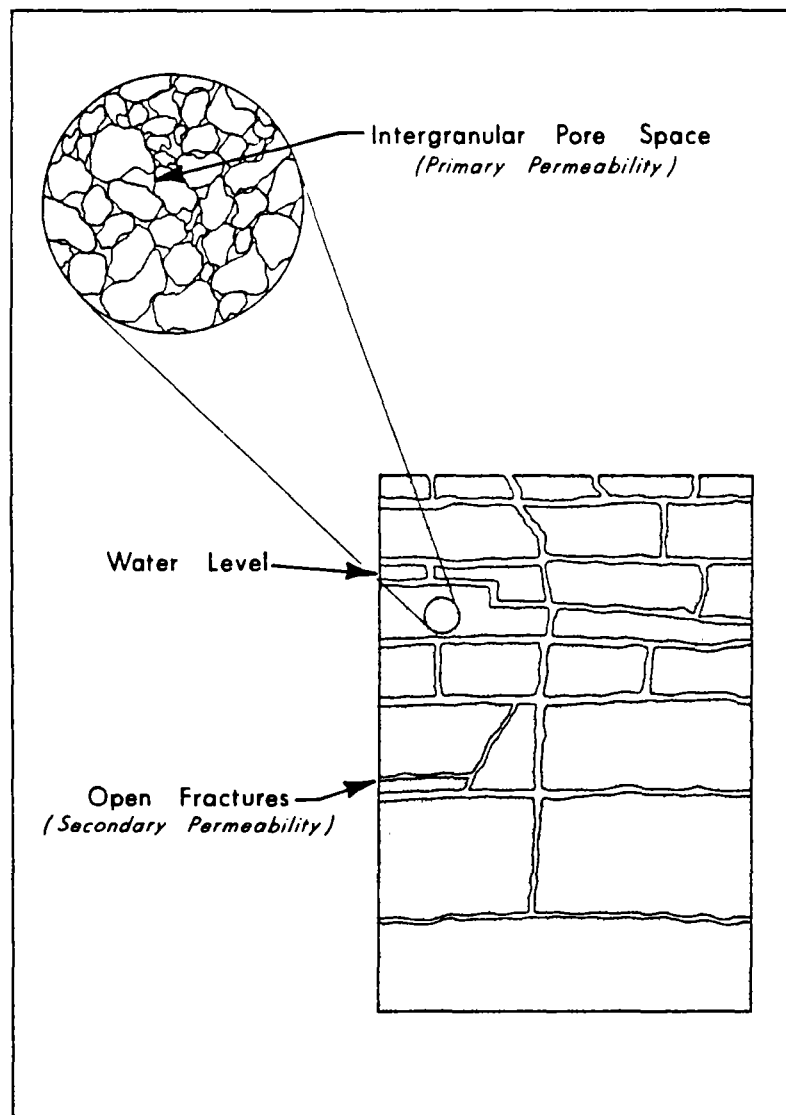
Figure 1 - Perméabilité primaire et secondaire (Wyrick et Borchers, 1981)	
Figure 2 - Gisements d'eau	2
Figure 3 - Zones de socle rocheux (grisé) et grands bassins sédimentaires (blanc)	2
Figure 4 - Distribution schématique des contraintes dans les terrains lors d'une phase compressive	4
Figure 5 - Les différents types de failles (In Blès-Feuga, 1981)	5
Figure 6 - Illustration schématique de la relation entre les amplitudes des principales contraintes et la capacité aquifère des différentes fractures (extrait de : Carlsson et Olsson, 1980)	6
Figure 7 - Distribution schématique des contraintes dans les terrains lors d'une phase distensive (In : Feuga, 1983)	6
Figure 8 - Fracturation d'un éprouvette lors d'un essai brésilien (In : Blès-Feuga, 1981)	8
Figure 9 - Relations théoriques entre les différentes fractures en échelon d'une zone de cisaillement	8
Figure 10 - Lentilles de cisaillement et rotation de blocs	10
Figure 11 - Schématisation des phénomènes de dilatance-contractance lors du cisaillement d'une discontinuité rocheuse (In : Feuga, 1983)	10
Figure 12 - a = faille normale ; b = faille inverse ; c = faille de décrochement senestre (d'après Blès et Feuga, 1981)	11

	Pages
Figure 13 - Fracturation conjuguée aux principaux systèmes de fracturation (d'après Blès-Feuga , 1981)	12
Figure 14 - Relations entre les grandes failles et les zones de densité des fractures d'échelle intermédiaire (décamétriques à hectométriques) dans le granite de Bassies (d'après Blès et al. , 1982, modifié)	13
Figure 15 - Distribution des fractures associées de cisaillements de quatre ordres successifs à partir d'un décrochement N-S dextre considéré de 1er ordre (M.R. 1973).	13
Figure 16 - Réorganisation des contraintes autour d'une grande faille (a) et failles de deuxième ordre (b) (In : E.M. Anderson , 1951 et J.G. Ramsay , 1967, modifié)	14
Figure 17 - Les structures développées dans une zone de cisaillement - Modèle de Riedel (1929)	15
Figure 18 - Les différents types de plis (d'après Mattauer , 1980)	16
Figure 19 - Réseau de failles normales conjuguées situé au sommet d'un diapir. Noter que les failles à pendages nord sont postérieures aux failles à pendages sud. In : Behrman (1949)	16
Figure 20 - Schéma expliquant l'ouverture des fractures lors d'une montée diapirique	18
Figure 21 - Les joints primaires du granite	19
Figure 22 - Mégaprismes et courants de convection dans le magma (Engalenc , 1978)	20
Figure 23 - Rétraction vers le centre de la maille. (Les flèches simulent les forces de tension). (Engalenc , 1978) Eclatement en étoile à 3 branches, 3 branches en milieu isotrope (Engalenc , 1978)	20
Figure 24 - Schéma des figures polygonales observées au Nord-Est du Togo, dans les gneiss de Lama-Kara (d'après 83 SGN 001 GEO)	22
Figure 25 - Influence du relief sur l'ouverture et la fermeture des fractures	23
Figure 26 - Mécanisme d'apparition de fractures de décompression dues à l'érosion	23
Figure 27 - Influence des variations de nature des terrains sur le pendage des failles (d'après Mattauer , 1980)	25
Figure 28 - Cas complexe de fracturation (d'après F. Arthaud et M. Mattauer , 1969, modifié Blès-Feuga , 1981)	26

	Pages
Figure 29 - Comportement de deux familles de discontinuités verticales sous l'effet d'un raccourcissement horizontal d'orientation variable (d'après F. Arthaud et P. Choukroune , 1972)	27
Figure 30 - Comportement en compression d'une fracture dans le granite de Guéret, carrière de Maupuy (Creuse) (d'après Billaux et al., 1984)	28
Figure 31 -	29
Figure 32 - Evolution de la perméabilité en fonction du développement des zones de cisaillement (d'après Larsson , 1972, modifié)	32
Figure 33 - Interprétation de l'aquifère au niveau du talweg selon le principe de l'aquifère bi-couche à nappe libre (altérites) et nappe semi-captive (zone fissurée)	34
Figure 34 - Morphologie du substratum, zone fissurée et arène grenue (<u>In</u> : Engalenc , 1978)	36
Figure 35 - Zones préférentielles de l'altération (d'après Engalenc , 1978)	38
Figure 36 - Différents aspects du linéament sur l'image (d'après Sawadogo , 1982)	40
Figure 37 - Exemple de carte de fracturation obtenue par photographie aérienne	41
Figure 38 - Ensemble des forages de la région des savanes. Directions des linéaments sur lesquelles sont implantés les forages (d'après BRGM 85 TGO 004 EAU (Campagne 5ème FED))	42
Figure 39 - Positionnement des forages (d'après Engalenc , 1978)	44
Figure 40 - Morphologie d'un marigot en fonction du type de fracturation (d'après Engalenc , 1975)	46
Figure 41 - Type de géométrie de base du réseau hydrographique (d'après Howard , 1967)	48
Figure 42 - Type de modification de base du drainage (d'après Howard , 1967)	49
Figure 43 - Type de modification du drainage (d'après Howard , 1967)	50
Figure 44 - Exemples d'anomalies de drainage (d'après Howard , 1967)	51
Figure 45 - Positionnement des forages (Bérard , 1977) (e = 1/25 000)	52
Figure 46 - Schéma d'une carte de fracturation au voisinage d'un village. Schéma de positionnement des forages	54
Figure 47 - Exemple d'une coupe de forage	55
Figure 48 - Description des principaux types de réseaux hydrographiques	56

Liste des tableaux

	Pages
Tableau 1 - Essai de synthèse des mécanismes d'ouvertures et de fermetures des fractures en fonction de leur orientation	24
Tableau 2 - Essai de synthèse sur les facteurs influençant l'ouverture ou la fermeture des fractures par les processus d'altération	37
Tableau 3 - Débit des forages en fonction de la longueur des fractures (exprimés en %) (378 relevés et débits) (R.C.I. Boucle du Cacao) (d'après Engalenc, 1982)	43
Tableau 4 - Forages situés sur des noeuds de fracture (74 noeuds - Boucle du Cacao R.C.I.) (d'après Engalenc, 1982)	45
Tableau 5 - Signification de la géométrie du réseau hydrographique de base (d'après Howard, 1967)	47
Tableau 6 - Forages sur granito-gneiss - Epaisseur des altérites	60
Tableau 7 - Forages sur granito-gneiss -Taux d'échecs	60



**Figure 1 - Perméabilité primaire et secondaire
(Wyrick et Borchers, 1981)**

I - INTRODUCTION

1.1 - DEFINITION DU MILIEU FRACTURE

La fracturation d'un massif rocheux dur se caractérise comme un milieu où l'on peut considérer que la perméabilité primaire est pratiquement nulle, alors que la perméabilité secondaire due à l'interconnection du réseau de fractures est marquée à divers degrés (fig. 1). On conçoit que de tels milieux contiennent potentiellement moins d'eau pour un même volume rocheux que des milieux à porosité primaire non négligeable (fig. 2) ; cependant, pour des volumes de roches importants, cela peut représenter des flux d'eau renouvelés considérables.

La définition hydrogéologique du milieu fracturé apparaît comme indépendante de la nature pétrographique des roches qui le constituent. Les zones de socle sont en tout premier lieu concernées par cette définition, et l'on peut constater qu'elles affleurent à la surface du globe sur de vastes étendues (fig. 3), notamment sur des régions du monde parmi les plus déshéritées et pour lesquelles les besoins en eau sont parfois difficilement couverts.

1.2 - LA RECHERCHE D'EAU EN MILIEU FRACTURE

S'il apparaît évident que le milieu fracturé, et en particulier les zones de socle, ne sont pas dépourvues d'eau, il est aussi évident que cette eau, parce qu'elle se trouve dans un milieu discontinu, n'est pas répartie de façon homogène, à l'échelle du captage au moins : en effet un forage, implanté au hasard dans un aquifère de milieu fracturé, a peu de chances de rencontrer, sous le niveau statique, suffisamment de fractures ouvertes interconnectées, pour un débit exploitable.

Le principal critère de prospection est la recherche de fractures ouvertes. Il sous-entend l'analyse de l'état de fracturation du massif considéré. Ainsi, l'outil actuellement le plus usité, à savoir l'interprétation de photographies aériennes, vise à repérer, à la surface du sol, les traces de la fracturation interne du massif en prenant en compte les linéaments assimilables à des cassures sub-verticales, auxquelles est le plus souvent associée une petite fracturation qui rend de tels sites potentiellement favorables. D'autres méthodes de performances inégales (télédétection, géophysique) sont complémentaires et visent le même objectif : la recherche de zones faillées.

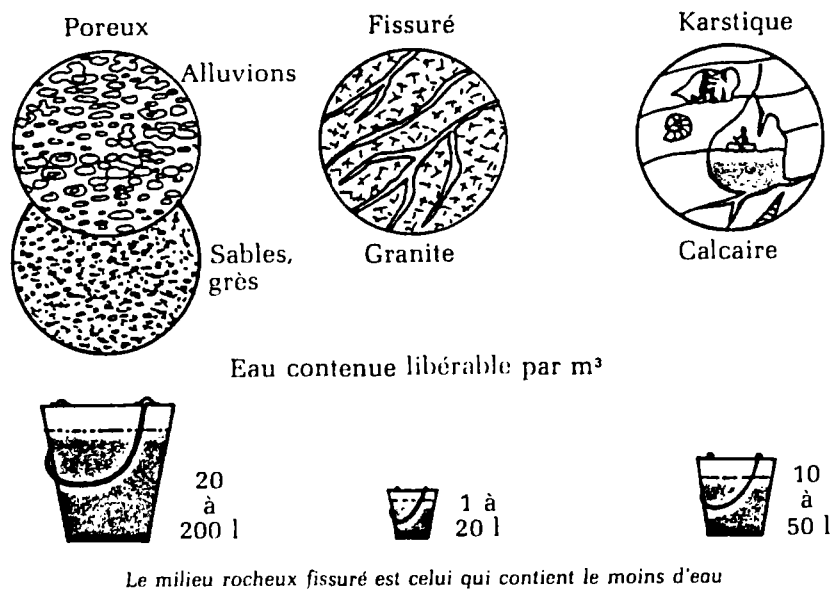


Figure 2 - Gisements d'eau

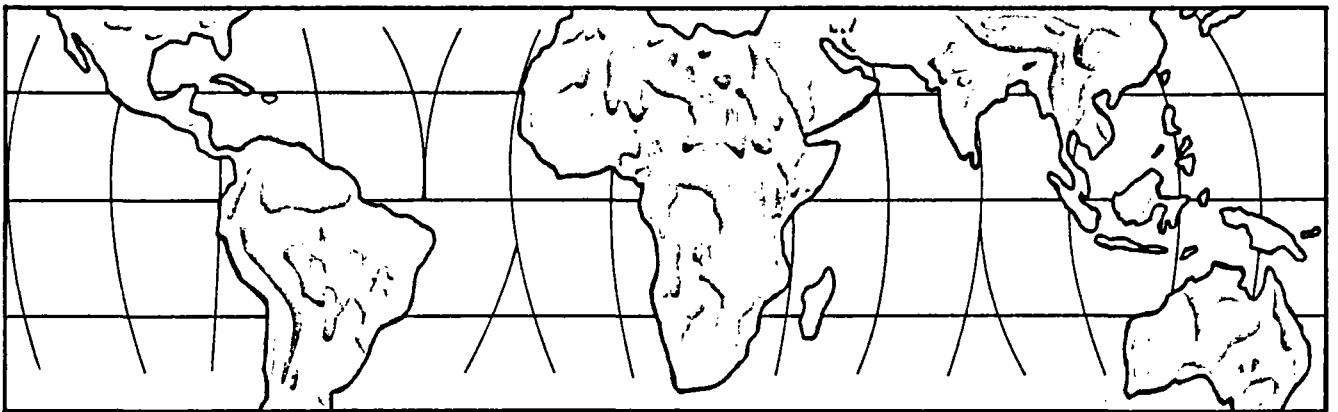


Figure 3 - Zones de socle rocheux (grisé) et grands bassins sédimentaires (blanc)

Mais déterminer leur présence n'est pas suffisant; peut-on déterminer si les fractures sont ouvertes ou fermées ? Sont-elles suffisamment interconnectées ? Où sont-elles les plus denses ? Sont-elles colmatées ? La recharge est-elle à cet endroit suffisante ? Qu'en est-il de l'effet capacitif ? Autant de questions qui conditionnent la réussite ou l'échec d'un forage.

L'objet de ce travail, sujet d'un rapport de stage de 3ème année de l'ENSG-Nancy, est de passer en revue le mode de fracturation des roches dures, les origines de cette fracturation, l'évolution des vides et de la perméabilité hydraulique qui leur est associée et enfin de déterminer ce que peut apporter l'analyse des photographies aériennes lorsque l'on "pousse" les performances de cet outil de prospection.

1.3 - ENJEU DE LA RECHERCHE D'EAU EN MILIEU FRACTURE

Sur l'exemple de la campagne "5ème FED" *(1985) de travaux d'hydraulique villageoise au Togo, le BRGM indiquait l'incidence des différentes prestations sur le coût unitaire du forage équipé.

	Etudes et contrôles	Travaux de forages	Fourniture et installation des pompes	TOTAL
Forage équipé (F CFA)	286 778	1 814 714	449 483	2 550 975
%	11,3	71,1	17,6	100

On constate le faible coût de la "phase papier" du Projet par rapport à son coût global, et donc des économies considérables que permettent de réaliser les études préliminaires. Actuellement, pour les campagnes d'hydraulique villageoise, en considérant comme succès tout forage dont le débit est supérieur à 0,8 m³/h, le BRGM peut se flatter de réussir environ 3 forages sur 4. Cependant rien n'interdit de penser que ce taux de succès peut encore être amélioré, notamment par une meilleure compréhension de la fracturation des roches et des conséquences hydrogéologiques qui s'ensuivent, ainsi qu'une recherche de nouveaux critères applicables aux outils de prospection de l'eau, notamment la photographie aérienne. C'est dans cette optique que s'inscrit ce rapport.

* Fonds Européen de Développement

2 - LES MODES DE FRACTURATION

Nous nous attacherons à décrire ici la fracturation, moins pour elle-même que pour ses conséquences d'un point de vue hydrogéologique, en insistant sur les phénomènes qui sont susceptibles de provoquer l'ouverture ou la fermeture des fractures.

2.1 - FRACTURES D'ORIGINE TECTONIQUE

2.1.1 - FRACTURES DE 1ER ORDRE

Ces fractures qui ne sont pas forcément les premières à apparaître chronologiquement, correspondent aux accidents les plus visibles, à toutes les échelles, de la taille du massif à celle de l'éprouvette.

2.1.1.1 - Fractures résultant d'une compression

. Conditions de mise en place - L'état de contrainte peut être schématisé de la manière suivante (fig. 4) (Feuga, 1984).

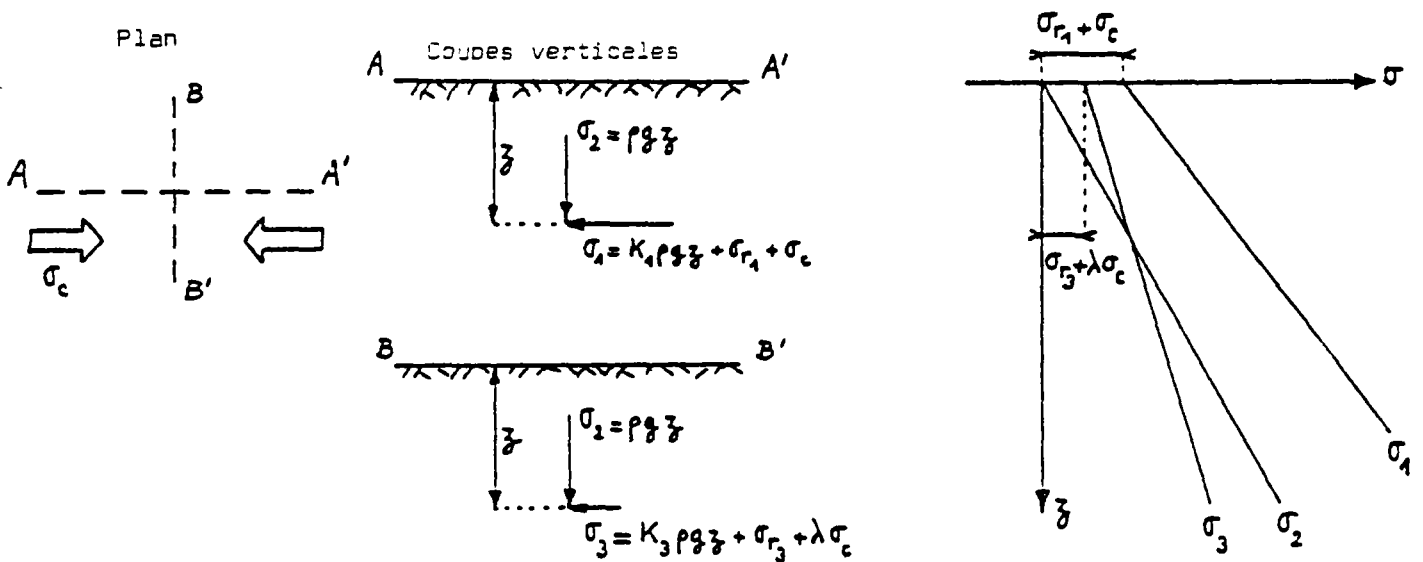


Figure 4 - Distribution schématique des contraintes dans les terrains lors d'une phase compressive (le facteur λ , inférieur à 1, traduit l'influence de la compression σ_c dans la direction horizontale perpendiculaire à celle suivant laquelle elle s'exerce)

avec σ_c = contrainte tectonique de compression (une telle contrainte ne peut en réalité être individualisée)
 σ_r = contrainte "résiduelle"
 ρ = masse volumique des terrains
 y = accélération de la pesanteur
 K = rapport entre contrainte verticale et contrainte horizontale résultant de la seule action de la pesanteur.

. **Effets** - Une cassure se manifestera soit en décrochement (cf. a3), soit en faille inverse (fig. 5).

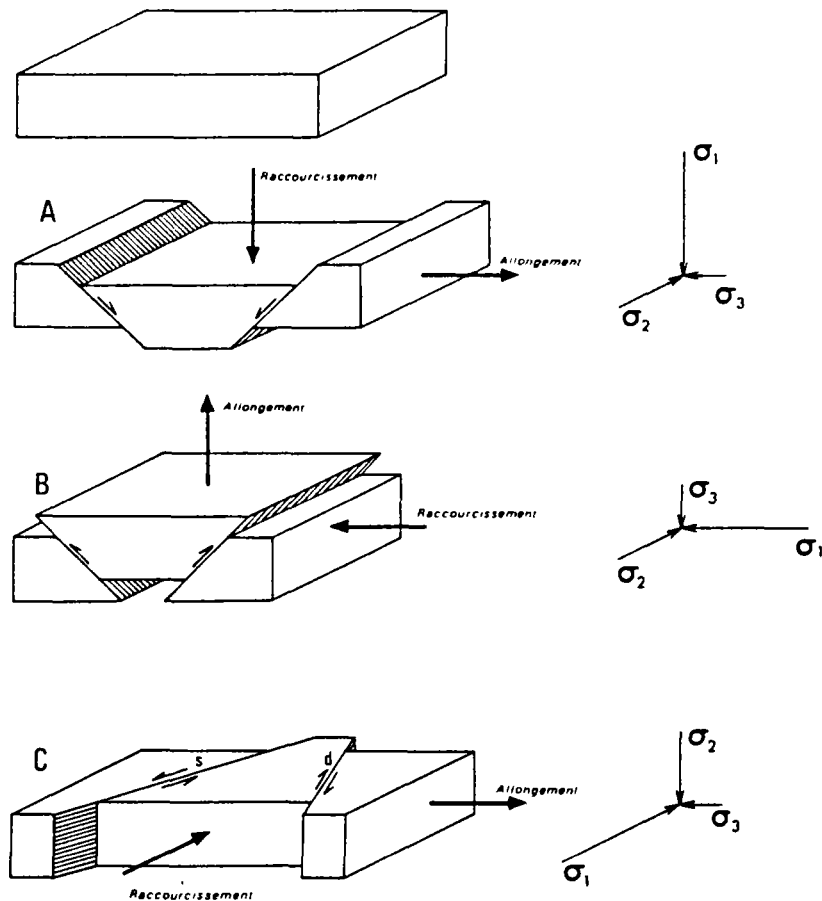


FIG. 2.6. — Les différents types de failles.

A : Failles normales.

B : Failles inverses.

C : Failles de décrochement (s = senestre : d = dextre).

Les directions théoriques des contraintes principales ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) sont indiquées ainsi que celles de raccourcissement et de l'allongement correspondant.

Figure 5 - Les différents types de failles (In Blès-Feuga, 1981)

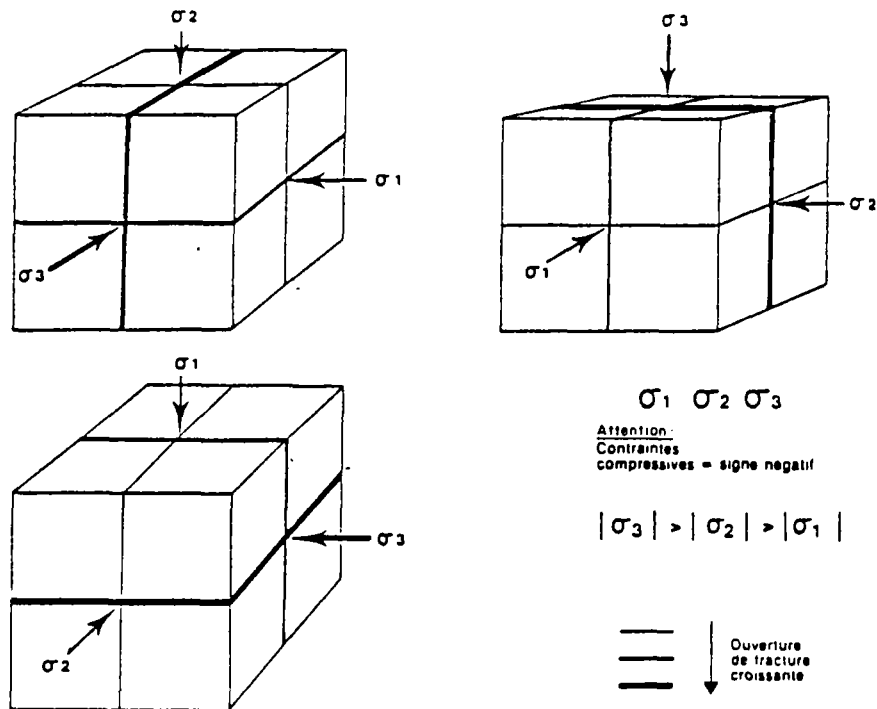
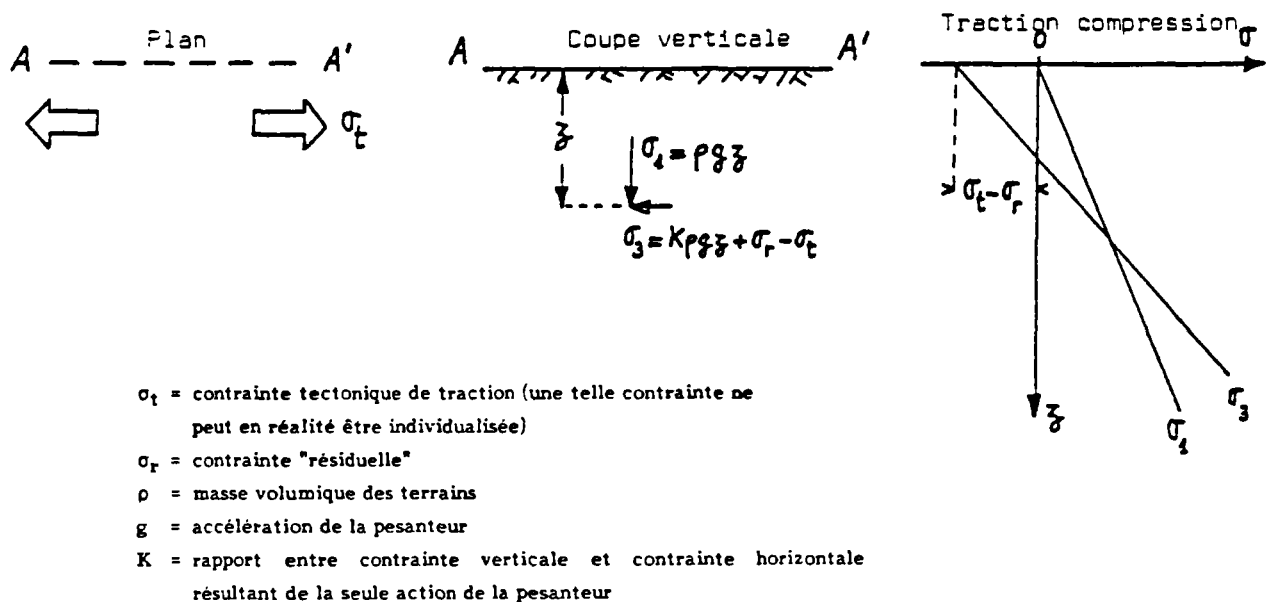


Figure 6 - Illustration schématique de la relation entre les amplitudes des principales contraintes et la capacité aquifère des différentes fractures (extrait de: Carlsson et Olsson, 1980)



Si la traction augmente, il viendra un moment où la contrainte de traction $\sigma_t - \sigma_r$ au niveau du sol excèdera la résistance à la traction de la roche, ce qui provoquera l'apparition, en un point de faiblesse du massif, d'une cassure verticale perpendiculaire à la direction de distension.

Figure 7 - Distribution schématique des contraintes dans les terrains lors d'une phase distensive (In: Feuga, 1983)

En ce qui concerne l'ouverture des fractures, la **figure 6** donne un aperçu de ce que l'on est en droit d'attendre en fonction de l'orientation du champ de contraintes. On retiendra que le plan le plus ouvert est celui qui contient les 2 axes de contraintes principales majeures.

2.1.1.2 - Fractures résultant d'une distension

. **Conditions de mises en place** - La représentation de l'état de contrainte est la suivante (**fig. 7**) (Feuga, 1984).

. **Effets** - On observe sur l'essai brésilien en laboratoire (**fig. 8**) l'ouverture de la fracture, dans une direction perpendiculaire à celle de la contrainte de compression maximale.

A l'échelle du massif, un tel état donne naissance à des failles normales (**fig. 5**). Au niveau du sol, l'ouverture est verticale, tendant à s'incliner avec la profondeur, sans toutefois jamais dépasser 45° avec la verticale (en théorie, jusqu'à $45^\circ - \phi/2$ avec la verticale en appelant ϕ l'angle de frottement), avec possibilité d'une faille conjuguée, symétrique par rapport à la verticale.

2.1.1.3 - Cisaillement

Il s'agit d'un effet. et non d'une cause comme dans les deux cas précédents.

. **Conditions de mise en place** - Le mécanisme d'apparition est celui montré en **figure 9**.

. **Effets** - Les fentes de traction, parallèles à la direction de compression maximale, peuvent apparaître à toutes les échelles. Le mouvement décrochant est susceptible d'induire des ouvertures importantes par rotation de blocs (**fig. 10**). Il peut y avoir également ouverture au niveau même de la faille, par le seul jeu du cisaillement. En effet, le plus souvent un plan de faille n'est pas lisse, mais présente des aspérités.

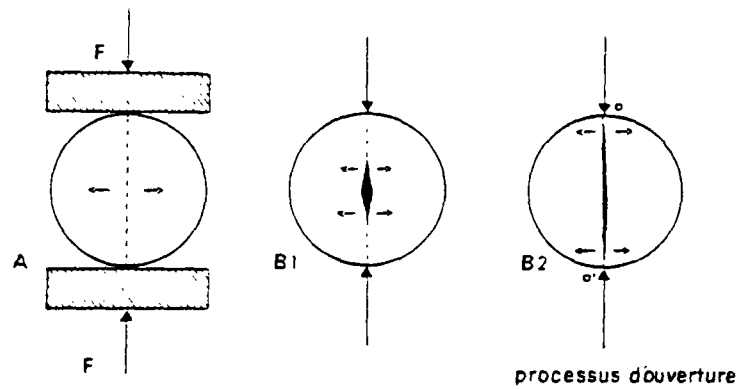
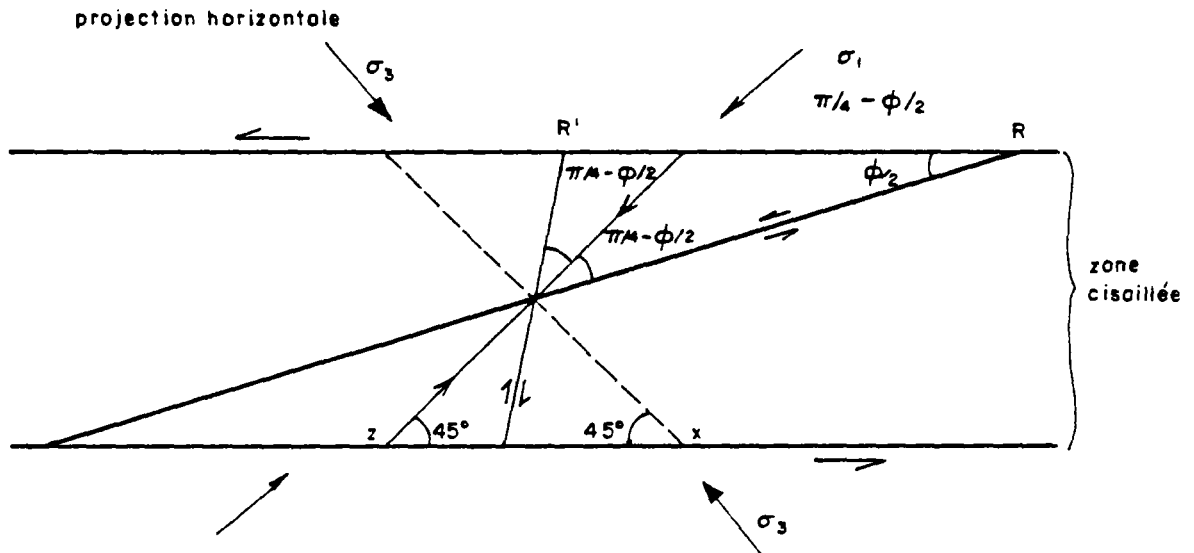


Figure 8 - Fracturation d'une éprouvette lors d'un essai brésilien
(In:Blès-Feuga, 1981)



ordre d'apparition : — z
R puis R' (système conjugué de Riedel)
→ cisaillement senestre
z = axe de raccourcissement maximal, fissure d'extension
x = axe d'allongement maximal
($\phi = 30^\circ$ le plus souvent)

Figure 9 - Relations théoriques entre les différentes fractures en échelon d'une zone de cisaillement

La **figure 11** illustre le phénomène dit de dilatance pour des aspérités auxquelles on a donné l'allure de dents de scie.

Il apparaît, à la fin de cette brève revue des fractures de 1er ordre, que les cisaillements semblent les plus aptes à être accompagnés d'un effet d'ouverture.

2.1.2 - FRACTURES DE 2ème ORDRE (s.l.)

Il convient avant toute chose de préciser que leur mécanisme de formation est d'un point de vue physique identique à celui décrit pour les fractures de 1er ordre. Elles peuvent même parfois être antérieures, ou faire rejouer d'anciennes fractures de 1er ordre. En fait, 1er et 2ème ordre constituent des notions relatives, issues d'une tradition d'observation du terrain, selon laquelle on qualifie de 2ème ordre un ensemble de fractures liées (tectoniquement ou chronologiquement) à des fractures de 1er ordre. En caricaturant, on pourrait dire que ce sont les "petites" par rapport aux "grandes".

2.1.2.1 - Fractures conjuguées

Associées à une grande faille, on observe une série de fractures de 2ème ordre de dimensions variables, dont une famille est parallèle à la grande faille, et l'autre proche de la perpendiculaire (**fig. 12**) (**Blès-Feuga, 1981**).

En reprenant la description schématique de la formation des failles de la **fig. 6**, on peut observer plus en détail le jeu (ouverture ou fermeture) de cette fracturation conjuguée (**fig. 13**).

Se pose alors le problème de l'antériorité de la petite fracturation par rapport à la grande fracturation. Des théories récentes (**Blès et al., 1982**) démontrent (**fig. 14**) que la grande fracturation tend à se développer préférentiellement dans des zones déjà préfracturées. Les grands accidents, utilisant les zones affaiblies, ne génèreraient de courtes fractures que pour raccorder ces zones affaiblies entre elles.

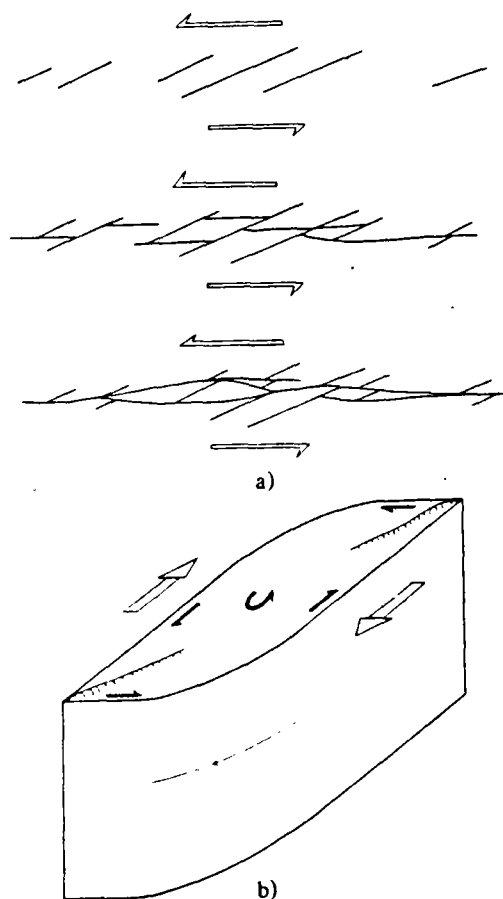


Figure 10 - Lentilles de cisaillement et rotation de blocs.a):

Evolution d'une zone de cisaillement à partir des fractures en échelon de type R et du plan de cisaillement (faille tressée). Formation de lentilles de cisaillement. - b) Schéma d'une lentille de cisaillement formée par les plans de cisaillement et le système associé R. Rotation induite. Noter que dans les dièdres aigus le bloc tend à être coincé sous l'effet du glissement. Un plissement de la lentille peut en résulter.

Ce phénomène peut se produire à toutes les échelles. En cas d'interconnection des lentilles on peut avoir une fracture ouverte sur une grande longueur (In: Vialon, Rohland, Grolier, 1976).

BRGM - SON/OEG

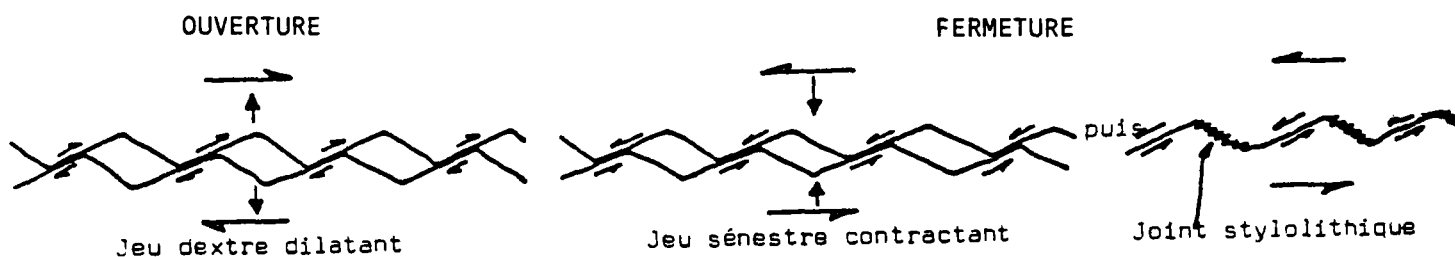


Figure 11 - Schématisation des phénomènes de dilatance-contractance lors du cisaillement d'une discontinuité rocheuse (In : Feuga, 1983)

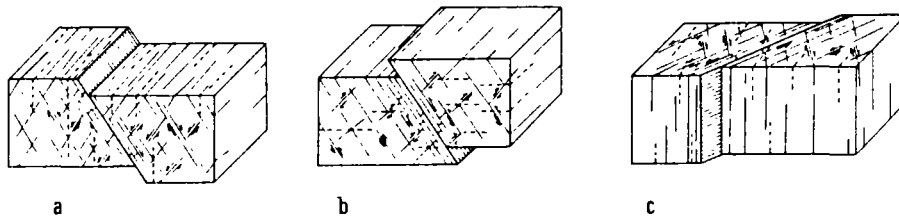


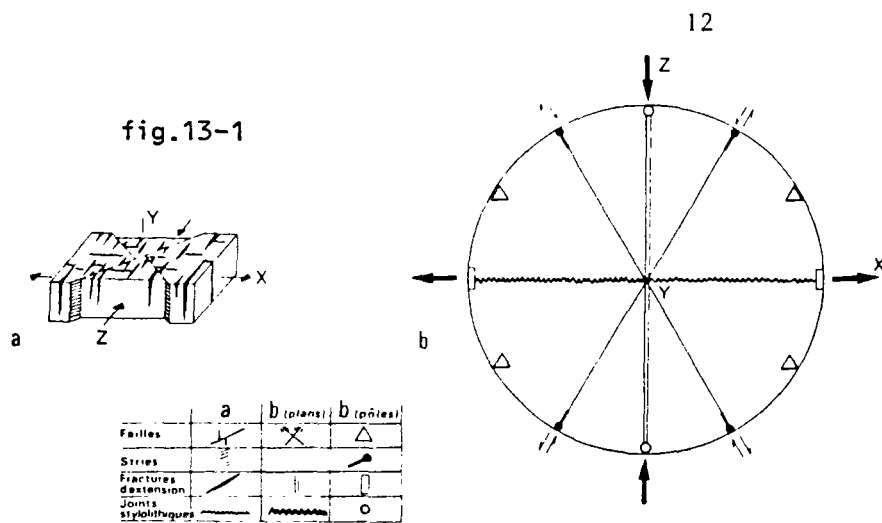
Figure 12 - a = faille normale ; b = faille inverse ; c = faille de décrochement senestre (d'après Blès et Feuga, 1981)

Ceci n'est pas sans conséquence hydrogéologique et reviendrait à dire qu'il n'y a pas toujours le long des grandes failles une petite fracturation associée, constante et suffisamment développée pour avoir un intérêt hydrogéologique, mais qu'il peut y avoir, çà et là, des zones affaiblies, plus densément fracturées et d'extension limitée.

2.1.2.2 - Fractures secondaires

L'apparition d'une faille dans un massif entraîne une modification des contraintes en son voisinage, susceptible de créer de nouvelles fractures (**fig. 15**).

Il faut noter que, dans la nature, ces failles sont très rarement d'un ordre supérieur à 2 (**Chinnery, 1966**). Il est à signaler que ces failles secondaires sont des failles de 2ème ordre au sens strict. Nous préférons le terme de secondaire car il induit moins la confusion avec l'ensemble des failles de 2ème ordre au sens large. En pratique, on observera plus facilement des phénomènes de ce type (**fig. 16**).

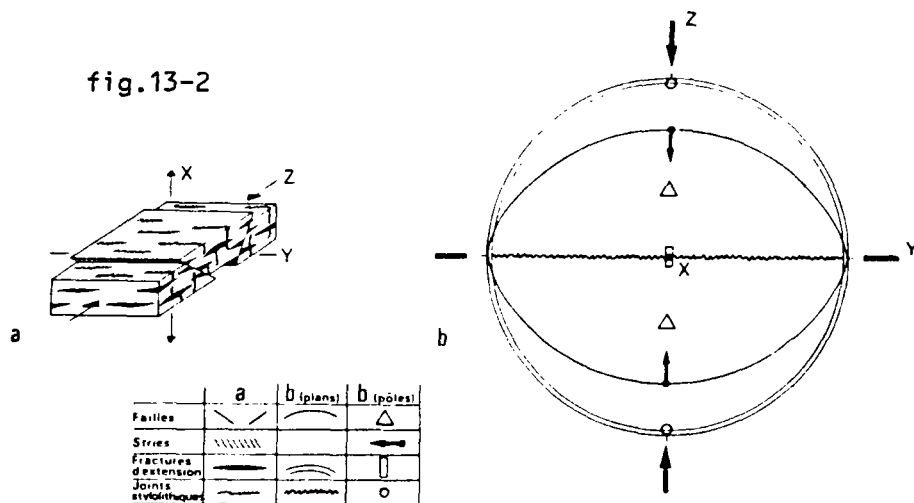


— Système simple et idéal de fracturation par décrochements.

a : Vue en perspective.

b : Représentation de type Schmidt

(Les demi-fleches indiquent le sens de décrochement, dextre ou sénestre)



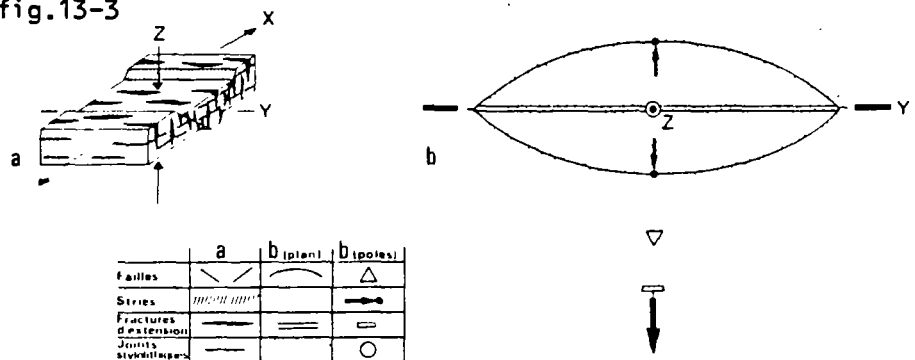
— Système simple et idéal de fracturation par failles inverses

a : Vue en perspective

b : Représentation de type Schmidt (projection de l'hémisphère inférieure)

(Les flèches des stries indiquent le sens de mouvement des compartiments supérieurs des failles).

fig.13-3



— Système simple et idéal de fracturation par failles normales.

a : Vue en perspective.

b : Représentation de type Schmidt (projection de l'hémisphère inférieure).

(Les flèches des stries indiquent le sens de mouvement des compartiments supérieurs des failles).

Figure 13 - Fracturation conjuguée aux principaux systèmes de fracturation
(d'après Blès-Feuga, 1981)

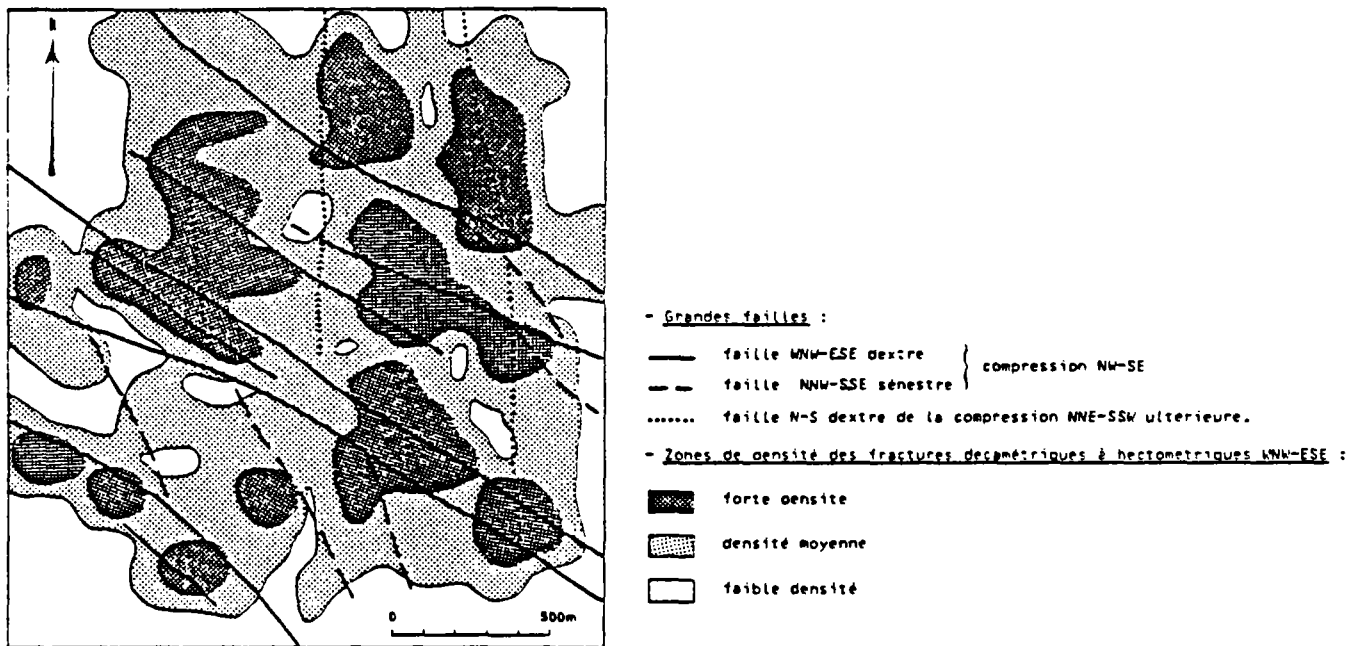


Figure 14 - Relations entre les grandes failles et les zones de densité des fractures d'échelle intermédiaire (décimétriques à hectométriques) dans le granite de Bassies (d'après Blès et al., 1982, modifié)

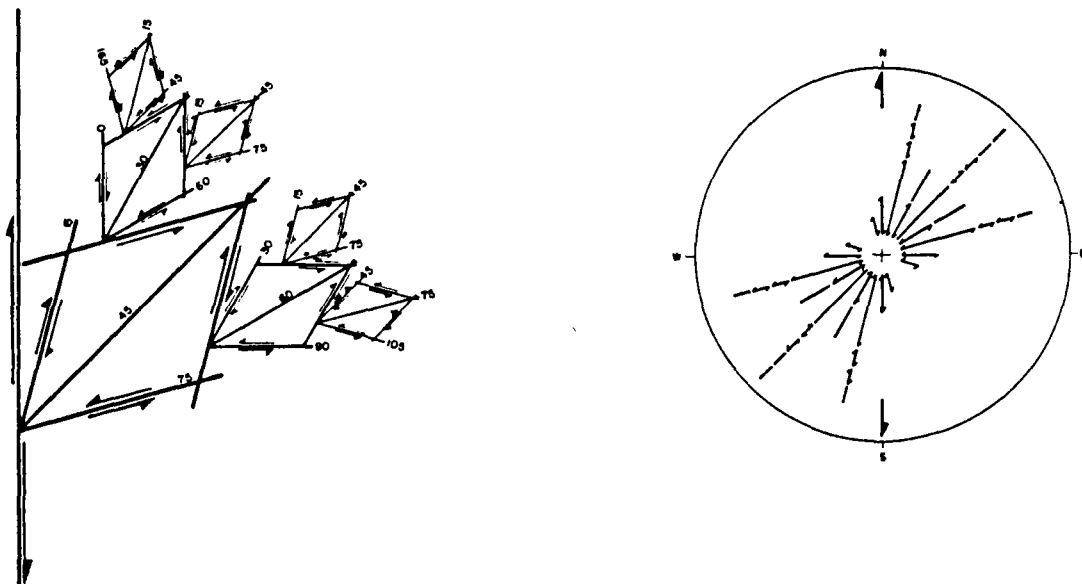


Figure 15 - Distribution des fractures associées de cisaillements de quatre ordres successifs à partir d'un décrochement N-S dextre considéré de 1er ordre (M.R. 1973). a) Association et relations angulaires des fractures R, R' et T de chaque ordre. - b) Représentation en rosace correspondante. Disposition droite de l'éventail par rapport au cisaillement de 1er ordre dextre N-S ; flèches longue, moyenne, courte : cisaillements (R et R') de 2e, 3e et 4e ordre ; double trait : fentes de tension T (même hiérarchie). Au-delà du 2ème ordre, les fractures sont improbables. (d'après Vialon, Ruhland, Grolier, 1976)

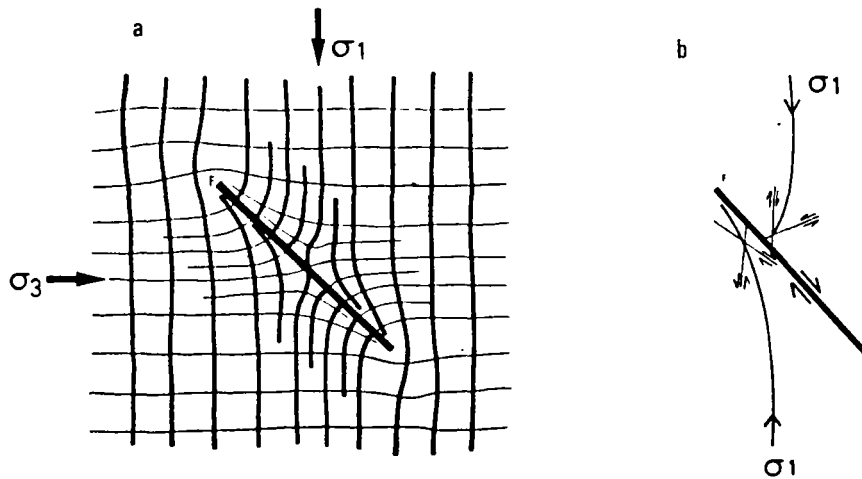


Figure 16 - Réorganisation des contraintes autour d'une grande faille (a) et failles de deuxième ordre (b) (In: E.M. Anderson, 1951 et J.G. Ramsay, 1967, modifié)

2.1.2.3 - Fractures de Riedel

Des expériences tendent à prouver que de telles fractures apparaissent au niveau de la couverture sédimentaire lorsque le socle se décroche (Fabre et Robert, 1975) (fig. 17). En ce qui concerne le mécanisme de leur mise en place, on se référera à la partie cisaillement (fig. 9).

Notons que de telles fractures, reprises dans un mouvement cisailant, peuvent donner lieu à des ouvertures (fig. 10).

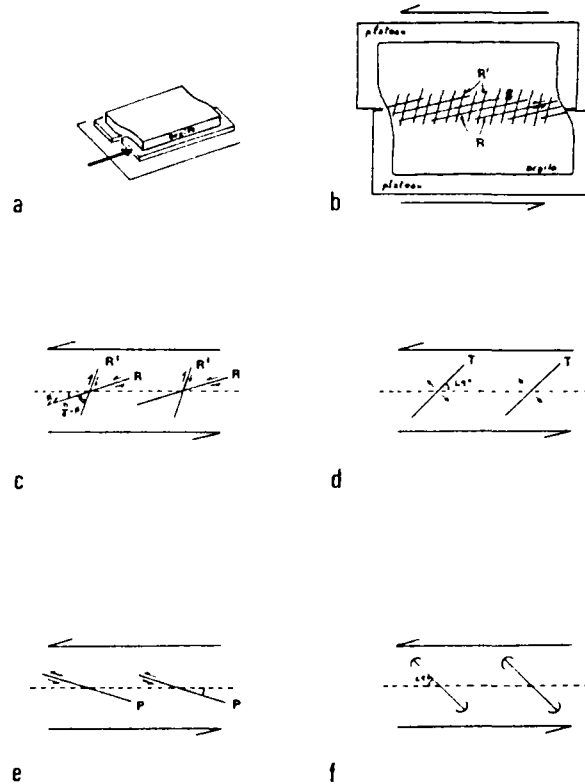


Figure 17 - Les structures développées dans une zone de cisaillement -
Modèle de Riedel (1929)

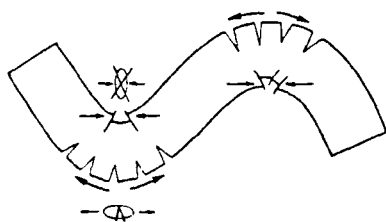
a et b = Maquette (a) et résultats (b) de l'expérience de Riedel
d'après J.S. Tchalenko (1975) ;

c, d, e et f = à l'intérieur d'une zone de cisaillement, disposition des
fractures de Riedel R et R' (c), des fissures par traction T (d), des
fractures P (A.W. Skempton, 1966) (e) et des plis en échelon (f).
(ϕ = angle de frottement interne du matériau).

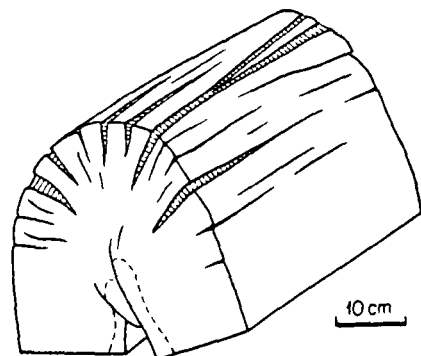
2.1.3 - FRACTURES LIEES A LA MISE EN PLACE DE PLIS

D'un intérêt hydrogéologique, c'est-à-dire susceptible de donner des fractures ouvertes, seuls sont concernés les plis à déformation de charnière (fig. 18a) et les fentes horizontales des plis isopaques (fig. 18b).

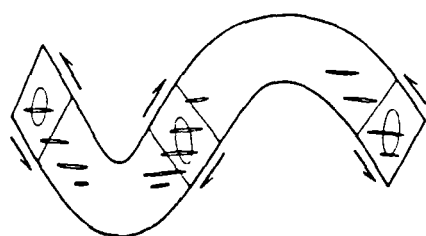
Notons que ces fractures ouvertes sont verticales et fortement susceptibles d'être comblées par du matériel de dissolution, ce qui en limiterait beaucoup l'intérêt hydrogéologique.

**Figure 18a**

Allure des fentes et des cassures se produisant dans les charnières de plis à déformation charnière



Un exemple de pli à déformation de charnière. Le matériel est quartzitique ; les fentes sont remplies de quartz

**Figure 18b**

Développement de fractures de traction dans des flancs de plis à déformation de flancs. Les fentes sont perpendiculaires à l'attaque de déformation.

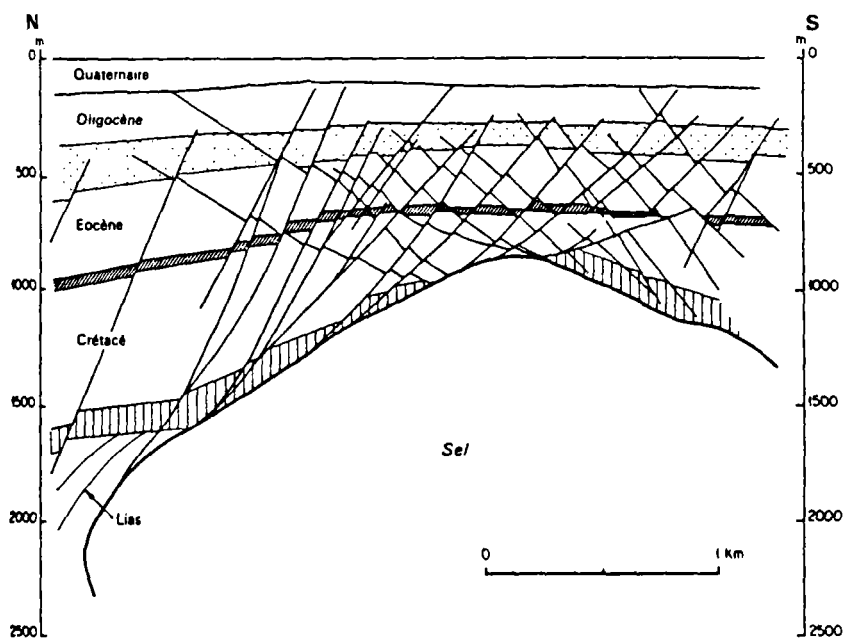
Figure 18 - Les différents types de plis (d'après Mattauer, 1980)

Figure 19 - Réseau de failles normales conjuguées situé au sommet d'un diapir. Noter que les failles à pendages nord sont postérieures aux failles à pendages sud. In: Behrman (1949)

2.2 - FRACTURES NON DIRECTEMENT LIEES A LA TECTONIQUE

2.2.1 - FRACTURES LIEES A LA MISE EN PLACE DE DIAPIRISME

Ce phénomène concerne les montées des dômes de sel et les montées des intrusions granitiques. Ces mouvements conduisent à la formation d'un champ de failles normales (**fig. 19**). Une fois le seuil de rupture atteint, les blocs ont tendance à s'écarter (**fig. 20**). Cependant ces remontées se font parce qu'elles concernent des matériaux de densité inférieure à l'encaissant et d'une plasticité (voire même d'une fluidité pour les magmas) leur permettant de fluer. On conçoit alors qu'un tel matériel a tendance à s'injecter dans les fractures qu'il aura contribué à ouvrir. Ainsi, plus on s'approche d'un pluton granitique, plus les mécanismes conduisant à l'ouverture de fractures du milieu encaissant sont importants, mais plus le remplissage des ouvertures est probable, et donc limite leur intérêt hydrogéologique.

Signalons, que par l'ouverture d'une fracture, certaines chambres magmatiques se vident, créant après leur effondrement, des caldeiras, susceptibles, par un nouveau jeu de contraintes, d'ouvrir des fractures.

2.2.2 - FRACTURES LIEES A LA RETRACTION

La température est un paramètre important de l'équilibre des massifs rocheux. L'équation suivante le montre :

$$\sigma : E(\epsilon + \alpha \Delta T) + s_0$$

σ : contrainte dans le massif

E : rigidité du massif

ϵ : déformations réelles

ΔT : variation de température

α : coefficient de dilatation thermique

s_0 : contraintes initiales.

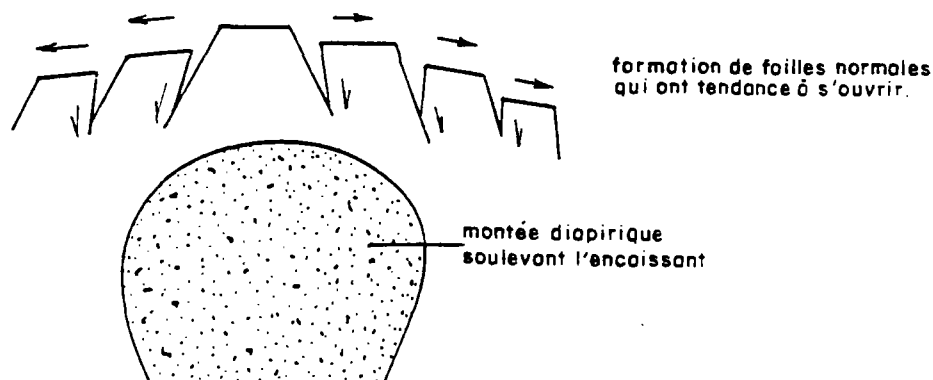


Figure 20 - Schéma expliquant l'ouverture des fractures lors d'une montée diapirique

B. Feuga (1984) cite l'application numérique suivante :

$$E = 6.10^4 \text{ MPa}$$

$$E\alpha = 0,48 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 8.10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

or

$\epsilon = 0$ quand le massif cesse de se déformer

alors

$\Delta T = 200^\circ\text{C}$ suffit à avoir $\sigma = 96 \text{ MPa}$ qui est de l'ordre de grandeur de la résistance à la compression du matériau.

Cependant les fractures ouvertes créées par les contraintes de traction dues au refroidissement sont souvent le lieu d'injection de solutions magmatiques tardives donnant naissance à des filons d'aprites ou de pegmatites. Selon Cloos (1936), on devrait aboutir au schéma présenté par la fig. 21.

Nous retiendrons que le refroidissement est apte à créer des zones de faiblesses horizontales.

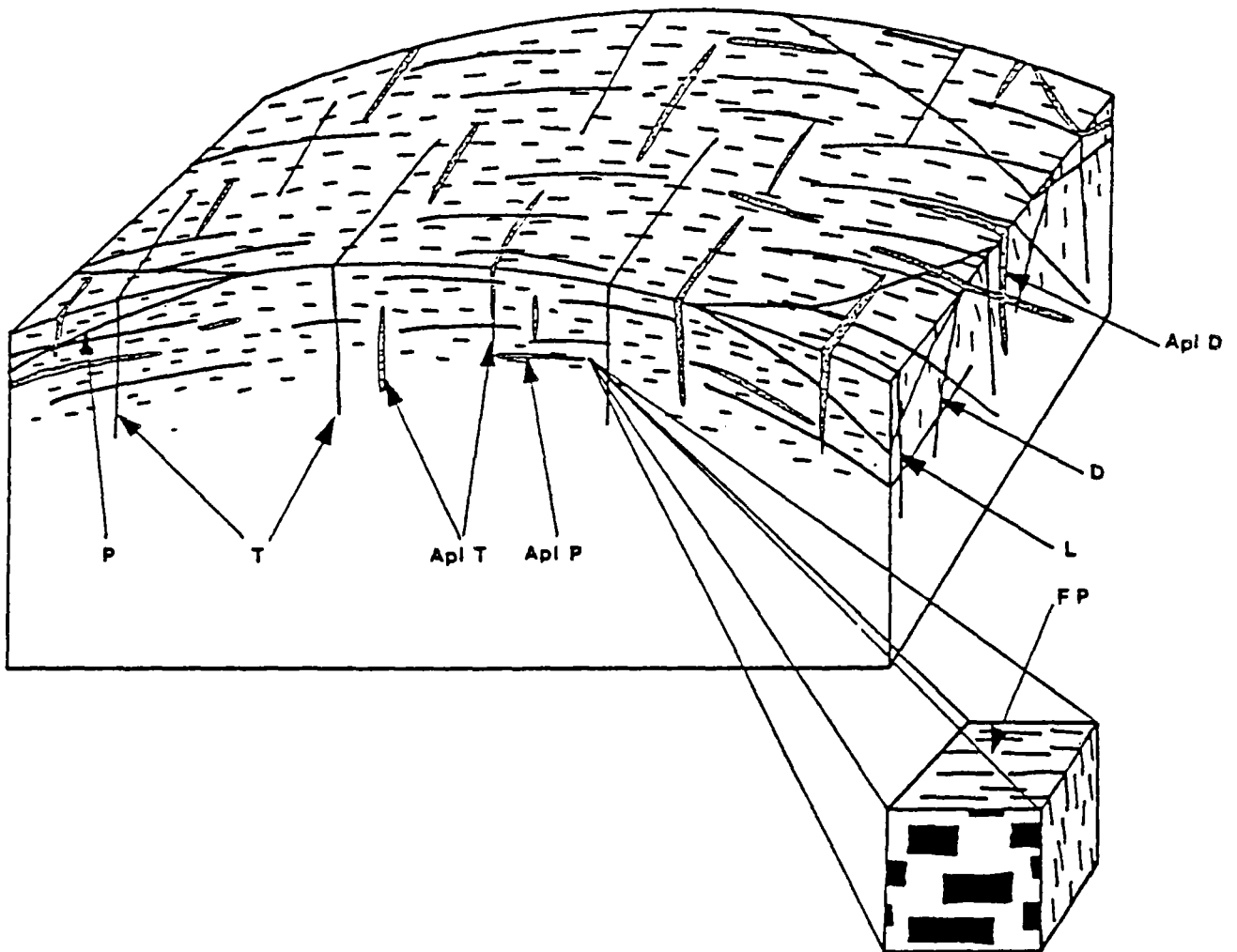


Figure 21 - Les joints primaires du granite

- T - Joints primaires transverses
- D - Joints primaires diagonaux
- P - Joints primaires plats
- L - Joints primaires longitudinaux
- Apl. T - aplites dans les joints primaires transverses
- Apl. D - aplites dans les joints primaires diagonaux
- Apl. P - aplites dans les joints primaires plats

(d'après Cloos H., 1936)

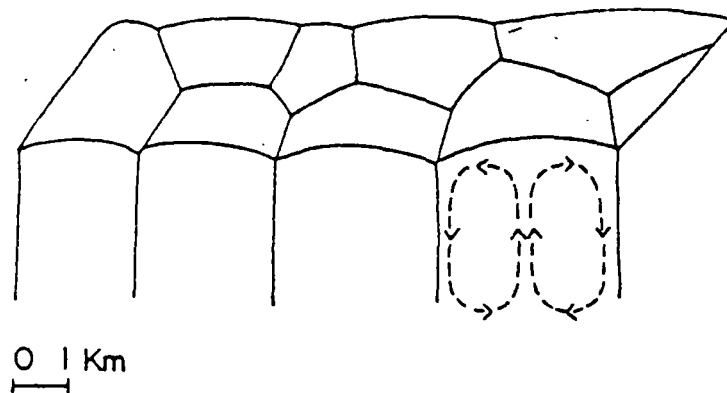
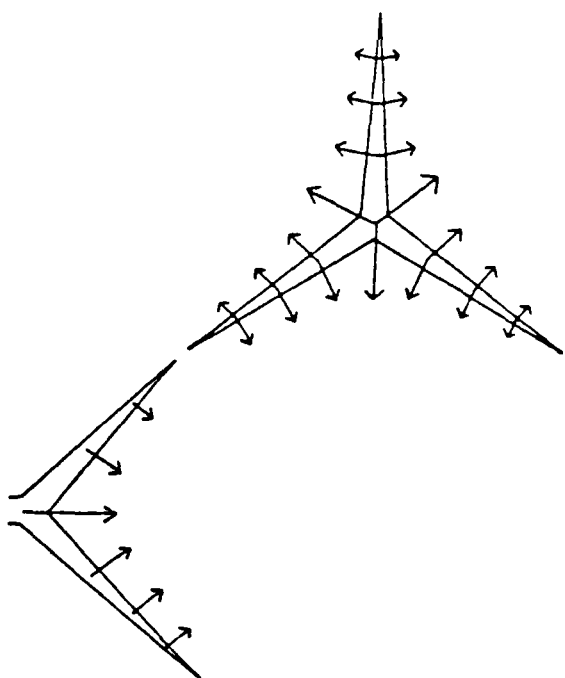
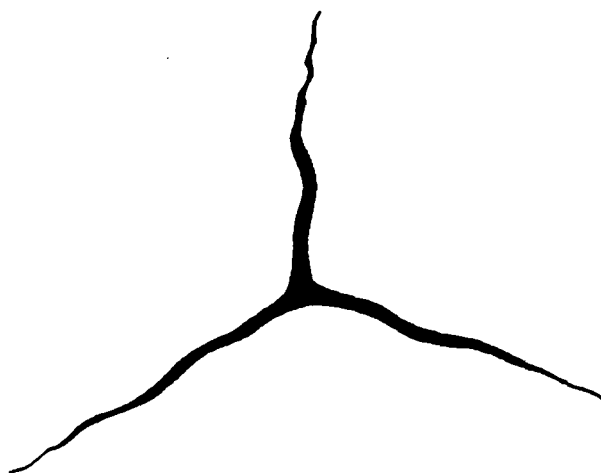


Figure 22 - Mégaprismes et courants de convection dans le magma
(Engalenc, 1978)



Rétraction vers le centre de
de la maille. (Les flèches
simulent les forces de tension).
(Engalenc, 1978)



Eclatement en étoile à 3 branches
3 branches en milieu isotrope
(Engalenc, 1978)

Figure 23

Les phénomènes de rétraction seraient, selon **Engalenc** (1978), l'explication des formes polygonales que l'on observe à la surface de certaines parties du socle africain (**fig. 22 et 23**). Pour expliquer ce phénomène, **Engalec** établit l'analogie avec les prismes des coulées basaltiques.

Nous émettrons cependant une réserve quant aux abus qu'a entraîné cette interprétation. En effet, toutes les figures hexagonales que marque le réseau hydrographique sur un socle ne sont certainement pas des figures de prisme de rétraction. Ainsi la **figure 24** montre (Nord Est Togo - gneiss Lama-Kara) que 2 directions de failles et 1 direction de foliation donnent également des figures hexagonales.

2.3 - FRACTURES LIEES AUX EFFETS DE SURFACE

2.3.1 - EFFET DE RELIEF

La distribution des contraintes à faible profondeur est dépendante du relief. A titre d'exemple simple, sur les versants, "l'appel au vide" engendre des contraintes de traction qui conduisent à l'ouverture des fractures verticales. Dans les fonds de talwegs c'est l'inverse : on a tendance à avoir une compression et donc une fermeture des fractures verticales. Cependant, en fond de talweg, se produit un mouvement vertical ascendant, compensant la charge lithostatique des versants, ayant donc tendance à ouvrir les fractures horizontales. En fond de talweg, ce mouvement se cumule avec celui causé par la décompression superficielle (**fig. 25**).

2.3.2 - DECOMPRESSION SUPERFICIELLE

Nous abordons un effet dont les conséquences hydrogéologiques sont très importantes.

. Conditions de mise en place - La décompression superficielle est induite par la diminution de la charge lithostatique. Cette diminution, causée par l'érosion, est brusque à l'échelle des temps géologiques et par rapport aux modification du champ de contraintes d'une région. Le processus théorique est schématisé par la '**fig. 26**' (**Feuga, 1984**). Notons qu'il agit principalement sur les fractures horizontales et sub-horizontales.

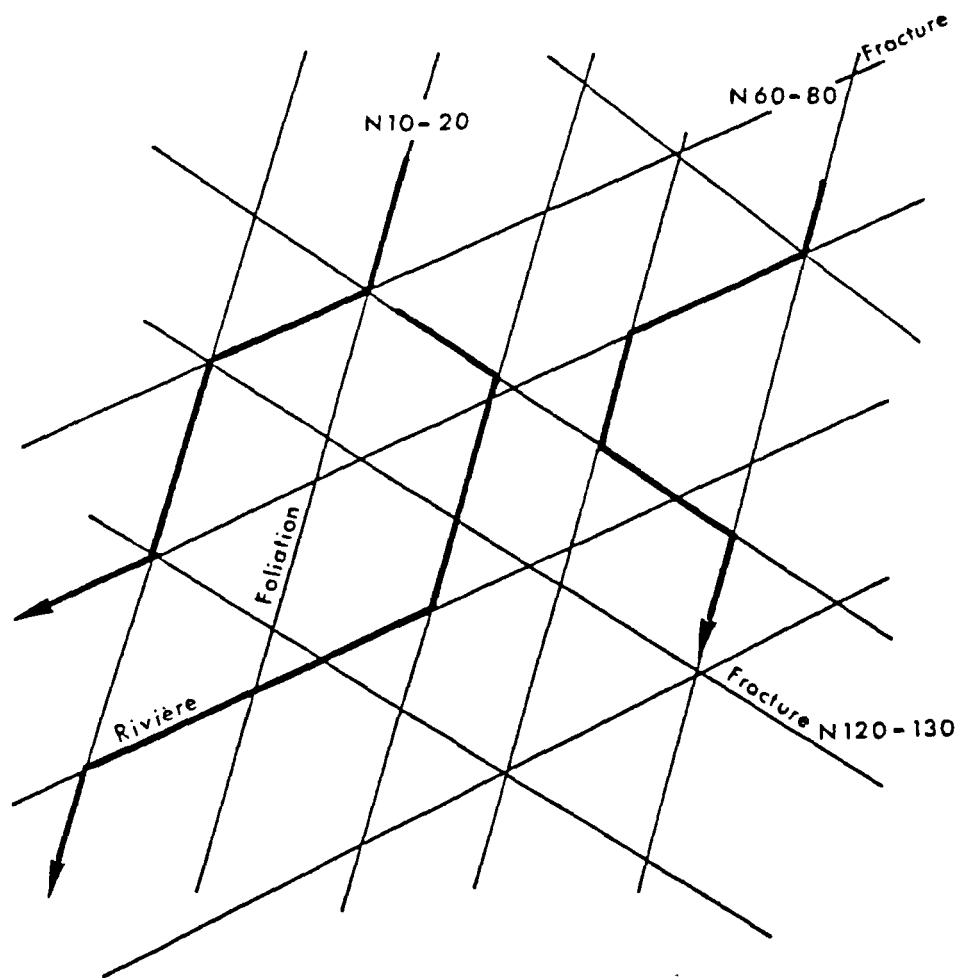
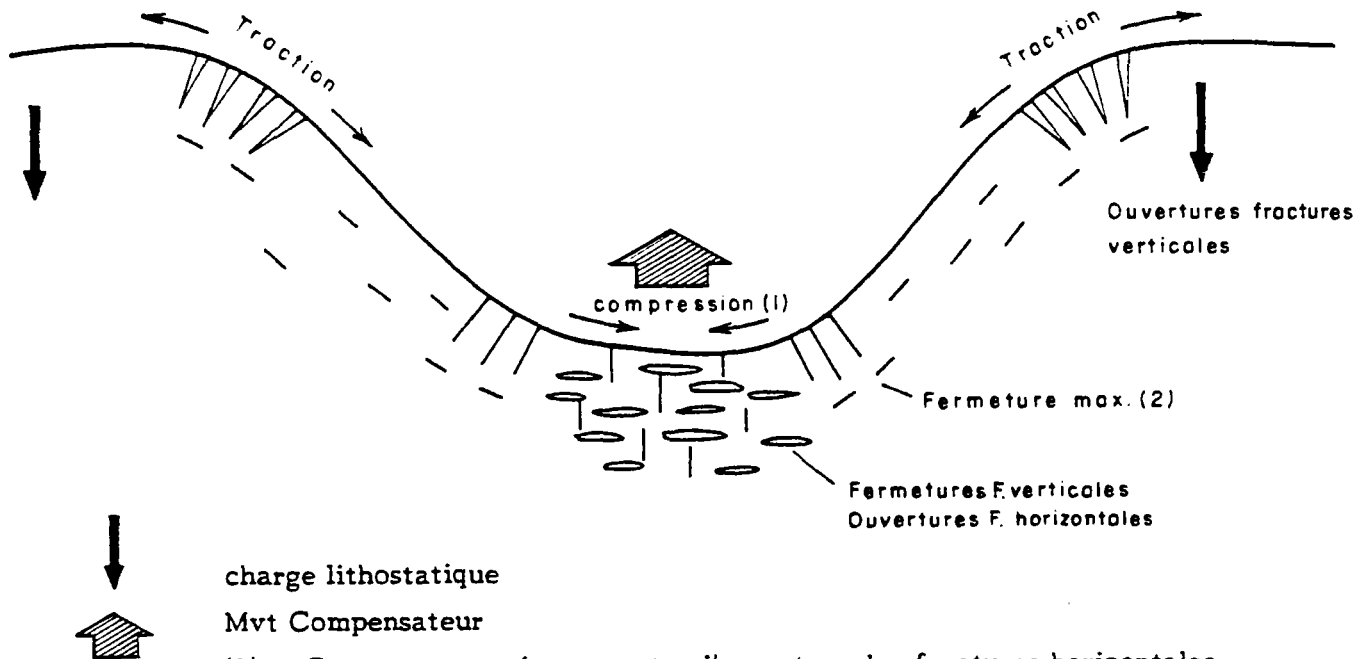


Figure 24 - Schéma des figures polygonales observées au Nord-Est du Togo, dans les gneiss de Lama-Kara (d'après 83 SGN 001 GEO)



- (1) Cette compression accentue l'ouverture des fractures horizontales
- (2) La charge verticale est à 45° des fractures horizontales et verticales et tend donc à les fermer

Raisons de l'ouverture des points noirs en fond de talweg :

- décompression superficielle (d'autant plus "efficace" que l'on est déjà en zone fracturée)
- compression horizontale
- mouvement compensateur

Figure 25 - Influence du relief sur l'ouverture et la fermeture des fractures

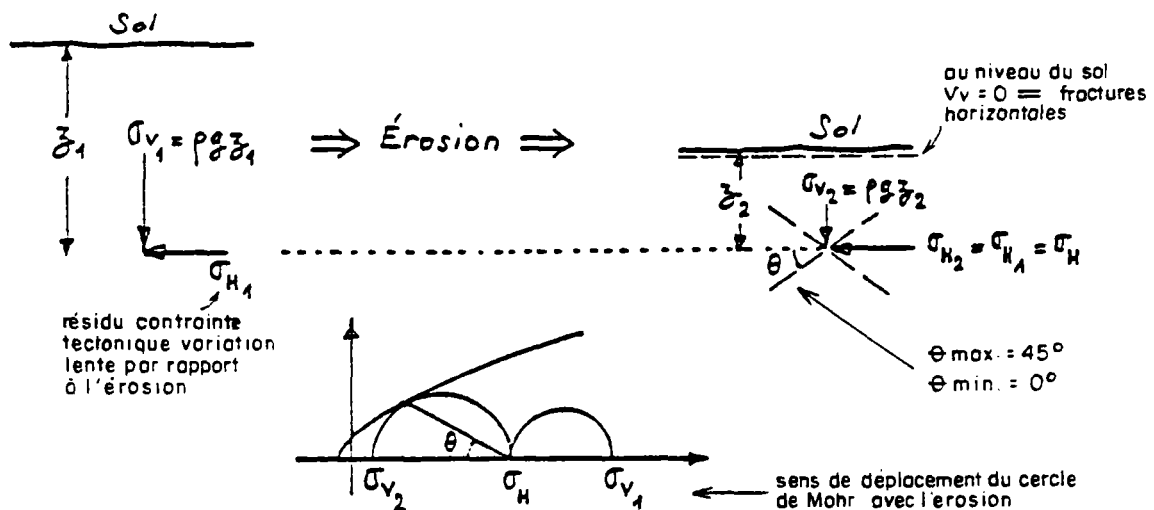


Figure 26 - Mécanisme d'apparition de fractures de décompression dues à l'érosion

. **Effets** - Les effets de la décompression superficielle diminuent avec la profondeur et les résultats des forages des campagnes hydrogéologiques tendent à montrer qu'ils sont principalement visibles dans les 40 premiers mètres et négligeables au-delà de 80 m. Cependant, il faut noter que peu de fractures observées dans cette tranche de profondeur ont pu être attribuées sans ambiguïté à ce phénomène. Ceci s'explique probablement par la faiblesse relative des énergies mises en jeu par la décompression superficielle, énergies qui ont tendance à être absorbées par déformation élastique du massif si celui-ci ne présente pas de zones de faiblesses mécaniques préexistantes (faille, schistosité,...). Aussi la décompression superficielle tend principalement à faire rejouer et ouvrir les fractures horizontales à sub-horizontales qui sont déjà présentes dans le massif, et ces effets sont d'autant plus marqués que le massif est déjà préfracturé (Feuga, Comm. Or.).

CONCLUSION

	OUVERTURE	FERMETURE
Fractures horizontales	<ul style="list-style-type: none"> . décompression superficielle . refroidissement d'un γ . failles inverses (mécanisme) . plis à déformation de flancs . compensation lithostatique 	<ul style="list-style-type: none"> . charge lithostatique . failles normales
Fractures verticales	<ul style="list-style-type: none"> . décrochements (raccourcissement) . cisaillements (dilatance) . failles normales . rétraction-refroidissement . plis à déformation de charnière 	<ul style="list-style-type: none"> . failles inverses (mécanisme de) . décrochement (raccourcissement) . cisaillement (contractance)

Tableau 1 - Essai de synthèse des mécanismes d'ouvertures et de fermetures des fractures en fonction de leur orientation

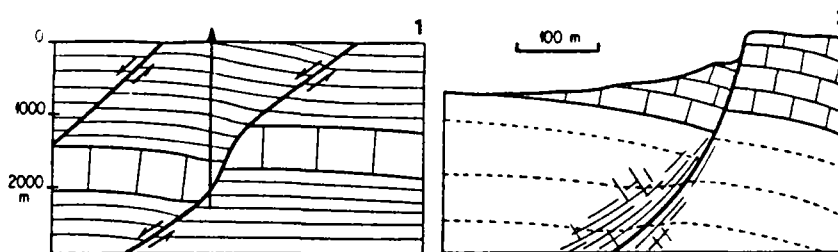
3 - INFLUENCE DE LA NATURE PREEXISTANTE DU MASSIF

Il convient d'insister sur le fait que les massifs, qui vont se trouver soumis aux phénomènes décrits en 1ère partie, ont une histoire antérieure, une pétrographie et une fracturation qui ne seront pas sans conséquence sur la distribution de la nouvelle fracturation qui va se mettre en place.

3.1 - INFLUENCE DE LA PETROGRAPHIE DES ROCHES

Suivant leur nature, les roches sont compétentes (cassantes) ou non. Cette caractéristique varie avec la pression et la température. On conçoit bien cependant qu'une roche, pour donner des fractures d'un intérêt hydrogéologique, doit pouvoir se casser. Les roches imperméables plastiques, quoique pouvant parfois se fracturer (argiles) seront d'autant moins intéressantes.

L'angle de frottement interne ϕ dépend de la nature de la roche. Ceci explique que des variations dans les directions des plans de fractures (phénomène de réfraction **fig. 27**) peuvent apparaître entre deux compartiments de lithologies différents. **Ph. Dutartre** (1981) constate que les fractures sont légèrement déviées (20° maximum) de part et d'autre de l'interface entre de 2 granites différents.



Coupes de failles normales montrant : 1. une variation de pendage ;
2, une variation de géométrie de la faille

Figure 27 - Influence des variations de nature des terrains sur le pendage des failles (d'après **Mattauer**, 1980)

La nature pétrographique de la roche fait qu'il existe toujours une échelle où le massif n'est pas isotrope. Ainsi les roches à grain fin présentent une densité de fracturation supérieure à celle des roches de même famille à grain grossier (Ph. Dutarte, 1981).

A une échelle légèrement supérieure, il existe une anisotropie de structure de la roche, qui a pour origine la schistosité, la foliation, la stratification, etc.. et qui entraîne l'existence de zones de moindre résistance mécanique par rapport à l'ensemble du massif.

3.2 - INFLUENCE DE LA FRACTURATION PREEXISTANTE

Il est généralement admis que l'essentiel de la fracturation d'un massif a lieu lors de la première orogénèse à laquelle il est soumis (rarement au-delà des deux premières). Les orogénèses qui suivent, ne font que reprendre des fractures déjà existantes. Leurs caractéristiques hydrauliques initiales sont donc amenées à varier, des failles fermées s'ouvrant et vice-versa. Pour acquérir ces nouvelles données, on se référera au dernier état de contrainte (fig. 28).

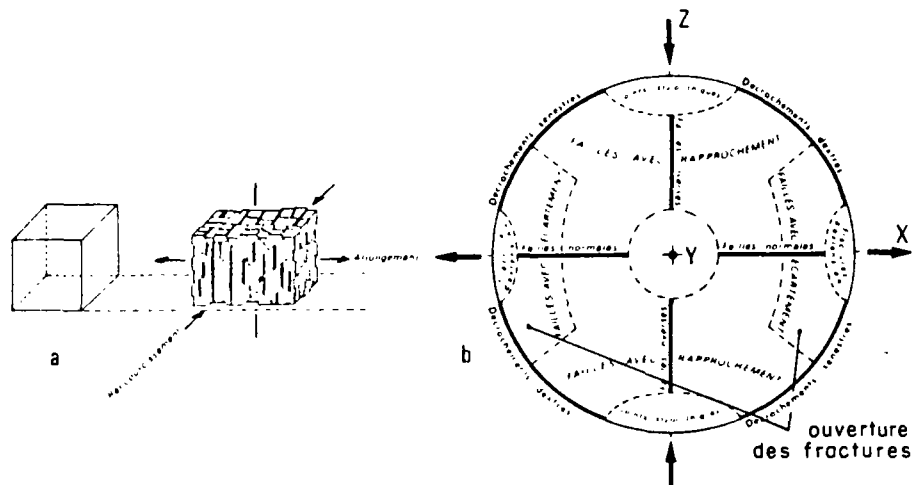


Figure 28 - Cas complexe de fracturation (d'après F. Arthaud et M. Mattauer, 1969, modifié Blès-Feuga, 1981)

Mais les choses ne sont pas aussi simples à l'échelle de l'ensemble du massif. Le champ de fracture tout entier peut faire varier localement les directions de raccourcissement comme le prouve l'exemple de la **fig. 29** qui montre l'influence de l'orogénèse pyrénéenne sur le socle hercynien du Poitou et des Charentes.

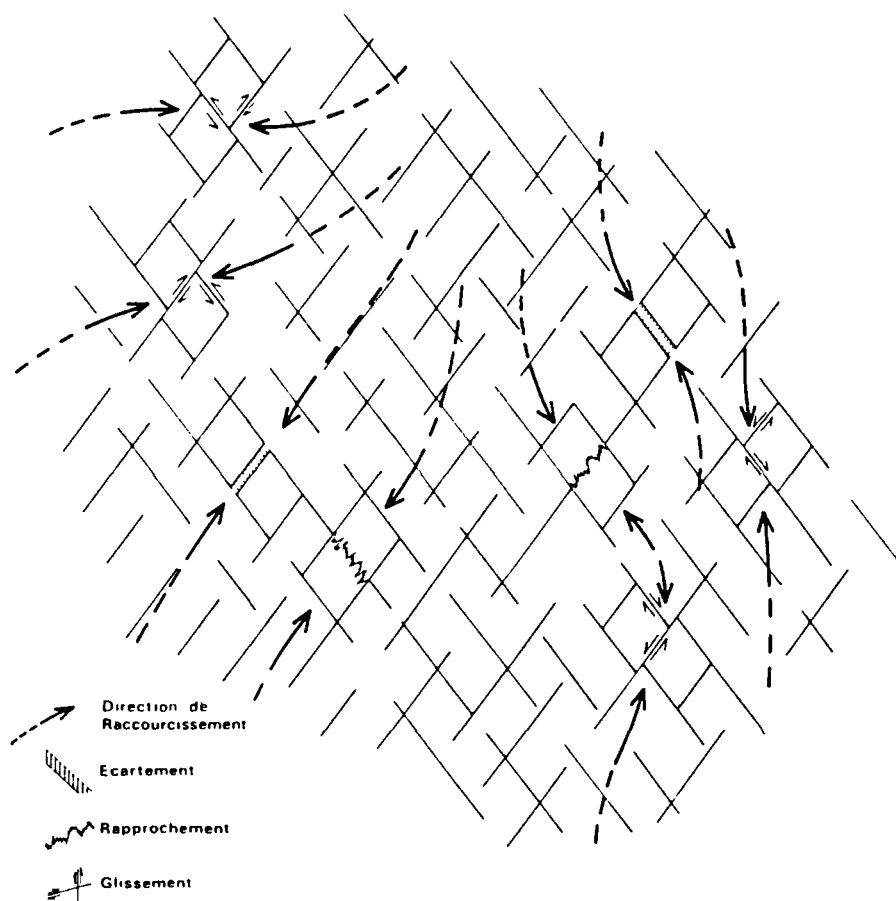


Figure 29 - Comportement de deux familles de discontinuités verticales sous l'effet d'un raccourcissement horizontal d'orientation variable (d'après F. Arthaud et P. Choukroune, 1972)

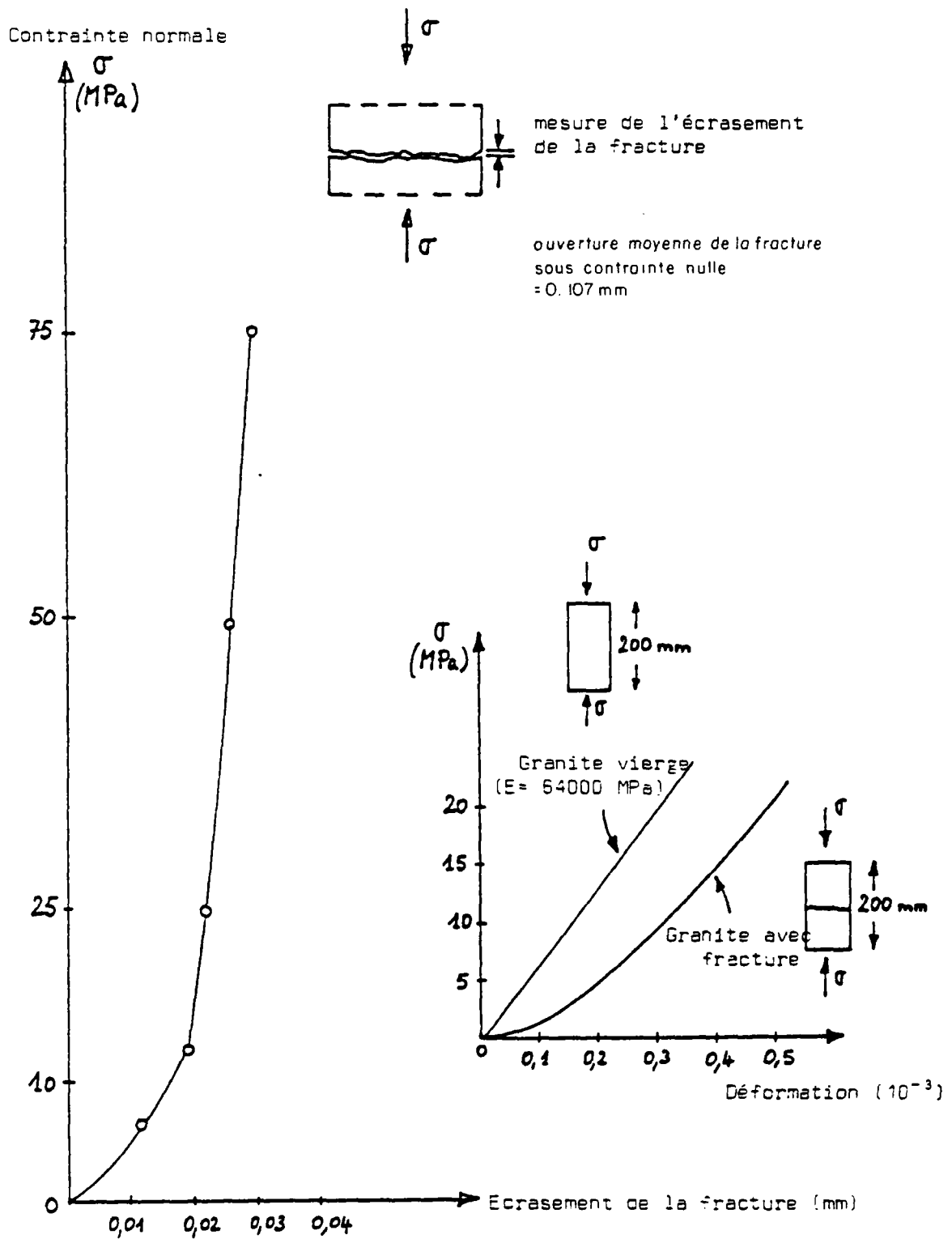


Figure 30 - Comportement en compression d'une fracture dans le granite de Guéret, carrière de Maupuy (Creuse) (d'après Billaux et al., 1984)

On notera que des directions parallèles peuvent être ouvertes ou fermées. Ceci n'est pas sans conséquence sur l'interprétation hydrogéologique que l'on peut faire de la tectonique d'une région. En effet, en l'absence de tout autre renseignement, il est logique de faire l'hypothèse que la contrainte principale σ_1 d'une région est perpendiculaire à l'orientation de la chaîne de montagne la plus récente. Il est donc a priori logique de penser que les failles parallèles à cette chaîne seront plutôt fermées, alors que celles perpendiculaires (et donc parallèles à σ_1) seront plutôt ouvertes. Or il apparaît d'après l'exemple précédent que, plus un massif est fracturé, moins le champ local de contraintes est uniforme. Il convient donc de se méfier d'un raisonnement trop global dans les zones très fracturées.

Au niveau de la fracture proprement dite, Billaux (1984) a fait des expériences sur une fracture de 0,107 mm d'ouverture moyenne sous contrainte nulle (fig. 30), si K est la perméabilité du milieu continu équivalent, sous contrainte nulle, à 25 MPa (environ l'équivalent de 1 000 m de terrain) cette perméabilité est diminuée de moitié.

Cette perméabilité est également liée au degré d'interconnection des fractures entre elles. Lassagnac (1983) a établi que pour une famille directionnelle donnée, on avait la formule $nae = 1$ (fig. 31)

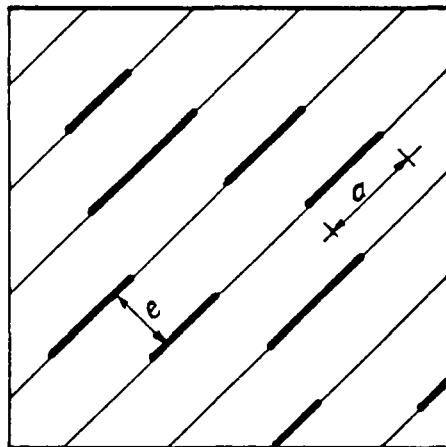


Figure 31

dans laquelle

- n = nombre de fractures par unité de surface (ou de volume)
- a = dimension moyenne (longueur ou surface)
- e = écartement moyen des fractures entre elles.

Le degré d'interconnection entre 2 familles directionnelles augmente si a augmente et/ou si e diminue, donc si a/e augmente. Or $\frac{a}{e} = \frac{1}{ne^2}$, ce qui conduit à dire que l'hydrogéologue aura tendance à préférer les zones où l'espacement moyen entre les fractures est le plus faible possible.

On retrouve ainsi par le calcul une notion intuitive, à savoir que les zones où la fracturation est la plus dense sont les plus favorables. Ceci est vrai en ce qui concerne le degré d'interconnection des fractures verticales et obliques auxquelles s'ajoute l'action de la décompression superficielle. En effet, cette décompression correspond à une énergie qui aura tendance à être absorbée par des déformations élastiques s'il n'y a pas de fractures préexistantes. Dans le cas contraire, le phénomène de décompression superficielle permettra d'ouvrir les fractures (horizontales principalement) existantes.

Ce phénomène sera d'autant plus net dans les zones très fracturées, où l'énergie sera peu absorbée par déformation élastique mais plus volontiers par le rejeu et l'ouverture des fractures existantes.

La décompression superficielle, bien qu'étant un phénomène uniforme qui apparaît présentant au voisinage de la surface topographique, ne fait qu'accentuer le caractère déjà favorable des zones fracturées, et accentue le contraste avec les zones qui le sont peu.

4 - DEVENIR DE LA FRACTURATION

Comme suite à l'étude de l'"avant" et du "pendant" de la fracturation, il nous faut étudier l'"après". En effet, après sa mise en place, la fracture est soumise à différents agents qui tendent à altérer la roche à son voisinage. Cette altération qui constitue un des éléments les moins maîtrisés par l'hydrogéologue, de par sa grande complexité, est pourtant l'une des principales causes d'échec des forages car elle induit le colmatage des fractures.

4.1 - PROCESSUS D'ALTERATION

Ils sont d'ordre chimique et/ou mécanique.

4.1.1 - ALTERATION CHIMIQUE

En circulant dans les fractures, l'eau dissout ou précipite certaines substances minérales. Il s'établit lentement un équilibre chimique entre eau et roche, qui est remis en cause lorsque varient les concentrations relatives (en l'un ou l'autre élément) de l'eau et de l'encaissant. Une eau faiblement minéralisée aura tendance à dissoudre et donc élargir les fractures, alors qu'une eau fortement minéralisée aura tendance à favoriser précipitation et cristallisation le long de la fracture, et donc à la colmater. Il est nécessaire de préciser qu'il faut distinguer minéral par minéral, une eau pouvant en théorie en dissoudre un pendant qu'elle en précipite un autre. Les cinétiques chimiques de ces réactions augmentent avec la pression et la température, par conséquent avec la profondeur.

4.1.2 - ALTERATION MECANIQUE

L'ensemble des processus d'altération d'ordre mécanique peuvent conduire à la formation, au transport et au dépôt de particules fines (de type argile essentiellement), le dépôt étant synonyme de colmatage.

4.1.2.1 - Broyage

Le long d'une faille, un déplacement relatif des compartiments induit un broyage (**fig. 32**) qui, dans un premier temps, augmente la densité de fracturation et la perméabilité, mais dans un second temps risque d'entraîner le colmatage des fractures ouvertes si les particules fines libérées s'accumulent, d'où une diminution possible de la perméabilité initiale.

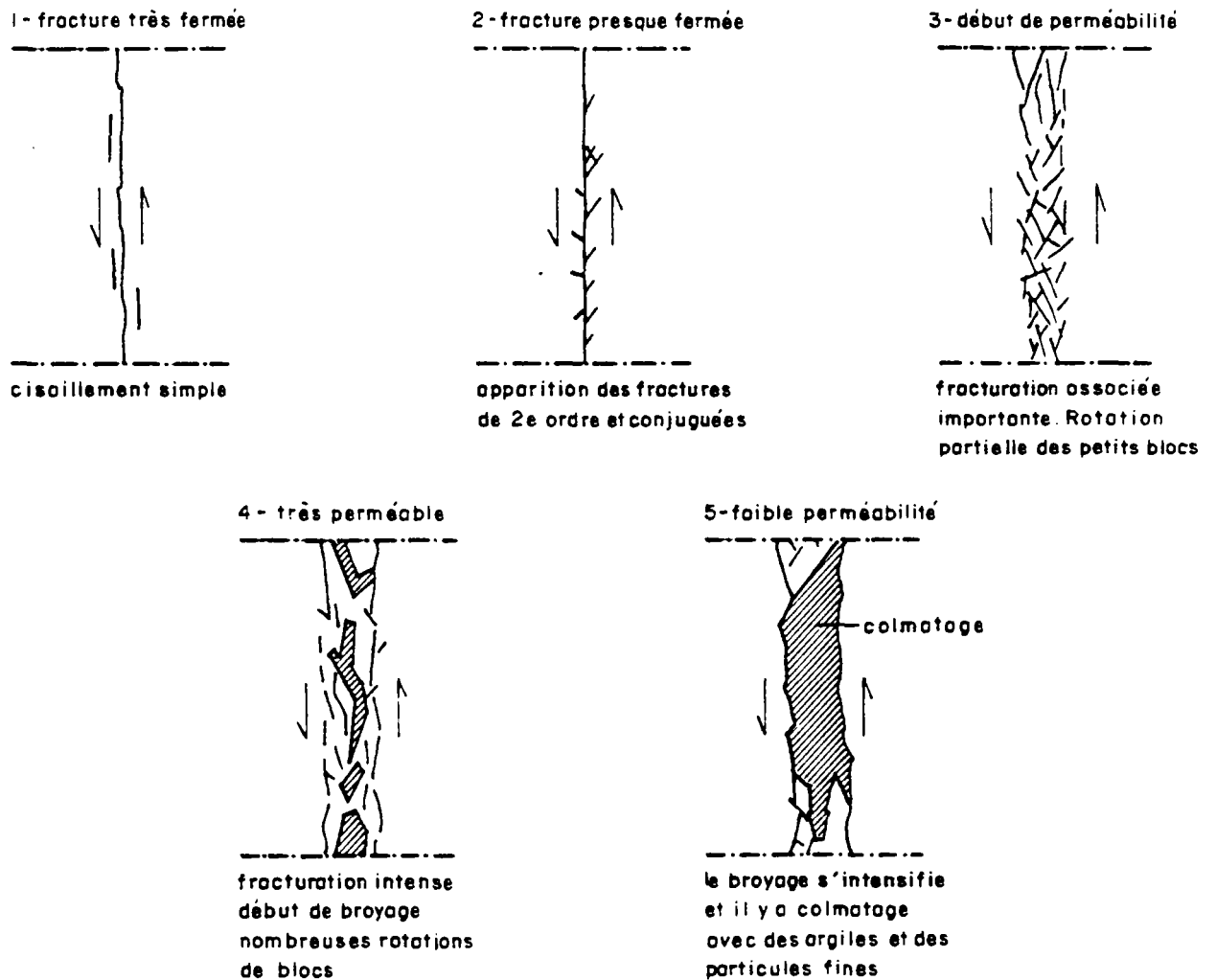


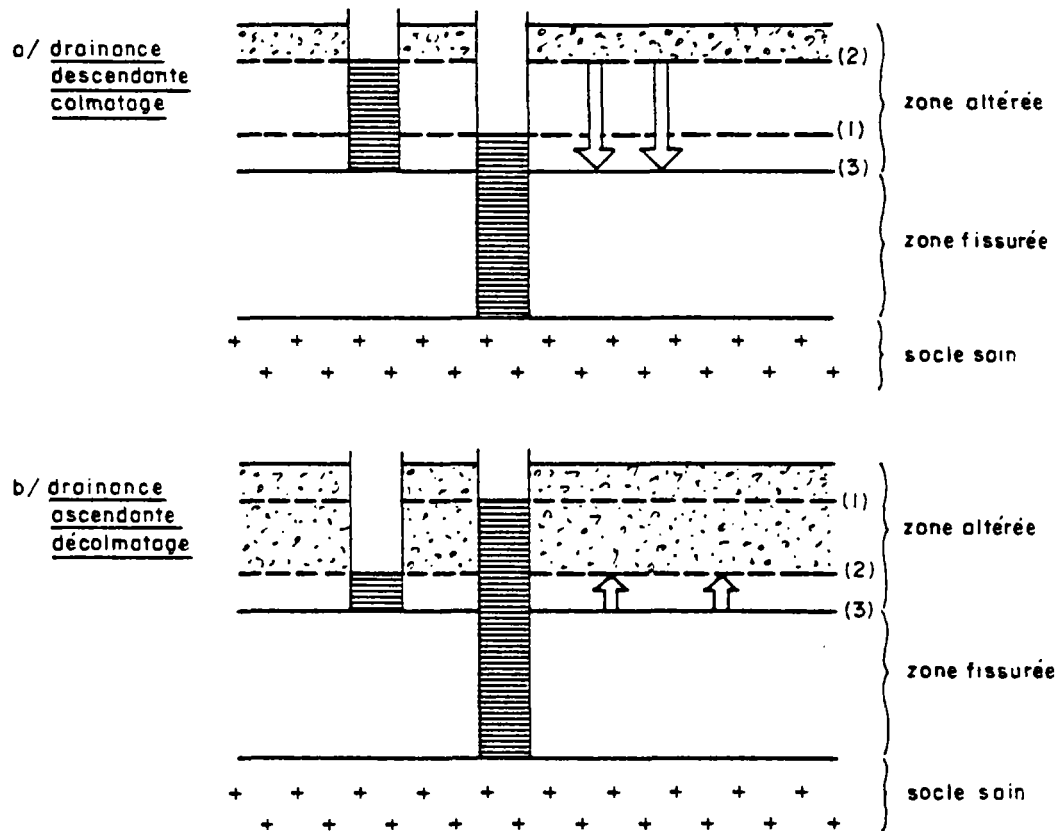
Figure 32 - Evolution de la perméabilité en fonction du développement des zones de cisaillement
(d'après Larsson, 1972, modifié)

4.1.2.2 - L'eau et ses effets mécaniques

- L'écoulement de l'eau dans une fracture a un triple effet : abrasion, transport et dépôt de particules. Ces 3 effets sont dépendants de la taille des particules (plus elles sont fines, plus elles seront transportées facilement), de la vitesse de l'écoulement (plus elle sera grande moins il y aura de dépôt), de l'ouverture de la fracture (plus elle est ouverte, moins il y a de dépôt) et enfin de l'état de surface de la fracture (plus elle sera rugueuse, plus il y aura de dépôt par effet de frottement). On peut a priori penser que les paramètres (taille des particules et état de la surface de la fracture) ne varient pas dans les relations talwegs-versants, et ne peuvent donc expliquer les différences observées dans le comportement hydrogéologique des talwegs et des versants. Il n'en va pas de même de l'ouverture des fractures et de la vitesse de l'écoulement. Cette dernière, pour des raisons gravitaires, est a priori plus importante dans les versants, ce qui fait que dépôt et colmatage tendent à se produire plutôt dans les talwegs.

. La pression hydrostatique, exercée par l'eau sur les surfaces ou plus exactement le gradient de pression, aura tendance à décolmater les fractures. Une telle pression peut être observable au niveau des talwegs, par mise en charge due à la nappe des versants (si elle existe), en surplomb, la condition aval étant donnée par la cote du talweg.

En fait, avec ses fractures verticales -le plus souvent fermées- et sa couche d'altérite, le talweg présente une perméabilité verticale relativement faible rendant facilement une nappe semi-captive (fig. 33a-b), et les positions respectives des différents niveaux piézométriques entraînent au niveau du vallon des possibilités de drainance ascendante ou descendante pouvant décolmater ou colmater cette zone.



Sens de la drainance

Zone non saturée

Socle sain = zone imperméable

Zone fissurée = zone faiblement perméable verticalement
zone à perméabilité horizontale forte

Zone altérée = zone semi-perméable

- (1) Niveau piézométrique de l'aquifère de la zone fissurée (il dépend de la nappe au niveau du versant jouant le rôle de Château d'eau)
- (2) Niveau piézométrique de l'aquifère de la zone altérée
- (3) Limite de la nappe semi-captive que constitue l'aquifère de la zone fissurée

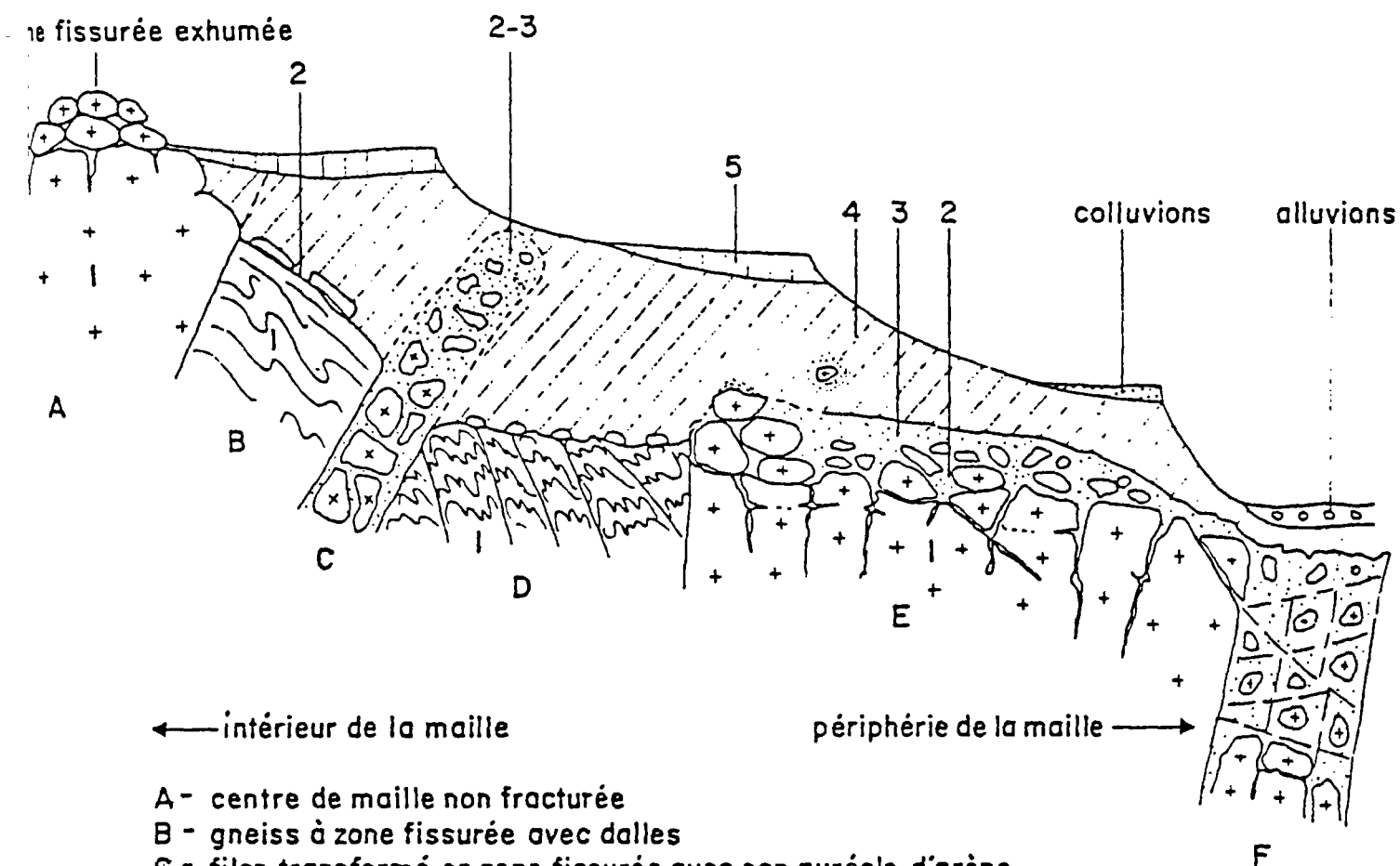
Figure 33 - Interprétation de l'aquifère au niveau du talweg selon le principe de l'aquifère bi-couche à nappe libre (altérites) et nappe semi-captive (zone fissurée)

Selon ce schéma, il apparaît que dans les zones de relief faible, le niveau piézométrique de l'aquifère de la zone fissurée ne pourra être que très bas, et les phénomènes de drainance seront toujours descendants entraînant un colmatage permanent.

Ecoulement et pression hydrostatique sont deux phénomènes complexes, aux paramètres difficilement quantifiables et qui se retrouvent au niveau des relations talwegs-versants.

En fait, le colmatage (ou le décolmatage) apparaît comme le résultat d'un équilibre qui peut dans certaines conditions être remis en question :

- une modification de l'état d'ouverture des fractures (par rejeu tectonique ou décompression superficielle) ; un **rétrécissement** des fractures favorisera le dépôt et donc le colmatage, alors qu'un **élargissement** aura l'effet inverse.
- une modification du niveau piézométrique de l'aquifère de la zone fissurée ; une **baisse** de ce niveau (causée par exemple par une diminution de la recharge de cette nappe) diminuera les possibilités de drainance ascendante et favorisera le colmatage.



- A - centre de maille non fracturée
 B - gneiss à zone fissurée avec dalles
 C - filon transformé en zone fissurée avec son auréole d'arène
 D - schistes - zone fissurée réduite à un pavage de petits blocs
 E - granite grenu - zone fissurée et arènes grenues bien développées
 F - zone broyée (pseudo filon)
 1 - roche mère saine ou fracturée
 2 - zone fissurée
 3 - arène grenue
 4 - altérite argileuse
 5 - cuirasse

Figure 34 - Morphologie du substratum, zone fissurée et arène grenue
 (In : Engalenc, 1978)

4.2 - EFFETS DE L'ALTERATION

Engalenc (1978) les a résumés pour le substratum (**fig. 34**).

On retiendra que les zones de fractures constituent des zones préférentielles d'altération, car on y retrouve les processus décrits au paragraphe 1.

La recherche des zones préférentielles d'altération (**fig. 35**) sera indirectement un moyen de recherche des failles. Outre cet effet révélateur de la fracture et celui de colmatage décrit avec le rôle de l'eau, les produits de l'altération assurent une part importante de la fonction capacitive de l'aquifère en milieu fissuré : les zones fracturées, où la couche d'altération est faible voire négligeable, sont souvent peu productives.

En réalité, dans le cadre de notre étude, l'altération et ses influences se révèlent des sujets trop vastes et trop complexes pour être plus abondamment développés. Pourtant, étant le dernier facteur chronologique -c'est-à-dire encore actif, une fois que ces **mouvements** d'ouverture et de fermeture des fractures ont disparu- influençant l'état d'ouverture des fractures, tout conduit à penser qu'il est fondamental.

Facteurs favorables	Facteurs défavorables
<ul style="list-style-type: none"> - Charge hydraulique - Ecoulement (abrasion) - Eau peu minéralisée - Couche altération (effet capacitif) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoulement (transport - dépôt) - Eau très minéralisée - Broyage intensif - Production de particules fines

Tableau 2- Essai de synthèse sur les facteurs influençant l'ouverture ou la fermeture des fractures par les processus d'altération

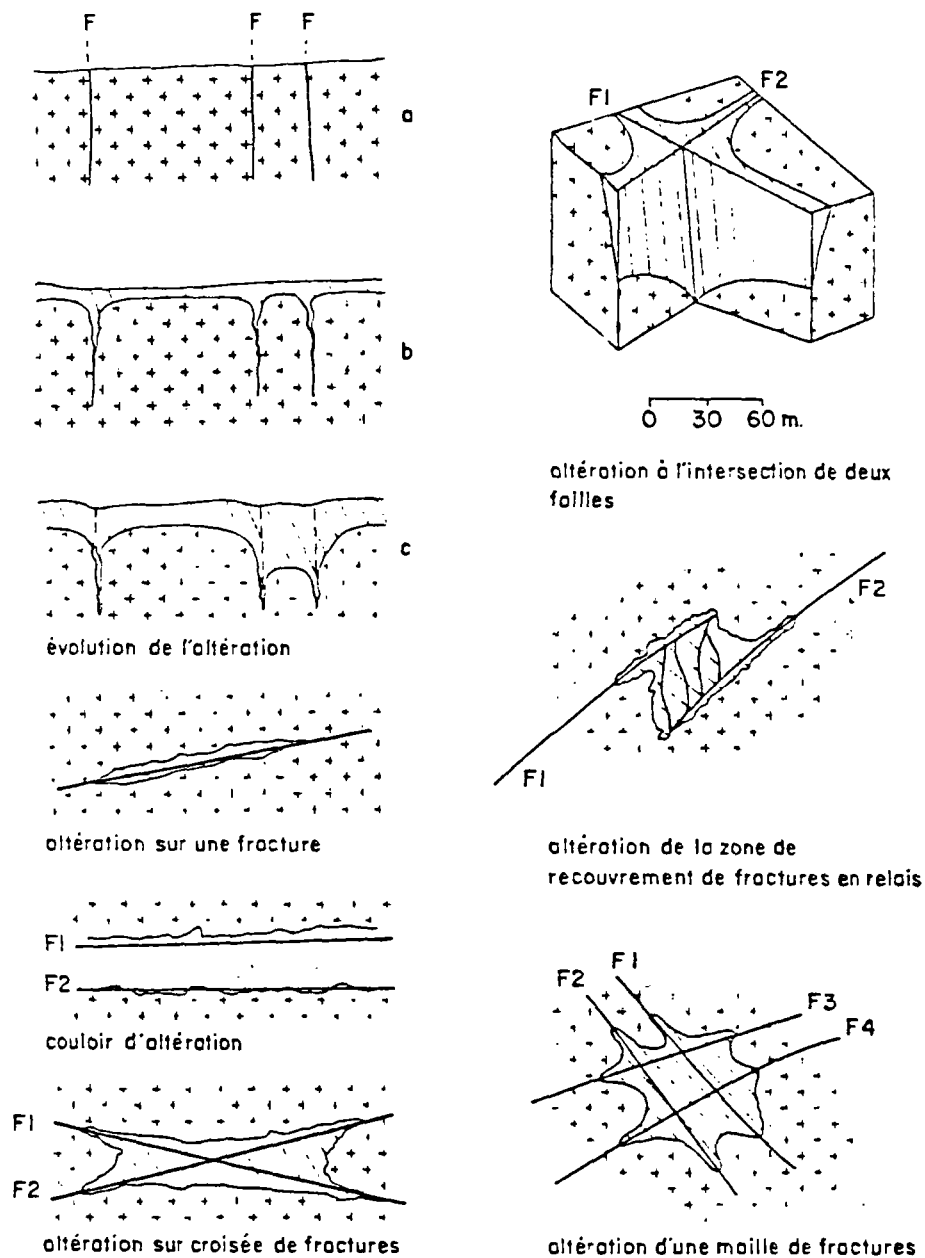


Figure 35 - Zones préférentielles de l'altération
(d'après Engalenc, 1978)

5 - UTILISATION DE LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE DANS LE CHOIX DES SITES DE FORAGES

5.1 - PROBLEMES LIES A LA DETERMINATION DU CARACTERE DE LA FRACTURATION

L'analyse d'un champs de fractures sur la base de photographies aériennes pose deux questions :

- comment repérer la fracturation de la zone de recherche d'eau ?
- comment prédire, même grossièrement, les potentialités des fractures repérées ?

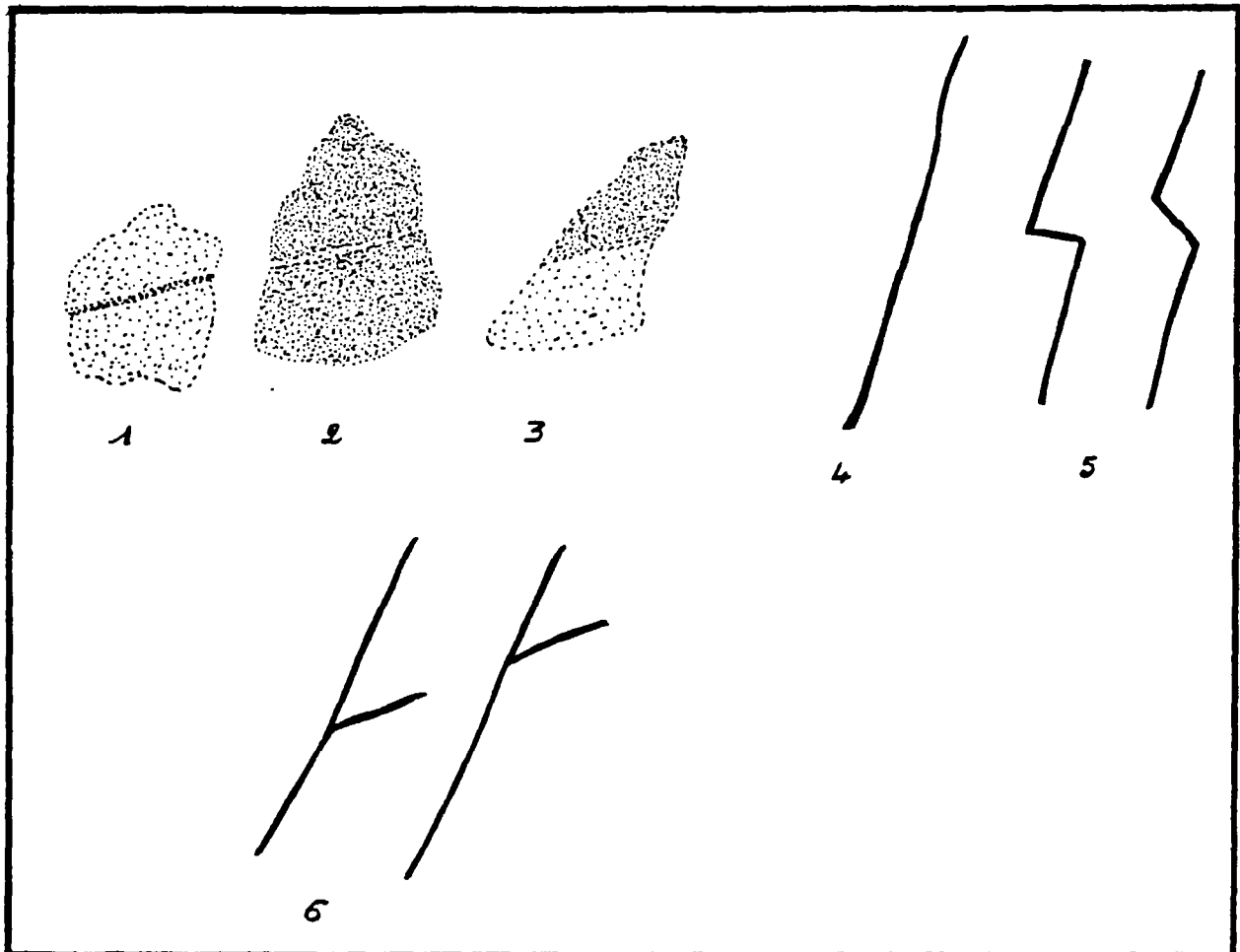
Si l'on s'en tient à la première question, sur les cartes de fracturation, chaque faille apparaît avec "le même poids", et il n'en est rien. Les linéaments identifiables sont le plus souvent des droites quelle que soit la morphologie, ce qui conduit à privilégier involontairement la présence et le rôle de fractures verticales. Or la plus simple visite d'une carrière en roche dure montre la grande diversité des systèmes fracturés et le rôle aquifère des fractures de toutes les orientations. Les conditions de formation et le devenir des fractures, distincts pour chaque famille d'entre elles, font qu'elles sont hydrogéologiquement favorables ou non. Ce sont ces caractères distinctifs que doivent s'efforcer de révéler des méthodes comme la photo-interprétation.

5.2 - INTERPRETATION DES CARTES DE FRACTURATION

L'interprétation de la photographie aérienne à des fins hydrogéologiques, est une technique qui se révèle précise rapide et bon marché, ce qui justifie son emploi systématique dans le cadre d'une stratégie de prospection de l'eau.

Elle repose sur l'analyse des caractères morphostructuraux : la fracturation induit une altération différente de l'encaissant et des lignes de discontinuité, ce qui les souligne et le réseau hydrographique s'inscrit préférentiellement sur de telles zones.

Les linéaments repérés sur l'image peuvent prendre de nombreux aspects (**fig. 36**) mais sont interprétés comme le reflet de la fracturation de la zone, et conduisent à une carte de fracturation (**fig. 37**).



- 1 - Ligne sombre dans une plage claire
- 2 - Ligne claire dans une place sombre
- 3 - Contact entre tonalités sombre et claire
- 4 - Portions rectilignes de cours d'eau
- 5 - Anomalies dans le cours d'eau
- 6 - Affluents alignés de cours d'eau

Figure 36 - Différents aspects du linéament sur l'image
(d'après Sawadogo, 1982)

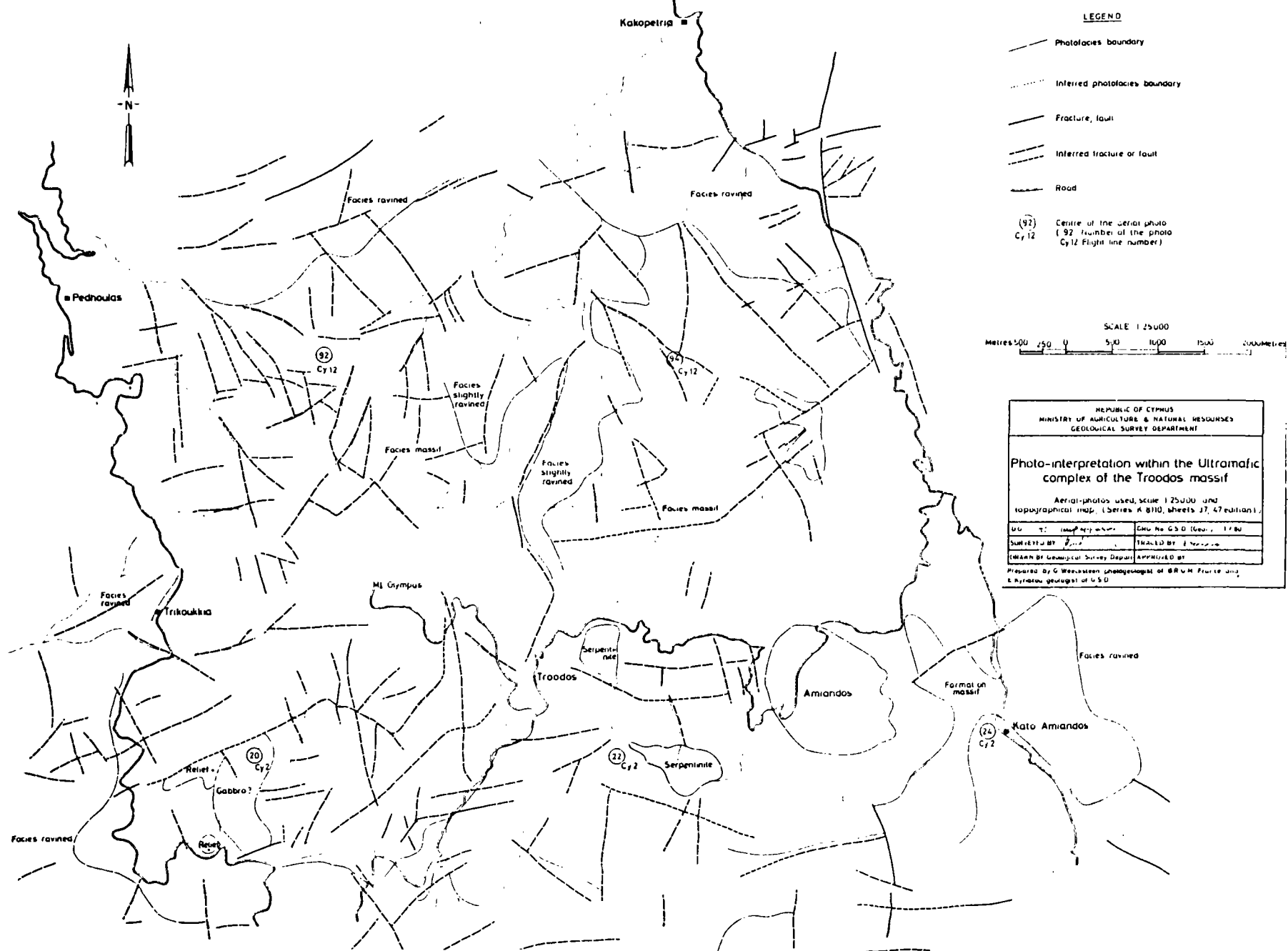
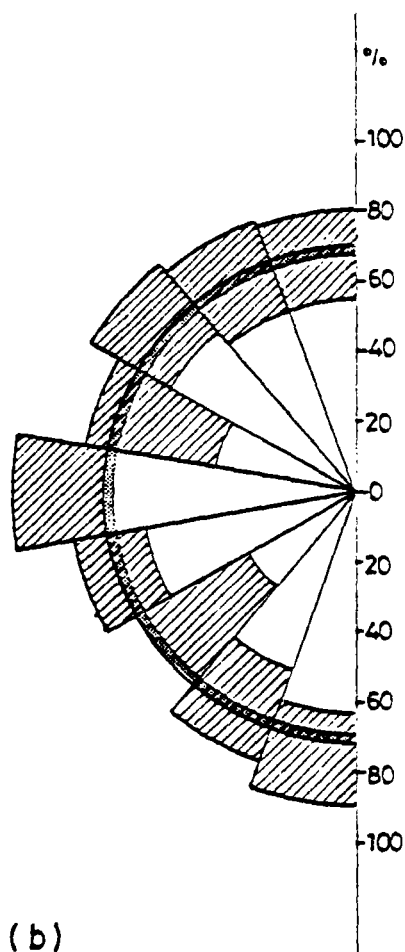
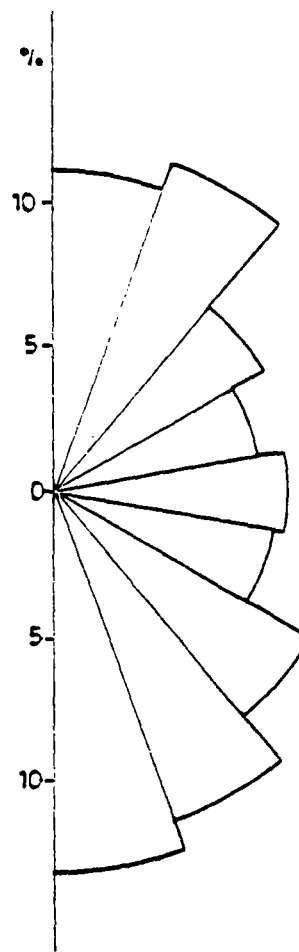


Figure 37 - Exemple de carte de fracturation obtenue par photographie aérienne



(b)

Probabilité d'obtenir le débit
-cible $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ en fonction
des directions de fracturation



(a)

Histogramme
circulaire
des fréquences

Figure 38 - Ensemble des forages de la région des savanes

Directions des linéaments sur lesquelles sont implantés les
forages (d'après BRGM 85 TGO 004 EAU (Campagne 5ème
FED))

5.2.1 - LONGUEUR DE LA FRACTURE

Plus une fracture est longue, plus elle a des chances d'être productive (tab. 3).

Longueur \ débit	0	< 500 l/h	< 1 m ³ /h	1 à 4	4 à 7	7 à 15	> 15	Classes des fractures
< 500 m	10 %	13,7	37,7	51,7	10,1	0	0	secondaires
0,500 - 1 km	8	14,8	29,6	46,9	10,8	5,4	0	kilométriques
1 à 2	4,3	6	14,5	61,2	13,7	10,3	0	
2 à 5	3,6	3,6	8,4	49,9	32,9	7,2	1,2	multikilométriques
5 à 10	0	2,4	4,8	47,8	33,8	12	0	
10 km	0	0	0	5,5	27,7	33,2	33	majeures

Tableau 3 - Débit des forages en fonction de la longueur des fractures (exprimés en %) (378 relevés et débits) (R.C.I. Boucle du Cacao)
(d'après Engalenc, 1982)

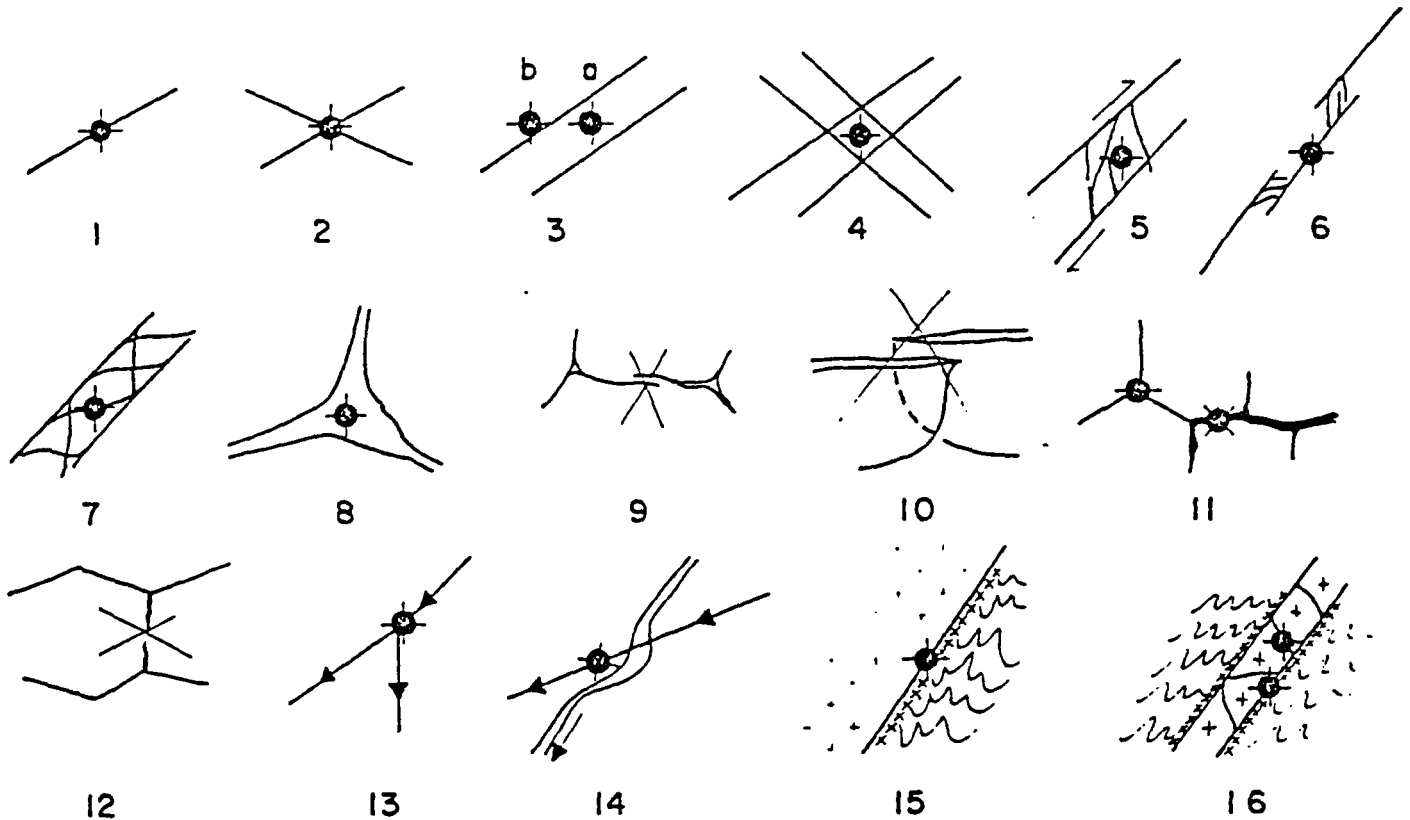
5.2.2 - DIRECTION DES FRACTURES

Si l'on connaît pour une région donnée le champ de contraintes, il faudra préférer les fractures parallèles à la direction de contrainte majeure, à celle qui lui sont perpendiculaires, les premières ayant tendance à s'ouvrir et les autres à se fermer (fig. 38). Cependant comme l'a montré l'étude sur la fracturation, il convient de rester prudent quant à la détermination de la contrainte majeure en un lieu donné.

5.2.3 - NOEUD DE FRACTURES

Au point de rencontre de deux ou plusieurs fractures, le cumul des contraintes provoque une destruction poussée de la roche qui favorise l'intervention des agents d'altération de la roche, conduisant le plus souvent à une perméabilité du massif.

L'interconnection de deux fractures et des sous-réseaux qui leurs sont associés augmente la ressource qui peut être mobilisée au point considéré.



1 = fracture kilométrique ou multikilométrique

2 = noeud de fractures

3 = couloir de fractures

(dans les granito-gneiss-a ;
dans les schistes-b)

4 = noeud de couloirs de fractures

5 = zone de recouvrement de fractures en relais

6 = fractures majeures en relais

7 = zone broyée (pseudo-dyke)

8 = centre d'étoile de fracturation

9 et 10 = éviter le raccordement de
deux branches filiformes

11 = branche courte avec angle plat
sur une fracture brisée

12 = pseudo fracture kilométrique
(alignement de deux fractures
avortées)

13 = divergence des écoulements

14 = fracture coupant un marigot

15 = contact géologique anormal

16 = limites d'un dyke ou d'un sill

Figure 39 - Positionnement des forages (d'après Engalenc, 1978)

5.2.4 - ANALYSE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Sous mêmes conditions climatiques et lithologiques, une forte altération traduit une fracturation ancienne. Il s'y associe une forte capacité si la zone saturée d'eau atteint le milieu altéré, mais la perméabilité peut être très modeste comparativement à celle de zones plus récemment fracturées. Les réseaux hydrographiques emprunteront préférentiellement les parcours les plus érodables donc a priori les plus altérés. Il faudra retenir par conséquent qu'un réseau n'est pas l'unique, ni parfois le meilleur révélateur de tracés perméables à travers un massif.

Débit	0	< 0,5 m ³ /h	< 1 m ³ /h	1 à 5 m ³	> 5 m ³ /
Granites	0	0	5 %	35 %	60 %
Schistes	0	0	0	51,8 %	48,2 %

Tableau 4 - Forages situés sur des noeuds de fracture (74 noeuds - Boucle du Cacao R.C.I.) (d'après Engalenc, 1982)

Une zone fracturée très altérée semble favorable pour deux raisons au moins : la première est que si la zone est fortement altérée c'est qu'elle est probablement fortement fracturée ; la seconde tient au rôle capacitif que joue la couche d'altérites. Au contraire, des zones où les fractures apparaissent comme trop nettes sont, pour des raisons opposées, a priori plus défavorables (fig. 39).

Prise séparément, chaque rivière est susceptible de révéler, par son tracé, une anomalie, une discontinuité, une faille. D'après Engalenc, 1982....

- "un chevelu hydrographique est d'autant plus dense que le terrain qui le supporte est imperméable (schistes, dolérites) ;
- tout tracé anguleux signifie une faible épaisseur d'altération ;
- un réseau hydrographique orthogonal traduit un réseau de diaclases ouvertes, courtes et superficielles ;
- un réseau polygonal indique une zone d'interfluve à possibilités hydrauliques limitées,
- sur roches foliées, les fractures reprennent les linéations ; les rivières ont un allongement caractéristique avec des cours parallèles ;
- les cours d'eau, sinueux traduisent des couloirs altérés alors que, s'ils sont droits, ils soulignent des fractures nettes et en principe moins intéressantes (fig. 40)".

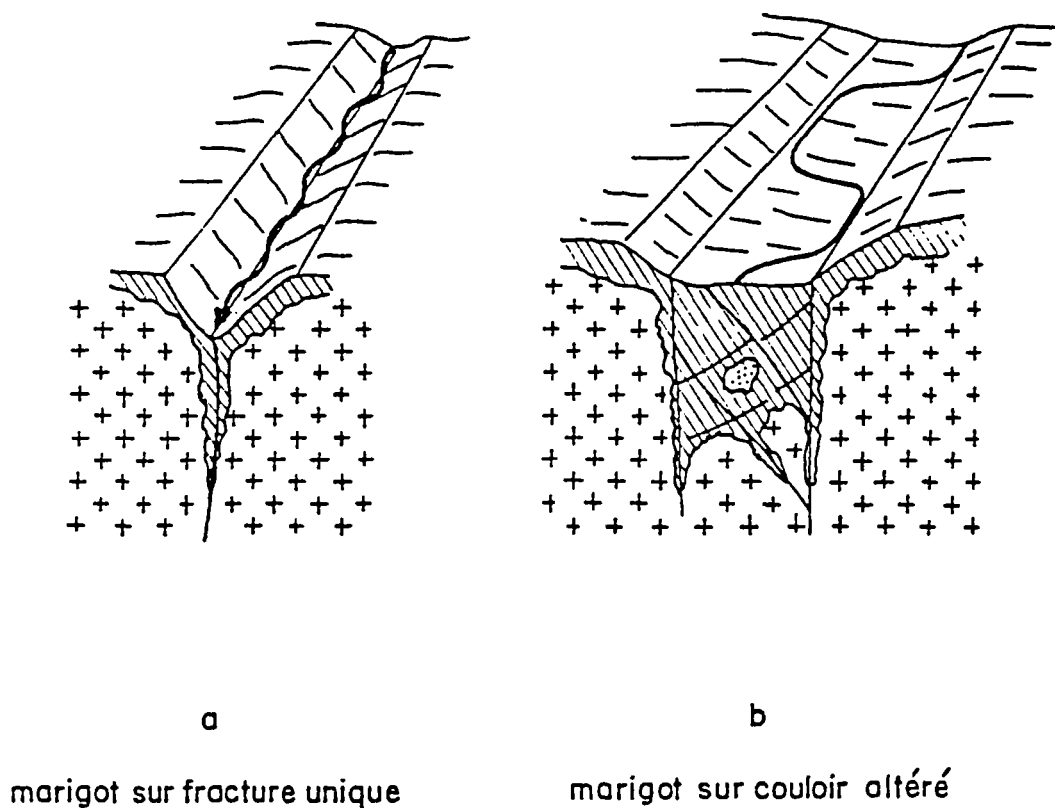


Figure 40 - Morphologie d'un marigot en fonction du type de fracturation
(d'après Engalenc, 1975)

Howard (1967) a ainsi pu classer les réseaux de drainage et leur donner une signification géologique ou tectonique (tab. 5 ; fig. 41, 42, 43, 44).

SIGNIFICANCE OF BASIC AND MODIFIED BASIC DRAINAGE PATTERNS

Basic	Significance	Modified Basic	Added Significance or Example
Dendritic ¹	Horizontal sediments or beveled, uniformly resistant, crystalline rocks. Gentle regional slope at present or at time of drainage inception. Type pattern resembles spreading oak or chestnut tree.	Subdendritic Pinnate ² Anastomotic ¹⁰ Distributary (Dichotomic) ¹¹	Minor secondary control, generally structural Fine-textured, easily erodable materials Floodplains, deltas, and tidal marshes. Alluvial fans and deltas
Parallel ³	Generally indicates moderate to steep slopes but also found in areas of parallel, elongate landforms. All transitions possible between this pattern and type dendritic and trellis.	Subparallel ¹² Colinear ¹³	Intermediate slopes or control by subparallel landforms Between loess, loess and sand ridges
Trellis ⁴	Dipping or folded sedimentary, volcanic, or low-grade metasedimentary rocks; areas of parallel fractures; exposed lake or sea floor ribbed by beach ridges. All transitions to parallel pattern. Type pattern is regarded here as one in which small tributaries are essentially same size on opposite sides of long parallel subsequent streams.	Subtrellis Directional Trellis Recurved Trellis Fault Trellis ¹⁴ Joint Trellis	Parallel elongate landforms Gentle homoclines. Gentle slopes with beach ridges. Plunging folds. Branching, converging, diverging, roughly parallel faults Straight parallel faults and or joints.
Rectangular ⁵	Joints and/or faults at right angles. Lacks orderly repetitive quality of trellis pattern; streams and divides lack regional continuity.	Angulate ¹⁵	Joints and/or faults at other than right angles. A compound rectangular-angulate pattern is common.
Radial ⁶	Volcanoes, domes, and erosion residuals. A complex of radial patterns in a volcanic field might be called multi-radial.	Centripetal ¹⁶	Craters, calderas, and other depressions. A complex of centripetal patterns in area of multiple depressions might be called multi-centripetal.
Annular ⁷	Structural domes and basins, diatremes, and possibly stocks.		Longer tributaries to annular subsequent streams generally indicate direction of dip and permit distinction between dome and basin.
Multibasinal ⁸	Hummocky surficial deposits; differentially scoured or deflated bedrock, areas of recent volcanism, limestone solution, and permafrost. This descriptive term is suggested for all multiple-depression patterns whose exact origins are unknown.	Glacially Disturbed Karst Thermokarst ¹⁷ Elongate Bay ¹⁸	Glacial erosion and/or deposition Limestone. Permafrost Coastal plains and deltas
Contorted ⁹	Contorted, coarsely layered metamorphic rocks. Dikes, veins, and migmatized bands provide the resistant layers in some areas. Pattern differs from recurved trellis (Fig. 2, H) in lack of regional orderliness, discontinuity of ridges and valleys, and generally smaller scale.		The longer tributaries to curved subsequent streams generally indicate dip of metamorphic layers and permit distinction between plunging anticlines and synclines.

¹ Described by Dutton (1882, p. 6, 62, 63) and applied as a drainage term at least as early as 1898 (Russell, p. 204). Classified as a basic pattern by Zernitz (1932, p. 499).

² Zernitz (1932, p. 510).

³ Willus (1895, p. 186).

⁴ First used in modern sense by Zernitz (1932, p. 503), but the pattern was recognized much earlier (Daubrée, 1879, p. 357-375; Kempf, 1894, p. 438-440; Hobbs, 1904, pl. 47).

⁵ Radial drainage is described and illustrated in Jaggar (1901, p. 174, pl. XVIII) and is referred to by Dake and Brown (1925, p. 134).

⁶ Jaggar (1901, p. 277) refers to annular drainage, but Zernitz (1932, p. 507) may have been the first to apply the name to the drainager pattern.

⁷ The descriptive term "multibasinal" is used here as a substitute for generic terms such as "kettlehole" and "sinkhole" which have been applied to patterns characterized by numerous depressions. The term "poly basin" (Parvis, 1950, p. 57) would have been appropriate had it not been restricted to the area of the Ogallala Formation in the Great Plains and specifically related to the presence of an impervious substratum.

⁸ Von Engel (1942, p. 113, 336).

⁹ Zernitz (1932, p. 512).

¹⁰ Described as a pattern by Zernitz (1932, p. 514). The descriptive adjective "anastomosing," however, had been used long prior to 1932. Johnson (1932, p. 497) restricted the term "braided" to the interlacings of an individual stream.

¹¹ Parvis (1950, p. 41) attributed the term "dichotomic" to Finch and Trewartha (1942). The writer was unable to locate the term in the 1942 reference or in the first edition of their *Elements of Geography*, but may have overlooked it. Distributaries are mentioned on pages 307, 342, and 355 of the 1st ed., 1936, and on pages 290, 326, and 340 of the 2d ed., 1942.

¹² Zernitz (1932, p. 518).

¹³ Zernitz (1932, p. 519).

¹⁴ Dake and Brown (1925, p. 191).

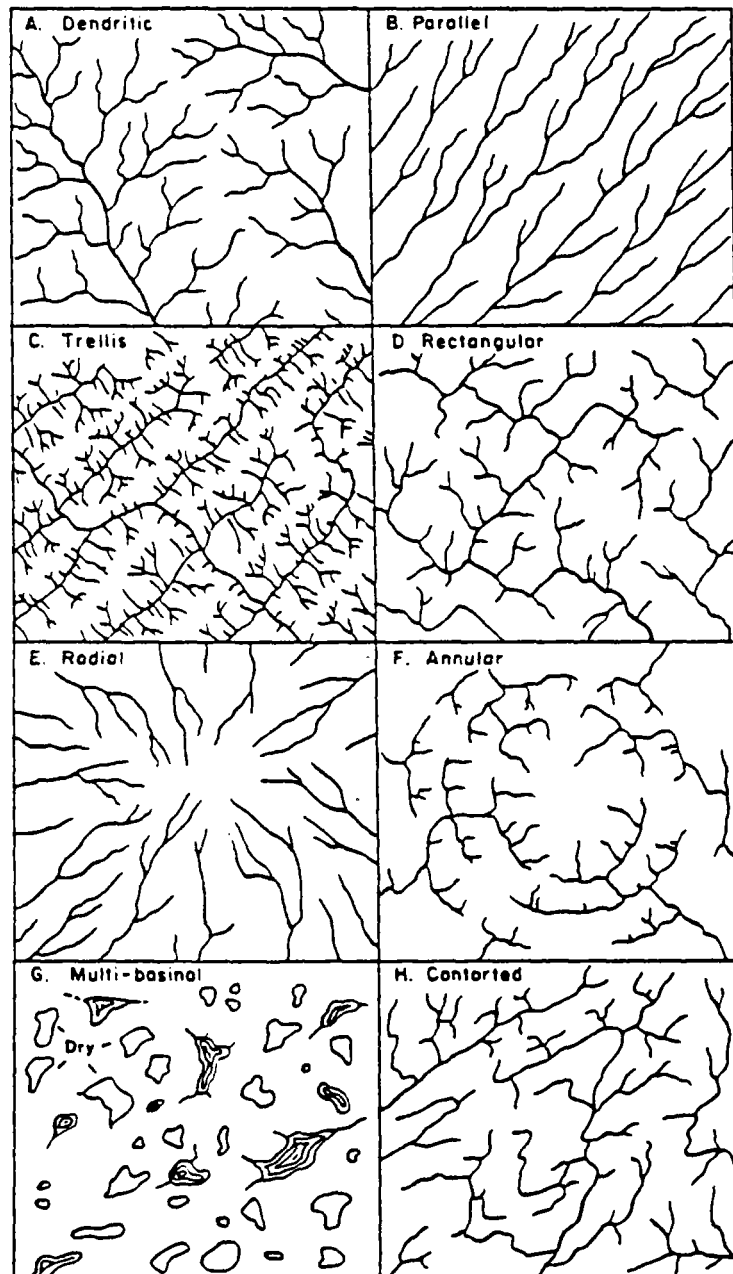
¹⁵ Zernitz (1932, p. 517).

¹⁶ Davis (1889, p. 249).

¹⁷ Muller (1943), p. 50.

¹⁸ Parvis (1950), p. 43.

Tableau 5 - Signification de la géométrie du réseau hydrographique de base
(d'après Howard, 1967)



-Basic drainage patterns. Each pattern occurs in a wide range of scales. Examples shown may be regarded as types. Dendritic pattern resembles spreading branches of oak or chestnut tree with tributaries entering at wide angles. In trellis pattern, small tributaries to long parallel subsequent streams are about same length on both sides of subsequent streams.

Figure 41 - Type de géométrie de base du réseau hydrographique
(d'après Howard, 1967)

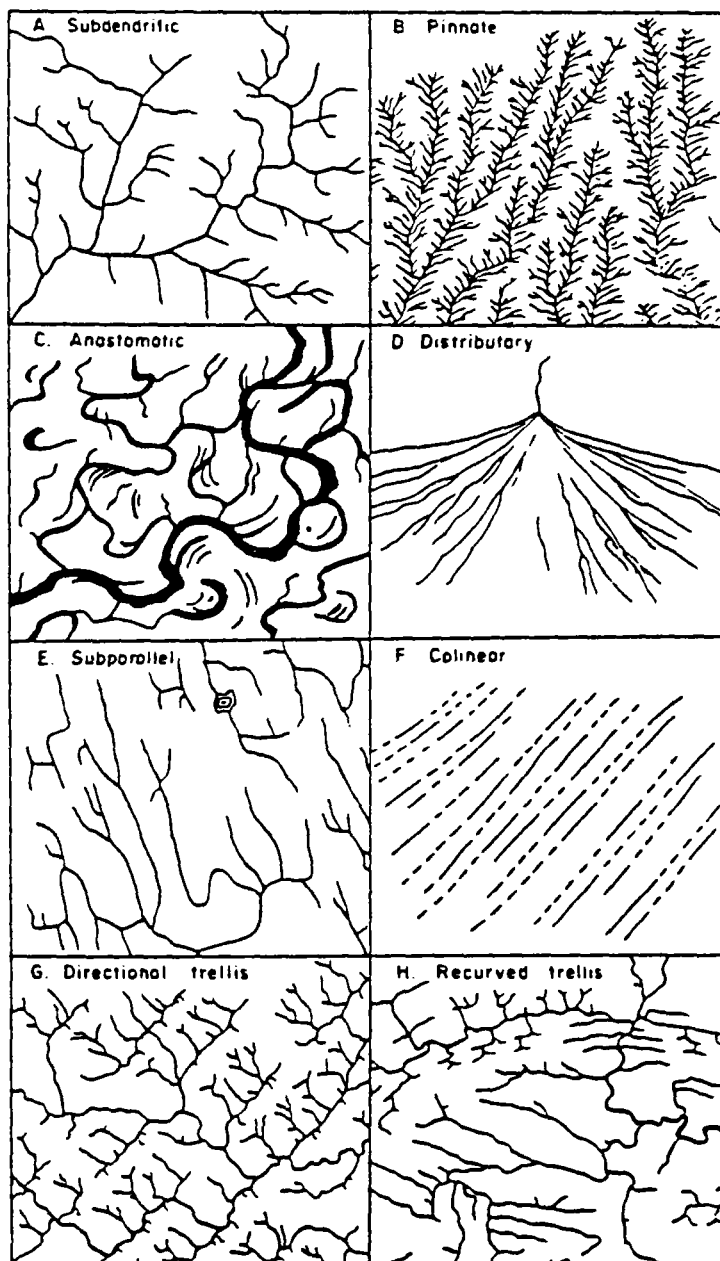
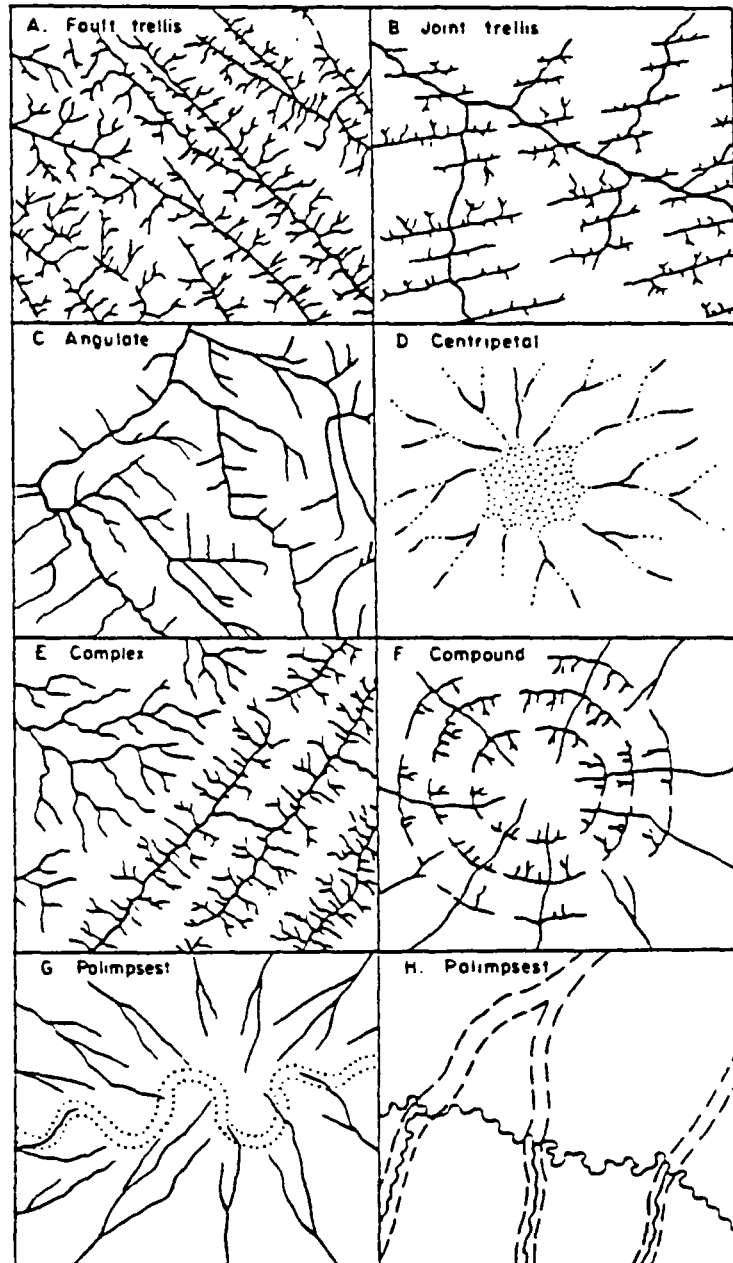
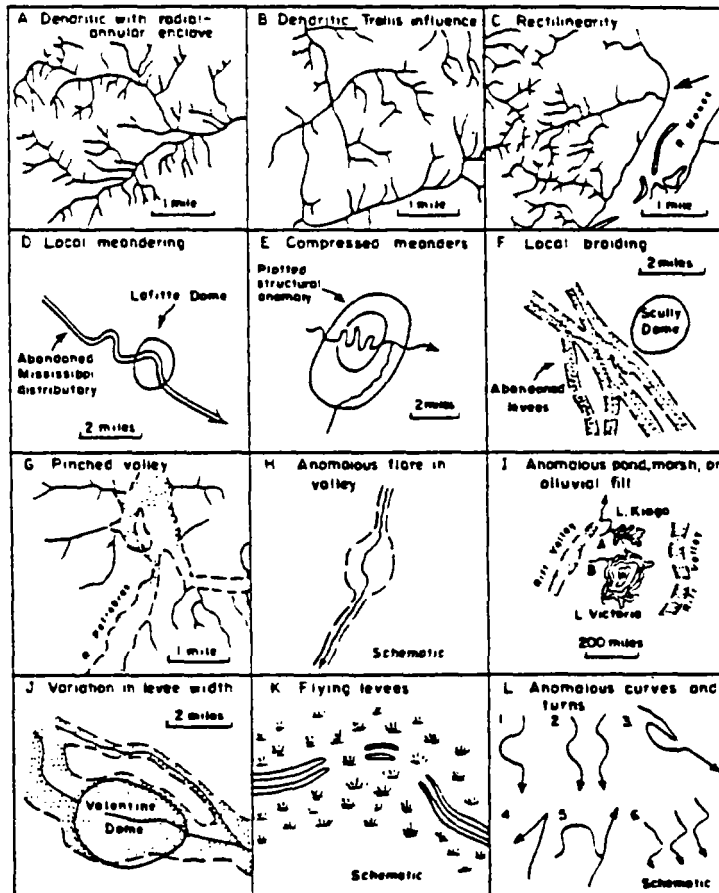


Figure 42 - Type de modification de base du drainage
(d'après Howard, 1967)



—Modified basic patterns (A-D); complex, compound, and palimpsest patterns (E-H)
Each pattern occurs in a wide range of scales.

Figure 43 - Type de modification du drainage
(d'après Howard, 1967)



—Examples of drainage anomalies. A, B, C, G—Amazon basin; E—Kent County, Texas, after DeBlieux and Shepherd, 1951; D, F, J—Louisiana, after DeBlieux, 1949; K—Louisiana, generalized after DeBlieux, 1949; I—East Africa, after Holmes, 1965; H, L—generalized examples.

Figure 44 - Exemples d'anomalies de drainage
(d'après Howard, 1967)

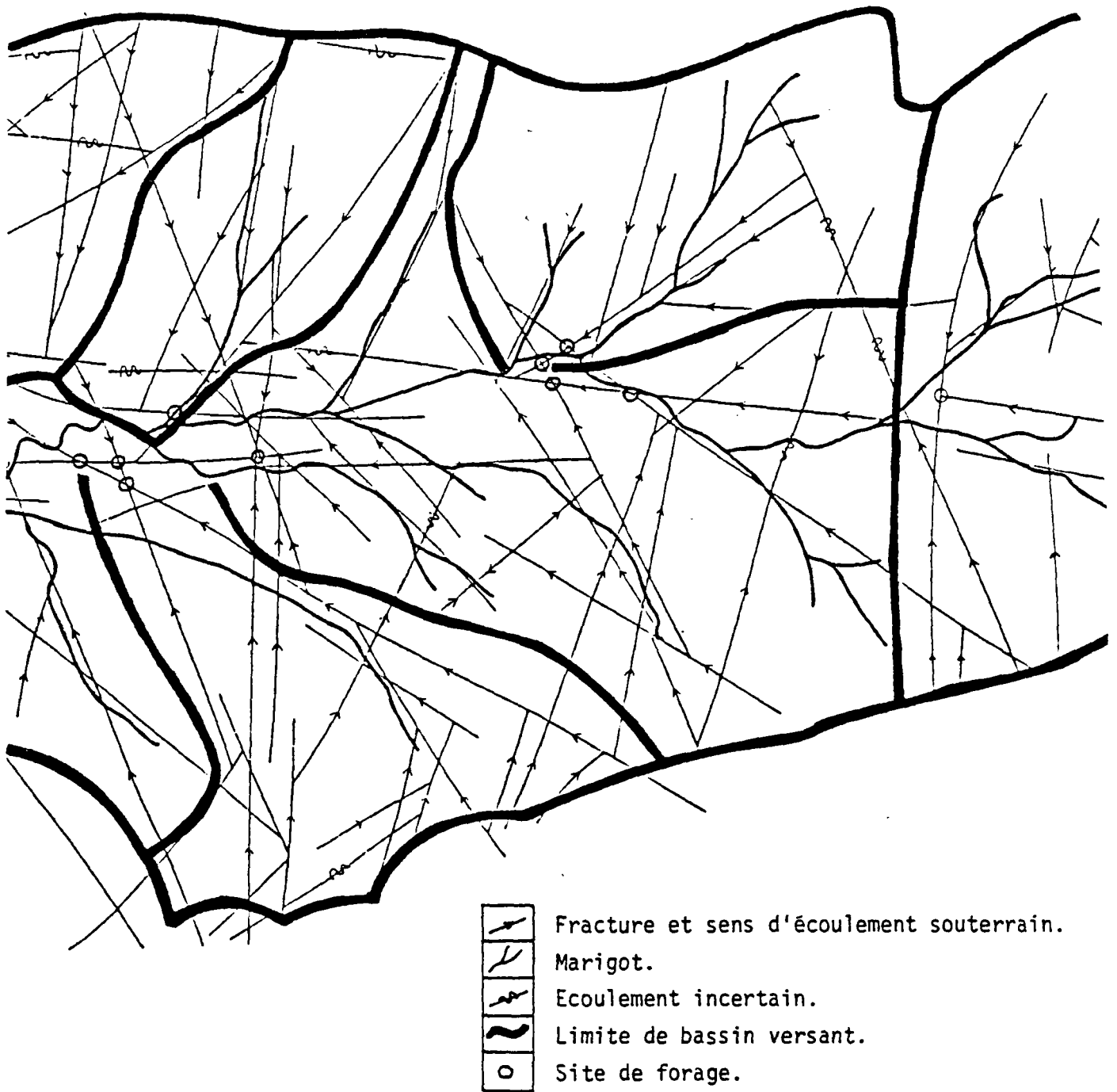


Figure 45 - Positionnement des forages (Bérard, 1977)
(e = 1/25 000)

6 - ESSAI D'APPLICATION PRATIQUE

A titre d'exercice, les deux exemples ci-après, qui proviennent d'études déjà conclues, ont été examinés sous l'angle de l'apport d'informations que procure l'observation du réseau de fractures sous l'angle de :

- ses dimensions,
- sa structure,
- l'altération liée.

6.1 - EXEMPLE DU TOGO, 5ème CAMPAGNE D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE FINANCEE PAR LE FONDS EUROPEEN DE DEVELOPPEMENT

L'analyse globale des forages a été faite de manière fort détaillée en fonction de nombreux paramètres (géologie, épaisseur de la couche d'altérites, profondeur du forage, direction des linéaments choisis pour forer...) dans le rapport BRGM 85 TGO 004 EAU (fig. 45).

Disposant des cartes de fracturation pour chaque village (fig. 46), des résultats détaillés pour chaque forage (fig. 47), à la suite de discussions avec des hydrogéologues de terrain, on peut avancer quelques hypothèses concernant les forages non productifs de cette campagne (79 sur un total de 344).

6.1.1 - PROXIMITE FORAGE-VILLAGE

C'est maintenant un leitmotiv que de rappeler le caractère contraignant de la proximité imposée forage-village qui ne permet pas toujours de privilégier le caractère favorable d'un site, mais ce fait a sa réalité et il faut le rappeler. La contrainte de proximité introduit un régime d'échec qui tient à un effet d'échelle, la zone que l'on se donne à prospecter peut être trop petite par rapport à la "maille" du réseau fracture en zone cratonique.

6.1.2 - ZONES FAVORABLES ET ZONES DEFAVORABLES

Convenons comme définition d'une zone le village où sont réalisés les forages. On constate que pour cette campagne du 5ème FED au Togo, le débit moyen par forage, dans les villages où tous les forages sont positifs, est de 5,8 m³/h, alors qu'il n'est que de 1,8 m³/h dans les villages où il y a au moins 2 forages négatifs. Dans ces mêmes villages, le débit moyen ne serait que de 3 m³/h si l'on n'y avait réalisé

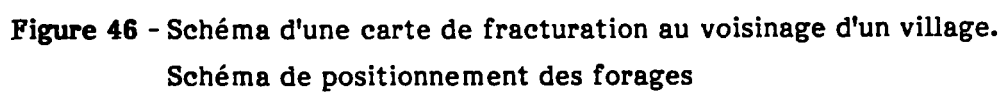


Figure 46 - Schéma d'une carte de fracturation au voisinage d'un village.
Schéma de positionnement des forages

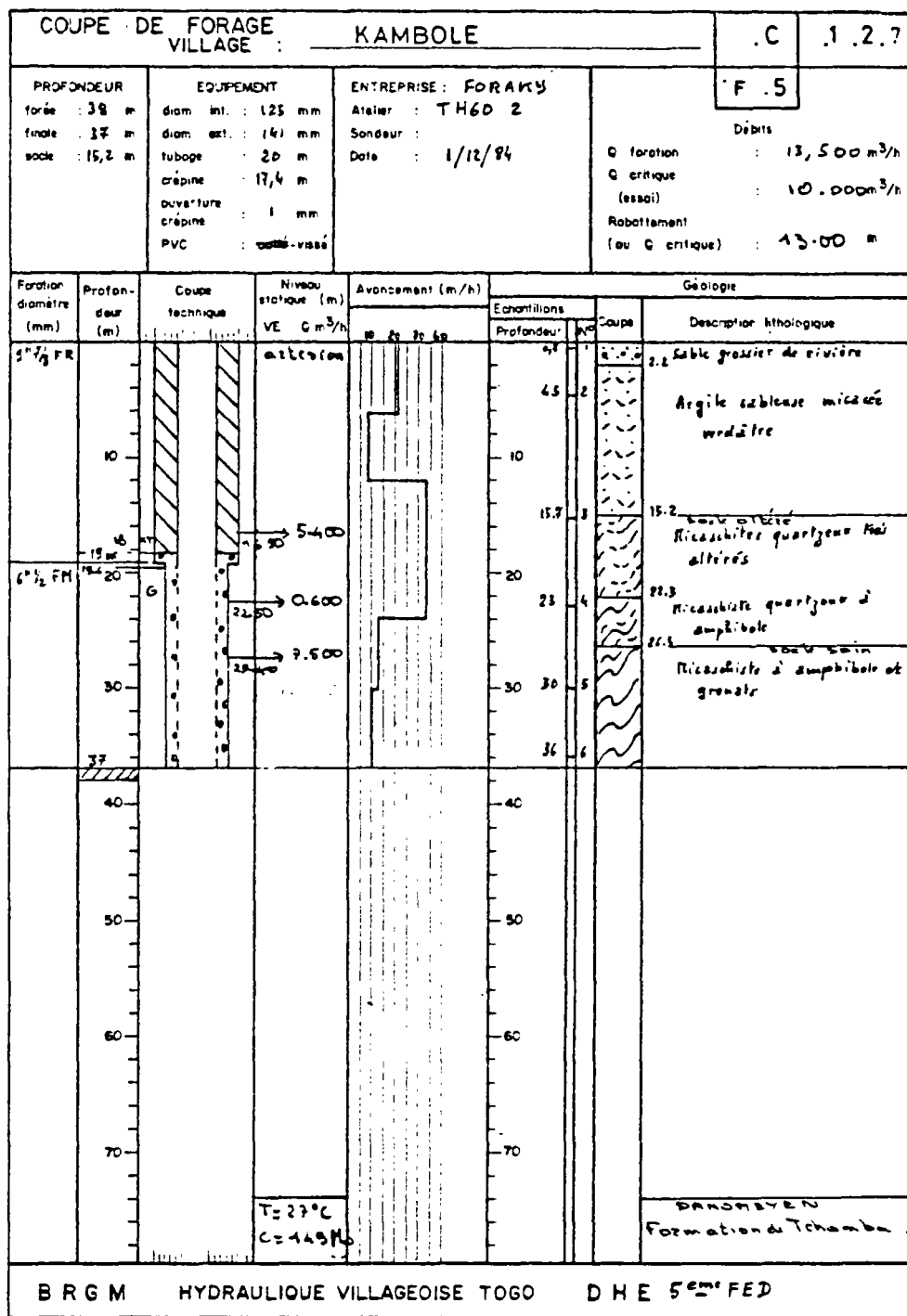
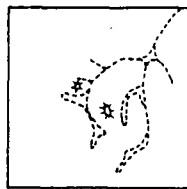


Figure 47 - Exemple d'une coupe de forage

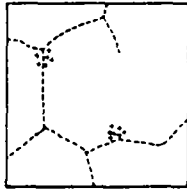
**RESEAU TYPE 1**

Réseau hydrographique d'allure courbe ou arrondie ("choux fleur") délimitant des interfluvies larges, arrondis ou allongés.

Thalweg à fond plat, nombreuses zones inondables.

— d'après carte topographique 1/200 000 de Boundiali.

fig. 48-a

**RESEAU TYPE 2**

Réseau polygonal à 3 directions proches de 120° avec tronçons rectilignes de plusieurs kilomètres. Aspect "nid d'abeille" ou panneaux anguleux allongés.

— calqué sur photo aérienne n° UNDP 45/192.1/50 000.

fig. 48-b

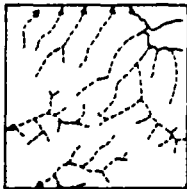
**RESEAU TYPE 3**

Réseau rectiligne à 2 directions orthogonales ou obliques, avec petits affluents courts.

Inselbergs à parois verticales.

— calqué sur photo aérienne n° 72 CIV 026/500/039.1/50 000.

fig. 48-c

**RESEAU TYPE 4 : ZONE GEOLOGIQUE DU BOUCLIER LIBERIEN**

Le bouclier libérien formé essentiellement de roches gneissiques, comprend également des granites, des granito-gneiss et des roches vertes.

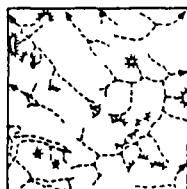
Le réseau hydrographique de cette zone est très varié, le plus souvent à tendance polygonale, il est parfois orthogonal ou encore présente de larges plages avec des marigots parallèles notamment à proximité des grands marigots.

— d'après carte topographique 1/200 000 d'Odienne.

fig. 48-d

RESEAU TYPE 5 : ZONE FORESTIERE

La couverture forestière ne permet pas de percevoir sur photos l'allure du réseau hydrographique.

**RESEAU TYPE 6 : ZONE INDETERMINEE SCHISTES GRANITE**

Réseau mixte d'allure parallèle ou courbe avec présence de quelques zones inondables et de lambeaux de cuirasse sur l'interfluvie.

— d'après carte topographique 1/200 000 de Korhogo.

fig. 48-e

**RESEAUX TYPE 7 et 8 : SCHISTES**

Nombreux affluents parallèles orientés sur une direction principale de fracturation.

La schistosité est parfois soulignée par de petits affluents rectilignes.

La présence de quelques affluents à allure courbe indique soit une plus forte épaisseur d'altération, soit une fracturation moins importante.

— d'après cartes topographiques 1/200 000.

fig. 48-f

**RESEAU TYPE 9 : ROCHES VERTES**

Réseau digité très dense et ramifié sur le pourtour des collines, vite regroupé à l'aval pour franchir les glacis cuirassés périphériques.

— d'après cartes topographiques 1/200 000.

fig. 48-g

2.1 — Le réseau de type 1 (fig. 1) est un réseau hydrographique non orienté, d'allure courbe, avec des bas-fonds larges, aux confluent arrondis, délimitant des mailles larges, arrondies ou allongées. L'aspect en «choux-fleurs» de ce réseau est particulièrement frappant sur photographies de satellite.

Dans ce réseau qui se développe principalement sur granite, mais parfois également sur diorites et amphibolites, l'épaisseur moyenne d'altération mouillée est de 20 à 25 m.

2.2 — Le réseau de type 2 (fig. 2) présente des mailles polygonales dues à 3 directions majeures orientées à 120°, donnant un aspect en «nids d'abeille», parfois allongés, mais toujours délimités par des bas-fonds étroits et rectilignes.

Dans ce type de réseau que l'on rencontre sur granites, granito-gneiss et migmatites, la fracturation observable sur photo est peu importante à l'intérieur des mailles, elle se limite généralement aux marigots en étoile limitant les mailles. L'altération, mince, y est de 15 m en moyenne.

2.3 — Le réseau de type 3 (fig. 3) se définit comme un réseau rectiligne à deux directions orthogonales ou obliques limitant des mailles en parallélogrammes allongées.

Ce réseau se développe comme le précédent sur granite, granito-gneiss et migmatites, la présence fréquente d'inselbergs étant à noter. L'épaisseur moyenne d'altération se situe entre 15 et 20 m.

2.4 — Le réseau de type 4. Il s'agit d'un réseau à tendance générale parallèle, avec parfois présence de formes rappelant les types 2 et 3.

Ce réseau est surtout caractérisé par son occurrence principale sur les gneiss du bouclier guinéo-libérien de l'ouest de la Côte-d'Ivoire, du Libéria et de la Guinée. L'altération est épaisse de 20 à 25 m en moyenne comme dans le réseau de type 1.

2.5 — Le réseau de type 5 caractérise la zone forestière, où le réseau hydrographique est mal visible. Son aspect mamelonné est cependant caractéristique. Il se développe sur granites, granito-gneiss, migmatites. L'épaisseur altérée moyenne dépasse 25 m.

2.6 — Le réseau de type 6 est un réseau hydrographique à éléments parallèles, soulignant la schistosité, il caractérise les régions de schistes birrimiens. L'épaisseur des altérations dépasse couramment 50 m et atteint parfois 100 m.

2.7 — Le réseau de type 7 enfin, se rencontre sur des roches vertes affleurant en collines. Le réseau digité, dense et très ramifié sur le pourtour des collines se simplifie à l'aval pour franchir le glacis périphérique, dans ce type de réseau l'altération (et la fissuration) est très peu développée. Les échecs y sont nombreux, mais ce type de réseau est très peu répandu.

Figure 48 - Description des principaux types de réseaux hydrographiques

que les forages positifs. Entre 5,8 m³/h et 3 m³/h, il apparaît que certaines zones sont plus défavorables que d'autres.

Sur un socle cratonique, la densité moyenne de linéaments par unité de surface peut être faible. La zone d'intérêt autour d'un village peut être suffisamment réduite pour ne pas permettre qu'on y observe un nombre de linéaments représentatif de cette densité moyenne. Sur deux zones, l'une pourra comporter une densité de fracturation importante et l'autre n'en comporter qu'une faible. La première sera potentiellement plus favorable que la seconde, par le petit nombre de sites qu'elle offrira, autrement dit par le fait que deux forages ne seront pas indépendants entre eux : si le premier est négatif, le second, sur le même linéament risque de l'être aussi.

Notons par ailleurs que la plupart des échecs correspondent à des forages positionnés en extrémité de linéament correspondant dans bien des cas à une fermeture de fracture.

6.2 - EXEMPLE D'UTILISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE : REGION COTONNIERE - COTE D'IVOIRE

L'expérience prouve que la productivité des forages est souvent corrélée à l'épaisseur d'altération. Or il est permis de supposer que l'épaisseur d'altération doit se marquer dans le modelé géomorphologique, et conditionner notamment l'allure et la forme des réseaux hydrographiques. Dans cet exemple, inspiré d'une étude réalisée par Bourgueil, Camerlo, Fahy, Vailleux (1981), un essai de classification du réseau hydrographique de la région cotonnière en Côte d'Ivoire a été réalisé afin d'essayer de prévoir les zones d'altération homogène.

6.2.1 - DESCRIPTION DES PRINCIPAUX TYPES DE RESEAUX HYDROGRAPHIQUES

6.2.1.1 - Le réseau de type 1 (fig. 48-a)

"C'est un réseau hydrographique non orienté, d'allure courbe, avec des bas-fonds larges, aux confluent arrondis, délimitant des mailles larges, arrondies ou allongées. L'aspect en "chou-fleur" est particulièrement frappant sur photographies de satellite.

Dans ce réseau, qui se développe principalement sur granite, mais parfois également sur diorites et amphibolites, l'épaisseur moyenne d'altérites mouillées est de 20 à 25 m".

6.2.1.2 - Le réseau de type 2 (fig. 48-b)

"Il présente des mailles polygonales dues à 3 directions majeures orientées à 120°, donnant un aspect en **"nids d'abeille"**, parfois allongés, mais toujours délimités par des bas-fonds étroits et rectilignes.

Dans ce type de réseau que l'on rencontre sur granites, granito-gneiss et migmatites, la fracturation observable sur photo est peu importante à l'intérieur des mailles : elle se limite généralement aux marigots en étoile limitant les mailles. L'altération, mince, y est de 15 m en moyenne".

6.2.1.3 - Le réseau de type 3 (fig. 48-c)

"Ce réseau se définit comme un réseau rectiligne à 2 directions orthogonales ou obliques limitant des mailles en parallélogrammes allongées.

Il se développe comme le précédent sur granite, granito-gneiss et migmatites ; la présence fréquente d'inselbergs est à noter. L'épaisseur moyenne d'altération se situe entre 15 et 20 m".

Exemple d'utilisation du réseau hydrographique :

Région cotonnière - Côte d'Ivoire

L'expérience prouve que la productivité des forages est souvent corrélée à l'épaisseur d'altération. Or, il est permis de supposer que l'épaisseur d'altération doit se marquer dans le modelé géomorphologique, et conditionner notamment l'allure et la forme des réseaux hydrographiques.

Dans cet exemple, inspirée d'une étude réalisée par **Bourguet, Camerlo, Fahy, Vailloux** (1981), un essai de classification du réseau hydrographique de la région cotonnière en Côte d'Ivoire a été réalisé afin d'essayer de prévoir les zones d'altération homogène.

6.2.1.4 - Le réseau de type 4 (fig. 48-d)

"Il s'agit d'un réseau à tendance générale parallèle, avec parfois présence de formes rappelant les types 2 et 3.

Ce réseau est surtout caractérisé par son occurrence principale sur les gneiss du bouclier guinéo-libérien de l'ouest de la Côte d'Ivoire, du Libéria et de la Guinée. L'altération est épaisse de 20 à 25 m en moyenne comme dans le réseau de type 1".

6.2.1.5 - Le réseau de type 5

"Il caractérise la zone forestière, où le réseau hydrographique est mal visible. Son aspect mamelonné est cependant caractéristique. Il se développe sur granites, granito-gneiss, migmatites. L'épaisseur altérée moyenne dépasse 25 m".

6.2.1.6 - Le réseau de type 7 (fig. 48e et 48f)

"C'est un réseau hydrographique à éléments parallèles, soulignant la schistosité ; il caractérise les régions de schistes birrimiens. L'épaisseur des altérites dépasse couramment 50 m et atteint parfois 100 m".

6.2.1.7 - Le réseau de type 9 (fig. 48-g)

"Ce réseau enfin, se rencontre sur des roches vertes affleurant en collines : le réseau digité, dense et très ramifié sur le pourtour des collines, se simplifie à l'aval pour franchir le glacis périphérique ; dans ce type de réseau l'altération (et la fissuration) est très peu développée. Les échecs y sont nombreux, mais ce type de réseau est très peu répandu".

6.2.2 - RELATION ENTRE EPAISSEUR ALTEREE ET STRUCTURE DU RESEAU

A partir des résultats d'une campagne de forage effectuée dans la région, il a été possible d'établir le tableau suivant (tab. 6).

Epaisseur d'altération observée en forages	0 - 10 m		10 - 20 m		20 - 27 m		> 27 m		Nombre de forages
Nombre de ces observés	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%	
Réseau 1	5	11,6	8	18,6	10	23,2	20	46,5	43
Réseau 2	25	22,5	39	35,1	22	19,8	25	22,5	111
Réseau 3	37	34,6	37	34,5	18	16,8	15	14	107
Réseau 4	5	9,8	11	21,5	15	29,4	20	39,2	51
% totaux	-	23	-	30,4	-	20,8	-	25,6	-

Tableau 6 - Forages sur granito-gneiss - Epaisseur des altérites

On notera que les résultats sont étalés sur les quatre classes d'épaisseur définies. Les épaisseurs les plus fréquentes sont très variables. Indépendamment du type de réseau, les risques d'échecs sont associés aux sites qui présentent les plus faibles épaisseur d'altération, comme le montre le tableau ci-après.

Nombre de forages	Fréquences d'échecs par réseau et par tranche d'épaisseur								Echecs	
	0 - 10 m		10 - 20 m		20 - 27 m		> 27 m		Totaux	
	Nb d'échecs / Nb de forages	%	Nb d'échecs / Nb de forages	%	Nb d'échecs / Nb de forages	%	Nb d'échecs / Nb de forages	%	types de réseaux (%)	
Réseau 1	43	3/ 5	60	4/ 4	50	0/10	0	0/10	0	16,2
Réseau 2	111	15/25	60	16/39	41	6/22	27	7/25	28	39,6
Réseau 3	107	21/37	57	13/37	35	5/18	28	2/15	13	38,3
Réseau 4	51	3/ 5	60	6/ 4	54	8/15	53	5/20	25	43
Moyenne des échecs		58 %		41 %		29 %		17 %		26,7 %

Tableau 7 - Forages sur granito-gneiss - Taux d'échecs

Cet exemple montre une utilisation peu courante de l'interprétation que l'on peut faire du réseau hydrographique en prospection hydrogéologique. Il prouve aussi que les renseignements obtenus par photo-interprétation ne se limitent pas à la réalisation d'une carte de fracturation, et que l'étude du réseau hydrographique peut apporter une somme d'enseignements intéressants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) **Affaton (P.)**, 1975.- Etude géologique et structurale du Nord-Ouest Dahomey, du Nord Togo et du Sud-Est de la Haute-Volta.- Thèse Trav. Lab. Sci. Terre, St-Jérôme, Marseille, n° 10, 201 p., 96 fig., 9 tabl.

- (2) **Ahmad (M.) ()**.- Lineaments and their tectonic significance in relation to mineral potential in South India.- GOSPAR Advances in Space Exploration, vol. 10, pp. 101-104.

- (3) **Aphrodisis (S.), Besognet (Ph.), Pointet (Th.)**, 1983.- Statistical study on 270 boreholes in igneous rocks of the Troodos massif (Cyprus). BRGM 83 SGN 655 EAU.

- (4) **Armand (C.)**, 1982.- Prospection hydrogéologique dans un contexte de socle défavorable.- Doc. BRGM, n° 45, 1982, pp. 13-23.

- (5) **Assouma (D.), Biscaldi (R.), Lelong (F.), Martin (A.), Sawadogo (J.), Scanvic (J.Y.)**, 1982.- Recherche de critères d'implantation de forages hydrauliques productifs en formations de socle d'Afrique intertropicale.- Doc. BRGM n° 45, 1982, pp. 25-32.

- (6) **Barrat (J.M.), Puyoo (S.)**, 1984.- Analyse hydrogéologique par méthodes statistiques de la campagne 1000 forages au Niger.- Rapport BRGM 84 SGN 309 EAU.

- (7) **Bérard (P.)**, 1982.- Interprétation des images satellites en complément à la photo-interprétation traditionnelle pour la définition des structures hydrogéologiques du Niger et en Haute-Volta.- Doc. BRGM n° 45, 1982, pp. 67-82.

- (8) **Bernard (Ph.), Bonin (H.), Crochet (Ph.), Le Joncour (M.)**, 1985.- Travaux d'hydraulique villageoise au Togo. 1ère et 2ème phase.- Vol. 1 : Compte rendu des travaux ; Vol. 2 : Analyse statistique des données de forage.- Rapport BRGM 85 TGO 003 EAU.

- (9) **Bernard (A.), Mouton (J.)**, 1981.- Les recherches d'eau dans le socle africain. Apport de la géophysique.- Bull. BRGM (2), III, n° 4 1981, pp. 293-309, 16 fig.

- (10) **Besognet (Ph.)**, 1984.- La Boutonnière d'Ifni. Aperçu tectonique et fracturation (Maroc - Anti-Atlas - Précambrien). Rapport BRGM 84 SGN 318 EAU.
- (11) **Besognet (Ph.)**, 1985.- Productivité des forages d'eau et caractères physiques du milieu (analyse statistique de données sur le socle de l'Anti-Atlas marocain).- DEA. Univ. Orléans - Hydrogéologie.- Rapport BRGM, 86 SGN 285 EAU.
- (12) **Blès (J.L.), Feuga (B.)**, 1981.- La fracturation des roches.- Manuels et Méthodes n° 1 ed. BRGM, Orléans.
- (13) **Blès (J.L.), Dutartre (Ph.), Feybesse (J.L.), Gros (Y.), Martin (P.)**, 1983.- Etude structurale de la fracturation du granite de Saint Sylvestre. Mines de Fanay-Augères et de Margnac (Haute-Vienne).- Rapport BRGM 83 SGN 426 GEO.
- (14) **Blès (J.L.)** 1984.- Distribution de la fracturation en surface et en profondeur dans les granites.- Doc. BRGM n° 84, p. 70-80.
- (15) **Bourguet (L.), Camerlo (J.), Fahy (J.C.), Vailleux (Y.)** 1981.- Méthodologie de la recherche hydrogéologique en zone de socle cristallin.- Bull. BRGM, (2), III, n° 4, pp. 273-288, 10 fig., 7 tabl.
- (16) **Bro (M.), Hubert (C.), Moullard (P.)**, 1981.- Recherche des aquifères de fracture dans des séries schisto-gréseuses au Mali à l'aide de techniques géophysiques.- Bull. BRGM (2), III, n° 4 1981, p. 311-324, 11 fig.
- (17) **Brosse (J.M.)**, 1975.- La télédétection en géologie structurale. Deux exemples : le massif granitique de Villefranche-de-Rouergue (Aveyron) et le système filonien de Vialas (Lozère).-Thèse 3ème cycle, Univ. Orléans, 122 p., 46 fig., 3 tableaux.
- (18) **Camerlo (J.), Fahy (J.C.)**, 1979.- Premiers résultats obtenus en Côte d'Ivoire dans les recherches d'eau axées sur les fractures secondaires des roches grenues du socle.- Bull. CIEH, n° 37-38, Ouagadougou, p. 31-33.

- (19) Castany (G.), Margat (J.), 1977.- Dictionnaire français d'hydrogéologie.- Ed. BRGM.
- (20) Cervelle (B.), Chorowicz (J.), 1986.- La télédétection des Ressources Minérales.- La Recherche n° 174, pp. 153-161.
- (21) Chinnery (M.A.), 1966.- Secondary faulting. Theoretical aspects.- *Canad. J. Earth. Sci.*, 3, n° 2, p. 163-190.
- (22) Deffontaines (B.), 1986.- Proposition d'une méthode géomorphologique permettant une approche de la néotectonique en pays tempéré.- Rapport BRGM 85 SGN 659 GEO.
- (23) Delpont G., 1984.- Etude par télédétection des régions des hauts plateaux de Tiznit et de Goulimine. Recherche d'eau.- Rapport BRGM 84 SGN 350 GEO.
- (24) Dulica (C.), 1979.- La recherche de l'eau souterraine dans les régions à substratum cristallin de l'Afrique de l'Ouest.- Comm. CIEH au Programme international de corrélation géologique (PICG). Ouagadougou 5-7 février 1979.
- (25) Dutartre (Ph.), 1981.- Etude de la fracturation du granite de la Margeride (Région de Saint-Alban-sur-Limaghole, Lozère). Géométrie, cinématique, densité des fractures.- Thèse 3ème cycle, Univ. Paris VII.
- (26) Engalenc (M.), Sawadogo (A.N.), 1975.- Rôle de la fracturation dans la recherche des eaux souterraines dans les granites de l'Afrique occidentale.- Bull. CIEH n° 20, Ouagadougou, p. 2-7.
- (27) Engalenc (M.), 1978.- Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest.- Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques.
- (28) Engalenc (M.), 1979.- Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines. Travaux complémentaires sur le milieu fissuré.- Ouagadougou Bulletin de liaison du CIEH.

- (29) Engalenc (M.), 1981.- Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines. Atlas de photo-interprétation.- (T3). Bulletin de liaison du CIEH.
- (30) Engalenc (M.), 1982.- Rôle de la photo-interprétation dans la détermination des facteurs influençant la productivité des fractures du socle cristallin.- Doc. BRGM, n° 45, 1982, pp. 291-299.
- (31) Fabre (D.), Robert (J.P.), 1975.- Analyse expérimentale des ruptures de la couverture liées à un mouvement décrochant du socle et applications.- Ann. Soc. Géol. Nord. 95. 3 pp. 175-182.
- (32) Feuga (B.), Vaubourg (P.), 1980.- Principales méthodes de reconnaissance des milieux fissurés. Etat des connaissances.- Rapport BRGM 80 SGN 855 EAU, 86 pl., 61 fig.
- (33) Feuga (B.), 1984.- Eléments d'approche des milieux rocheux fracturés du point de vue de l'hydraulique souterraine.- Rapport BRGM 84 SGN 128 GEG.
- (34) Georges (M.), Motti (E.), Pointet (T.), 1983.- Application de la télédétection à la prospection hydrogéologique en zones arides.- Rapport BRGM 83 SGN 896 EAU.
- (35) Girousse (B.), 1984.- Critères d'implantation et productivité des forages d'eau en milieux fissurés.- Rapport BRGM 84 SGN 209 EAU.
- (36) Henou (B.), 1985.- Site pilote de Broualan (Ille-et-Villaine). Le Radon dans le sol et la fracturation du Bed-rock.- BRGM. Note technique Dpt EAU 85/29.
- (37) Howard (A.D.), 1967.- Drainage analysis in geologic interpretation: a summation.- Bull. Ann. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, vol. 51, n° 11, pp. 2246-2259, 4 fig., 1 tabl.
- (38) Hunt (G.R.), Salisbury (J.W.), 1970.- The Use of near-infrared spectra of minerals and rocks. t.1, Silicate minerals.- Modern geology, p. 283-300 (1970).

- (39) **Hunt (G.R.), Salisbury (J.W.), 1971.-** Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. t.2, Carbonates.- Modern geology, p. 23-30.
- (40) **Hunt (G.R.), Salisbury (J.W.), 1971.-** Visible and near infrared spectra of minerals and rocks, t 3. Oxides and hydroxides.- Modern geology, p. 193-205.
- (41) **Labey (D.), 1983.-** Recherche et exploitation de l'eau souterraine dans les terrains de socle ancien. Application à une étude statistique de forages hydrauliques réalisées dans diverses régions d'Afrique occidentale.- Thèse CNAM Paris.
- (42) **Lassagne (D.), 1983.-** Essai de caractérisation du milieu fracturé en massif granitique. Site de Fanay-Augères (Haute-Vienne). Travail de fin d'études 4ème année.- Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, option Géologie de l'ingénieur.
- (43) **Leblanc (Ph.), 1986.-** Structure et hydrodynamique des milieux fissurés aquifères. Synthèse bibliographique.- Rapport BRGM 86 SGN 102 EAU.
- (44) **Leblanc (Ph.), 1986.-** Site expérimental de Broualan (Ille-et-Villaine). Interprétation de la seconde série de pompage d'essai. Rapport BRGM 86 SGN 133 EAU.
- (45) **Lejoncour (M.), Henou (B.), Bernard (Ph.), 1985.-** Travaux d'hydraulique villageoise au Togo. 5ème FED.- Rapport BRGM 85 TGO 004 EAU.
- (46) **Macaudière (J.), 1972.-** Cours de tectonique.- Nancy ENSG. 1ère année.
- (47) **Manigault (B.), 1986.-** Révision des caractères morphologiques et structuraux des fissures ouvertes de granites sous recouvrement d'altérations superficielles.- Rapport BRGM 86 SGN 385 EAU.
- (48) **Mattauer (M.), 1980.-** Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre.- Hermann édi. Paris. Collection Méthodes. (2ème édition).
- (49) **Ollier (C.D.), 1981.-** Tectonics and Landforms.- Longman, London and New-York 324 p.

- (50) Oujida (A.), 1978.- La télédétection. Quelques applications en géologie structurale dans l'Atlas saharien algérien (région de Bou Saada, Djelfa et Laghouat).- Thèse docteur-ingénieur, Univ. Paris VI.
- (51) Pernel (F.), Pointet (Th.), 1985.- Identification par télédétection de la fracturation et de l'humidité superficielle dans le socle et le recouvrement (Anti-Atlas-Maroc).- Rapport BRGM 85 MAR 058 EAU.
- (52) Petyjohn (W.A.), Deutch (M. Ed.), Wiesnet, Rango (A.Ed.), .- Groundwater and Satellites: an overview/introduction.- Proc. Ann. W.T. Pecora. Mem. Symp. Remote Sensing. Sioux Falls.
- (53) Rampon (A.), 1969.- Mesures de pendages et de directions de fractures dans des granites : considérations théoriques et applications à la circulation souterraine de l'eau.- Revue de géographie physique et de géologie dynamique, (2), vol. XI, fasc. 2, p. 177-188, Paris 1969.
- (54) Razack (M.), 1978.- Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées. Numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens.- Thèse doct. Ing., Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, 58 p., 18 fig.
- (55) Reeves (R.G.), 1975.- Manual of remote sensing.- Virginia, American Society of Photogrammetry.
- (56) Sawadogo (S.), 1982.- Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation. Application à l'hydrogéologie du socle du milieu intertropical.- Thèse. Doct. 3ème cycle, Univ. Orléans, 238 p., 79 fig., 15 tabl., 12 pl. h.t., 2 cartes.
- (57) Sabins (F.F.) jr., 1978.- Remote sensing, principles and interpretation.- W.H. Freeman & Co, San Francisco.
- (58) Roy (A.K.), 1985.- Remote sensing in groundwater targeting.- International Workshop. Rural hydrology and hydraulics in fissured basement zones.- March 15-24, 1985.

- (59) Scanvic (J.Y.) 1983.- Utilisation de la télédétection dans les Sciences de la Terre.- Manuels et Méthodes, n° 7, ed. BRGM.
- (60) Shaw (R.), Sowers (L.), Sanchez (E.), 1981.- A comparative study of linear and non linear edge finding techniques for Landsat multispectral data.-
In : Proc. Annu. W.T. Pecora. Mem. Symp. Remote sensing, USA n°7, pp. 529-542, bibl. (2 réf.).
- (61) Schowengerdt (R.), Babcock (E.M.), Ethridge (L.), Glass (Ch.E.), Deutch (M.Ed.), Wiesnet (D.A.Ed.), Rango (A.Ed.), 1981.- Correlation of geologic structure inferred from computer enhanced landsat imagery with underground water supplies in Arizona.- 5th W.T. Pecora. Symp., Sioux Falls, n° 5, 387-397 (1981).
- (62) Valerio (Cl.), Vuillaume (G.) et al., 1979.- Ressources en eau et télédétection. OPIT, Paris. (Opération Pilote Interministérielle de Télédétection). 2ème édition).
- (63) Waksman (G.), 1977.- Application à l'hydrogéologie de l'image satellite traitée au 1/80 000. Rapp. CGG.
- (64) Wyrick (G.), Borchers (J.W.), 1981.- Hydrologic effects of Stress relief fracturing in an Appalachian Valley.- US Geol. Survey Water-Supply paper (Wash.) USA. 1981, Num. 2177, 51 p.

* *

*

