

SOCIÉTÉ SUISSE DE SPÉLÉOLOGIE

Actes du 3^e Congrès national de spéléologie

(Interlaken, 24 et 25 septembre 1967)

Supplément n° 3 à «STALACTITE»

Relations entre les phénomènes karstiques et la géologie

LASZLO KIRALY

LES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX AUX ENVIRONS DU GOUFFRE DU PETIT PRÉ DE SAINT-LIVRES (JURA VAUDOIS)

Introduction

Le but des quelques remarques qui vont suivre est double :

– premièrement, j'aimerais donner quelques renseignements complémentaires à la très intéressante étude géologique de mon camarade François Le Guern (voir page 44),

– ensuite, à l'aide de l'exemple du Petit Pré, j'aimerais montrer l'importance de la projection stéréographique pour la représentation des levés spéléologiques sous une forme directement utilisable par les géologues.

Lors de son Congrès national d'Interlaken (septembre 1967) la Société suisse de spéléologie avait décidé la création d'une Commission scientifique qui devrait promouvoir, en particulier dans le domaine de la spéléologie physique, la collaboration entre spéléologues et géologues. Comme exemple de collaboration possible je prendrai un domaine très étroit, mais qui m'intéresse plus particulièrement : l'étude des relations entre orientation des cavités souterraines, alignement des phénomènes karstiques et éléments de la structure géologiques (« tectonique »). Dans bon nombre de publications on avait souligné l'importance de la structure géologique pour l'orientation des cavités souterraines, mais rares sont les études où l'on ait dépassé le stade de «...il y a une relation entre les diaclases et l'orientation des grottes...» ou «...il n'y a aucune relation entre la tectonique et les cavités souterraines...». Suivant les cas, les spéléologues ont l'habitude de parler de cavités « tectoniques » ou « non-tectoniques ».

Quelques mots d'abord sur le terme « tectonique ». On le considère généralement comme synonyme de « structure » ou « géologie structurale ». Toutefois N. RAST (1966) souligne très justement que « the present usage distinguishes structural geology and tectonics in so far as the former term applies mainly to methods of investigation carried out essentially by studying the form of rock structures on all scales while the latter term applies to regional studies and incorporates stratigraphical and geophysical results ». Ainsi donc la géologie structurale s'occupe essentiellement de la description et de l'analyse *géométrique* des éléments structuraux, tandis que la « tectonique » concerne surtout les *processus* de déformation dans leurs aspects cinématique et dynamique. Il en résulte que l'analyse géométrique des éléments structuraux doit *précéder* l'interprétation tectonique et avant de parler « tectonique » il faut parler « structure ». Si les cavités sont parallèles à certains éléments de la structure, ce parallélisme se situe encore sur le plan géométrique et l'on ne peut passer sans autre de cette relation géométrique à la relation causale, d'autant moins qu'il est parfois très difficile, sinon impossible, d'évaluer la part exacte des mouvements tectoniques, des relâchements de contraintes ou

La plupart des clichés illustrant le présent travail ont été aimablement mis à notre disposition par l'Imprimerie Centrale (Neuchâtel).

de la dissolution par l'eau dans l'ouverture des cavités souterraines, ces trois facteurs étant presque toujours actifs. Dans un premier stade il serait donc plus prudent de ne pas qualifier les cavités souterraines de « tectoniques » ou « non tectoniques », mais il faudrait plutôt étudier les relations géométriques, et cela aussi exactement que possible, entre structure géologique et orientation des cavités.

La projection stéréographique

La plus précieuse contribution des spéléologues à cette étude est représentée par les levés topographiques et morphologiques des cavités souterraines. La représentation graphique des résultats du levé se fait, habituellement, par des profils transversaux pour la morphologie des cavités, ainsi que par des « plans » et « profils » pour l'ensemble du réseau exploré. Si ces représentations sont indispensables et fondamentales pour avoir une idée de l'ensemble du réseau, elles deviennent nettement insuffisantes quand il s'agit de comparer et analyser l'orientation des cavités par rapport aux éléments structuraux (sauf dans des cas très simples). Il s'agit là, en effet, non seulement de grouper les tronçons \pm rectilignes du réseau selon leur pendage, leur direction et leur fréquence, mais encore ces groupements doivent être comparés, simultanément, à 3 et même 10 systèmes de diaclases ! La représentation en plan et en profil du réseau souterrain ne permet pas ces comparaisons, donc les plans et les profils ne sont pas directement utilisables par le géologue. Pour faciliter la collaboration entre spéléologues et géologues dans ce domaine, je propose l'introduction de la projection stéréographique en spéléologie comme moyen de représentation des tronçons \pm rectilignes du réseau. La projection stéréographique est utilisée par les géologues depuis plusieurs dizaines d'années déjà et la description détaillée de son principe et de son emploi se trouve dans presque tous les traités de cristallographie et de géologie structurale. En voici le principe de base :

La figure 1 montre la sphère de référence et le plan de dessin horizontal passant par « l'équateur ». La projection d'un élément linéaire (par exemple d'un tronçon \pm rectiligne du réseau) déterminé par sa direction et par son pendage, s'obtient de la

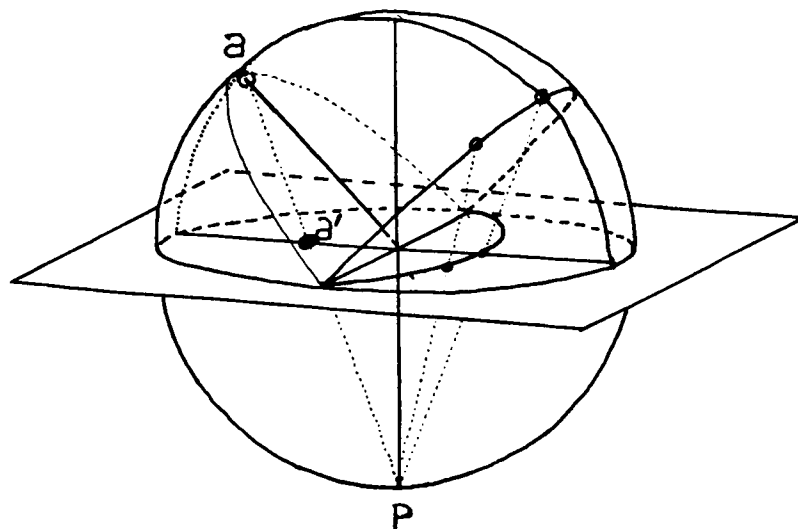


Fig. 1. Principe de base de la projection stéréographique (d'après SZTROKAY et KOCH, simplifié).

façon suivante (fig. 1): on fait passer l'élément linéaire par le centre de la sphère -> l'élément linéaire rencontre l'hémisphère supérieure en un point *a* -> on mène une droite depuis le point *a* au pôle (P) inférieur de la sphère de référence -> cette droite traverse le plan de dessin en un point *a'* qui est la projection stéréographique de l'élément linéaire. Ainsi donc on peut représenter les droites par des points.

La représentation d'un *plan* (plan de couche, plan de diaclase, plan passant par une cavité en fente) peut se faire de deux manières (fig. 1):

a) on fait passer le plan (déterminé par sa direction et par son pendage) par le centre de la sphère de référence -> le plan recoupera l'hémisphère supérieur en un demi-cercle -> la projection de ce demi-cercle sur le plan de dessin donnera un arc de cercle représentant le plan considéré.

b) une autre méthode consiste à représenter la normale du plan passant par le centre de la sphère de référence. La normale étant une droite, sa projection sera un point.

Ainsi les plans peuvent être représentés soit par des arcs de cercle, soit par des points (« pôles de plan »), cette dernière possibilité étant très avantageuse lorsqu'il s'agit d'analyser statistiquement l'orientation d'un grand nombre de plans. Des abaques (« réseaux stéréographiques ») facilitent considérablement la représentation des plans et droites. Les réseaux souterrains pouvant être décomposés en éléments linéaires et plans ayant une direction et un pendage, on peut les représenter facilement par la projection stéréographique, ensemble avec les éléments structuraux.

Une dernière remarque sur le terme « éléments structuraux ». Les plus ordinaires et les plus facilement observables de ces éléments sont les plans de couches et les diaclases. Parmi ces dernières on doit distinguer plusieurs ordres de grandeur allant des microfissures à l'échelle de l'échantillon et ne traversant qu'un seul banc jusqu'à la zone de failles et aux fissures béantes. Si ces dernières semblent très importantes pour les spéléologues, il ne faut pourtant pas ignorer les fissures fines non plus, d'autant moins qu'elles sont infiniment plus denses et plus nombreuses que les grandes « failles » et peuvent jouer un rôle très important pour la circulation des eaux souterraines.

Un exemple: Le gouffre du Petit Pré et ses environs

Situation générale

L'emplacement exact et la description sommaire du gouffre sont donnés par M. AUDÉTAT (1962). J.-P. GUIGNARD (1965) place le gouffre dans son contexte géologique et fait des remarques pertinentes sur les relations géométriques et génétiques possibles entre éléments structuraux et alignement des dolines et des gouffres: « Cette cavité, ainsi que plusieurs autres plus petites sont réparties à faible distance les unes des autres sur une ligne légèrement incurvée, dont la direction diverge d'environ 30° avec le décrochement. Toutes les dépressions karstiques s'ouvraient sur de courtes diaclases légèrement obliques par rapport à l'alignement général. » Du point de vue de relations géométriques il souligne donc, très justement, la différence de 30° entre l'orientation du décrochement principal et l'alignement des cavités. L'analogie entre la fissuration et « les dislocations qui apparaissent sur une feuille de plexiglas lorsque celle-ci est soumise à certaines contraintes de déformation » lui suggère l'idée que la région du Petit Pré serait « une zone faiblement

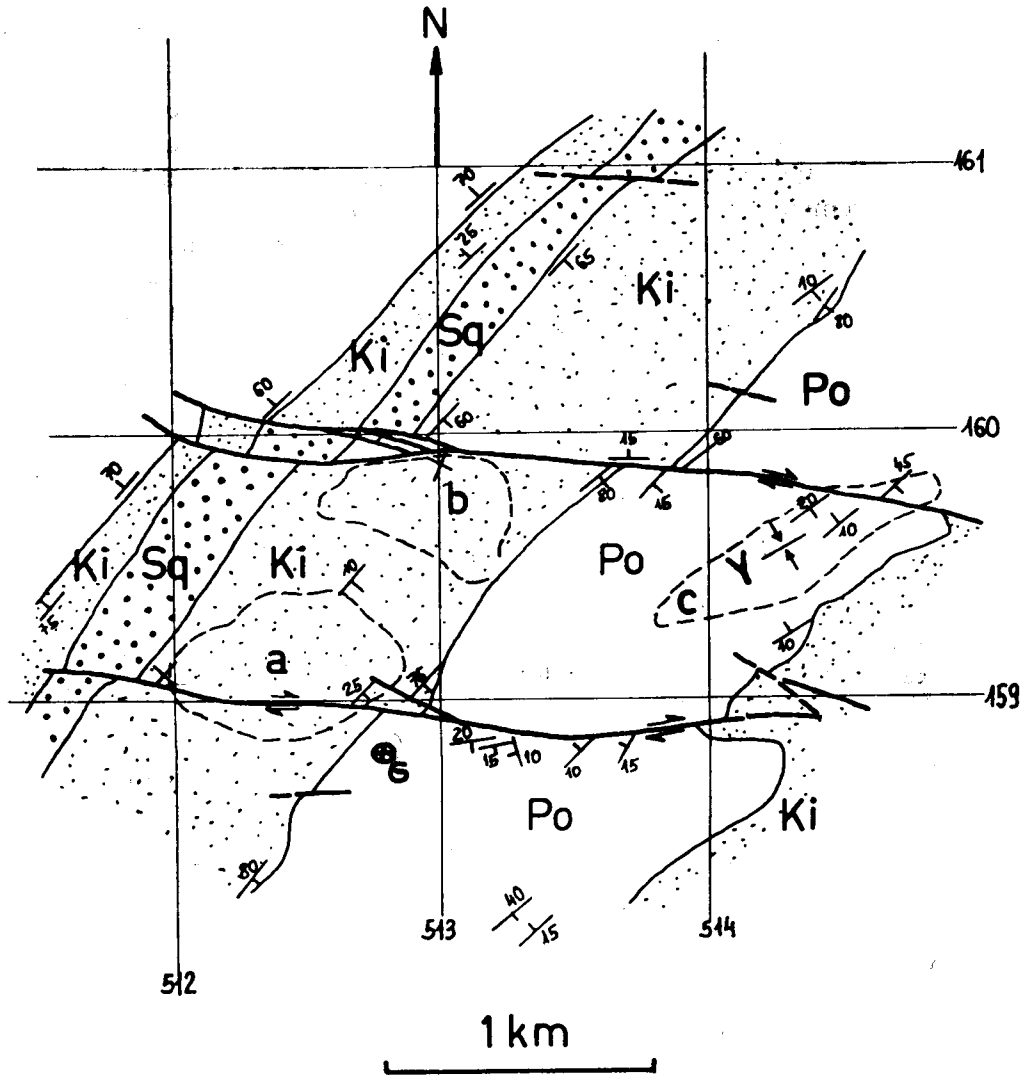


Fig. 2. Situation géologique dans la région du Petit Pré (d'après D. AUBERT, 1941).

disloquée par un effet de torsion lié au décrochement ». Il est frappé par le fait que les phénomènes karstiques se trouvent « sur de très modestes cassures alors qu'ils sont pratiquement inexistant le long de la zone traversée par la faille principale » (répétons ici encore une fois que les modestes cassures sont beaucoup plus nombreuses que les grandes failles et que, statistiquement, elles ont une importance primordiale). Ces observations et analogies lui suggèrent l'hypothèse suivante: « la majorité des failles avec rejet vertical ou horizontal résultent de contraintes d'écrasement; ainsi les roches voisines des lèvres subiraient à un moment donné des tensions de compression qui les rendraient structuralement plus compactes et plus réfractaires à une corrosion intensive. Les diaclases, au contraire, paraissent provenir, dans des conditions les plus simples, de deux forces de traction opposées. Toutefois un effet plus complexe de torsion et de cisaillement semble être à l'origine de la fissuration observée dans la zone du Petit Pré et il est fort probable que toutes les cavités karstiques des environs ne sont qu'un agrandissement par corrosion de ces dislocations tectoniques. »

Essays de comparer ces suppositions avec un modèle géologique plus concret :

La situation géologique est montrée sur la fig. 2 d'après D. AUBERT (1941). Le gouffre se situe sur le flanc SE de l'anticlinal de Mont Tendre ce flanc étant structuré par une série de « genoux » (direction : N 40° E pendage : 60 à 80° vers le SE) séparant des zones relativement peu inclinées (pendage : 14 à 20° vers le SE). Cette partie de l'anticlinal est affectée par une série de décrochements *dextres* orientés approximativement N 100° E et qui forment un système conjugué avec les décrochements *senestres* (orientés N 160 – 170° E environ) de la zone Vallorbe – Pontarlier (angle 2α entre les deux zones de décrochements : 60 à 70°). Le gouffre se trouve dans une partie peu inclinée du flanc, située au SE d'un « genou » et à proximité d'un décrochement dextre (voir fig. 2).

Les diaclases

Une centaine de mesures de diaclase ont été effectuées dans les environs immédiats du gouffre : une cinquantaine dans la partie peu inclinée du flanc et une cinquantaine dans le « genou » au NW du gouffre. Ces mesures sont trop peu nombreuses pour effectuer une analyse statistique détaillée, néanmoins elles permettent de séparer et mettre en évidence les principaux systèmes de diaclases. Les résultats de mesure sont représentés sur les fig. 3 et 4 par des lignes d'égale densité de pôles (% de pôles par unité de surface) ; les principales concentrations de pôles (4% – 6% – 8% et plus) représentant les systèmes de diaclases, sont désignées par des lettres. Le plan moyen de chaque système est représenté en projection cyclographique (c'est-à-dire par des arcs de cercle) sur la fig. 4b (les plans verticaux apparaissent

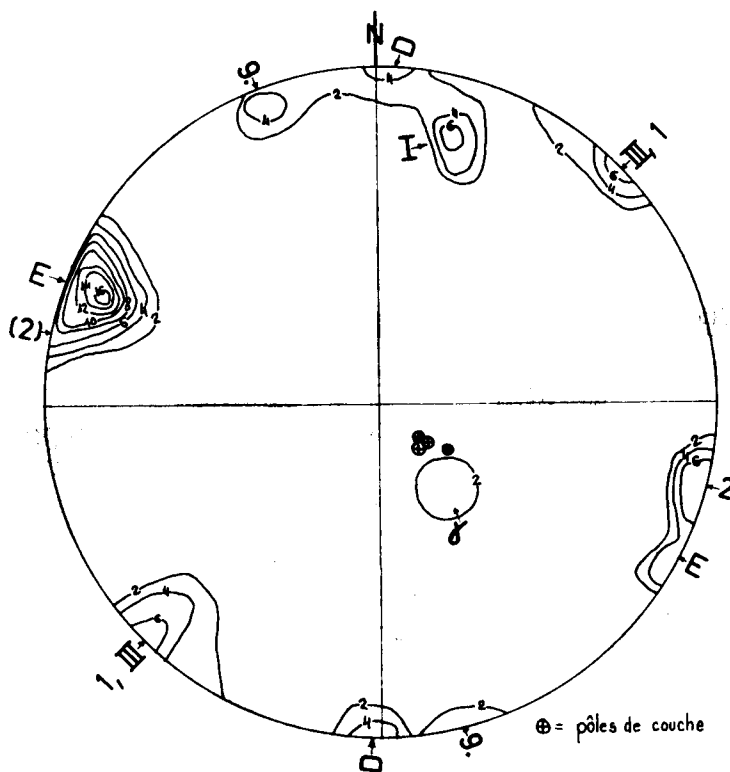


Fig. 3.

Fig. 3, 4a et 4b : Orientation des éléments structuraux mesurés dans la région du gouffre. Fig. 3 : dans la partie peu inclinée ; fig. 4a : dans le « genou » ; fig. 4b : plans « moyens » des éléments structuraux (sur toutes les figures : projection stéréographique équivalente, hémisphère supérieur).

Fig. 4 a

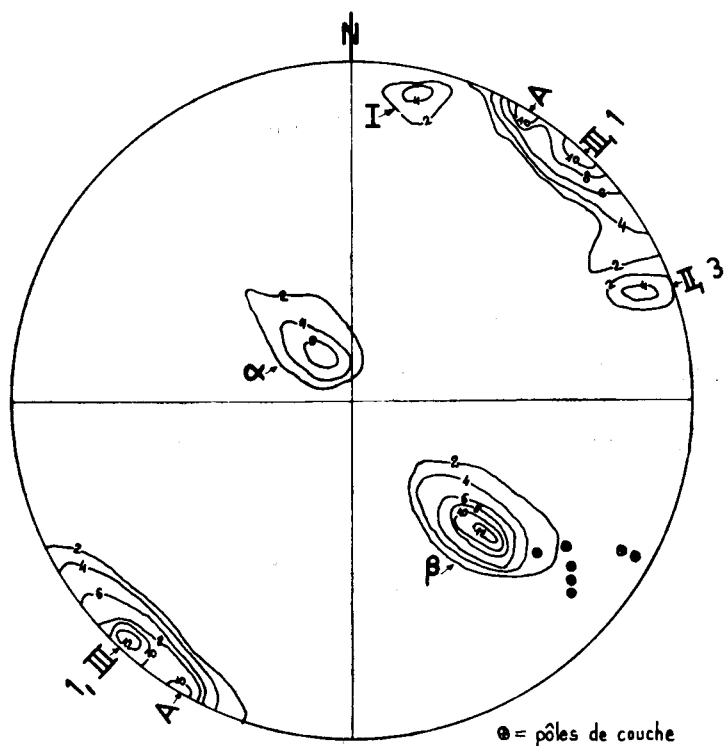
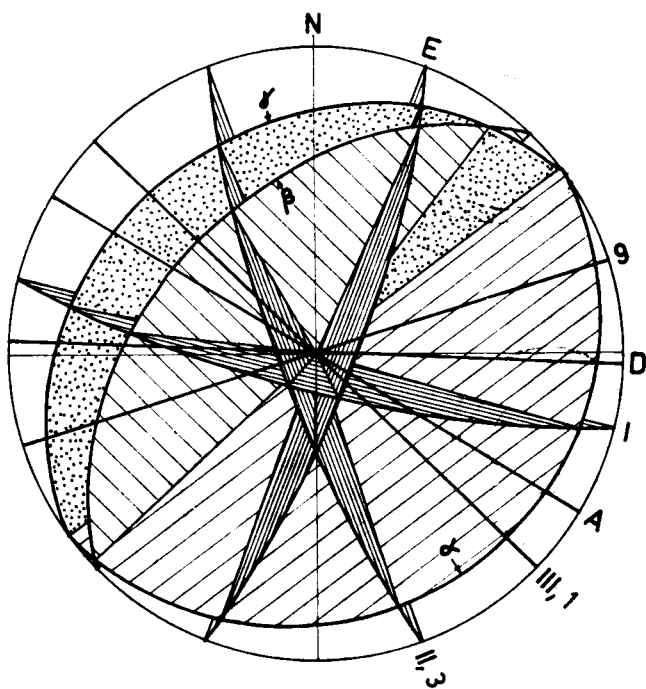


Fig. 4 b



comme des droites!). La désignation des plans moyens correspond à la désignation des groupes de pôles sur les figures 3 et 4a.

Les relations angulaires peuvent être lues directement sur les stéréogrammes des figures 3, 4a et 4b si l'on les superpose à un réseau stéréographique équi-surface. Les angles théoriques les plus significatifs pour l'interprétation tectonique sont: ~ 15 à 20° , $\sim 30^\circ$, $\sim 45^\circ$, $\sim 60^\circ$, et 70 à 80° . Dans notre cas on aura les relations suivantes entre les différents systèmes de diaclases (les numéros des systèmes se rapportent aux numéros des figures 3, 4a et 4b):

angle ~ 15 à 20° :	D	$\wedge I$	= 16°
	I	$\wedge A$	= 19°
	A	$\wedge III, 1$	= 14°
	γ	\wedge couches peu inclinées	= 12°
angle $\sim 30^\circ$:	I	$\wedge 9$	= 31°
	I	$\wedge III, 1$	= 31°
	D	$\wedge A$	= 29°
	III, 1	$\wedge II, 3$	= 27°
	β	\wedge couches du « genou »	= 28°
angle $\sim 45^\circ$:	D	$\wedge III, 1$	= 42°
	A	$\wedge II, 3$	= 40°
	A	$\wedge 9$	= 48°
	II, 3	$\wedge E$	= 45°
	E	$\wedge 9$	= 50°
angle $\sim 60^\circ$:	I	$\wedge II, 3$	= 61°
	III, 1	$\wedge II$	= 60°
	III, 1	$\wedge 9$	= 62°
	β	$\wedge \alpha$	= 60°
angle ~ 70 à 80° :	D	$\wedge E$	= 71°
	D	$\wedge II, 3$	= 68°
	I	$\wedge E$	= 84°

L'interprétation tectonique exacte de ces données exigerait, évidemment, des recherches plus approfondies, mais on peut concevoir déjà d'après ces rapports angulaires un modèle théorique (concrétisant une hypothèse de travail) pouvant expliquer l'apparition des fissures, leurs relations angulaires et leurs rôles lors des déformations. Voici ce modèle:

a) Dans un premier stade et à l'échelle régionale l'état des contraintes avait déterminé l'apparition des plis principaux et des grands décrochements (voir fig. 5a). La direction de la plus grande contrainte principale (σ_3) devait être N $130-135^\circ$ E, faisant apparaître les plis principaux avec une direction axiale de N 40° E environ, ainsi que deux systèmes de décrochements conjugués: des décrochements senestres N 160° E (zone Vallorbe-Pontarlier) et des décrochements dextres orientés N 100° E environ. Dans la région du Petit Pré ce sont les mouvements dextres à N 100° E qui se sont développés (système I), les diaclases N 160° E (système II) étant restées sans grands rejets. Dans la direction N $130-135^\circ$ E, des diaclases de tension devaient apparaître très tôt (système III). Les systèmes I, II et III représenteraient donc les diaclases primitives régionalement développées. Il est intéressant à remarquer que l'entrée naturelle du gouffre du Petit Pré est formée par une diaclase orientée N 135° E avec pendage de 75° vers le SW et que dans les couches redressées du « genou » on observe plusieurs fissures pennées (Fiderspalten) orientées, elles aussi, N 135° E, pendage 75° SW. Il s'agit donc d'anciennes fissures de tension. Toutefois on observe, dans le système III, aussi des diaclases plus fines, engendrées probablement par des cisaillements.

b) Ces grands mouvements dextres suivant les zones N 100° E (système I) avaient dû modifier l'état de contraintes dans les blocs délimités par les décrochements (à noter que cette modification de contraintes devait avoir un caractère local affectant des régions d'un ordre de grandeur inférieur à celui des régions considérées dans le premier stade!). Des décrochements de deuxième ordre orientés N $115-120^\circ$ E

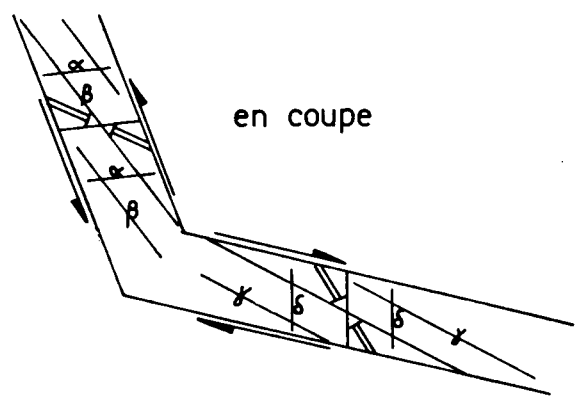
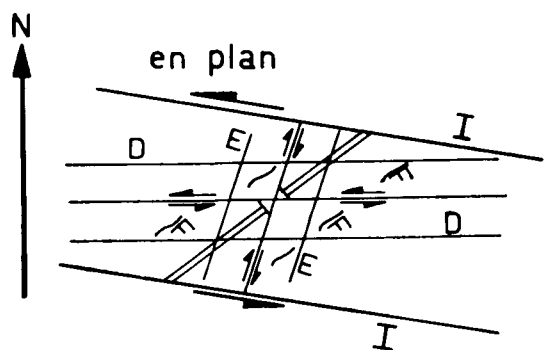
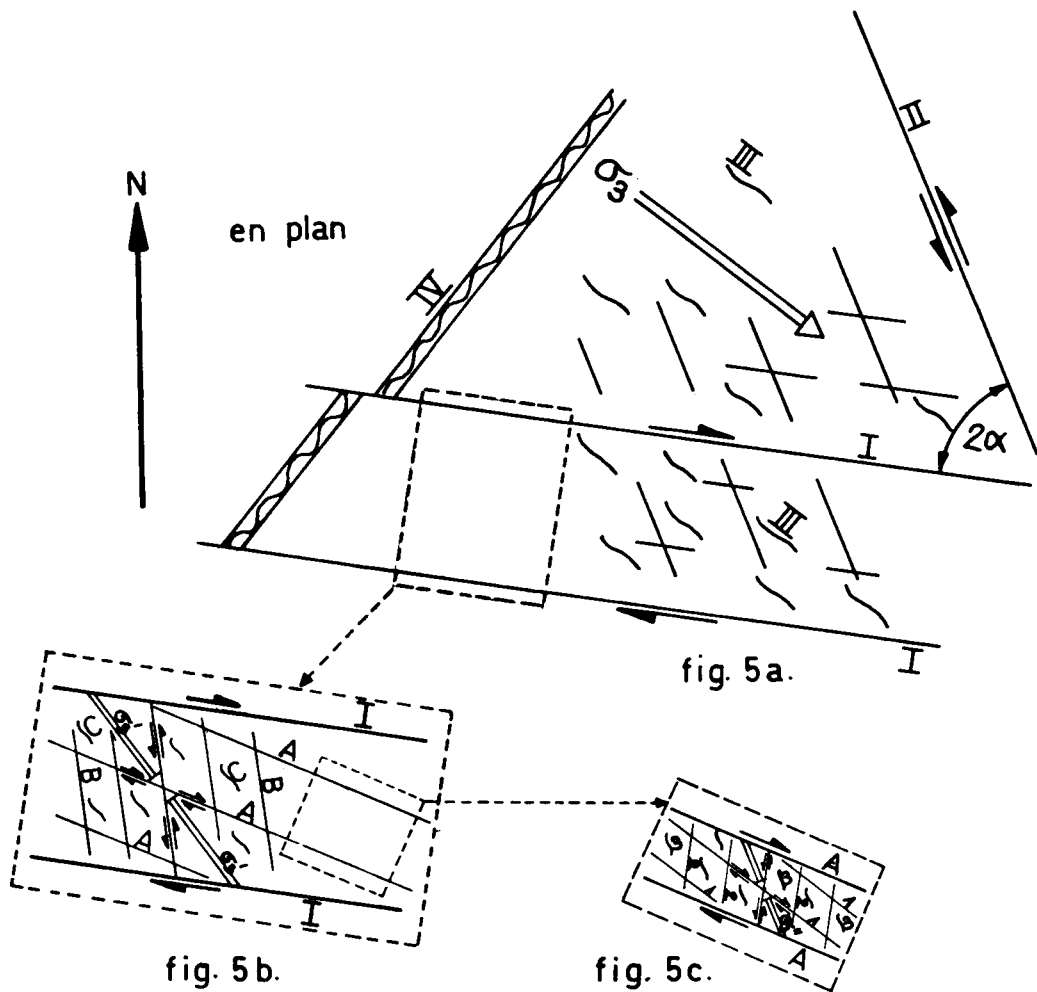


Fig. 6.

Fig. 7.

Fig. 5, 6 et 7. Explication dans le texte.

(système A) devaient apparaître à l'intérieur des blocs selon le schéma de la figure 5b. Effectivement, la figure 2 montre que de tels décrochements secondaires existent dans la région. Ces mouvements de deuxième ordre avaient pour conséquence la réactivation des diaclases de tension primaires N 130° E (système III) par des cisaillements (d'où les deux sortes de fissures, de tension et de cisaillement, dans le système III), ainsi que l'ouverture des diaclases primaires N 160° E (système II) comme fissures de tension (voir fig. 5c).

c) L'apparition des systèmes E et D dans un pareil contexte laisse supposer que les mouvements relatifs suivant les décrochements N 100° E n'étaient pas toujours dextres, mais qu'il y avait eu, temporairement et peut-être localement, inversion du mouvement relatif par suite de réajustement des blocs. Le système I devait alors fonctionner (au moins par moments) comme décrochement senestre. C'est dans ces phases qu'il y aurait eu apparition des systèmes E et D suivant le schéma de la figure 6. Il faut remarquer que le système E est très fortement développé dans les environs immédiats du gouffre: la densité des fissures fines atteint 20 à 40 par mètre courant.

Le schéma 6 nous donne encore un système qui n'est pas apparent dans les diagrammes des figures 3, 4a et 4b: ce sont des diaclases de tension orientées N 55-60° E environ. A la surface je ne les ai pas observées en tant que diaclases de tension, mais il existe des lapiez bien développés dans cette direction (lapiez « ± parallèles à la direction des couches »). On verra par la suite que ce système (que j'appellerai système F) influence effectivement l'orientation des cavités souterraines.

d) Il faut mentionner, enfin, les fissurations plus restreintes, à l'échelle du banc, et qui sont dues au glissement des couches les unes sur les autres. Les systèmes α , β

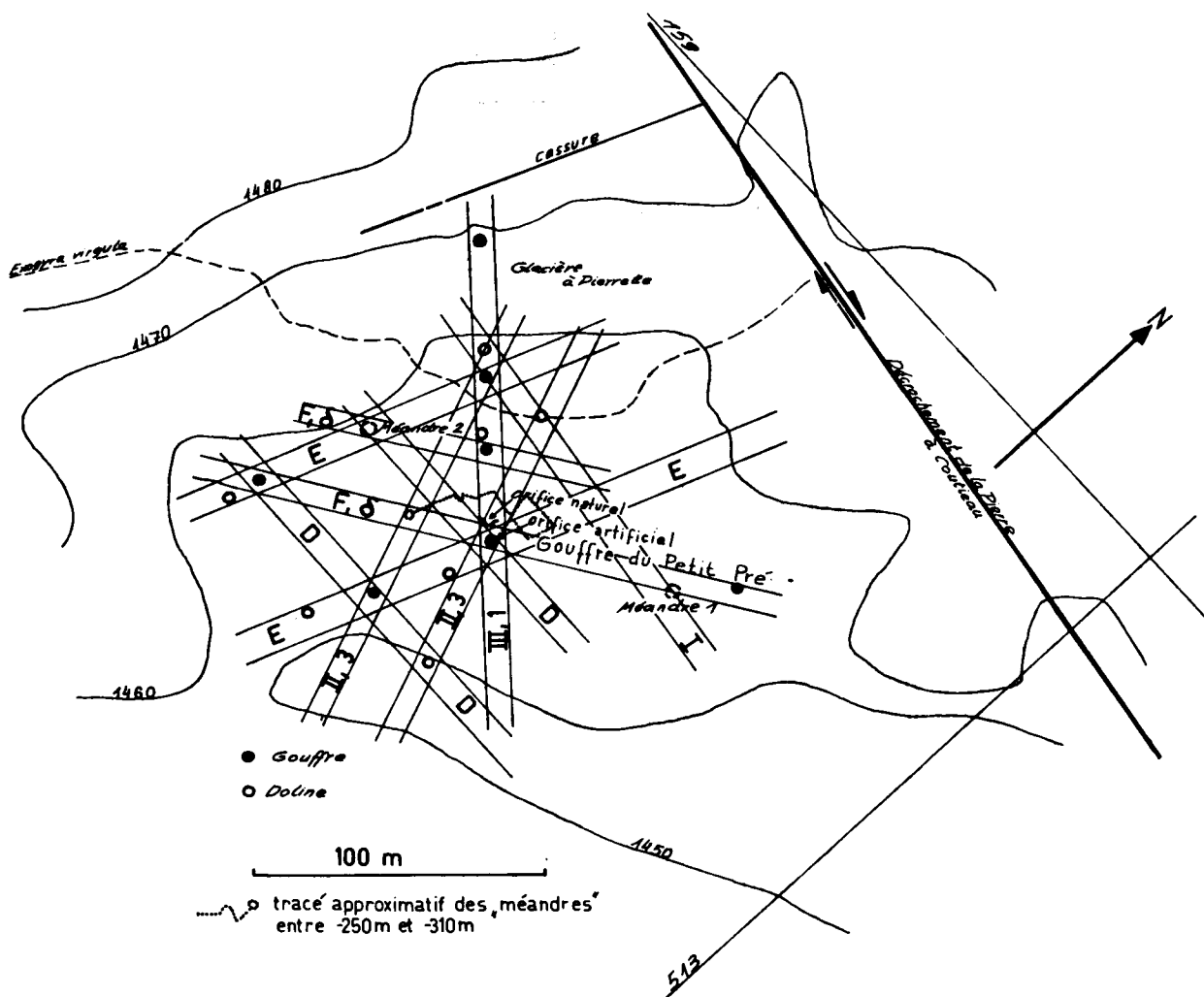


Fig. 8. Alignement des gouffres et dolines dans la région du Petit Pré.

et γ ont été engendrés selon le schéma de la figure 7. D'après ce schéma il faut compter encore avec un 11^e système de fissures subverticales, \pm parallèles à la direction des couches et au système F, dans la partie peu inclinée du flanc.

e) Pour que tout ne soit pas parfait je renonce à interpréter le système 9, les observations étant trop rares sur ce système.

Il faut souligner que d'après ce schéma certains systèmes de fissures avaient des rôles variables suivant la phase et l'échelle des déformations. En outre ce schéma n'est valable, probablement, que pour la partie centrale des décrochements. Vers les extrémités, les trajectoires des contraintes principales devaient être beaucoup plus compliquées (voir E.M. ANDERSON, 1951) et l'on doit s'attendre à y trouver une situation assez différente de celle décrite ici.

Les phénomènes karstiques

Comparons maintenant les différents éléments structuraux avec les phénomènes karstiques observés par les spéléologues.

En surface

La figure 8 représente, d'après une esquisse inédite de J.-P. GUIGNARD aimablement mise à ma disposition, les dolines et gouffres dans la région du Petit Pré. Je me suis contenté de les relier par des zones parallèles aux systèmes de diaclases D, I, II, III, E et F. L'esquisse se passe de commentaire. Notons seulement que l'alignement le plus important suit la direction N 130° E (système III), c'est-à-dire une zone d'anciennes fissures de tension (fissures a-c pour les tectoniques)

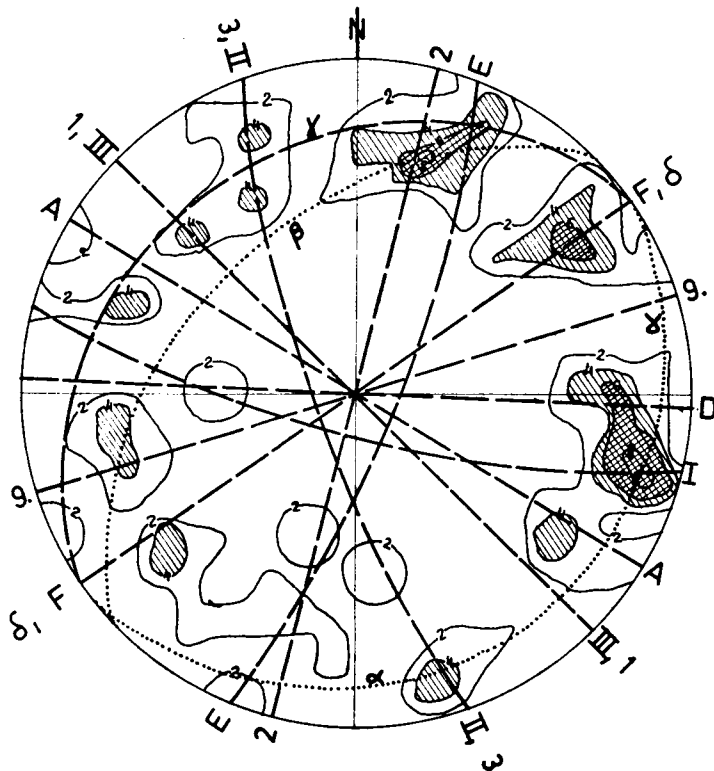


Fig. 9. Eléments structuraux et orientation des cavités souterraines (projection stéréographique équivalente, hémisphère supérieur).

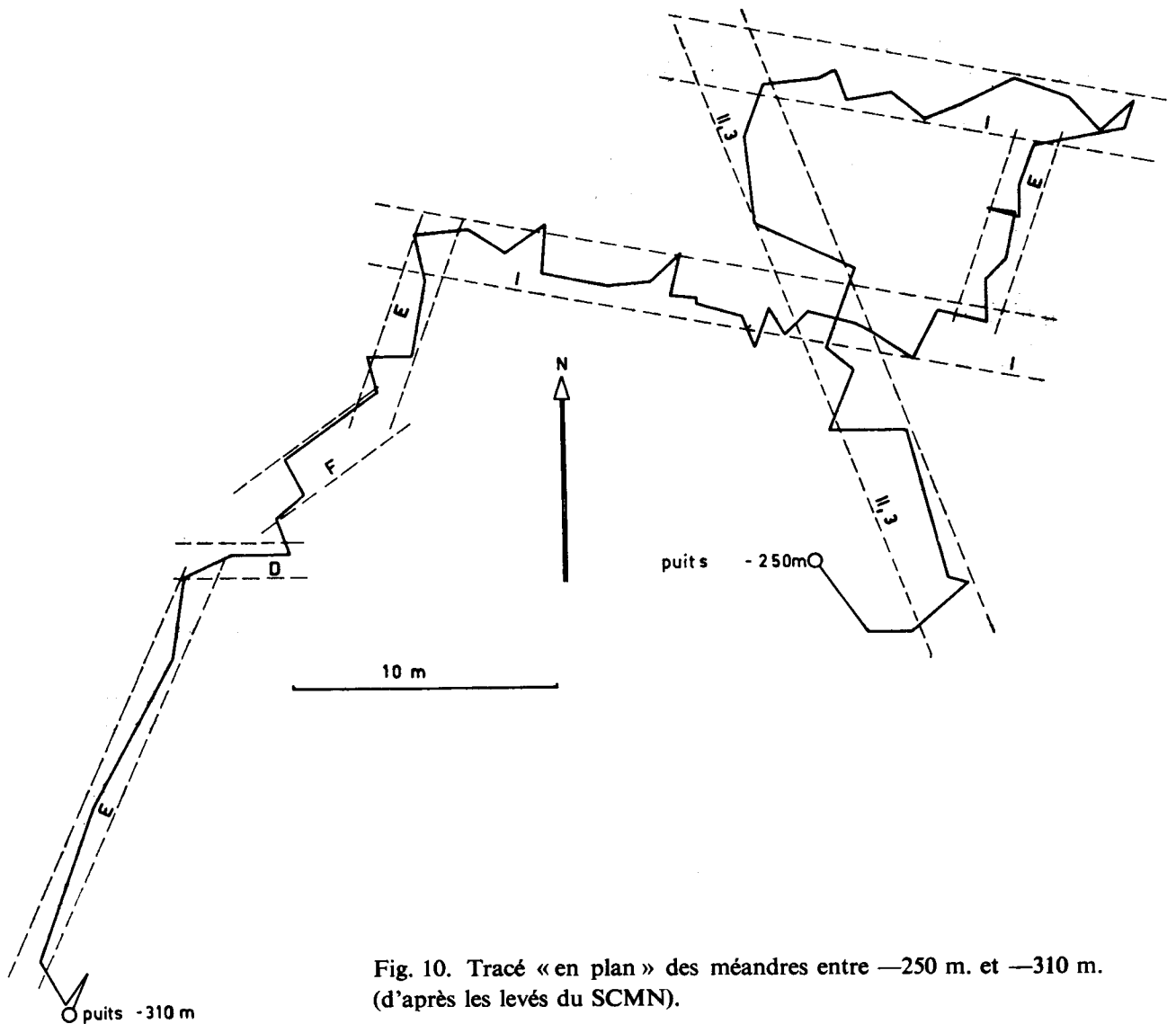


Fig. 10. Tracé « en plan » des méandres entre —250 m. et —310 m. (d'après les levés du SCMN).

reliées par des diaclases de cisaillement plus récentes. L'importance de zones analogues se marque aussi ailleurs dans le Jura. Il faut souligner encore une certaine *périodicité* des zones actives qui me paraît très importante pour l'exploration spéléologique systématique de la région. Si la dimension des mailles définies par les zones D, I, II, III, E et F reste \pm constante, il suffirait de prolonger ces zones à l'W du décrochement et explorer systématiquement les « nœuds » des mailles. Après l'exploration on pourrait comparer le modèle avec la réalité et estimer le degré d'approximation du modèle.

En profondeur

Lors de l'expédition de juin 1967 le SCMN avait effectué un levé topographique dans la partie inférieure du gouffre du Petit Pré, entre —250 m. et —310 m. environ. Les résultats du levé ont été aimablement mis à ma disposition par le SCMN que je remercie tout particulièrement. Il s'agit de méandres étroits dans lesquels on a effectué 67 visées de tronçons \pm rectilignes. La longueur des tronçons se situe entre 1 m. et 6 m. environ.

Le diagramme de la figure 9 montre la répartition spatiale des tronçons \pm rectilignes (par des courbes d'égalité de pôles) ainsi que la projection cyclo-graphique du plan moyen des différents systèmes de diaclases. Il apparaît assez clairement que l'orientation des tronçons rectilignes n'est pas due au hasard, mais que toute concentration importante (dépassant 4 ou 6 % des mesures totales) autour d'une direction est influencée par un système de diaclases. Il faut remarquer le rôle du système F (déduit du schéma de déformation) et le peu d'influence du système III (pourtant important en surface) à cette profondeur. La figure 10 montre l'alignement général des méandres. Les zones définies en surface apparaissent clairement en profondeur, à l'exception de la zone (III, 1). Cet alignement général est reporté sur la figure 8 en pointillé. On voit que le puits —310 m. se trouve à l'intersection d'une zone de (F, δ) avec une zone de (III, 1).

Le diagramme de la fig. 9 représente la synthèse des levés géologiques et spéléologiques: il permet de comparer, simultanément, l'orientation des cavités souterraines avec 11 systèmes de diaclases.

Conclusion

L'exemple du gouffre du Petit Pré a démontré que l'étude des relations entre orientation des cavités souterraines et éléments de la structure géologique exige l'emploi de la projection stéréographique permettant la comparaison directe et simultanée des éléments plans et linéaires. Les résultats sont encourageants même dans un cas comme celui du Petit Pré où, apparemment, on avait des difficultés à paralléliser les cavités souterraines avec les éléments structuraux.

Remerciements

Je tiens à remercier le SCMN et tous ses membres ayant participé à l'expédition de juin 1967 pour avoir mis à ma disposition les résultats de leurs observations et pour m'avoir permis (à un non-sportif encombrant) non seulement de descendre dans le gouffre du Petit Pré, mais encore d'en remonter à la surface!

Bibliographie

- ANDERSON, E.M. (1951): The dynamics of faulting. *Edinburgh, Oliver and Boyd*. 206 pp.
- AUBERT, D. (1941): Atlas géologique de la Suisse 1:25 000: Vallée de Joux. *Publ. Comm. géol. suisse*.
- AUDÉTAT, M. (1962): Essai de classification des cavernes de Suisse. *Stalactite* IV (6) et V (7). Sion.
- GUIGNARD, J.P. (1965): Une importante caverne du Jura vaudois: le gouffre du Petit Pré de Saint-Livres. *Les Alpes, rev. du Cl. alpin suisse 1965* (4), fasc. trimestriel.
- PHILIPS, F.C. (1954): The use of stereographic projection in structural geology. *Edward Arnold (Publisher) Ltd, London*: 86 p. 86 fig.
- RAST, N. (1966): Recent trends in geotectonics. *Earth-Science Reviews*, 2/1, pp. 1-46, 11 fig.
- WILSON, G. (1961): The tectonic significance of small scale structures and their importance to the geologist in the field. *Ann. Soc. géol. Belgique* LXXXIV: 423-548, 46 fig., IV planches.

*Université de Neuchâtel
Centre d'Hydrogéologie*