Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band: 91 (1968)

Artikel: Éléments structuraux et alignement de phénomènes karstiques
Autor: Kiraly, Laszlo
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-88989

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

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

INSTITUT DE GÉOLOGIE, UNIVERSITÉ DE NEUCHATEL
Directeur : Professeur J.-P. Schaer
CENTRE D'HYDROGÉOLOGIE
Directeur : Professeur A. Burger

ÉLÉMENTS STRUCTURAUX ET ALIGNEMENT DE PHÉNOMÈNES KARSTIQUES

(RÉGION DU GOUFFRE DU PETIT-PRÉ DE SAINT-LIVRES, JURA VAUDOIS)

par

LASZLO KIRALY

AVEC 10 FIGURES

1. Introduction

Le but de cette étude est de montrer :

1° l'importance de la projection stéréographique pour la représentation des levés spéléologiques en une forme directement utilisable par les géologues ;

2° l'importance de l'analyse structurale pour l'étude des phénomènes karstiques.

Dans bon nombre de publications on avait déjà 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... ». C'est souvent sans analyse structurale que les spéléologues parlent de cavités « tectoniques » ou cavités « karstiques ».

Quelques mots d'abord sur le terme « tectonique ». On le considère généralement comme synonyme de « structure » ou « géologie structurale ». Toutefois N. Rast (1966) souligne que la géologie structurale s'occupe essentiellement de la description et de l'analyse géométriques des éléments structuraux, tandis que la tectonique analyse surtout les processus de déformation dans leurs aspects cinématiques et dynamiques et à l'échelle régionale. Il en résulte que l'analyse géométrique des éléments structuraux doit précéder l'interprétation tectonique, et qu'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 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 importe plutôt d'étudier les relations géométriques entre structure géologique et orientation des cavités.

La représentation graphique des résultats du levé spéléologique 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 d'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 plus ou moins rectilignes du réseau selon leur pendage, leur direction et leur fréquence, mais encore de comparer ces arguments simultanément, à 3, éventuellement même à 10 systèmes de diaclases ! La représentation en plan et en profil du réseau souterrain ne permet pas ces comparaisons, donc les plans et profils ne sont pas directement utilisables par le géologue. Pour faciliter la collaboration entre spéléologues et géologues dans ce domaine, nous proposons l'introduction de la projection stéréographique en spéléologie comme moyen de représentation des tronçons plus ou moins rectilignes du réseau. L'exemple du Petit-Pré montrera les avantages d'une telle représentation.

2. Le gouffre du petit-pré et ses environs

2.1. *Situation générale*

L'emplacement exact et la description sommaire du gouffre sont donnés par M. Audetat (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 de dolines et de 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 des 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 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 inexistants le long de la zone traversée par la faille principale ». 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. » Essayons de comparer ces suppositions avec des observations et un modèle géologique plus explicite.

La situation géologique est esquissée sur la figure 1, extraite des travaux de D. Aubert (1941). Le gouffre se situe sur le flanc SE de l'anticlinal de Mont-Tendre, où existent plusieurs « genoux » (les parties inclinées ayant une 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 qui forment un système conjugué avec les décrochements senestres (orientés N 160° E environ) de la zone Vallorbe-Pontarlier. Le gouffre se trouve dans une partie peu inclinée du flanc, situé au SE d'un « genou », à proximité d'un décrochement dextre (voir fig. 1). Le gouffre traverse la base du Portlandien, tout le Kimmeridgien et entre dans le Séquanien (voir les descriptions lithologiques dans la monographie de D. Aubert (1943) et dans le travail de F. Le Guern qui paraîtra dans les Actes du Troisième Congrès national de la Société suisse de spéléologie).

2.2. *Les diaclases observées*

Soit U l'ensemble des diaclases autour du gouffre. Sur cet ensemble nous avons prélevé un sous-ensemble U 1 (échantillon, « sample ») par mesure de l'orientation des diaclases. La structure fondamentale de ce sous-ensemble prélevé sur U sera représentée par un modèle théorique (paragraphe 2.3). La structure et les relations définies sur U 1 seront ensuite extrapolées sur tout l'ensemble U.

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 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 figures 2 et 3 par des lignes d'égale densité de

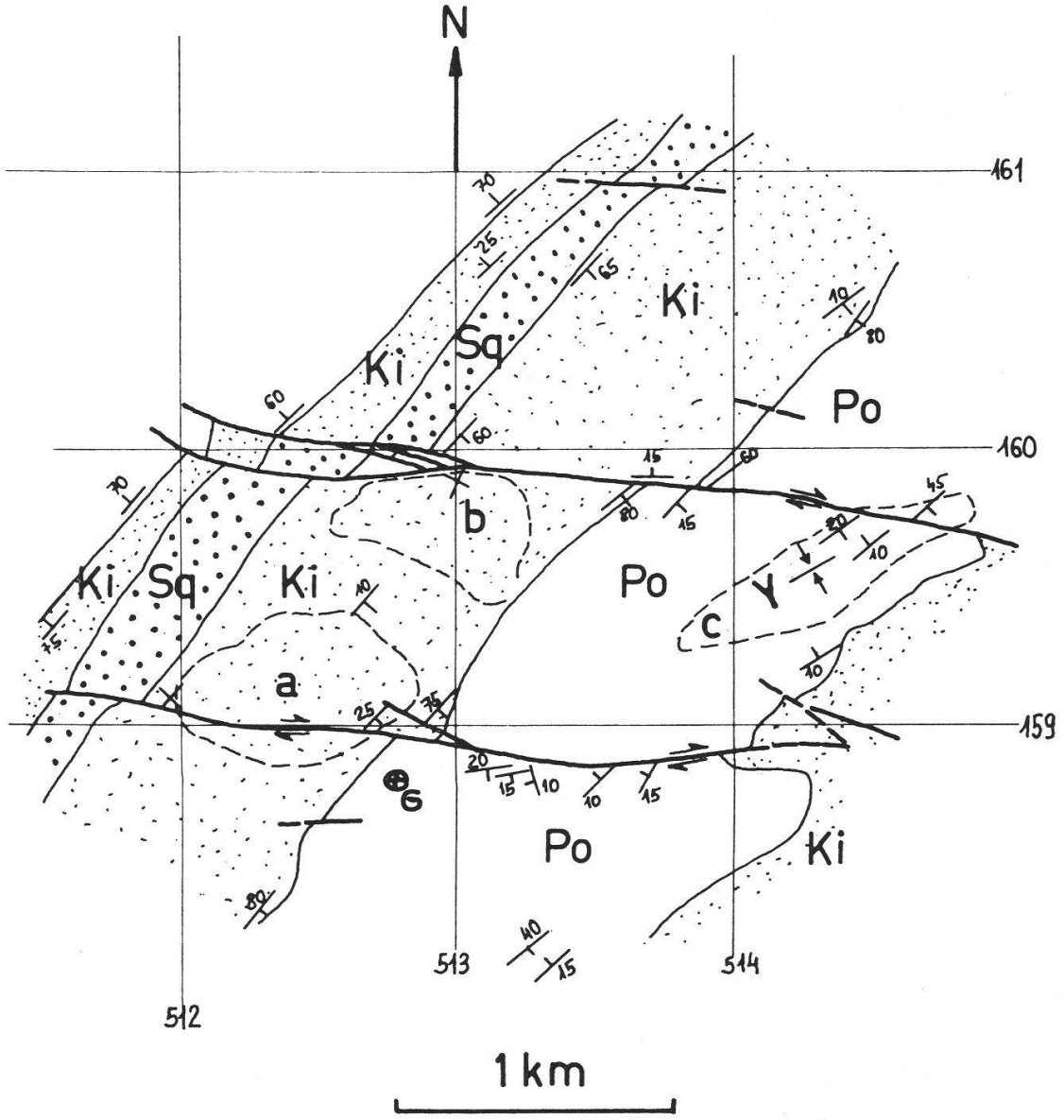


Fig. 1. Esquisse géologique de la région du Petit-Pré (d'après D. Aubert, 1941). Sq = Séquanien ; Ki = Kimmeridgien ; Po = Portlandien ; G = gouffre du Petit-Pré ; a, b, c = dépressions fermées ; Y = synclinal de second ordre ; ⊥ = orientation des couches géologiques.

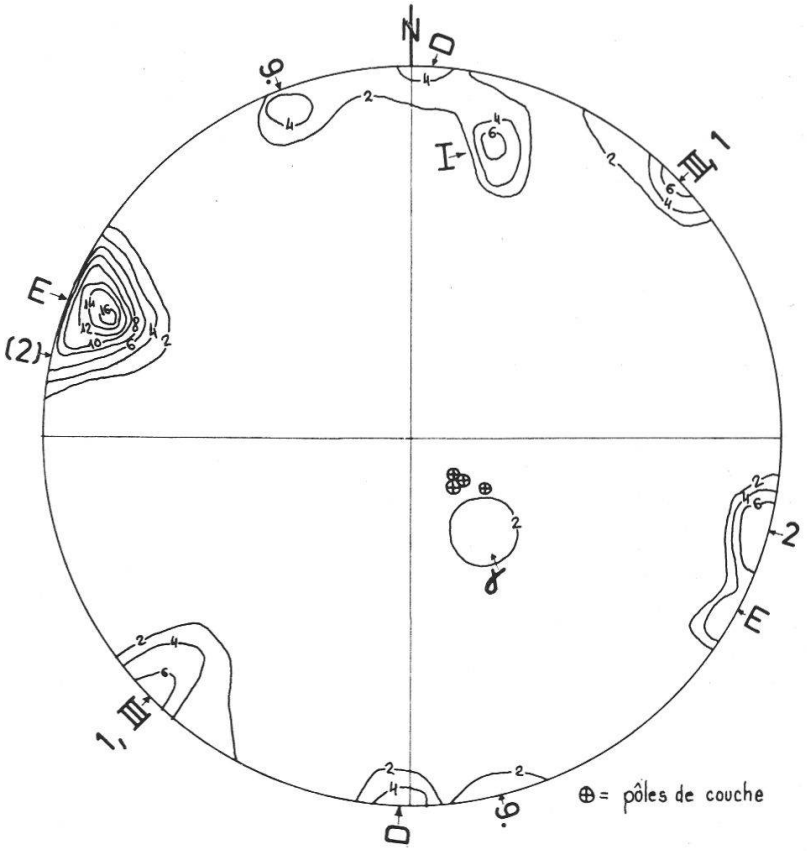


fig. 2.

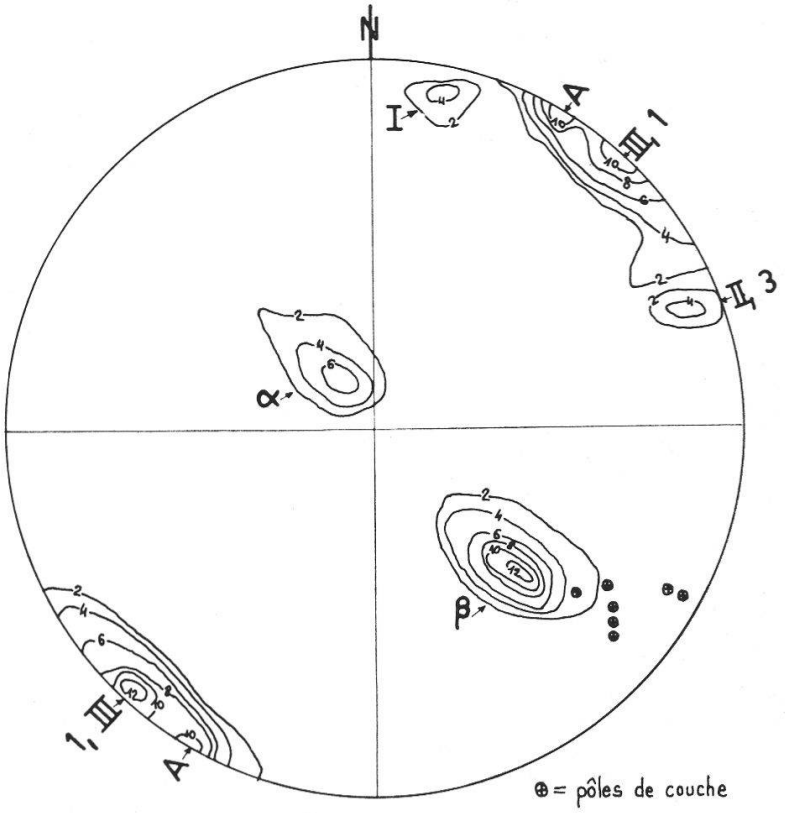


fig. 3.

Fig. 2 et 3. Orientation des éléments structuraux mesurés dans la région du gouffre. Fig. 2 : dans la partie peu inclinée, fig. 3 : dans le « genou ».

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 chiffres et des lettres. Le plan moyen de chaque système est représenté en projection cyclographique (c'est-à-dire par des arcs de cercle) sur la figure 4.

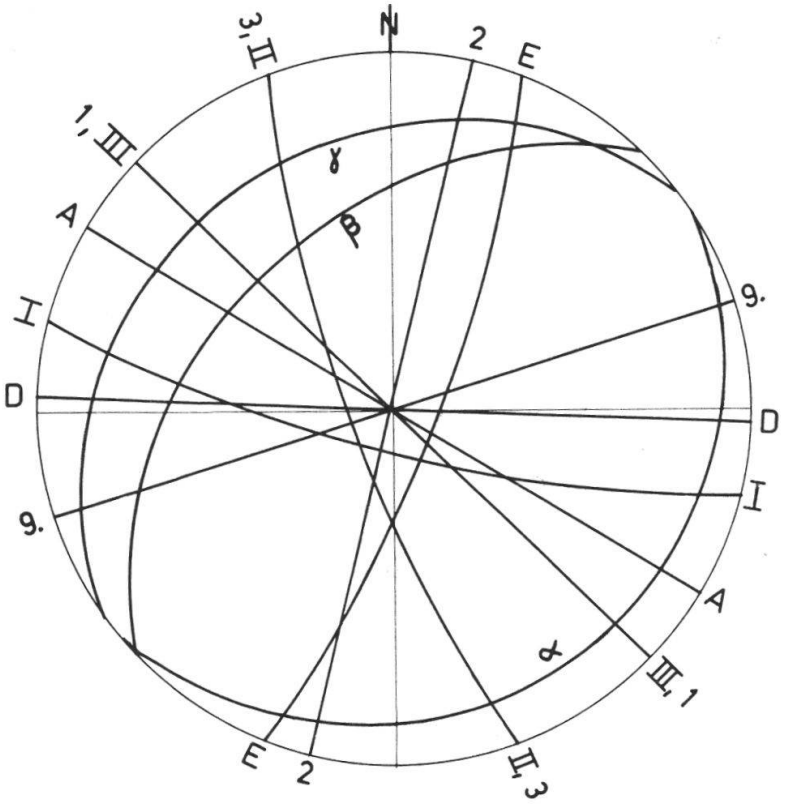


Fig. 4. Orientation des éléments structuraux mesurés dans la région du gouffre. Plans « moyens » des éléments structuraux (sur toutes les figures : projection stéréographique équisurface, hémisphère *supérieur*).

Les angles les plus significatifs pour l'interprétation tectonique sont : 15°-20°, 30°, 45°, 60° et 70°-80°. Dans notre cas on aura les relations angulaires suivantes entre les différents systèmes de diaclases (les numéros et lettres se rapportent aux désignations des figures 2, 3 et 4) :

angle 15°-20° :	D-I = 16°
	I-A = 19°
	A-III, 1 = 14°
	γ-couches peu inclinées = 12°
angle 30° :	I-9 = 31°
	I-III, 1 = 31°
	D-A = 29°
	III, 1-II, 3 = 27°
	β-couches du « genou » = 28°

angle 45° :	D-III, 1 = 42°
	A-II, 3 = 40°
	A-9 = 48°
	II, 3-E = 45°
	E-9 = 50°
angle 60° :	I-II, 3 = 61°
	III, 1-2 = 60°
	III, 1-9 = 62°
	β-α = 60°
angle 70°-80°	D-E = 71°
	D-II, 3 = 68°
	I-E = 84°

On peut concevoir, déjà d'après ces rapports angulaires, un modèle théorique pouvant expliquer l'apparition des fissures, leurs relations angulaires et leur rôle lors des déformations. Voici ce modèle :

2.3. *Le modèle théorique*

2.3.1. But et méthode

Le but de ce modèle est de faciliter la représentation et l'analyse de la structure géologique et de permettre la définition d'une relation d'ordre entre les éléments structuraux. Il est « une simplification du réel, que l'on tente pour lui faire subir les variations qui permettront de lire plus aisément la structure, et le diagramme, grâce auquel on figure le modèle, renvoie à l'analyse, à sa méthode, non à une réalité particulière dont il serait la reproduction » (J. Pouillon 1966, p. 781). Nous l'avons construit de la manière suivante :

a) On choisit, dans l'ensemble des éléments structuraux, quelques éléments jugés fondamentaux. Les éléments fondamentaux choisis pour ce modèle sont les grands décrochements dextres et senestres mentionnés précédemment (paragraphe 2.1), ainsi que l'axe de l'anticlinal de Mont-Tendre.

b) On choisit quelques hypothèses jugées fondamentales sur les mécanismes de déformation. Pour ce modèle les hypothèses suivantes ont été choisies :

1° A partir des principaux éléments structuraux choisis on peut trouver la direction des contraintes principales ayant engendré ces éléments.

2° A l'intérieur des « blocs » délimités par les décrochements principaux, la direction des contraintes principales et la fissuration d'ordre inférieur (secondary faults des auteurs anglo-saxons) seront déterminées par le sens et l'intensité des mouvements le long des décrochements principaux.

c) On applique les hypothèses choisies aux principaux éléments structuraux et l'on déduit les éléments structuraux d'ordre inférieur conformément aux hypothèses admises. La comparaison faite entre éléments déduits et éléments observés montrera le degré d'adéquation du modèle.

Dans les hypothèses du point *b* nous avons admis qu'à l'intérieur des blocs délimités par les décrochements principaux la fissuration d'ordre inférieur sera déterminée par le sens des mouvements le long de ces décrochements. Précisons comment.

J. D. Moody et M. J. Hill (1956) pensent que dans une zone de décrochements la direction de σ_3 (la plus grande contrainte de compression) modifiée sera plus ou moins perpendiculaire au décrochement principal ayant déterminé cette modification. Ils donnent aussi l'orientation des éléments structuraux secondaires : plis d'entraînement (« drag folds ») formant un angle de 15° environ avec l'accident principal et des décrochements secondaires conjugués (dextres et senestres) formant des angles de 75° et 45° environ avec le décrochement principal (Moody and Hill 1956, fig. 5).

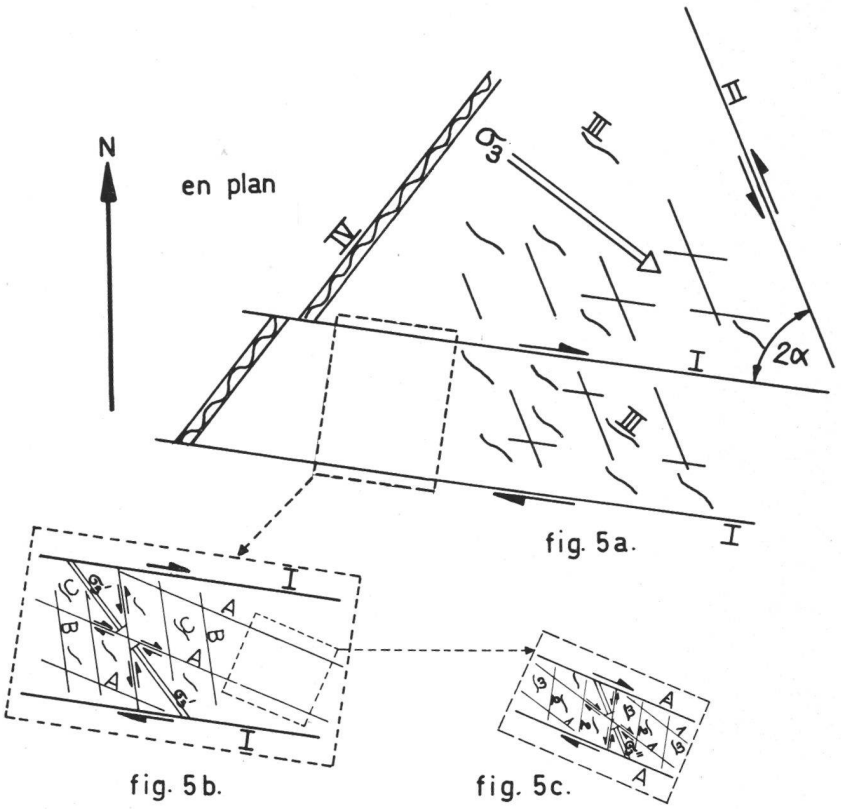
M. A. Chinnery (1961, 1963 et 1966) a calculé la distribution théorique des contraintes autour d'un décrochement isolé. Conformément aux résultats de E. M. Anderson (1951) il arrive à la conclusion que la distribution des contraintes est très compliquée autour des extrémités des décrochements, plus simple vers le milieu de ceux-ci. Il admet que les éléments structuraux secondaires sont formés aux extrémités des décrochements, ces extrémités se déplaçant au fur et à mesure que le décrochement « se propage » par à-coups. Les décrochements secondaires sont classifiés en 6 types déductibles du modèle théorique. M. A. Chinnery donne aussi leur direction par rapport à l'accident principal ainsi que le sens du mouvement (M. A. Chinnery 1966, p. 182, fig. 4).

Il faut souligner, toutefois, que ces études se rapportent à une seule grande zone de décrochements, tandis que la région qui nous intéresse est traversée par une série de décrochements relativement courts, parallèles les uns aux autres et déterminant une déformation par rotation interne (« Internrotation » des auteurs allemands) à l'échelle de l'anticlinal. Les conditions d'application n'étant pas réalisées, dans notre région, pour les schémas de Moody and Hill (1956) et M. A. Chinnery (1966), ce sont, finalement, le schéma de E. M. Anderson (1951) et celui, plus simple, de G. Wilson (1961) qui seront retenus ici.

D'après ces schémas, dans une région assez éloignée des extrémités du décrochement principal, la contrainte principale σ_3 modifiée fera un angle d'à peu près 45° avec l'accident primaire (changement de direction de 15° environ par rapport à σ_3 originelle). Des diaclases de cisaillements peuvent se développer à 30° à gauche et à droite de σ_3' et des fissures de tension peuvent apparaître parallèlement à la direction de σ_3'.

2.3.2. Description du modèle pour le Petit-Pré

a) Dans un premier stade et à l'échelle régionale, l'état de contraintes détermine l'apparition des plis principaux et des grands décrochements. La direction de la plus grande contrainte principale σ_3 doit être N 130° E



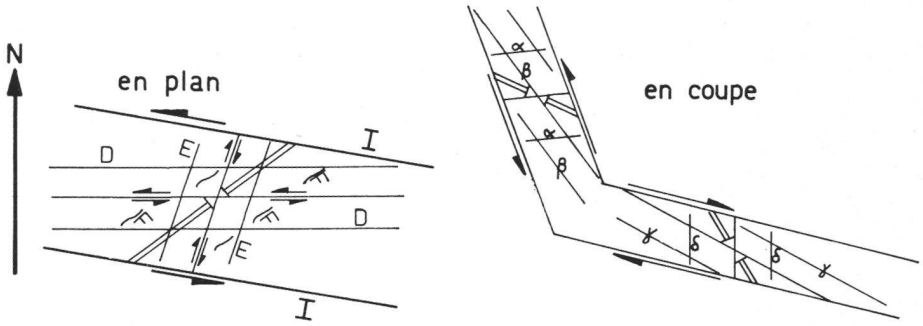


fig. 6. fig. 7.

Fig. 5, 6 et 7. Voir explication dans le texte.

faisant apparaître les plis avec une direction axiale de N 40° E environ (ensemble IV, fig. 5*a*), ainsi que les grands décrochements conjugués ($2\alpha = 60°$, fig. 5*a*) : un système de décrochements senestres orientés N 160° E (ensemble II, fig. 5*a*) et un système de décrochements dextres orientés N 100° E environ (ensemble I, fig. 5*a*). Dans la direction N 130° E (parallèlement à σ_3) des diaclases de tension doivent apparaître (ensemble III, fig. 5*a*). Les ensembles I, II, III et IV représentent donc les éléments structuraux de premier ordre régionalement développés.

Observations (voir fig. 1, 2, 3, 4 et 5). — Aux éléments de l'ensemble I correspondent les décrochements dextres dans la région du Petit-Pré. L'ensemble II est représenté par le décrochement senestre de Vallorbe-Pontarlier (+ les diaclases parallèles à cette zone). Les fissures pennées (« Fiederspalten ») de N 130°-135° E sont identifiées comme éléments de l'ensemble III et l'axe de l'anticlinal de Mont-Tendre correspond à l'ensemble IV.

b) Dans la région qui nous intéresse ce sont les décrochements dextres de l'ensemble I (N 100° E) qui se développent, les cisaillements senestres de l'ensemble II (N 160° E) restant sans grand rejet.

Les grands décrochements dextres I modifient l'état des contraintes dans les « blocs » qu'ils délimitent conformément à l'hypothèse fondamentale 2.3.1, lettre b. D'après la figure 5*b* on aura la contrainte maxima modifiée (σ_3') dans la direction N 145° E environ. σ_3' peut déterminer, théoriquement, l'apparition de deux systèmes de décrochements secondaires : un système dextre à N 115° E et un système senestre à N 175° E à peu près. Des diaclases de tension pourraient apparaître dans la direction N 145° E (voir fig. 5*b*). L'axe des plis secondaires formés sous l'influence de σ_3' doit être orienté N 55°-60° E environ. Ainsi le modèle nous donne quatre ensembles d'éléments structuraux de second ordre :

A = {plans de cisaillement dextres à N 115° E}
B = {plans de cisaillement senestres à N 175° E}
C = {diaclases de tension à N 145° E}
Y = {plis de second ordre à N 55°-60° E}

Observations. — Les décrochements dextres de l'ensemble A (N 115° E) se retrouvent facilement sur la carte géologique de D. Aubert (1941) (voir aussi fig. 1) et sur les stéréogrammes des figures 3 et 4. Les diaclases de l'ensemble B ne sont pas identifiables sur les stéréogrammes des figures 2 et 3 : elles ne se sont pas développées ou elles ont échappé à l'échantillonnage. Aux diaclases de tension de l'ensemble C correspondent quelques « Fiederspalten », de direction N 140°-145° E, assez mal représentées sur les stéréogrammes. Il faut souligner, par contre, l'orientation axiale du petit synclinal Y (voir fig. 1) qui est de N 60° E, c'est-à-dire perpendiculaire à σ_3'.

En définitive, ce sont seulement les éléments structuraux appartenant aux ensembles A et Y que l'on retrouve sans ambiguïté dans les observations.

c) Les décrochements de deuxième ordre A (N 115° E) modifient à leur tour la direction de la contrainte maxima dans les « blocs » qu'ils délimitent, selon le schéma de la figure 5*c*. Dans ces « blocs » la direction de σ_3'' est de N 160° E et peut entraîner l'apparition d'éléments structuraux de troisième ordre. Sur la figure 5*c* on distingue les ensembles suivants : 1 = {plans de cisaillement dextres N 130° E}
2 = {plans de cisaillement senestres N 10° E}
3 = {diaclases de tension N 160° E}

Ce résultat est intéressant car il montre que les éléments de l'ensemble 1 sont parallèles aux éléments de l'ensemble primaire III et l'orientation des éléments de l'ensemble 3 est la même que celle des diaclases primaires de l'ensemble II. Il n'y a que les éléments de l'ensemble 2 qui seront « nouveaux » (N 10° E). La contrainte principale de troisième ordre σ_3'' aura donc pour effet la « réactivation » des éléments de premier ordre II et III. Toutefois l'étendue de cette « réactivation » des éléments primaires sera d'un ordre de grandeur très inférieur à leur extension originelle considérée dans le premier stade du modèle (paragraphe 2.3.2, lettre a). Cette « réactivation » consiste à relier, par des diaclases de cisaillement, les fissures de tension primaire (III) et à ouvrir légèrement les diaclases de cisaillement de l'ensemble II.

Observations. — Puisque les éléments de troisième ordre des ensembles 1 et 3 sont parallèles aux éléments de premier ordre des ensembles II et III, leurs séparation et identification deviennent très subjectives. L'analyse détaillée de la densité de ces éléments pourrait donner, éventuellement, des critères d'identification. Les éléments de l'ensemble 2 semblent représentés par une concentration de pôles sur le stéréogramme de la figure 2. Leur développement est toutefois négligeable dans la région du gouffre.

d) En supposant que les décrochements principaux I (dextres) fonctionnent, au moins par moment (à la suite de réajustement des blocs) comme décrochements senestres (inversion du sens du mouvement), nous devons avoir de nouveaux éléments de second ordre selon le schéma de la figure 6. On aura les ensembles :

D = {plans de cisaillement dextres N 25° E}
E = {plans de cisaillement senestres N 85° E}
F = {diaclases de tension N 55° E}

Observations. — Sur le stéréogramme de la figure 2 nous avons une faible concentration de pôles identifiable aux éléments de l'ensemble D

et une très forte concentration de pôles correspondant aux diaclases de l'ensemble E. Les stéréogrammes (fig. 2, 3 et 4) ne montrent, par contre, pas de diaclases pouvant être identifiées aux éléments de l'ensemble F (N 55°). Il faut remarquer toutefois que l'on observe, sur les dalles peu inclinées du Portlandien dans la région du gouffre, des lapiez bien développés et orientés N 50°-60° E. La dissolution les a déjà passablement élargis, c'est pourquoi ils ne sont pas représentés sur les stéréogrammes des éléments structuraux proprement dits.

e) Enfin on doit considérer la microfissuration et les diaclases peu étendues engendrées par le glissement des couches les unes sur les autres. D'après le schéma de la figure 7 nous aurons les ensembles suivants :

α = {plans de cisaillement dextres N 40°-50° E, pendage ~10° vers le NW}
β = {plans de cisaillement senestres N 40°-50° E, pendage 55° SE}
γ = {plans de cisaillement dextres N 40°-50° E, pendage 25°-30° SE}
δ = {plans de cisaillement senestres N 40°-50° E, subverticaux}

Ces plans de cisaillement se développent à l'échelle du banc, leur orientation varie avec l'inclinaison des couches. A noter que les éléments de l'ensemble δ sont subparallèles aux éléments de l'ensemble F.

Observations. — Sur le stéréogramme de la figure 3 on identifie facilement les ensembles α et β, mais la figure 2 ne contient qu'un seul pôle de diaclase assimilable à un élément de l'ensemble γ. Les éléments de l'ensemble δ ne sont pas représentés sur les stéréogrammes (fig. 2 et 3).

2.3.3. Classification des éléments structuraux

La correspondance entre le modèle théorique et les observations est assez étroite. Tous les ensembles déductibles d'après le modèle ne sont pas représentés dans les observations, mais il arrive fréquemment, dans le cas de systèmes conjugués, qu'un des systèmes se développe beaucoup plus fortement que l'autre. Remarquons encore que l'ensemble 9 des observations (fig. 2 et 4) n'apparaît pas dans le modèle théorique.

Il faut souligner que d'après le modèle les différents systèmes de diaclases ont joué des rôles variables suivant le stade et, surtout, l'échelle des déformations. Nous pouvons schématiser l'extension et l'importance dans la déformation des différents éléments structuraux en distinguant les classes suivantes :

1° une classe P = {ensembles I, II, III, IV} des éléments structuraux de premier ordre ;

2° une classe Q = {ensembles A, B, C, D, E, F, Y} des éléments structuraux de deuxième ordre ;

3° une classe R = {ensembles 1, 2, 3} des éléments structuraux de troisième ordre ;

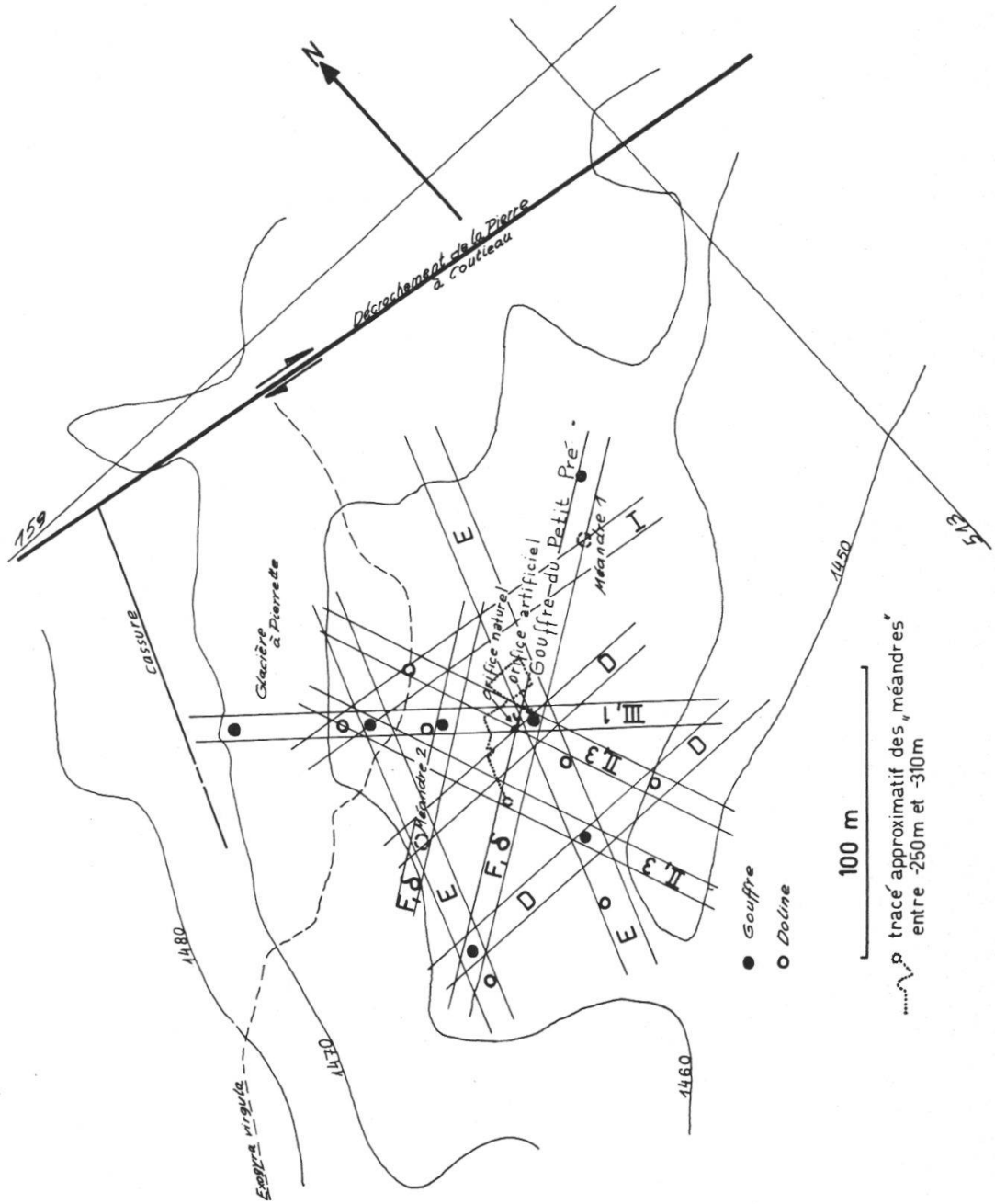
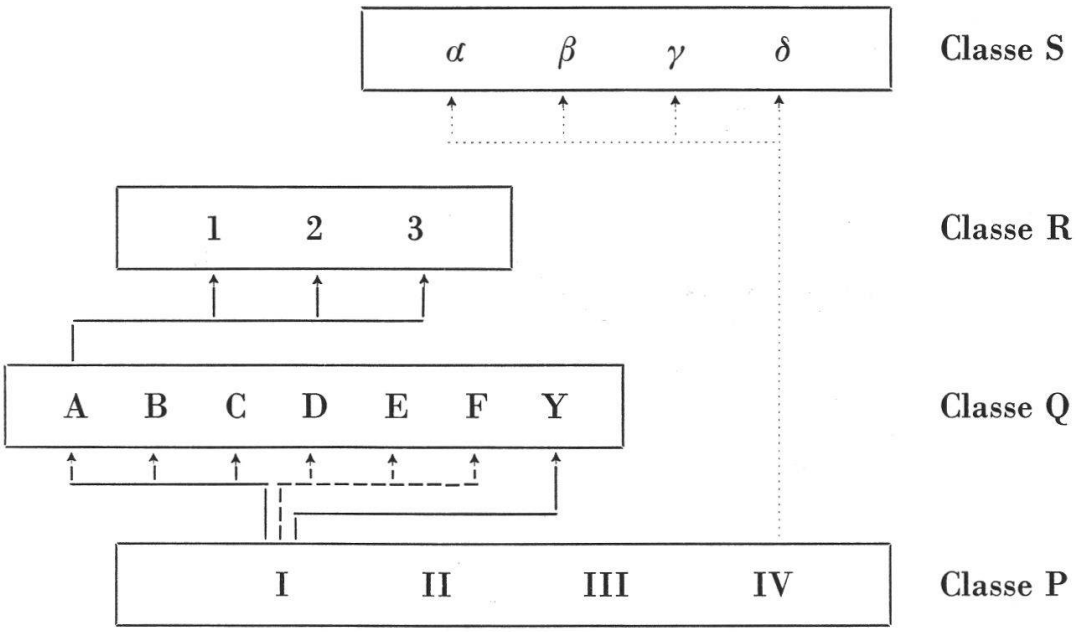


Fig. 8. Alignement des gouffres et dolines dans la région du Petit-Pré.

4° une classe S = {ensembles α, β, γ, δ} des éléments structuraux développés à l'échelle du banc.

L'« arbre généalogique » des ensembles et classes peut être schématisé de la façon suivante :



où : ——→ = « opération cisaillement dextre »
- - - - - - - → = « opération cisaillement senestre »
····· → = « opération glissement couche sur couche »

Quant à l'orientation des éléments, plusieurs ensembles, d'ordre de grandeur et d'importance très différents, s'empiètent :

N 130° E = III et 1
N 160° E = II et 3
N 55° E = D et δ

2.3. *Les phénomènes karstiques*

Théoriquement l'alignement des phénomènes karstiques devrait suivre surtout les zones localement « réactivées », c'est-à-dire les directions N 130° E, N 160° E et N 55° E. Comparons donc les alignements des phénomènes karstiques observés avec les directions déduites du modèle.

2.3.1. 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 I, (II,3), (III, 1), E, (F, δ), D. L'esquisse se passe de commentaire. Notons seulement que l'alignement le plus

important suit la direction N 130° E (comme l'a déjà souligné J.-P. GUIGNARD (1965)), c'est-à-dire une zone d'anciennes fissures de tension reliées localement par des diaclases de cisaillement. L'importance de zones analogues se marque aussi d'ailleurs dans le Jura. Il faut souligner encore une certaine périodicité des zones actives qui paraît très importante pour l'exploration spéléologique systématique de la région. Si la dimension des mailles définies par les zones I, (II, 3), (III, 1), D, (F, δ), E reste plus ou moins constante, il suffirait de prolonger ces zones à l'W du décrochement et explorer systématiquement les « nœuds » des mailles.

2.3.2. 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. Il s'agit de méandres étroits dans

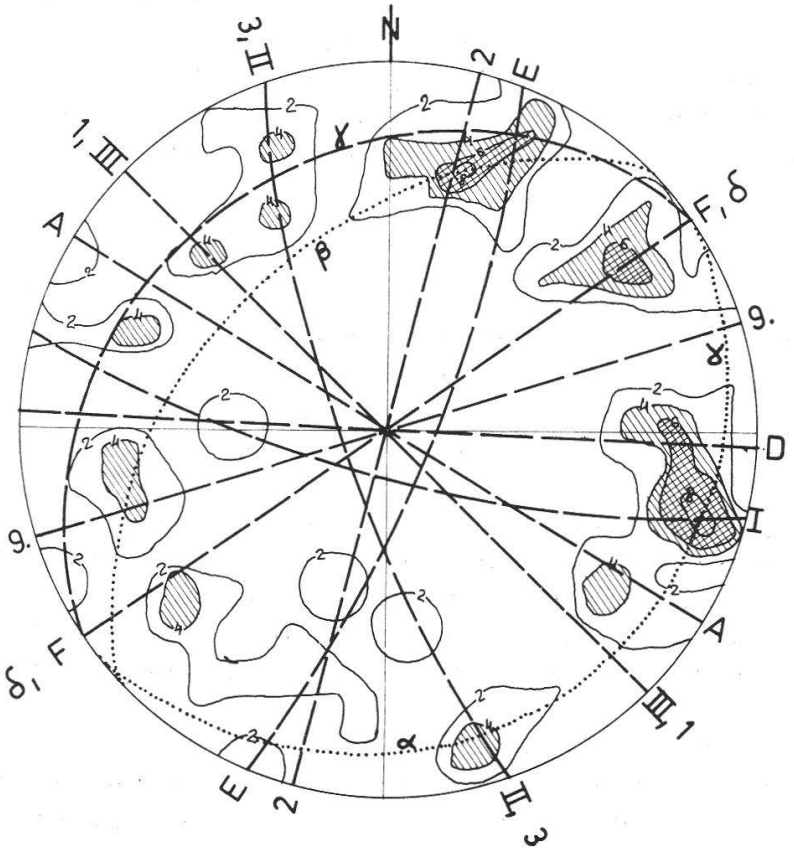


Fig. 9. Eléments structuraux et orientation des cavités souterraines (projection stéréographique équi-surface, hémisphère supérieur).

lesquels on a effectué 67 visées de tronçons plus ou moins rectilignes. La longueur des tronçons se situe entre 1 m et 6 m environ. 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, 2).

Le diagramme de la figure 9 montre la répartition spatiale des tronçons plus ou moins rectilignes (par des courbes d'égale densité des pôles), ainsi que la projection cyclographique du plan moyen des différents systèmes de diaclases. Il apparaît 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, δ) (déduit du schéma théorique) et le peu d'influence du système (III, 1) (pourtant important en surface) à cette profondeur. Soulignons, enfin, que si « en plan » l'orientation des tronçons rectilignes est déterminée presque exclusivement par des diaclases subverticales, l'inclinaison de ces mêmes tronçons rectilignes dépend surtout de l'inclinaison des couches et des diaclases provenant du glissement des bancs les uns sur les autres. (Voir le stéréogramme de la figure 9, où les concentrations de pôles se trouvent sur un cône à axe vertical et à génératrice peu inclinée.)

Le diagramme de la figure 9 représente la synthèse des levés géologiques et spéléologiques : il permet de comparer, simultanément, l'orientation des cavités souterraines avec 12 systèmes de diaclases.

3. Résumé et conclusions

a) L'exemple du gouffre du Petit-Pré a démontré que l'étude des relations entre orientation des cavités souterraines et des éléments de la structure géologique s'analyse mieux par l'emploi de la projection stéréographique permettant la comparaison directe et simultanée des éléments plans et linéaires.

b) L'emploi d'un modèle structural conceptuel a permis de définir une relation d'ordre sur l'ensemble des éléments structuraux (diaclases, décrochements, axe des plis) pouvant influencer l'alignement des phénomènes karstiques. Il apparaît que, dans la région du Petit-Pré, ce sont, essentiellement, les éléments structuraux de premier et de deuxième ordre qui déterminent l'alignement des phénomènes karstiques, en surface et en profondeur.

c) Certains éléments structuraux, influençant fortement l'alignement des gouffres et des dolines en surface, restent apparemment sans effet sur l'orientation des cavités karstiques en profondeur.

d) L'alignement des phénomènes karstiques suit aussi bien les éléments structuraux développés par cisaillement que les fissures de tension.

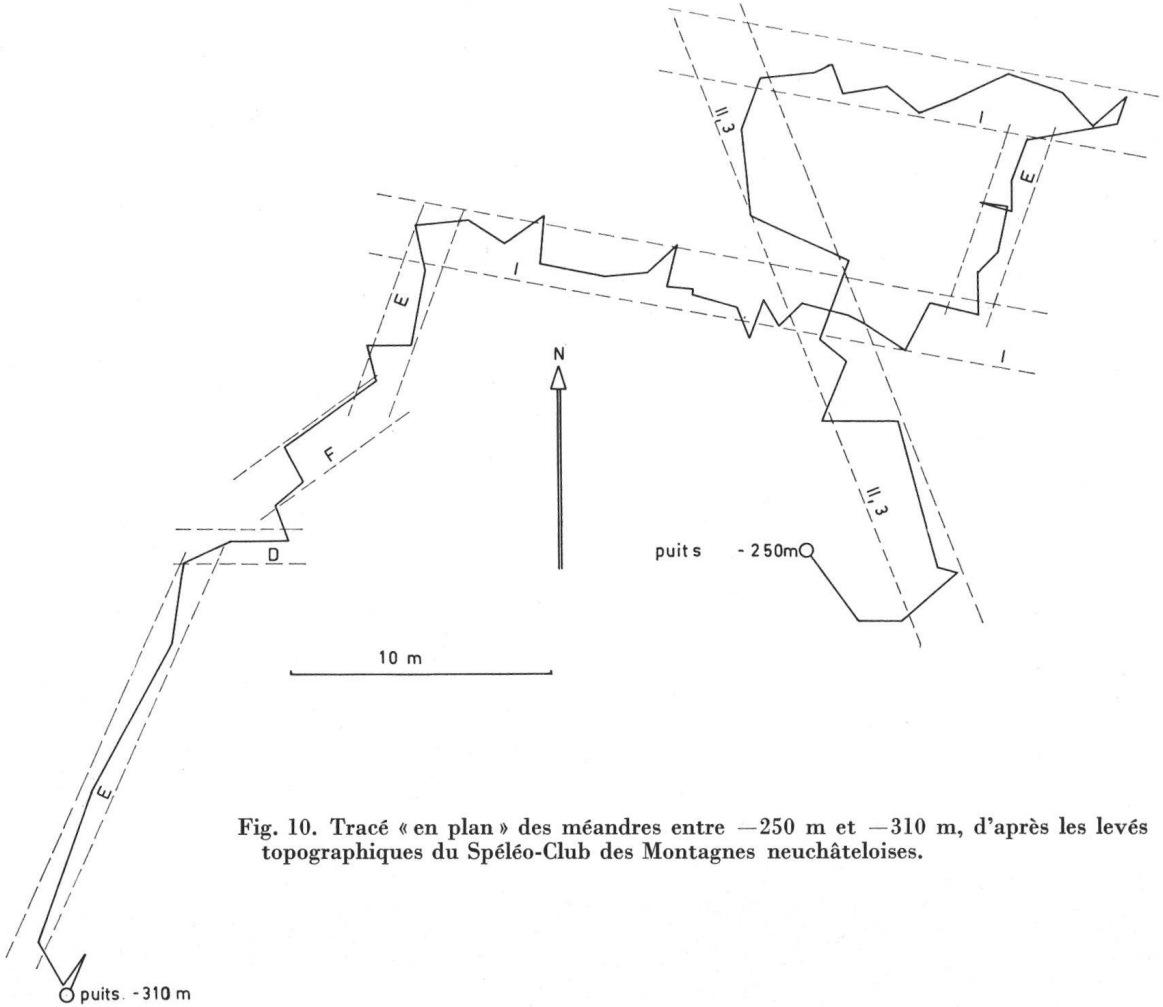


Fig. 10. Tracé « en plan » des méandres entre —250 m et —310 m, d'après les levés topographiques du Spéléo-Club des Montagnes neuchâteloises.

Remerciements

Je tiens à remercier le Spéléo-Club des Montagnes neuchâteloises et tous ses membres ayant participé à l'expédition de juin 1967, pour avoir mis à ma disposition les résultats de leurs observations.

Je remercie, en outre, MM. les professeurs J.-P. Schaer, A. Burger et B. Kubler pour la lecture du manuscrit et pour leurs suggestions constructives.

Ce travail entre dans le cadre d'une étude plus étendue sur les unités hydrogéologiques du Jura que nous poursuivons grâce à un subside du Fonds national de la Recherche scientifique.

Zusammenfassung

a) Das Beispiel der Schachthöhle von Petit-Pré hat gezeigt, dass das Studium der Beziehungen zwischen der Orientierung von unterirdischen Hohlräume und geologischen Strukturelemente die Verwendung der stereographischen Projektion verlangt, welche einen direkten und gleichzeitigen Vergleich der ebenen und linearen Elemente erlaubt.

b) Die Verwendung eines theoretischen Strukturmodells erlaubte die Definition einer Ordnungsbeziehung für die Menge der Strukturelemente (Klüfte, Horizontalverschiebungen, Faltachsen), welche die Verteilung und Regelung der Karstphänomene bestimmen, sowohl an der Oberfläche wie in der Tiefe.

c) Gewisse Strukturelemente, die die Verteilung der Dolinen und Schachthöhlen an der Oberfläche stark beeinflussen, bleiben scheinbar ohne Einfluss auf die Orientierung der Karsthohlräume in der Tiefe.

d) Die Verteilung und Regelung der Karstphänomene sind sowohl durch die Scherklüfte wie durch die Spannungsrisse beeinflusst.

Summary

a) The example of the Petit-Pré shaft cave shows that the use of stereographic projection is essential to study the relationships between the orientation of subterranean cavities and elements of the geological structure, because it allows a direct and simultaneous comparison of both the plane and linear elements.

b) The use of a conceptual structural model has made it possible to define an order on the set of the structural elements (joints, strike-slip faults, fold axis) capable of influencing the alignement of karst phenomena. It seems that in the area of Petit-Pré, it is essentially the structural elements of first and second order which determine the alignement of karst phenomena both on the surface and in depth.

c) Certain structural elements, greatly influencing the alignement of karst phenomena on surface, remain apparently without any effect on the orientation of the caves underneath.

d) The alignement of karst phenomena follows both the shearing and tension fissures.

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON, E. M. — (1951). The dynamics of faulting. 206 pp., *Edinburgh* (Oliver and Boyd).

AUBERT, D. — (1941). Atlas géologique de la Suisse 1 : 25 000. Vallée de Joux. *Commission Géol. Suisse.*

— (1943). Monographie géologique de la Vallée de Joux (Jura vaudois, Suisse). *Mat. pour la Carte géol. Suisse* 78 (108) : X + 134 pp., 32 fig., 1 planche.

AUDETAT, M. — (1962). Essai d'une classification des cavernes de Suisse. *Stalactite*, t. IV, N° 6 et t. V, N° 7.

CHINNERY, M. A. — (1961). The deformation of the ground around surface faults. *Bull. Seism. Soc. Am.* 50 : 355-372, 12 fig.

— (1963). Stress changes that accompany strike-slip faulting. *Seism. Soc. Am. Bull.* 53 : 921-932, 7 fig.

— (1966). Secondary faulting. *Can. J. Earth Sci.* 3 : 163-190, 6 + 8 fig.

GUIGNARD, J.-P. — (1965). Une importante caverne du Jura vaudois : le gouffre du Petit Pré de Saint-Livres. *Les Alpes* (Revue du C.A.S.), fasc. trimestriel 4, 1965.

KIRALY, L. et MEIA, J. — (1967). Observations tectoniques dans une carrière de Chaumont (Jura neuchâtelois, Suisse). *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 90 : 277-283, 4 fig., 1 pl.

MOODY, J. D. and HILL, M. J. — (1956). Wrench-fault tectonics. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 67/9 : 1207-1246, 25 fig., 2 tabl.

POUILLON, J. — (1966). Problèmes de structuralisme. Présentation : un essai de définition. *Les Temps Modernes*, 22e année, N° 246, pp. 769-790.

RAST, N. — (1966). Recent trends in geotectonics. *Earth - Science Reviews* 2/1 : 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* 84 : 423-548, 46 fig., 4 pl.