

INSTITUT DE GÉOLOGIE, UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Directeur : Professeur Jean-Paul Schaer

CENTRE D'HYDROGÉOLOGIE

**FISSURATION ET ORIENTATION
DES CAVITÉS SOUTERRAINES
RÉGION DE LA GROTTÉ DE MILANDRE
(JURA TABULAIRE)**

par

LASZLO KIRALY, BERNARD MATHEY et JEAN-PIERRE TRIPET

AVEC 5 FIGURES

1. INTRODUCTION

1.1. But de l'étude

Le but du présent travail est d'étudier les relations entre l'orientation des galeries d'une cavité souterraine et la fissuration des calcaires dans lesquels elle se développe. Les étapes successives de l'étude sont les suivantes :

- a) on teste l'isotropie ou l'anisotropie de l'orientation des différents tronçons de la cavité karstique ;
- b) on effectue la même opération sur les fissures de la roche dans les environs de la grotte ;
- c) on compare la distribution des deux ensembles d'éléments étudiés sous *a* et *b* ;
- c) on propose une interprétation génétique des analogies et des différences mises en évidence sous *c*.

L'analyse géométrique de l'orientation des cavités souterraines et des éléments de la structure géologique, opération descriptive, doit précéder l'interprétation génétique ; celle-ci fait intervenir des processus tectoniques et hydrauliques. Telle est la démarche qui a été adoptée au cours de la présente étude.

1.2. Situation générale

La grotte de Milandre (Ajoie) se développe dans les calcaires sub-horizontaux du Rauracien-Séquanien, qui forment, avec le Kimmeridgien, un complexe calcaire épais de 250 à 270 m (E. ERZINGER 1943).

Cette cavité est parcourue par une rivière souterraine. La situation et la description sommaire de la grotte sont données par E. KLOETZLI (1969), et P. VOUILLAMOZ (1969) cite brièvement les plus récentes découvertes faites dans cette cavité (développement : 8074 m à fin 1968) ; le plan et la coupe de la grotte ont paru à la fin de cette dernière note ; ce plan est reproduit dans le présent travail (fig. 1).

2. ETUDE DE L'ORIENTATION DES GALERIES DE LA GROTTÉ

2.1. Relevé topographique souterrain

Chaque tronçon plus ou moins rectiligne de la cavité a fait l'objet d'une mesure (azimut, pente, dimensions) ; la technique du relevé a été décrite par E. KLOETZLI (1968) ; notons que l'usage d'un magnétophone portatif a avantageusement remplacé le carnet de notes, vu les conditions particulières du milieu.

2.2. Méthode d'élaboration des mesures

Tous les axes de galeries mesurés dans la grotte ont été reportés, avec indication de leur longueur, sur un diagramme de Schmidt (projection équi-surface).

Le 88% de la longueur totale des mesures ainsi représentées ont une pente inférieure à 10°.

Dans la suite de l'étude, il n'a été tenu compte que de cette concentration d'éléments voisins de l'horizontale ; les axes de pente supérieure, répartis dans divers azimuts, ont été négligés. Une autre simplification a consisté à ramener à l'horizontale toutes les mesures prises en considération ; ceci est destiné à faciliter la comparaison entre la distribution de l'orientation des galeries et des fissures, et sera sans conséquence sur l'interprétation finale.

Il reste donc à étudier la répartition directionnelle d'éléments linéaires (axes de galeries) horizontaux, compte tenu de leur longueur. L'anisotropie de la distribution de l'ensemble de ces individus est testée grâce à une méthode décrite par A. B. VISTELIUS (1966, p. 99).

Ces axes horizontaux ont leurs pôles répartis sur le cercle équatorial, en projection azimutale. Chaque pôle est affecté d'un poids égal à la longueur de son axe en mètres. On teste l'hypothèse que ces individus sont orientés dans l'espace d'une façon aléatoire, sans aucune tendance préférentielle.

Si N est le nombre total d'individus, et que le cercle équatorial est divisé en K arcs égaux contenant chacun n_i éléments, la valeur de n_i est une variable aléatoire, pour laquelle on peut accepter une loi de distribution normale (A. B. VISTELIUS 1966) autour de la moyenne $n = N/K$.

A. B. VISTELIUS (*op. cit.*) donne une formule qui permet de calculer la valeur des limites m_1 et m_2 pour les déviations de n_i autour de sa moyenne n , telles que l'hypothèse de départ (isotropie de la distribution pondérée des pôles) puisse être acceptée comme vraie pour un intervalle de confiance donné.

$$\text{On a : } m_{1,2} = \frac{N(2n + t^2) \pm \sqrt{[t^4 N^2 + 4t^2 Nn(N - n)]}}{2(t^2 + N)}$$

où t est la variable réduite (déviations par rapport à la moyenne, exprimée en unités standard).

En appliquant ce test à l'échantillon considéré, on a :

pour $t = 2$

$$\begin{aligned} m_1 &= 564 \text{ (limite supérieure)} \\ m_2 &= 476 \text{ (limite inférieure)} \end{aligned}$$

pour $t = 3$

$$\begin{aligned} m_1 &= 589 \text{ (limite supérieure)} \\ m_2 &= 456 \text{ (limite inférieure)} \end{aligned}$$

2.3. Présentation des résultats

Ceci permet de distinguer les groupements suivants dans la répartition pondérée des pôles (fig. 2) :

1. Zones de dispersion ou zones à densité anormalement faible ; n_i est inférieur à m_2 pour $t = 3$. On peut rejeter l'hypothèse d'une répartition isotrope.
2. Zone de transition entre la dispersion et la distribution isotrope ; n_i est compris entre m_2 pour $t = 3$ et m_2 pour $t = 2$. Cette zone n'est pas représentée ici.
3. Zone isotrope ; n_i est compris entre m_2 et m_1 pour $t = 2$.
On peut accepter l'hypothèse d'une répartition isotrope. Cette zone n'est pas représentée ici.
4. Zone de transition entre la concentration et la distribution isotrope ; n_i est compris entre m_1 pour $t = 2$ et m_1 pour $t = 3$.
5. Zone de concentration ; n_i est supérieur à m_1 pour $t = 3$.
On peut rejeter l'hypothèse d'une répartition isotrope.

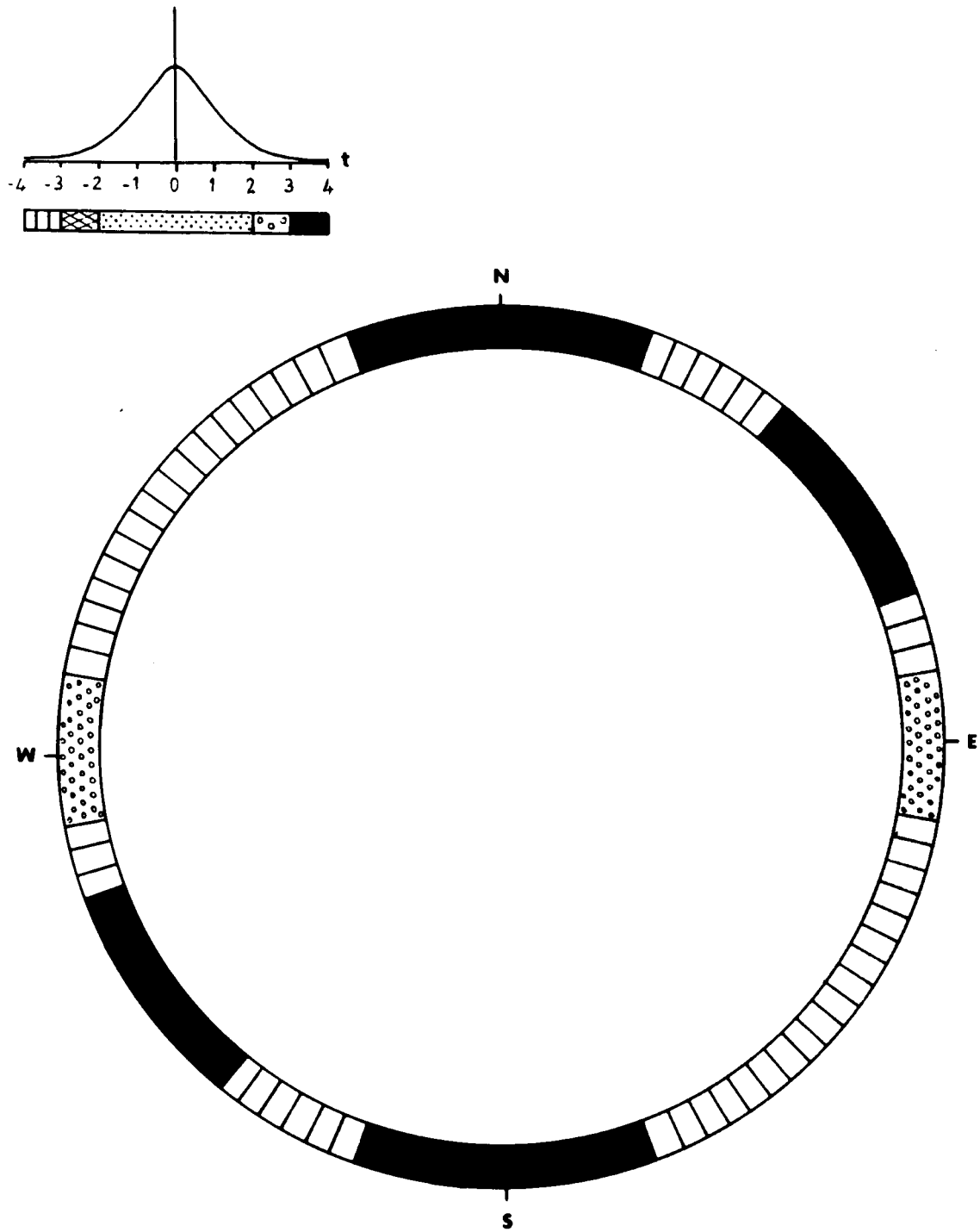


Fig. 2. Distribution de l'orientation des galeries de la grotte. Représentation graphique des résultats du test de A. B. Vistelius.

Cette distribution est représentée à la figure 2. On distingue deux directions de répartition concentrée de l'orientation des galeries de la grotte : l'une environ Nord-Sud, l'autre N 50° E. Dans la direction Est-Ouest, nous avons une zone de transition entre la concentration et la distribution isotrope. Ces galeries orientées N 0° E, N 50° E et N 90° E sont d'ailleurs bien visibles sur le plan de la cavité (fig. 1).

3. ETUDE DE LA FISSURATION DES CALCAIRES

3.1. Mesures de terrain

L'étude de la fissuration est faite en surface. En effet, la méthode utilisée est quasiment inapplicable en caverne, où les fissures béantes sont généralement les seules visibles ; les fissures fines, beaucoup plus nombreuses que ces crevasses, et qui jouent un rôle très important dans la circulation des eaux souterraines, sont masquées par les dépôts de surface de la roche, ou si celle-ci est propre, par le poli dû à l'érosion mécanique et chimique.

La méthode utilisée pour les levés est décrite par L. KIRALY (1969b), d'après L. MULLER (1963). Les stations de mesure, au nombre de neuf, ont été choisies de façon à être uniformément réparties au-dessus de la cavité, et en fonction de la qualité des affleurements (fig. 3). En une station, une ou plusieurs lignes de lever sont définies et matérialisées par un ruban métrique ; la direction et le pendage de tous les éléments plans (fractures ou plans de couches) coupant la ligne de lever, ainsi que la direction, la pente et la longueur de cette dernière, sont mesurées. L'orientation d'environ 550 éléments plans a été ainsi relevée.

3.2. Méthode d'élaboration des mesures

L'élaboration des mesures comprend les étapes suivantes :

A. Au niveau de la station

- a) Pour chaque station, les éléments plans mesurés (fractures et plans de couches) sont représentés par leurs pôles sur un diagramme de Schmidt (projection équi-surface).
- b) Les accumulations de pôles plus ou moins unimodales sont séparées sur ce diagramme.
- c) Pour chaque accumulation, la position de la normale moyenne (représentée en projection par le pôle moyen), ainsi que la fréquence des plans (calculée sur la normale moyenne et exprimée par unité de longueur de 10 m), sont calculées au moyen d'une technique mise au point par L. KIRALY (1969b), d'après E. A. SCHEIDEGGER (1965) ; les calculs ont été faits au moyen d'une calculatrice électronique (IBM 1130). Cette méthode donne une image correcte de la densité de chaque système de fractures, éliminant l'effet de l'orientation de l'affleurement.

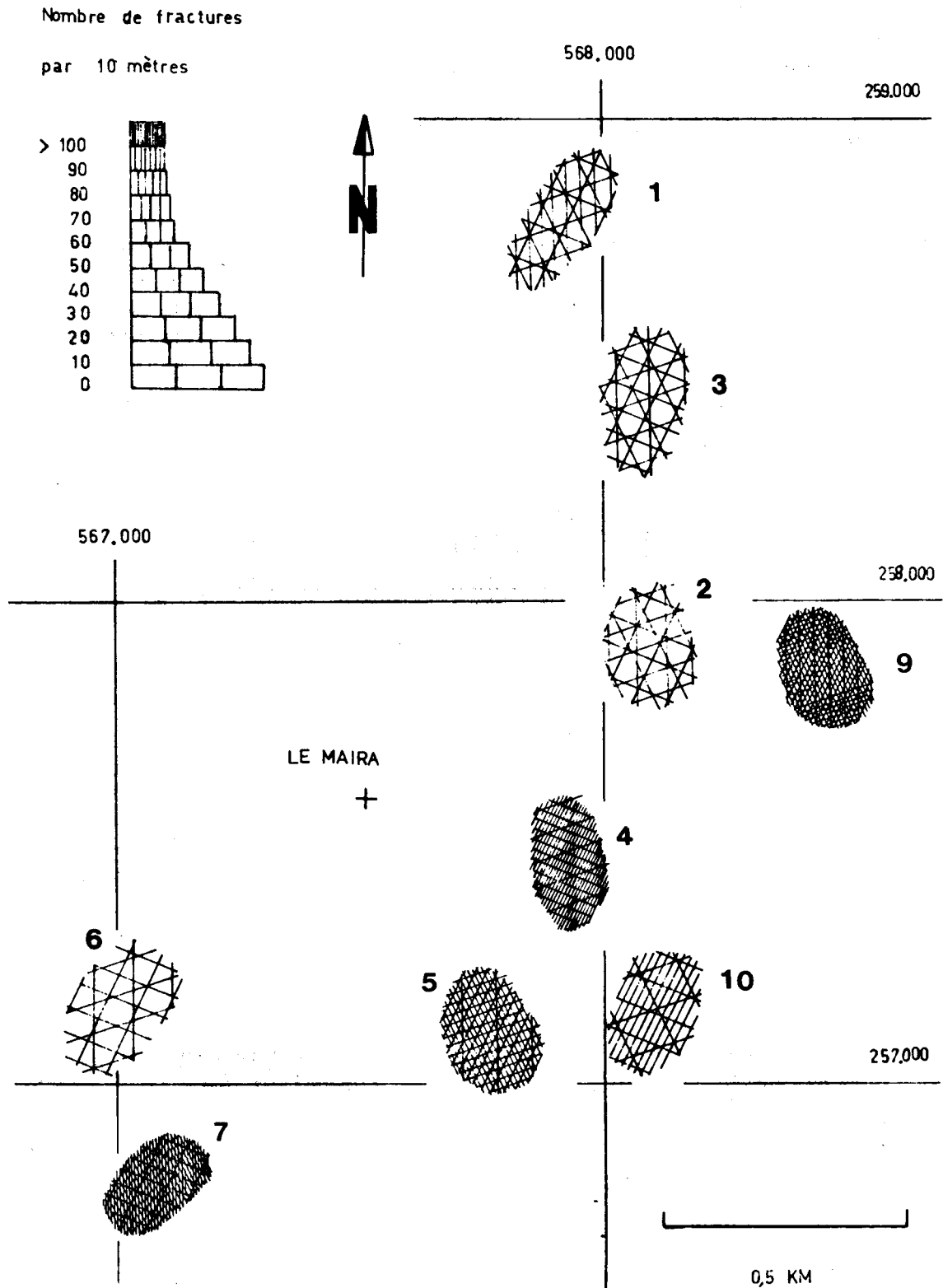


Fig. 3. Répartition des stations de mesures en surface. Fréquence des systèmes de fractures I à V à chaque station.

A la station 9, le groupe V (fréquence > 100) n'a pas été représenté pour des raisons de clarté. L'entrée de la grotte est située au point de coordonnées 568160/259470.

B. Au niveau de l'ensemble de la région étudiée

- d) L'ensemble des pôles moyens pour toutes les stations est reporté sur un diagramme de Schmidt.
- e) Sur ce diagramme, les accumulations de pôles moyens plus ou moins unimodales sont séparées. Par simplification, les pôles isolés qui n'appartiennent pas à une concentration sont éliminés.
- f) Les accumulations de pôles moyens de la figure 4 sont situées dans la zone équatoriale et l'on peut considérer que le plan moyen de chacun de ces groupes est à peu près vertical ; ces plans sont représentés d'une manière très approximative sur le diagramme de Schmidt (chiffres I à V, fig. 4).
Le tableau I donne la fréquence moyenne pour chacune de ces concentrations.

TABLEAU I

<i>N^o du groupe</i>	<i>Fréquence moyenne (plans par 10 m)</i>
I	82
II	44
III	36
IV	37
V	28

Ce tableau montre que les plus grandes fréquences se rencontrent dans les groupes I et II, et la plus faible dans le groupe V.

- g) En raison de la nature des affleurements, les plans de couches étaient peu visibles ; leur manque de netteté est la cause de la dispersion de leur orientation. On peut cependant les considérer à l'échelle de la région étudiée, comme horizontaux.
- h) La dernière étape de l'élaboration des mesures consiste à étudier l'orientation des intersections de tous les plans moyens, représentés par leurs pôles à la figure 4, avec les plans de couches considérés comme horizontaux. Ces intersections sont des droites horizontales, dont on étudie la répartition directionnelle, compte tenu de la fréquence des différents systèmes de fractures. L'anisotropie de la distribution de l'ensemble de ces individus est étudiée de la même manière que celle des axes des galeries de la grotte, par le test de Vistelius (voir paragraphe 2.2) ; les deux problèmes sont d'ailleurs posés exactement de la même manière

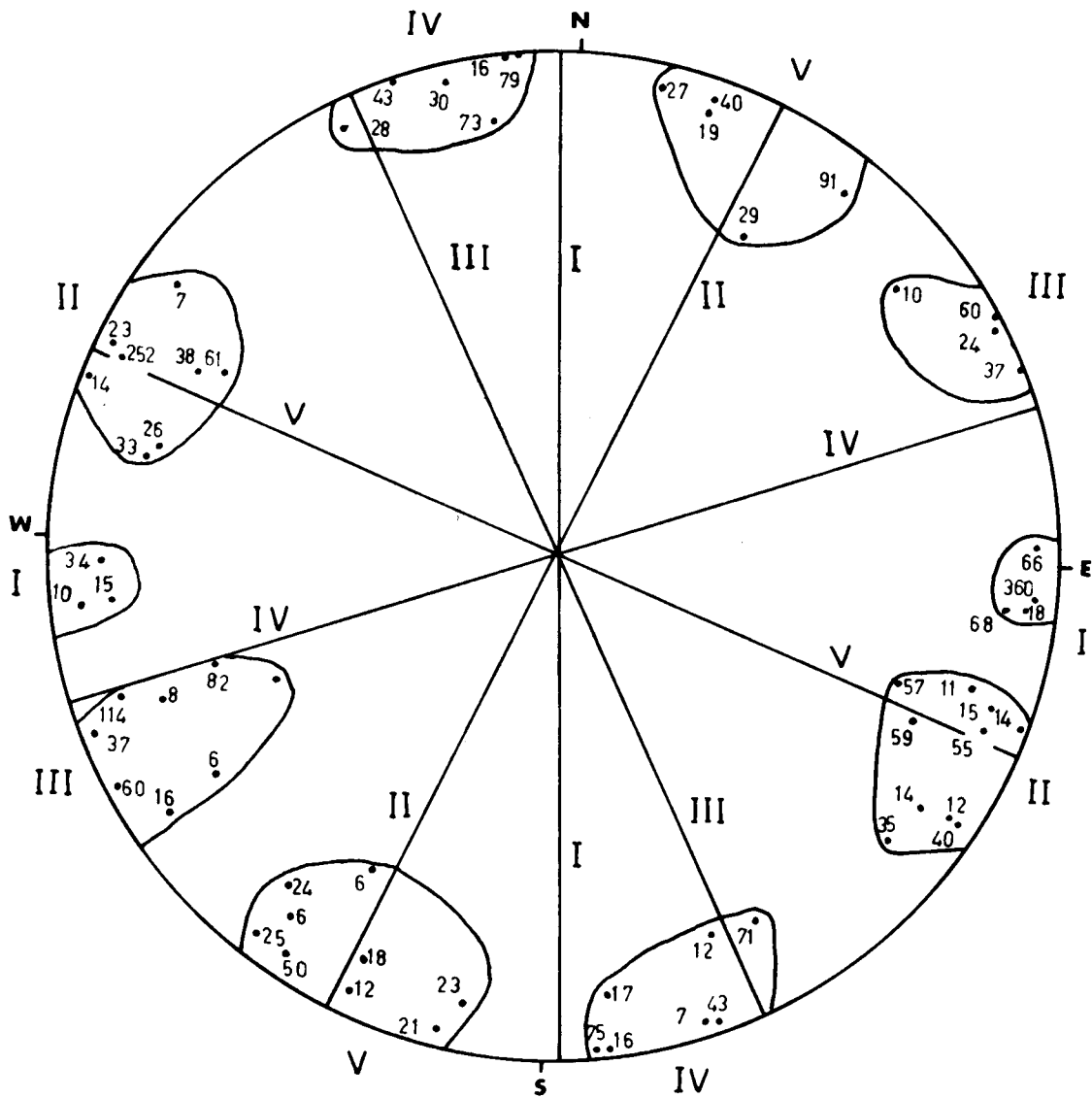


Fig. 4. Séparation des pôles moyens en groupes, numérotés de I à V. Projection équi-surface, hémisphère supérieur. Les pôles isolés sont éliminés. Les plans moyens approximatifs (verticaux) des cinq groupes sont représentés par leur projection.

En appliquant ce test à l'échantillon considéré, étant donné $N = 2622$ (= somme des fréquences de tous les plans moyens), $K = 18$, $n = 146$, on a :

pour $t = 2$: $m_1 = 170$ (limite supérieure)
 $m_2 = 123$ (limite inférieure)

pour $t = 3$: $m_1 = 185$ (limite supérieure)
 $m_2 = 114$ (limite inférieure)

3.3. Présentation des résultats

Ce test permet de distinguer les groupements suivants dans la répartition pondérée des pôles (fig. 5) :

1. Zones de densité anormalement faible ; n_i est inférieure à m_2 pour $t = 3$.
2. L'intervalle de transition pour lequel n_i est compris entre m_2 pour $t = 3$ et m_2 pour $t = 2$ n'est pas représenté.
3. Zones isotropes ; n_i est compris entre m_2 et m_1 pour $t = 2$.
4. L'intervalle de transition pour lequel n_i est compris entre m_1 pour $t = 2$ et m_1 pour $t = 3$ n'est pas représenté.
5. Zones de concentration ; n_i est supérieur à m_1 pour $t = 3$. Cette répartition est représentée à la figure 5. La densité de la distribution des groupes de fractures I à V (paragraphe 3.2, lettre *f*) est représentée à la figure 3.

4. COMPARAISON ENTRE L'ORIENTATION DES GALERIES DE LA GROTTÉ ET CELLE DES ÉLÉMENTS DE LA STRUCTURE GÉOLOGIQUE

La comparaison directe des figures 2 et 5 appelle les observations suivantes :

Il y a une relation entre les principales directions de la cavité et l'orientation des principaux groupes de fissures. La meilleure coïncidence des deux ensembles, donc la plus forte karstification des fissures s'observe dans la direction des groupes I, II et III et dans la direction d'un sous-ensemble du groupe IV ; dans cette dernière direction, la karstification est bien marquée mais les fissures ont une fréquence faible, comme le montre la figure 5.

Les diaclases du groupe V sont aussi karstifiées mais sur de courtes distances seulement (voir plan de la grotte, fig. 1) ; ceci explique l'absence de ce système de galeries à la figure 2.

Il est possible de donner une expression du coefficient de ressemblance des deux distributions d'éléments linéaires représentées aux figures 2 et 5. Ce coefficient est le cosinus de l'angle formé par les deux vecteurs à 18 dimensions qui représentent les deux ensembles ; sa valeur est de 0,751.

5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

5.1. Hypothèse de base

Proposons une interprétation des similitudes et des différences observées au paragraphe 4. Elle est basée sur l'hypothèse fondamentale suivante :

H1 : le degré de karstification est proportionnel au vecteur vitesse de filtration \vec{q} de l'écoulement souterrain.

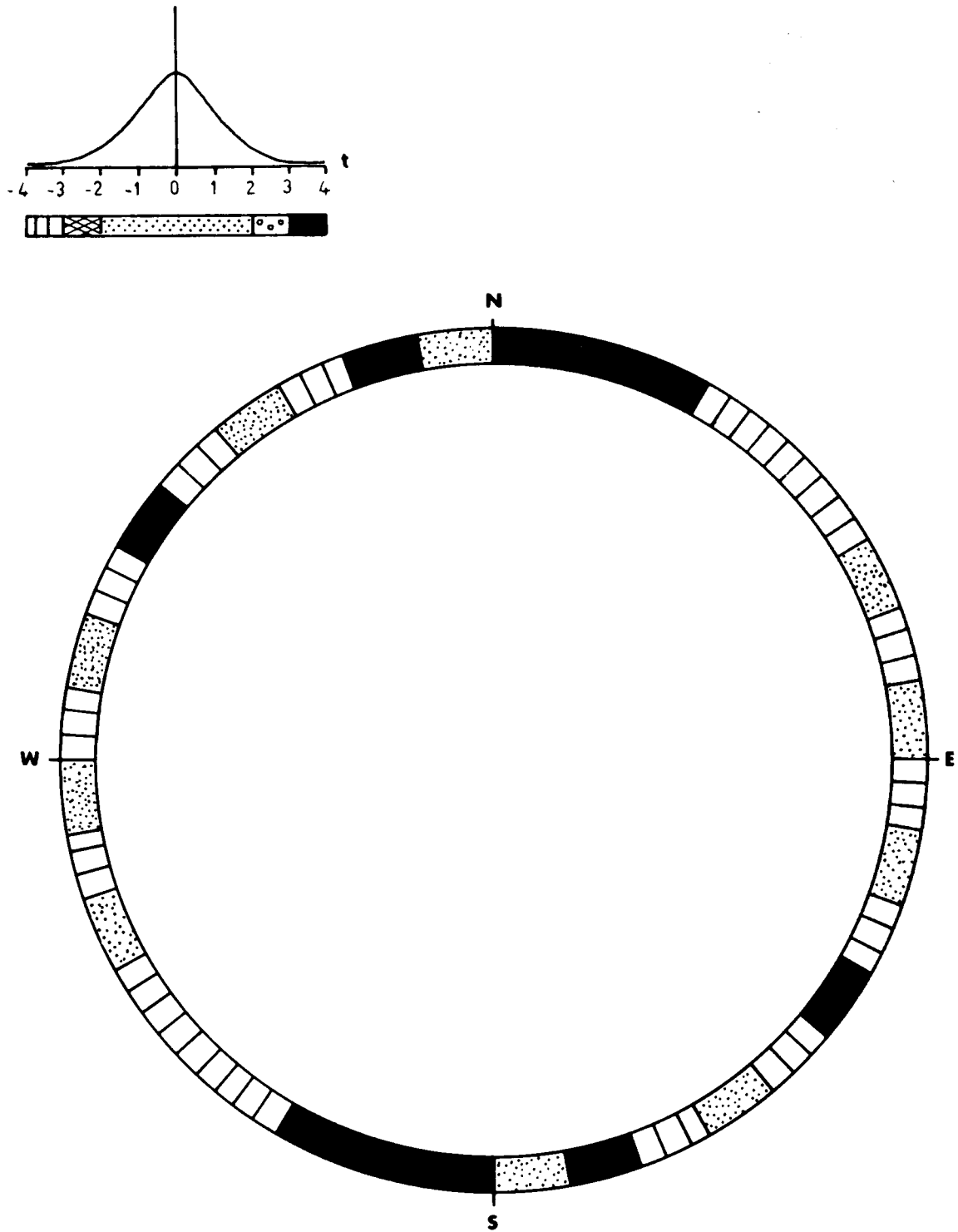


Fig. 5. Distribution de l'orientation des plans représentés par leurs pôles à la figure 4.
Représentation graphique des résultats du test de A. B. Vistelius, portant sur les intersections de ces plans avec les couches.

Connaissant trois paramètres des principaux groupes de fissures (l'orientation \vec{n}_i , la fréquence f et l'ouverture d), on peut calculer la composante de \vec{q} dans la direction de chaque groupe (L. KIRALY 1969a) :

$$\vec{q}_i = \left(\frac{g}{12\nu} f_i d_i^3 [\mathbf{I} - \vec{n}_i \otimes \vec{n}_i] \right) \vec{J} = K_i \vec{J} \quad [\text{LT}^{-1}]$$

où

- \vec{q}_i = composante de \vec{q} dans la direction du i -ème groupe
- g = accélération due à la gravité
- ν = viscosité cinématique de l'eau
- f_i = fréquence du i -ème groupe
- d_i = ouverture moyenne des fissures du i -ème groupe
- \mathbf{I} = matrice identique
- $\vec{n}_i \otimes \vec{n}_i$ = produit tensoriel de la normale du i -ème groupe par elle-même
- \vec{J} = vecteur du gradient hydraulique
- K_i = tenseur de perméabilité du i -ème groupe

Les f_i et \vec{n}_i sont estimés d'après les mesures de terrain ; les d_i sont estimés par hypothèse (l'ouverture des diaclases étant difficilement mesurable). La direction du vecteur \vec{J} est estimée, grossièrement, d'après la position de la principale zone d'exutoire.

La quasi totalité des galeries est sub-horizontale, il nous est donc permis de raisonner dans un sous-espace bidimensionnel : le plan X — Y (l'axe des +X = direction Nord, l'axe des +Y = direction W).

5.2. Données pour l'estimation du vecteur \vec{q}

a) Les normales des principaux groupes de fissures sont représentées par les matrices-colonnes suivantes :

$$\begin{aligned} \vec{n}_I &= [0 \quad 1]' & \vec{n}_{II} &= [0,438 \quad 0,899]' \\ \vec{n}_{III} &= [0,438 \quad -0,899]' & \vec{n}_{IV} &= [0,940 \quad 0,342]' \\ \vec{n}_V &= [0,913 \quad -0,423]' \end{aligned}$$

b) Les fréquences moyennes sont [m^{-1}] :

$$f_I = 8,2; \quad f_{II} = 4,4; \quad f_{III} = 3,6; \quad f_{IV} = 3,7; \quad f_V = 2,8$$

c) Faisons l'hypothèse que l'ouverture moyenne des diaclases avant la karstification était $d_i = 0,1 [mm] = 10^{-4} [m]$, pour tous les groupes. Nous pensons, sur la base de considérations tectoniques que cette estimation est trop faible pour les groupes I et III. En effet, les fissures du groupe II sont des cisaillements sénestres et les fissures du groupe V sont des cisaillements dextres, régionalement développés; donc les diaclases des groupes I et III ont été certainement élargies par extension. Toutefois, dans cette étude préliminaire, nous admettons un écartement uniforme de $d_i = 0,1 [mm]$ pour tous les groupes.

d) Les constantes physiques sont :

$$\begin{aligned} g &= 9,81 & [ms^{-2}] \\ v &= 10^{-6} & [m^2s^{-1}] \end{aligned}$$

e) La principale zone d'exutoire est la vallée de l'Allaine, donc la direction générale du gradient devrait être dirigée vers le NE ou vers le N-NE. \vec{q}_i est calculé pour deux directions du gradient (N 45° E et N 20 E) représentées par les matrices-colonnes :

$$\vec{J}_1 = [0,707 \quad -0,707] \quad \text{et} \quad \vec{J}_2 = [0,940 \quad -0,342]$$

La valeur absolue du gradient n'a pas d'importance, car seuls les rapports entre les $|\vec{q}_i|$ nous intéressent. Pour cette raison, nous adoptons $|\vec{J}_1| = |\vec{J}_2| = 1$.

5.3. Résultats de l'estimation du vecteur \vec{q}

a) Les tenseurs de perméabilité $K_i = \frac{g}{12 v} f_i d_i^3 [I - \vec{n}_i \otimes \vec{n}_i]$

des groupes de fissures sont (dans le sous-espace X — Y !):

$$K_I = 10^{-6} \begin{bmatrix} 6,56 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K_{II} = 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 2,84 & -1,39 \\ -1,39 & 0,68 \end{bmatrix}$$

$$K_{III} = 10^{-6} \begin{bmatrix} 1,67 & 1,13 \\ 1,13 & 0,55 \end{bmatrix} \quad K_{IV} = 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 0,34 & -0,95 \\ -0,95 & 2,61 \end{bmatrix}$$

$$K_V = 10^{-6} \begin{bmatrix} 0,37 & 0,86 \\ 0,86 & 1,84 \end{bmatrix}$$

dimension des K_i : $[ms^{-1}]$.

b) Le tenseur de perméabilité global K_T , dû aux cinq groupes de fissures, est :

$$K_T = \sum_{i=1}^5 K_i = 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 11,8 & -0,3 \\ -0,3 & 5,7 \end{bmatrix}$$

Si nous avons admis $d_i = 1$ [mm], la perméabilité serait alors :

$$K_T = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 11,8 & -0,3 \\ -0,3 & 5,7 \end{bmatrix}$$

On voit que la matrice K_T est pratiquement diagonale dans la base des coordonnées géographiques et que la perméabilité est maximale dans la direction N-S, et minimale dans la direction E-W. Déjà d'après ce renseignement, on s'attend à une plus grande karstification des groupes I, II, III.

c) Les vecteurs vitesse de filtration sont en valeur absolue (dimension : [ms⁻¹]) :

avec \vec{J}_1 :

$$|\vec{q}_I| = |K_I \cdot \vec{J}_1| = 4,63 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_{II}| = |K_{II} \cdot \vec{J}_1| = 3,31 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_{III}| = |K_{III} \cdot \vec{J}_1| = 0,55 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_{IV}| = |K_{IV} \cdot \vec{J}_1| = 2,66 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_V| = |K_V \cdot \vec{J}_1| = 0,78 \cdot 10^{-6}$$

avec \vec{J}_2 :

$$|\vec{q}_I| = 6,16 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_{II}| = 3,48 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_{III}| = 1,36 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_{IV}| = 1,88 \cdot 10^{-6}$$

$$|\vec{q}_V| = 0,19 \cdot 10^{-6}$$

d) Les résultats de l'estimation avec \vec{J}_2 ne contredisent pas l'hypothèse fondamentale H1. La karstification relativement faible du groupe V s'explique par le fait que la quantité d'eau qui s'écoule (par unité de temps) dans ces fissures était relativement faible et cela, probablement, déjà avant la formation des grandes cavités karstiques. Le développement de ces dernières dans la direction des groupes I, II et IV est expliqué par l'importance des vecteurs vitesse de filtration dans la direction de ces fissures.

Si la direction générale du gradient \vec{J} reste assez constante dans le temps, la karstification des fissures devient un processus autocatalyseur : un faible élargissement des fissures d'un groupe suffit à augmenter la perméabilité directionnelle parallèlement à ce groupe (si d passe de 0,1 [mm] à 1 [mm], K_t augmente 1000 fois), ce qui entraîne l'augmentation de \vec{q}_t , donc l'accélération de la karstification des fissures. Ainsi, les conditions « paléo-hydrauliques » sont, en quelque sorte, « fossilisées » dans le réseau des cavités souterraines.

6. CONCLUSIONS

1. Les cavités souterraines ne sont pas également développées dans toutes les directions (leur développement est anisotrope). L'étude de la distribution de leur orientation présente un grand intérêt pour l'hydrogéologie des roches fissurées.
2. Les principales directions des cavités sont influencées par l'orientation des principaux groupes de fissures, par la perméabilité géométrique de chaque groupe de fissures et par la direction générale du gradient hydraulique des eaux souterraines.
3. Les résultats de cette étude ne contredisent pas l'hypothèse que le degré de karstification des fissures est proportionnel au vecteur vitesse de filtration dans la direction de celles-ci.
4. L'étude statistique de la fissuration, de l'orientation de cavités karstiques et de la direction générale de l'écoulement des eaux souterraines est indispensable pour définir les relations entre ces facteurs et pour contrôler l'hypothèse ci-dessus.

Remerciements

Nous remercions très sincèrement les membres du Spéléo-Club Jura, qui nous ont fait part à plusieurs reprises de leur vœu de voir leurs recherches à la grotte de Milandre complétées par une étude géologique, et qui ont accepté de mettre à notre disposition tous les relevés topographiques effectués dans cette cavité. Cette étude entre dans le cadre de recherches financées par le Fonds national pour la recherche scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- ERZINGER, E. — (1943). Die Oberflächenformen der Ajoie (Berner Jura).
Thèse, Université de Bâle, 138 pp.
- KIRALY, L. — (1968). Eléments structuraux et alignement de phénomènes
karstiques (région du gouffre du Petit-Pré de Saint-Livres, Jura vau-
dois). *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 91 : 127-146, 10 fig.
- (1969). Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires
fissurés. *Eclogae Geol. Helv.* 62 (2) : 613-619.
- (1969). Statistical Analysis of Fractures (Orientation and Density). *Geol.*
Rundschau 59 (1).
- KLOETZLI, E. — (1968). Topographie à Milandre. Le Jura souterrain. *Bull.*
du Spéléo-Club Jura 12 (2) : 3-4.
- (1969). La grotte de Milandre (Boncourt, BE). *Actes du 3^e Congrès national*
suisse de Spéléologie, pp. 113-115.
- MULLER, L. — (1963). Der Felsbau. Theoretischer Teil. 624 S., 307 Abb.,
22 Taf., *Stuttgart*.
- SCHEIDEGGER, A. E. — (1965). On the Statistics of the Orientation of Bedding
Planes, Grain Axes, and Similar Sedimentological Data. *U. S. Geol.*
Survey Prof. Paper 525-C : 164-167, 1 fig.
- VISTELIUS, A. B. — (1966). Structural Diagrams. 178 pp. (Pergamon Press).
- VOUILLAMOZ, P. — (1969). Grotte de Milandre 1964-1969. Le Jura souterrain.
Bull. du Spéléo-Club Jura 13 (1) : 6-10, 2 fig.
-