

# Néotectonique dans le karst du nord du lac de Thoune (Suisse)

Autor(en): **Jeannin, Pierre-Yves**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **83 (1990)**

Heft 2

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-166590>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Néotectonique dans le karst du nord du lac de Thoune (Suisse)

Par PIERRE-YVES JEANNIN<sup>1)</sup>

*Mots-clefs:* Karst, Néotectonique, Champs de contraintes plio-quadernaires, Réseaux karstiques, Karstogenèse, Helvétique, Suisse.

*Key-words:* Karst, Neotectonic, Plio-quadernary strain fields, karstic systems, Karstogenesis, Helvetic, Switzerland.

## RÉSUMÉ

La région karstique du nord du lac de Thoune appartient à la chaîne bordière des Alpes suisses (Crétacé, Helvétique). Elle comprend de vastes cavités réparties dans deux bassins versants principaux. Le premier est le bassin de l'exurgence de la Beatushöhle, il renferme plus de 15 km de galeries connues. Le second est le bassin de la région Sieben Hengste – Hohgant – Hohlaub – Schrattenfluh, il a son exutoire aux sources de Bätterich et Gelber Brunnen au bord du lac de Thoune. Il renferme le très vaste «Réseau Sieben Hengste – Hohgant» qui développe plus de 115 km pour 1050 m de dénivellation, le Bärenschacht qui développe plus de 10 km (–950 m), ainsi que plusieurs autres cavités importantes développant plus d'un kilomètre.

Des rejets récents sur des failles ont été mesurés surtout dans le «Réseau des Sieben Hengste». Les indices de néotectonique sont, soit des sections de galeries décalées par le rejet, soit des piliers décalés, soit des concrétions décalées, inclinées ou cassées.

La situation relative des mouvements dans l'échelle du temps a été possible à partir des connaissances sur l'évolution génétique du réseau karstique (Hof et al. 1984). Elle montre qu'il y a eu trois phases de mouvements qui ont influencé fortement les écoulements souterrains et la karstification.

L'analyse géométrique et dynamique des rejets mesurés et des plans de glissement montre également trois phases de mouvements et permet, en outre, de déterminer l'orientation des contraintes à l'origine des mouvements. Trois phases tectoniques plio-quadernaires ont ainsi pu être mises en évidence: une phase de compression SSE–NNW alpine, suivie d'une phase d'extension E–W puis, à nouveau, d'une de compression.

## SUMMARY

The karstic area north of Lake Thun is part of the "Border Chain" of the Swiss Alps (Cretaceous, Helvetic). It comprises large caves coming from two catchments. The first one exsurges at the Beatushöhle; more than 15 km of galleries are known in this area. The second one contains the Sieben Hengste – Hohgant – Hohlaub – Schrattenfluh region, it exsurges at the Bätterich and Gelberbrunnen springs, by Lake Thun. It includes the very large "Sieben Hengste – Hohgant cave System", (length: 115 km; depth: 1,050 m); the Bärenschacht (length: >10 km; depth: 950 m), as well as several other important caves more than 1 km long.

Recent shifts along faults were mainly measured in the Sieben Hengste cave System. Indications of neotectonic movements are: gallery sections displaced by the fault shifts, displaced pillar structures or shifted, inclined or broken speleothems.

The fault movements were correlated with the genetic evolution of the region. It indicates that there were three phases of movement which greatly affected the underground flows and karstification.

---

<sup>1)</sup> Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 11, rue E. Argand, 2007 Neuchâtel, Suisse.

The geometric and dynamic analyses of the measured shifts and "sliding planes" also indicates three phases of movements. The strain direction, causing these movements, was determined. Thus, three plio-quadernary tectonic phases were found: an alpine compressive SSE-NNW phase, followed by an extensive E-W phase and then again by a compressive one.

## 1. Introduction

Dans les milieux de la spéléologie scientifique, la néotectonique est un sujet fréquemment cité. Jusqu'ici, les auteurs ne l'ont traité que très superficiellement; pourtant, en 1969 déjà, BÖGLI décrivait des fractures ayant visiblement bougé postérieurement à la formation des galeries du Hölloch (Schwyz, Suisse).

Les premières mesures de rejets récents sont dues à FORTI & POSTPISCHL (1979, 1980, 1985) qui corrèlent le déplacement des axes des stalagmites avec les tremblements de terre connus dans la région de Bologne (Italie).

En France, le phénomène est signalé depuis longtemps, mais à notre connaissance, c'est GILLI (1986) qui est le premier à y consacrer un article.

Dans la région karstique située au nord du lac de Thoune (canton de Berne, Suisse, fig. 1), le phénomène est connu depuis plusieurs années. Parmi les récits des explorateurs, nombreux sont ceux qui décrivent des éboulements récents dans des galeries situées sur des fractures apparemment encore actives, ou ceux qui prétendent que des galeries entières ont été oblitérées par des fractures.

## 2. But

Conformément au dictionnaire de géologie, le terme «néotectonique» est utilisé ici dans un sens précis: il s'agit de l'ensemble des déformations tectoniques affectant un orogène déjà formé. Dans l'exemple présenté, il s'agit de déformations tectoniques synchrones ou postérieures à la karstification plio-quadernaire. Les observations de néotectonique apportent des informations tant au géologue tectonicien qu'au sismologue, au karstologue ou au spéléologue. Il a donc paru intéressant d'étudier le sujet de manière assez détaillée.



Fig. 1. Plan de situation du karst du nord du lac de Thoune.  
Location of the karstic area north of lake Thun.

Le but de la présente étude était de déterminer l'origine des rejets observés afin de savoir s'il s'agissait bien de néotectonique ou de phénomènes plus locaux; trois hypothèses ont été envisagées.

1) *Poussée tectonique alpine*: Les déplacements devraient alors être compatibles avec un seul champ de contraintes «régional» comparable aux mesures de stress effectuées à partir des séismes récents (environ N150–330° et subhorizontal) (PAVONI 1980).

2) *Tassement régional*: Le massif étant délimité au NW et SE par des escarpements, des glissements couche à couche et une dislocation globale en extension de la région sont possibles. Les déplacements observés devraient alors être presque exclusivement en extension selon une direction N135–315°.

3) *Glissements locaux*: Des glissements et tassements à proximité des galeries pourraient provoquer les rejets observés. Leurs directions devraient alors être assez aléatoires.

Pour tenter de discerner la part de chacune des trois hypothèses, des mesures de vecteurs de déplacements (longueur, azimuth et pente) ainsi que du plan sur lequel s'est opéré le mouvement (plan porteur) ont été effectuées systématiquement. De plus, chaque point d'observation a été situé dans le cadre structural régional ainsi que dans la chronologie relative de l'histoire du système karstique.

### 3. Le karst du nord du lac de Thoune

La présentation suivante est inspirée de l'article de BITTERLI & BORREGUERO (1989) qui essaie de faire une synthèse des connaissances sur cette vaste zone karstique. L'étude de la néotectonique a été effectuée principalement dans le «Réseau des Sieben Hengste» qui ne représente qu'une partie du système karstique. Un aperçu global est cependant utile à la compréhension des phénomènes décrits dans le présent article.

#### 3.1 Situation

Le système karstique du nord du lac de Thoune se situe dans la Chaîne bordière helvétique, en bordure sud-est du Plateau molassique. Du bord nord du lac de Thoune, le système karstique s'étend jusqu'à la Schratzenfluh, massif situé au-delà de la profonde vallée de l'Emme. Toute la chaîne montre un flanc sud-est penté régulièrement, interrompu au nord-ouest par d'abruptes falaises. La partie supérieure, située entre 1700 m et 2000 m d'altitude est dénudée et largement lapiazée; plus bas, le sol marécageux est dominé par des forêts de sapins. La pluviométrie annuelle est comprise entre 1500 et 2000 mm.

#### 3.2 Contexte géologique

La région a été étudiée en détail par BECK (1911), puis par GIGON (1952), après quoi des travaux thématiques se sont succédé: en sédimentologie, BREITSCHMID (1978), et en tectonique, JAMIER & SIMEONI (1979), JEANNIN (1989).

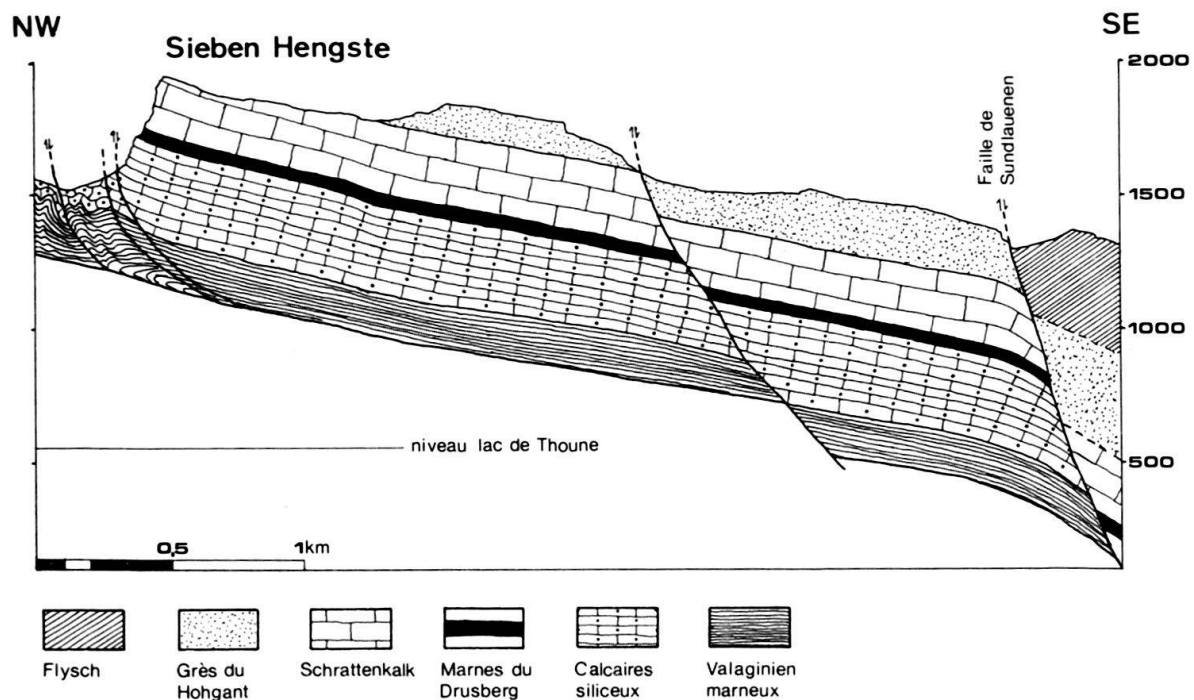


Fig. 2. Coupe géologique simplifiée.  
Simplified geological cross-section.

Les grandes lignes de la géologie structurale sont simples (fig. 2): une dalle monoclinale inclinée de 15 à 30° vers le sud-est est déjetée par une grande faille normale longitudinale, qui s'étend du lac de Thoune jusqu'à la Schrattefluh (Faille de Sundlauenen). Le rejet de la faille, de 150 m à 550 m, rompt la continuité de la couche calcaire. Au NW des Sieben Hengste se trouvent les plis frontaux de l'Helvétique, bien visibles dans la Chaîne du Sigriswilergrat. Au SE de la faille de Sundlauenen se trouve le synclinal de Habkern, rempli de Flyschs.

La fracturation de la dalle calcaire a été marquée par deux phases bien distinctes: d'abord une fracturation Crétacé supérieur à Eocène représentée surtout par des failles normales orientées NE-SW, puis une fracturation plus tardive (Oligocène-Miocène ?) représentée par un système de décrochements dextres (E-W), sénestres (N150°) et de fractures associées (fentes de tension, Riedel, etc.).

Les failles normales et les décrochements dextres sont les familles de fractures les plus karstifiées. Les parties actuellement actives du drainage karstique sont situées le long des décrochements alors que les parties fossiles se trouvent plutôt sur les failles normales.

La karstification s'est produite principalement dans le Schrattekalk (Barrémien à Aptien, Crétacé, faciès urgonien), épais de 100 à 200 m, que les réseaux karstiques actifs percent verticalement par des zones de puits. Les calcaires reposent sur les marno-calcaires du Drusberg (Barrémien inférieur), épais de 30 à 50 mètres, qui forment généralement le niveau imperméable. Les rivières souterraines s'écoulent sur ce toit imperméable en suivant les accidents tectoniques principaux. Le Schrattekalk est surmonté des grès du Hohgant (Eocène) dont l'épaisseur atteint localement plus de 200 m. Ces grès contiennent des niveaux calcaires souvent bien karstifiés.

### 3.3 Les systèmes d'écoulements karstiques

Deux bassins karstiques (fig. 3) ont été mis en évidence par des essais de traçage (KNUCHEL 1973):

1) Le bassin de la Beatushöhle draine la région Beatenberg – Niederhorn; la zone d'exutoire de ce système est bien connue (Beatushöhle, fig. 4), alors que le reste du karst est encore assez mal connu. Seuls le Fitzlischacht (dév. env. 3 km) et le Häliloch (dév. env. 1 km) y sont explorés. L'eau semble traverser le karst très verticalement, puis s'écouler, selon le pendage, sur les couches du Drusberg jusqu'à la Beatushöhle, située peu en amont de la faille de Sundlauenen.

2) Le bassin des émergences de Bätterich et Gelber Brunnen (figs. 3 et 4) peut être séparé en deux sous-bassins: celui de la région Sieben Hengste – Hohgant et celui du Hohlaub – Schrattenfluh.

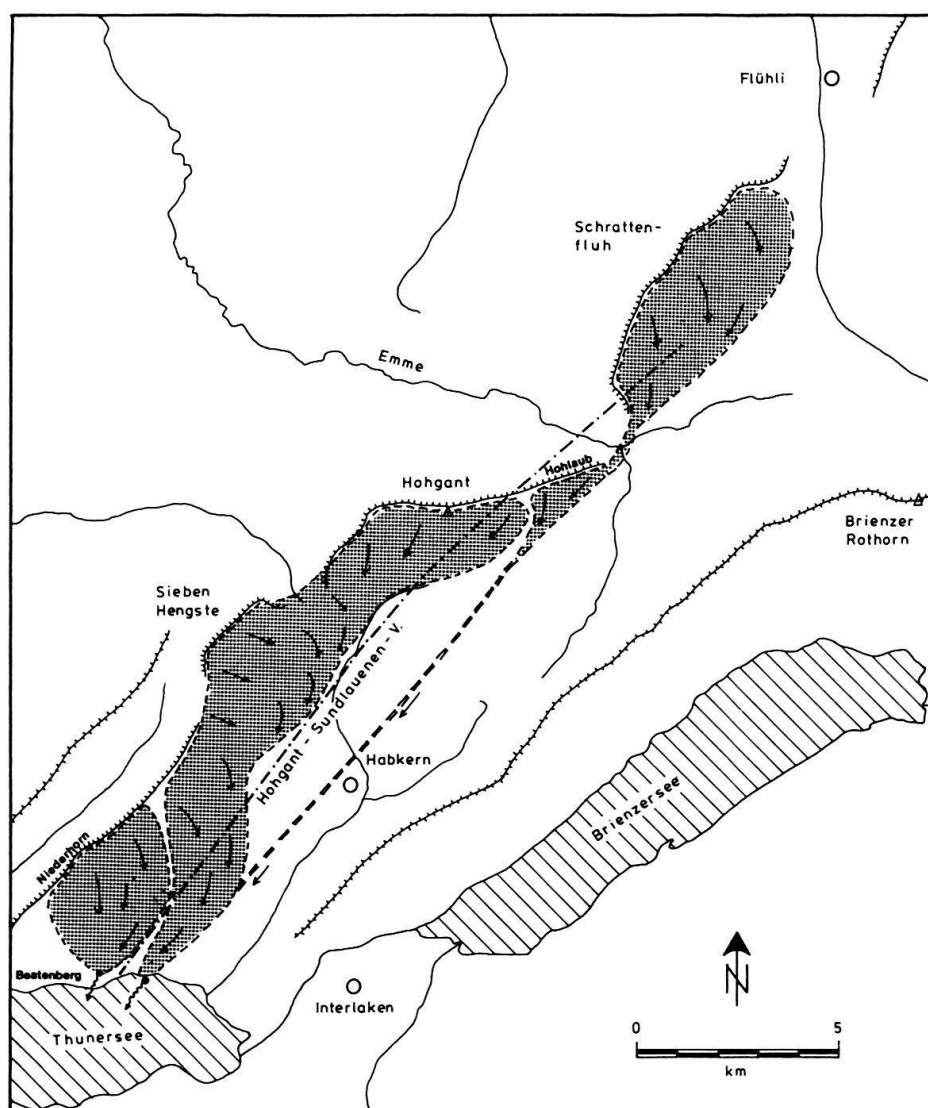


Fig. 3. Les bassins versants de la zone karstique du nord du lac de Thoune.  
Water catchments of the karstic area north of lake Thun.

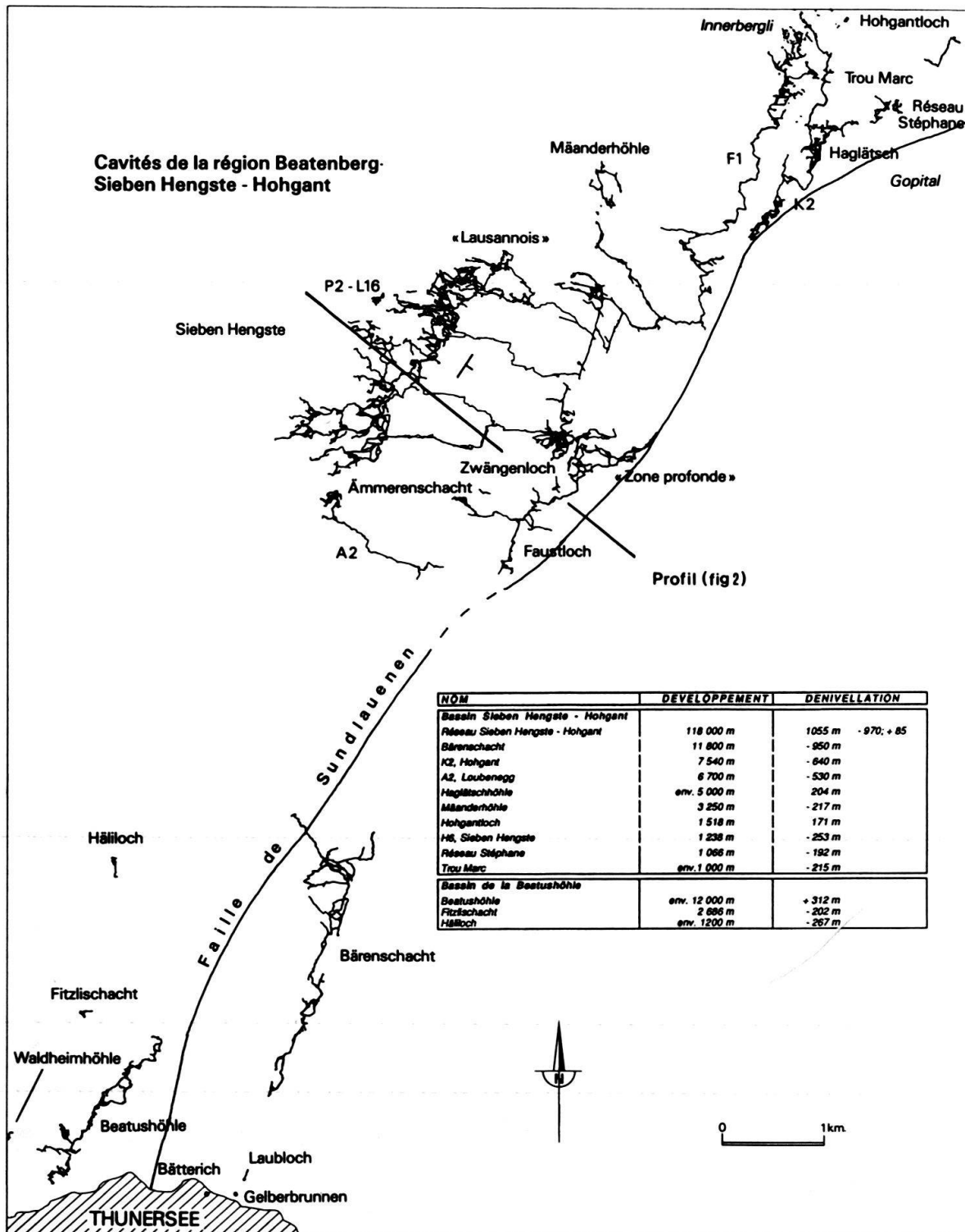


Fig. 4. Principales cavités de la région Beatenberg – Sieben Hengste – Hohgant et trace de la faille de Sundlaunen (d’après BITTERLI 1989, modifié).

Main caves of the Beatenberg – Sieben Hengste – Hohgant region and the Sundlaunen fault (after BITTERLI 1989, modified).

– Le système Sieben Hengste – Hohgant est bien connu au niveau de son bassin d'alimentation, mais ce n'est qu'avec les dernières découvertes dans le fond du Bärenschacht qu'on atteint réellement le niveau de la nappe karstique. Le Réseau des Sieben Hengste forme un immense labyrinthe de galeries actives et fossiles. Les galeries fossiles sont orientées selon la direction du pendage (SW-NE) alors que les rivières actives suivent le pendage des couches vers le SE. La combinaison de ces deux directions de galeries forme un système maillé caractéristique, au-delà duquel se prolongent les drains actifs; ceux-ci se développent à l'intersection entre les décrochements dextres et le toit des marno-calcaires du Drusberg. Après environ 1,5 km, ces galeries atteignent un axe essentiellement fossile, de grandes dimensions et localement labyrinthe. Du fond du gouffre K2 (fig. 4), cet axe semble se poursuivre dans le gouffre F1, puis dans l'immense labyrinthe de la «Zone profonde», le Faustloch et finalement pourrait rejoindre le fond du Bärenschacht. A l'exception de cette dernière cavité, toutes les autres se développent au NW de la faille de Sundlauenen. L'eau traverse donc cet accident majeur pour suivre le fond d'un petit synclinal où se développe la partie profonde du Bärenschacht, puis pour rejoindre les émergences.

– Le système Hohlaub – Schratzenfluh est nettement moins bien connu; quelques rivières souterraines importantes rappellent celles des Sieben Hengste, mais les couloirs fossiles reliant les rivières y sont plus difficiles à trouver; ils semblent moins nombreux et davantage comblés qu'aux Sieben Hengste. Le collecteur de toutes les rivières qui doivent exister dans ces massifs est encore complètement inconnu, mais les traçages ont montré un écoulement souterrain très rapide (38 heures pour 21 kilomètres, soit env. 550 m/h).

En résumé, les rivières souterraines des deux sous-bassins versants de Bätterich/Gelber Brunnen montrent un régime vadose au NW de la faille de Sundlauenen. Elles sont perchées bien au-dessus de la nappe karstique située au SE de la faille (Bärenschacht). Le bassin de la Beatushöhle est lui aussi perché au NW de la faille, mais l'eau longe l'accident vers le SW sans le traverser; il s'agit d'un karst barré.

### 3.4 La genèse du Réseau karstique

Dans ce chapitre nous appelons «phase» un événement relativement bref, permettant une chronologie (ex. phase de mouvements tectoniques) et «stade» l'ensemble des événements caractérisant une période (ex. stade d'évolution du système karstique).

En admettant un abaissement progressif des écoulements karstiques, Hof et al. (1984) résument les hypothèses sur la chronologie relative de la genèse du Réseau. Schématiquement, ils distinguent trois stades: (fig. 5)

1) Le drainage du karst des Sieben Hengste se fait en régime noyé, du SW vers le NE: L'absence de fissures ouvertes sous les grès situés au SE et la position des niveaux de base hydrologiques régionaux conditionnent l'écoulement de cette nappe captive située entre les grès tertiaires et les marnes du Drusberg. Le système maillé se forme alors en s'enfouissant progressivement sous les grès. La durée de ce stade est difficile à estimer. Certaines galeries creusées en régime noyé se trouvent aujourd'hui à plus de 1850 m d'altitude. De là, tout un système de collecteurs noyés se sont succédé, les derniers, aujourd'hui fossiles, se situant actuellement vers 1470 m d'altitude.



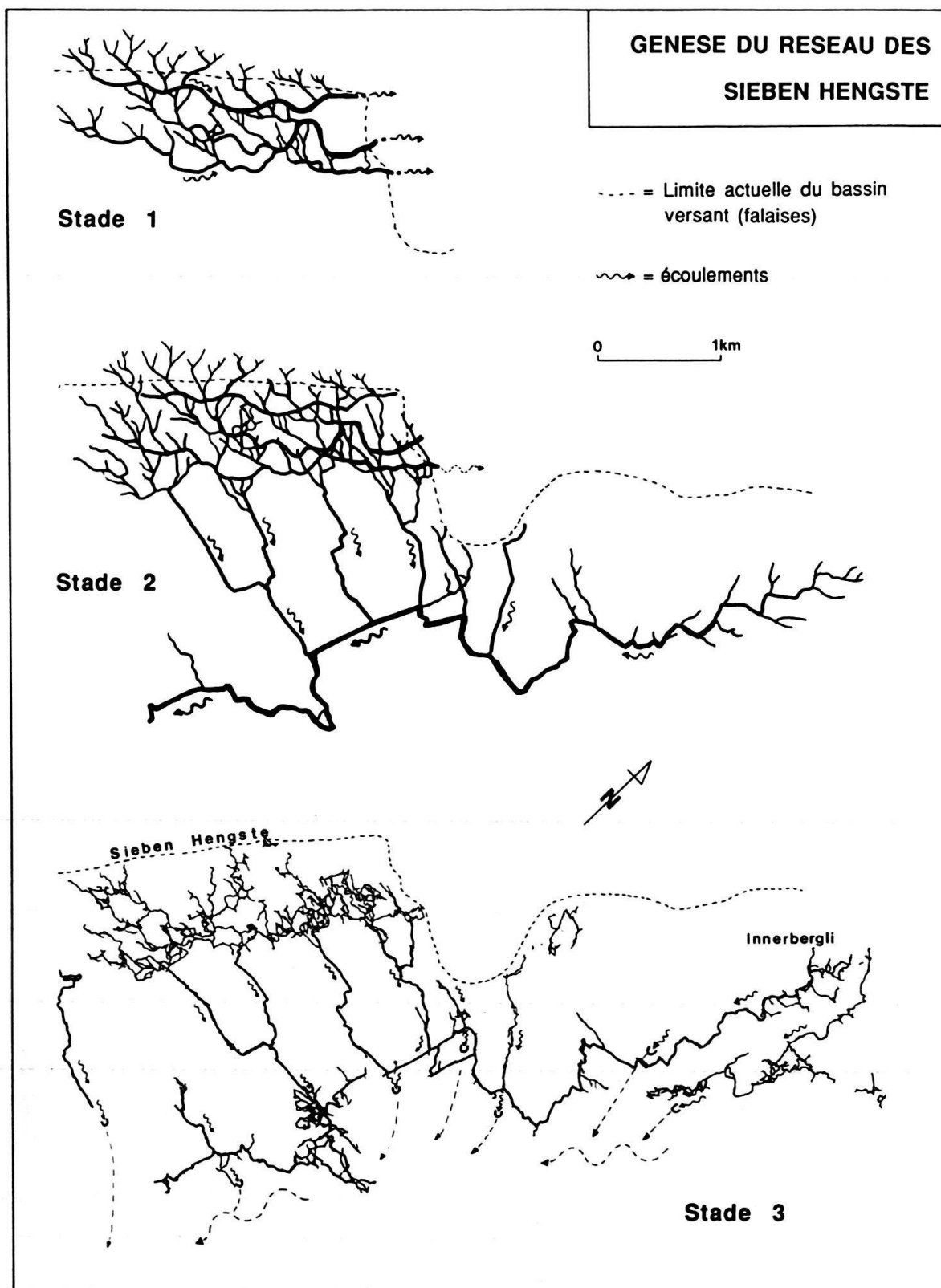


Fig. 5. Plans schématiques illustrant l'évolution du Réseau karstique Sieben Hengste – Hohgant. On notera que les directions d'écoulements ont tourné de 180 degrés (d'après Hof 1984).  
 Schematical plans showing the evolution of the Sieben Hengste – Hohgant cave system. Flow directions changed 180 degrees with time (after Hof 1984).

2) Les décrochements dextres situés sous les grès, au SE du réseau maillé, soutirent les eaux du karst des Sieben Hengste. L'écoulement y est d'abord noyé puis vadose. Simultanément un petit lapiaz (Innerbergli) est dégagé par un glacier (?) permettant la formation des collecteurs d'abord noyés puis vadoses du F1 et du K2 (voir fig. 4). Les eaux du F1, rejointes par celles des Sieben Hengste, circulent dans des conduits noyés, depuis le fond du F1 vers la «Zone profonde», le Faustloch et éventuellement le Bärenschacht. Les écoulements semblent alors barrés par la faille de Sundlauenen. Pendant ce stade le niveau de base karstique se situe entre 900 et 1450 m d'altitude.

3) L'abaissement du niveau de base (moins d'eau ou meilleur drainage) au-dessous de 800 m d'altitude permet la généralisation de l'écoulement libre dans la partie connue du Réseau. Les creusements s'effectuent actuellement dans ce stade.

L'âge absolu de chacun des stades n'est pas connu, le stade No. 1 pourrait être Pliocène.

#### 4. Indices et méthodes de mesure de néotectonique

Sous terre, quatre types d'indices permettent de mettre en évidence des mouvements tectoniques récents:

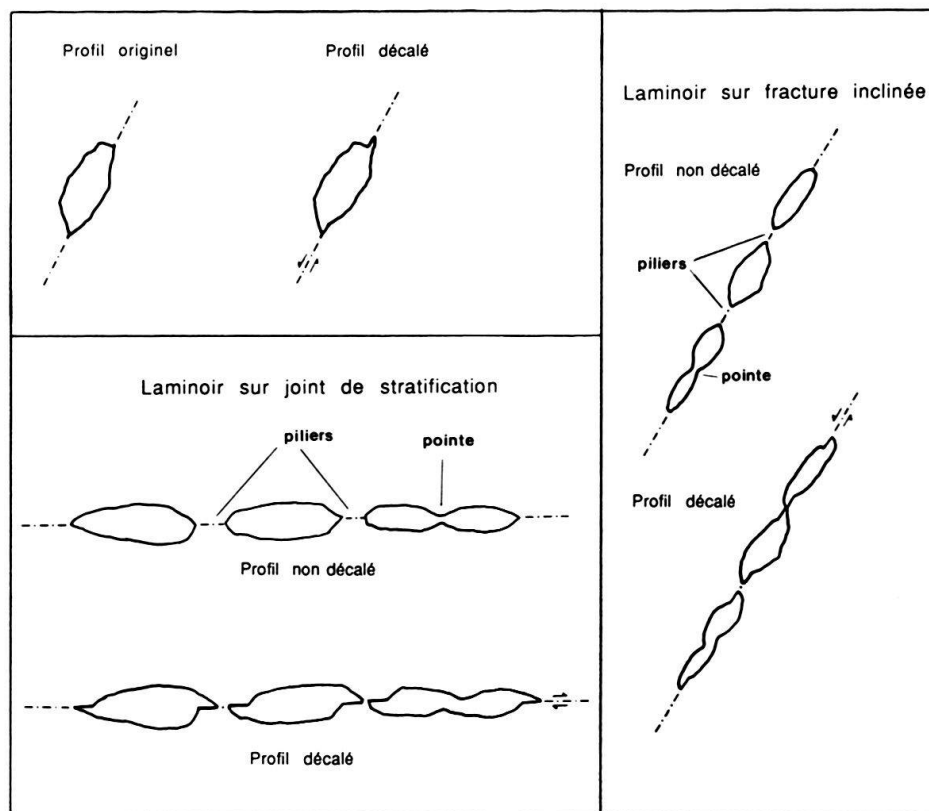


Fig. 6. Profils verticaux schématiques de galeries elliptiques sur fractures ou joints de stratification. Les sections sont décalées par un rejet postérieur à la formation de la galerie, conduisant parfois à la formation de «piliers» et des «pointes».

*Schematic vertical sections of galleries developed on joints (fractures or stratification). Sections are shifted by a postformation movement, leading sometimes to apparition of "pillar" and "pyramid" structures.*

**Type 1: Sections décalées:** Le profil originel de la galerie est décalé par un glissement sur le plan porteur. Ce type d'indice se marque particulièrement bien dans les galeries elliptiques, creusées en régime noyé. Le plan de glissement apparaît plat, rarement strié, et toujours non corrodé. Le profil de la galerie à proximité du plan de glissement est souvent écaillé, ce qui ne facilite pas la mesure du rejet qui se fait en recherchant un point visiblement unique avant le mouvement et actuellement partagé de part et d'autre de la fracture (figs. 6, 7, et 8).

**Type 2: Piliers ou pointes:** Ces formes sont typiques des laminoirs se développant soit sur des fractures (fig. 6), soit sur des joints de stratification. La mesure est meilleure sur les piliers que sur les pointes où le pendage est difficile à déterminer. La roche est souvent écaillée aux abords du plan de fracture.

**Type 3: Concrétions:** Pour être des témoins certains de néotectonique, les concrétions doivent être posées ou suspendues directement sur la roche encaissante, sinon le tassement du sédiment ou le décollement d'un morceau de paroi peuvent être à l'origine du mouvement relatif mesuré. Les concrétions sont parfois «décalées» (fig. 9), c'est-à-dire que la stalagmite est décalée par rapport à la stalactite correspondante. Dans les cas favorables, la stalactite a formé plusieurs stalagmites successives (cas comparable aux «Hot spots» des îles océaniques, que nous nommerons ici «Drop spot»). Les concrétions sont parfois aussi inclinées ou cassées par les mouvements tectoniques. Seul le cas des concrétions fracturées (croûtes de calcites, colonnes ou dra-

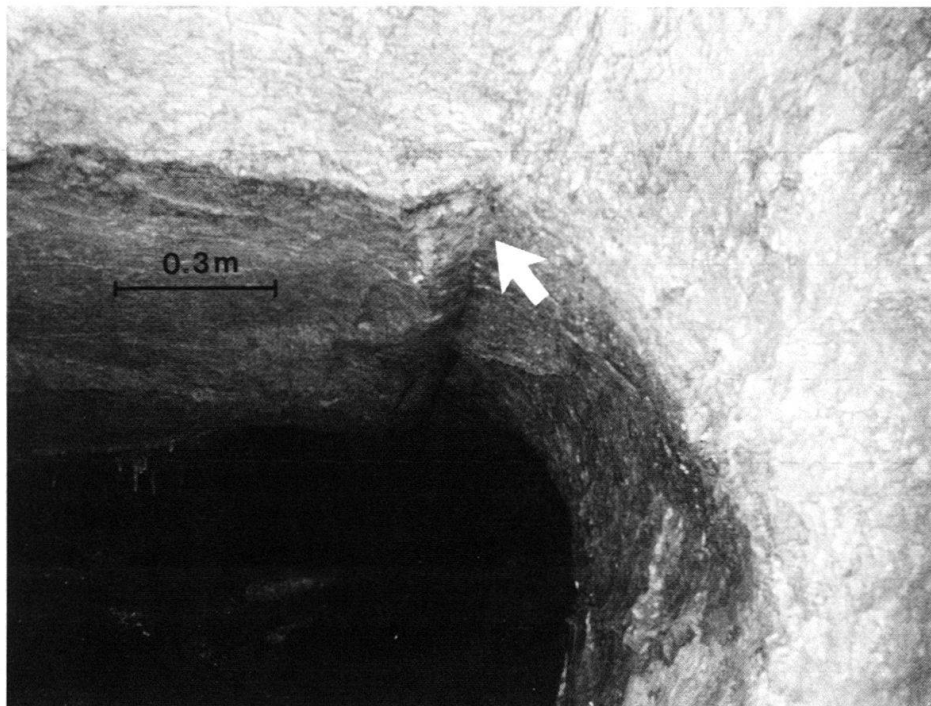


Fig. 7. Plafond d'une galerie elliptique rejeté d'une vingtaine de centimètres par une faille normale. La section de la galerie sur le mur de la faille a été écaillée lors du mouvement (point NT 51, Galerie amont du Polonais aval, Réseau des Sieben Hengste).

*A phreatic gallery ceiling shifted of 20 cm by a normal fault. The section of the gallery on the faults' wall was affected by the movement causing fragmentation (point NT 51, Gallery "amont du Polonais aval", Sieben Hengste cave-system).*

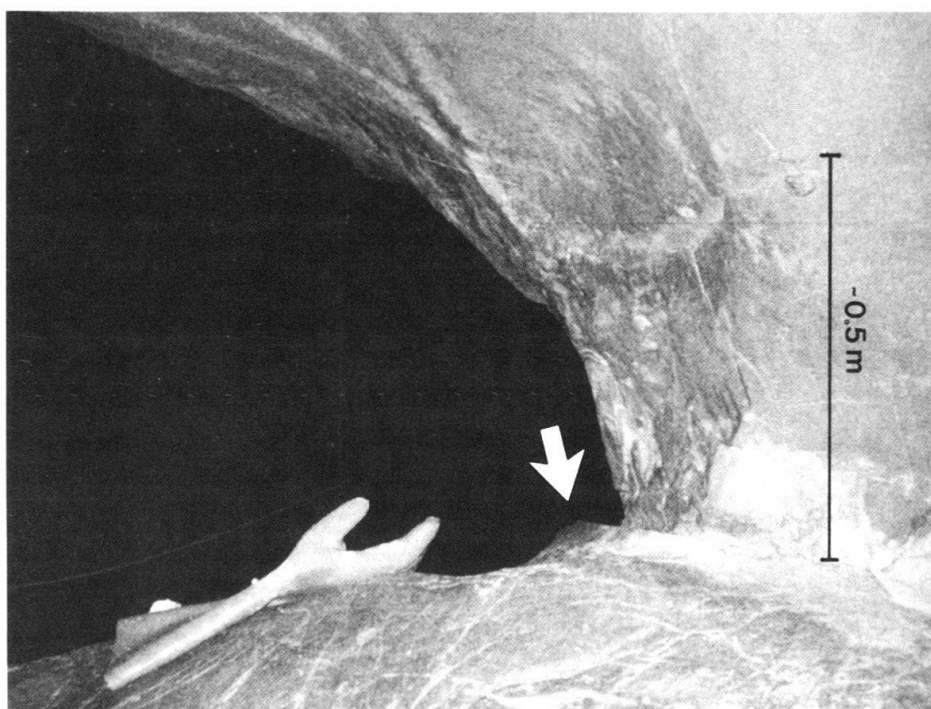


Fig. 8. Profil d'une galerie elliptique présentant un rejet de 4–5 cm sur un joint de stratification. La paroi au-dessus du joint est visiblement écaillée, rendant la mesure du rejet plus délicate (Pt. NT 27, Galerie du Parc des Princes, Zone profonde du Réseau des Sieben Hengste).

*Profil of phreatic gallery having been shifted 4 or 5 cm along a stratification joint. The wall above the joint having been noticeably broken, makes measurement harder (Pt. NT 27, Galerie du Parc des Princes, Zone Profonde, Sieben Hengste cave-system).*

peries) est un indice certain de mouvement récent; les autres cas (inclinaison ou décalage) peuvent être provoqués par des courants d'air.

L'avantage de ce type d'indice est la possibilité de dater (datations radiométriques des concrétions) les mouvements tectoniques.

Type 4: **Sédiments détritiques:** Les dépôts détritiques peuvent avoir été inclinés, plissés ou fracturés (GILLI 1986). Cependant des tassements ou glissements des sédiments lors de leur compaction rendent ce type d'indice très peu fiable; ils n'ont pas été recherchés dans le cadre de cette étude.

Généralement, pour un point de mesure donné, plusieurs indices concordants ont été recherchés et mesurés (longueur, azimut, pente); nous avons observé systématiquement qu'il n'y ait pas d'incompatibilité telle qu'une concrétion décalée dans une galerie dont la section n'est visiblement pas décalée! De tels cas ne se sont heureusement pas présentés!

## 5. Situation spatiale et temporelle des indices

La situation spatiale de l'ensemble des points de mesures est donnée sur la figure 10.

La datation relative des indices de néotectonique est basée sur des principes triviaux tels que: une concrétion située dans une galerie d'origine phréatique est forcée-

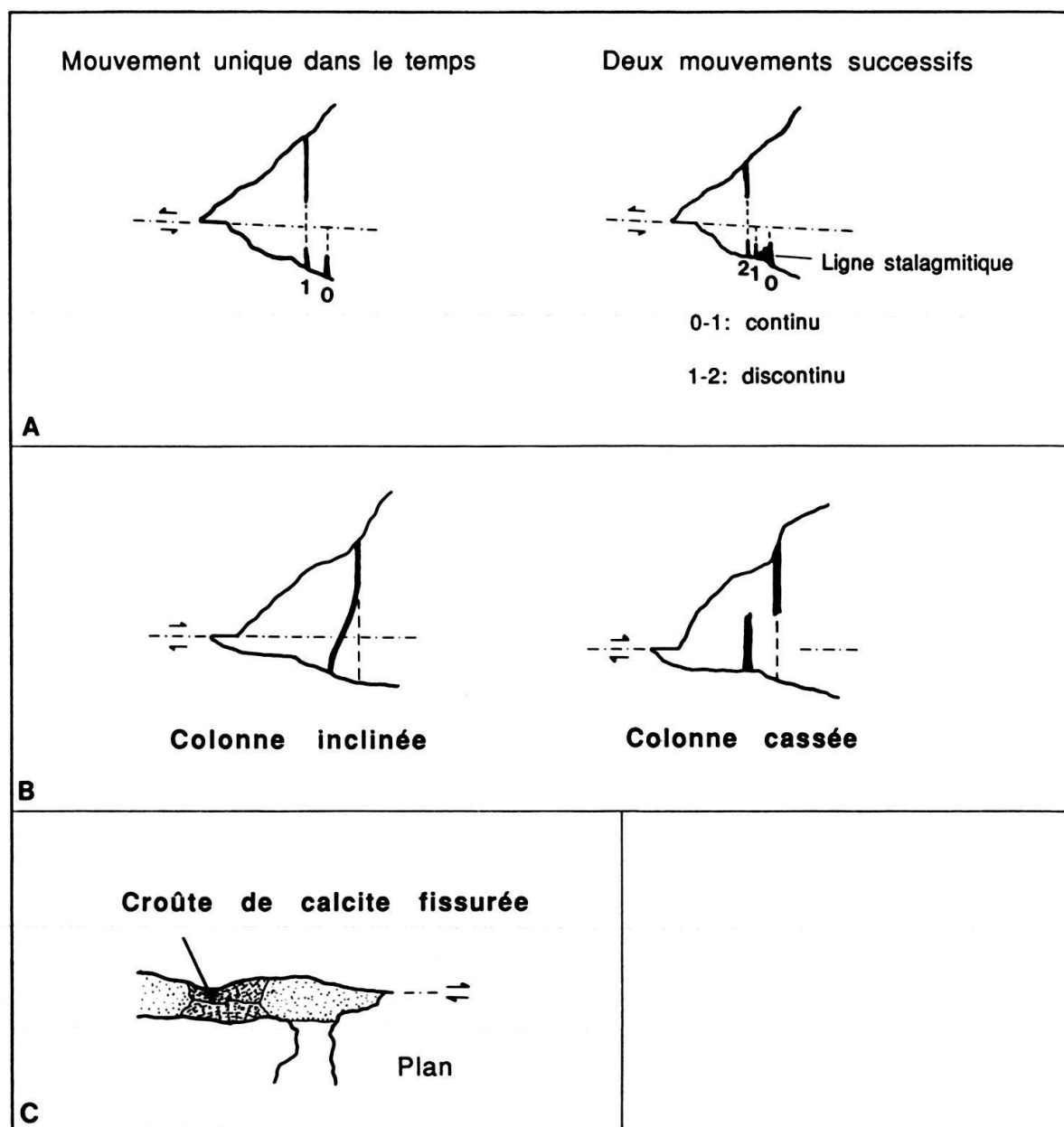
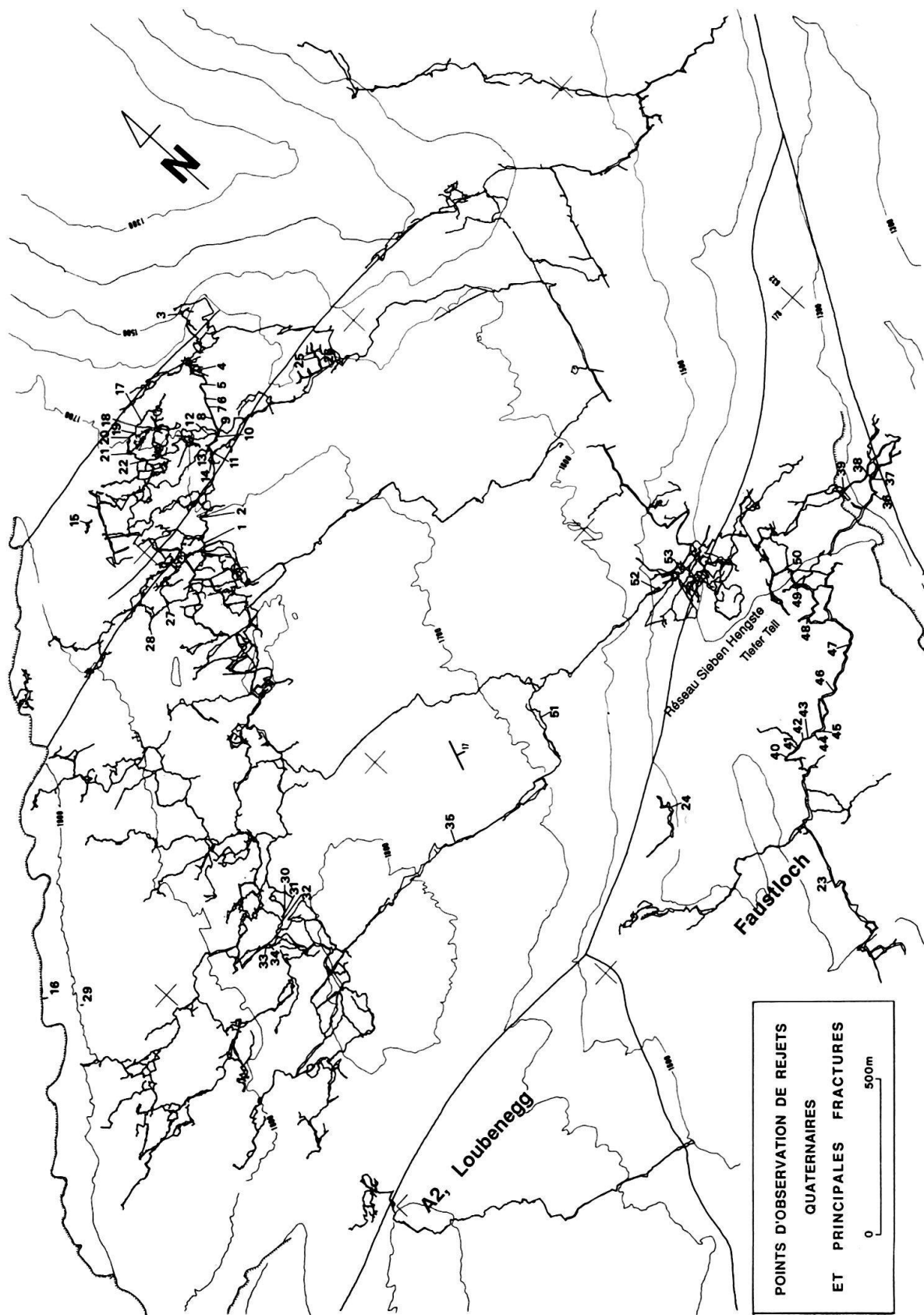


Fig. 9. Les mouvements tectoniques récents sont mis en évidence par les concrétionnements des cavités karstiques: Le déplacement du plafond par rapport au sol peut provoquer (A) la formation de plusieurs stalagmites sous une stalactite («drop spot»), incliner ou casser les colonnes (B), ou encore fissurer les croûtes de calcite (C).

*Tectonic shifts are shown by speleothems: The displacement of the ceiling with respect to the ground caused (A) the formation of several stalagmites under one stalactite ("drop spot"), deformation or fracturation of columns (B), or fissuration of stalagmitic crusts (C).*

Fig. 10. Situation spatiale dans le réseau karstique des points d'observation de néotectonique. Les traits principaux de la structure géologique et de la topographie sont donnés en surimpression.

*Spatial location of neotectonic observation sites in the cave System. Main elements of the geological structure and topography are indicated.*



POINTS D'OBSERVATION DE REJETS  
QUATERNAIRES  
ET PRINCIPALES FRACTURES

0 500m

ment plus jeune que la galerie elle-même! En admettant les hypothèses de Hof et al. (1984), étayée par de très nombreux indices morphologiques, on peut donner des âges relatifs maximaux (âges des galeries) aux rejets observés. Parfois des âges relatifs minimaux peuvent être déduits lorsque des concrétions jeunes ou des sections de galeries jeunes ne sont pas rejetées alors qu'elles sont situées sur des plans qui ont visiblement glissé. Chaque point de mesure a ainsi pu être situé dans une échelle relative du temps. La chronologie relative déduite mène à considérer trois phases de mouvements récents:

1) Mouvements contemporains au milieu ou à la fin du stade 1 de la genèse du Réseau (fig. 5). Les rejets résultants de ces mouvements sont situés sur les décrochements dextres et sont tous de grande amplitude (20–30 cm).

2) Mouvements postérieurs à la fin du stade 2 de la genèse du Réseau, sûrement proches du début du stade 3. Ils se marquent surtout sur les joints interstrates et sur la plupart des fractures existantes. Leur amplitude est de 1–5 cm.

3) Mouvements actuels ou très récents, visibles sur les décrochements dextres (éboulements, zones de tension, exfoliation, concrétions actives cassées). Leur mesure est difficile.

En tous les cas, les indices chronologiques observés ne permettent pas de placer l'ensemble des rejets mesurés dans une phase unique de mouvements.

Cette répartition en trois phases de mouvements est schématique et les rejets ont pu être progressifs.

## 6. Interprétation et discussion

### 6.1 Orientation des plans supports et des rejets

Cette analyse a permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

– Tous les plans porteurs de néotectonique appartiennent aux principales familles de fractures, mises en évidence par les études de la fracturation régionale (JAMIER & SIMEONI 1979; JEANNIN 1989). Les rejets récents ne se sont donc produits que sur des discontinuités préexistantes dépendantes de la tectonique alpine et éoalpine.

– La nature des rejets récents (inverse, normal, dextre, sénestre) est généralement la même que celle du rejet alpin indiquant une certaine compatibilité entre le champ de contraintes récent et les contraintes alpines.

– La fréquence d'observations de rejets récents montre que ce sont les joints de stratification, suivis des décrochements dextres puis des sénestres qui sont les plus souvent réactivés. Ces trois familles sont celles qui se marquent le mieux dans la morphologie superficielle (linéament en photos aériennes) et souterraine (direction des galeries). La réactivation des discontinuités semble donc jouer un rôle important sur la morphologie superficielle et sur les écoulements souterrains.

– L'orientation des vecteurs de rejet comparée à celle des plans de glissement montre que les rejets ne sont pas exactement contenus dans le plan de glissement, mais présentent une composante d'ouverture; les observations directes des plans montrent d'ailleurs fréquemment des zones ouvertes. Les plans de glissement étant toujours un peu ondulés, il est normal qu'un rejet y provoque des ouvertures. La perméabilité d'une roche fissurée dépendant du cube de l'ouverture moyenne des fissures, de tels rejets

doivent considérablement augmenter la perméabilité des fissures réactivées, donc fortement influencer les directions d'écoulements.

### 6.2 Amplitude des rejets

L'amplitude des rejets varie entre quelques millimètres et 31 centimètres. La distribution est visiblement bimodale (fig. 11), avec une famille comprise entre 0,2 et 6 cm et une autre entre 20 et 31 cm. Tous les rejets supérieurs à 20 cm sont situés sur des décrochements dextres. Or, à certains endroits, on peut mesurer sur ces décrochements un rejet de 20 cm de la section de la galerie et des piliers et un rejet de 2 à 6 cm sur les concrétions situées dans la galerie! Deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène:

1) Une phase de déplacement lent où les concrétions ne croissent que vers la fin de la période de mouvements et n'enregistrent que les derniers incréments. Cette hypothèse est peu probable vu la forme et la taille des concrétions cassées (colonnes hautes et cylindriques).

2) Deux phases de mouvements se sont succédé sur ces fractures; les premiers mouvements décalent les sections des galeries de 15 cm environ, puis, après une période calme durant laquelle croissent les concrétions, une seconde phase de mouvements décale section et concrétions de 5 cm environ.

### 6.3 Aspect dynamique

La mesure des vecteurs de déplacements récents correspond à celle des stries sur un plan de faille.

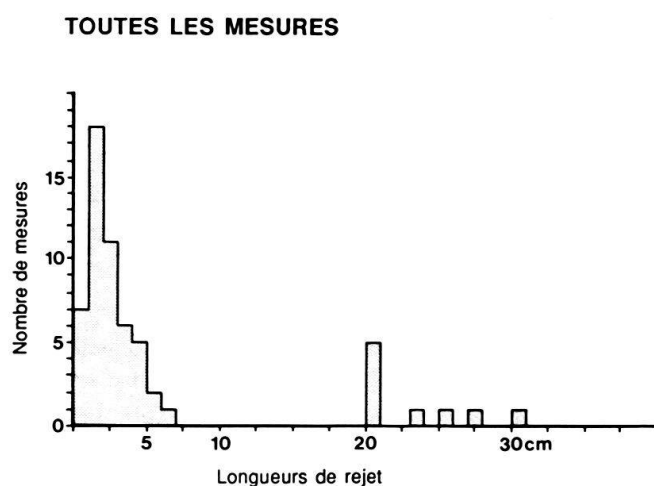


Fig. 11. Histogramme des fréquences des longueurs de rejets récents pour l'ensemble des mesures effectuées (60). La distribution est bimodale, un des modes est situé vers 2 cm et l'autre vers 23 cm. Il semble y avoir deux phases successives de mouvements avec des rejets de longueurs différentes.

*Frequency histogramm of the lengths of neotectonical shift lengths (60 measurements). The distribution is bimodal, one mode being situated at roughly 2 cm and the other at roughly 23 cm. There seem to be at least two successive phases of movement with shifts of different lengths.*



Le programme FAULTDYN (PFIFFNER & BURKHARD 1987) calcule, à partir des mesures des stries, du plan de glissement et du type de rejet (ou direction du dièdre d'extension), les parties de l'espace dans lesquelles peuvent se trouver les contraintes compatibles avec l'ensemble des stries mesurées. Les résultats sont donnés sous la forme de stéréogrammes de densité donnant les zones les plus probables pour la direction de compression ( $\sigma_1$ ) et de tension ( $\sigma_3$ ). Il s'applique particulièrement bien aux cas de réactivations tectoniques de structures préexistantes. Il indique le degré de cohérence entre le champ de contraintes déduit et les mesures effectuées. Le résultat est incohérent si le nombre de mesures cohérentes avec le champ de contraintes calculé (Max) est inférieur à la moitié du nombre total de mesures (n).

En considérant simultanément l'ensemble des mesures effectuées (fig.12A), la cohérence est bonne, mais deux maxima apparaissent pour la contrainte de tension. Ceci est typique de rejets résultants de plusieurs champs de contraintes successifs (BURKHARD, comm. or.). Les glissements couche à couche observés ont un rejet de type normal, exprimant *a priori* une phase d'extension, alors que les décrochements indiquent de la compression. En traitant les familles séparément avec FAULTDYN, on obtient des résultats excellents pour chacune des familles. L'analyse des décroche-

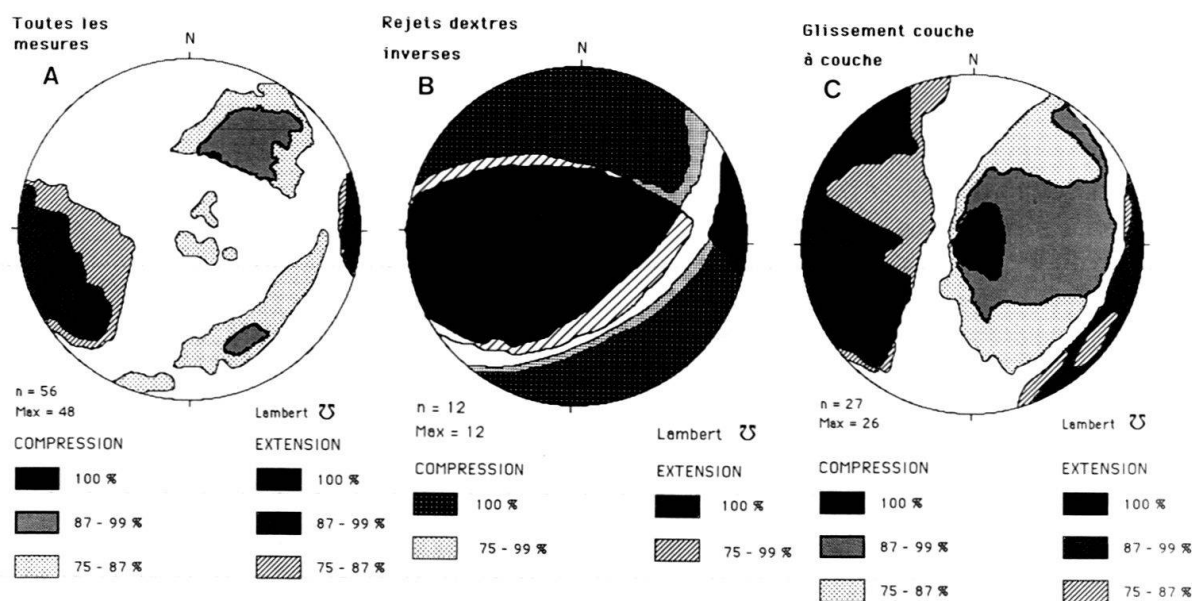


Fig. 12. Stéréogrammes de densités indiquant l'orientation probable des contraintes à l'origine des rejets mesurés.

A) Diagramme établi à partir de l'ensemble des mesures effectuées (56 mesures). La direction des contraintes de compression ( $\sigma_1$ ) est mal définie. B) Diagramme établi à partir des rejets dextres inverses mesurés. La direction de la contrainte de compression est subhorizontale, comprise entre l'ENE et le NW. Cette direction est compatible avec les mesures de contraintes effectuées lors des tremblements de terre (PAVONI 1980). C) Diagramme établi à partir des rejets mesurés de glissement couche à couche sur les joints de stratification (27 mesures). La direction de la contrainte de compression ( $\sigma_1$ ) est verticale.

*Density stereogram showing the probable stress-fields which caused the measured shifts.*

A) Diagram obtained using all the measurements (56). The compression direction is poorly defined. B) Diagram obtained using dextral inverse shifts. The compression direction is subhorizontal, between the ENE and NW, this direction is compatible with stress-fields measured on earthquakes (PAVONI 1980). C) Diagram obtained using stratalayer sliding shifts (27 measurements). The compression direction is vertical.

ments dextres (fig. 12B) donne une compression subhorizontale de type alpin (SSE-NNW), celle des glissements couche à couche (fig. 12C) donne une compression verticale et une extension subhorizontale E-W. Les autres rejets mesurés, notamment les failles normales, donnent un résultat cohérent avec celui des glissements couche à couche.

Le champ de contraintes a donc varié au cours du temps, induisant plusieurs phases de mouvements récents: un champ de contraintes de compression alpine a activé les décrochements dextres (éventuellement les sénestres), puis un champ d'extension a activé les joints de stratification et les autres discontinuités (failles normales principalement). L'analyse de l'amplitude des rejets a montré que les décrochements dextres ont été activés deux fois (env. 15 cm puis env. 5 cm). Trois phases de mouvements récents ont donc dû se produire, deux de compression et une phase d'extension (compression maximale verticale).

Les deux phases de compression mises en évidence ici montrent une direction de compression NNW-SSE très voisine de celle mesurée actuellement à partir des séismes récents ou dans les forages (PAVONI 1980). A condition d'avoir suffisamment de mesures, la méthode semble donc efficace pour mesurer l'orientation des contraintes récentes dans les roches calcaires et estimer la sismicité d'une région. L'observation des rejets récents visibles dans les cavernes peut ainsi donner des renseignements utiles aux problèmes de glissements de terrain et de sismologie des régions calcaires.

La présente étude a en outre permis de mettre en évidence une phase d'extension (compression maximale verticale) plus difficile à interpréter. On peut y voir un phénomène purement tectonique de relaxation de la contrainte alpine pendant une période du Quaternaire. Cependant la relaxation de la contrainte principale ( $\sigma_1$ ) aurait dû être accompagnée de la relaxation de  $\sigma_2$  pour aboutir au champ d'extension obtenu (fig. 12C). De plus, sans être incompatibles, les directions des axes des champs de contraintes de compression et d'extension ne sont pas tout à fait identiques rendant probable l'intervention d'un facteur supplémentaire. Il est possible que les glaciers aient joué un rôle sur les mouvements tectoniques observés. De récentes découvertes (JEANNIN 1989b) montrent que pendant le Pléistocène ancien et moyen (avant 400 000 ans B.P.), des glaciers ont dû complètement recouvrir le massif, créant une certaine surcharge qui pourrait expliquer la contrainte verticale obtenue pour le champ d'extension. Cependant, l'âge de ces glaciers paraît plus vieux (stade 1 de la genèse du Réseau) que la phase d'extension (fin du stade 2 de la genèse du Réseau). Dans l'état actuel des connaissances, l'origine du champ de contrainte d'extension reste donc encore discutable...

## 7. Conclusions

### 7.1 Conclusions karstologiques

Les observations montrent que trois phases de mouvements récents liées à la genèse du Réseau se sont succédées.

– La première phase de néotectonique intervient à la fin du premier stade de genèse du réseau karstique, lors du passage d'une morphologie peu influencée par les décrochements dextres à une morphologie de galeries rectilignes sur ces fractures caractérisant le deuxième stade de l'évolution du Réseau.

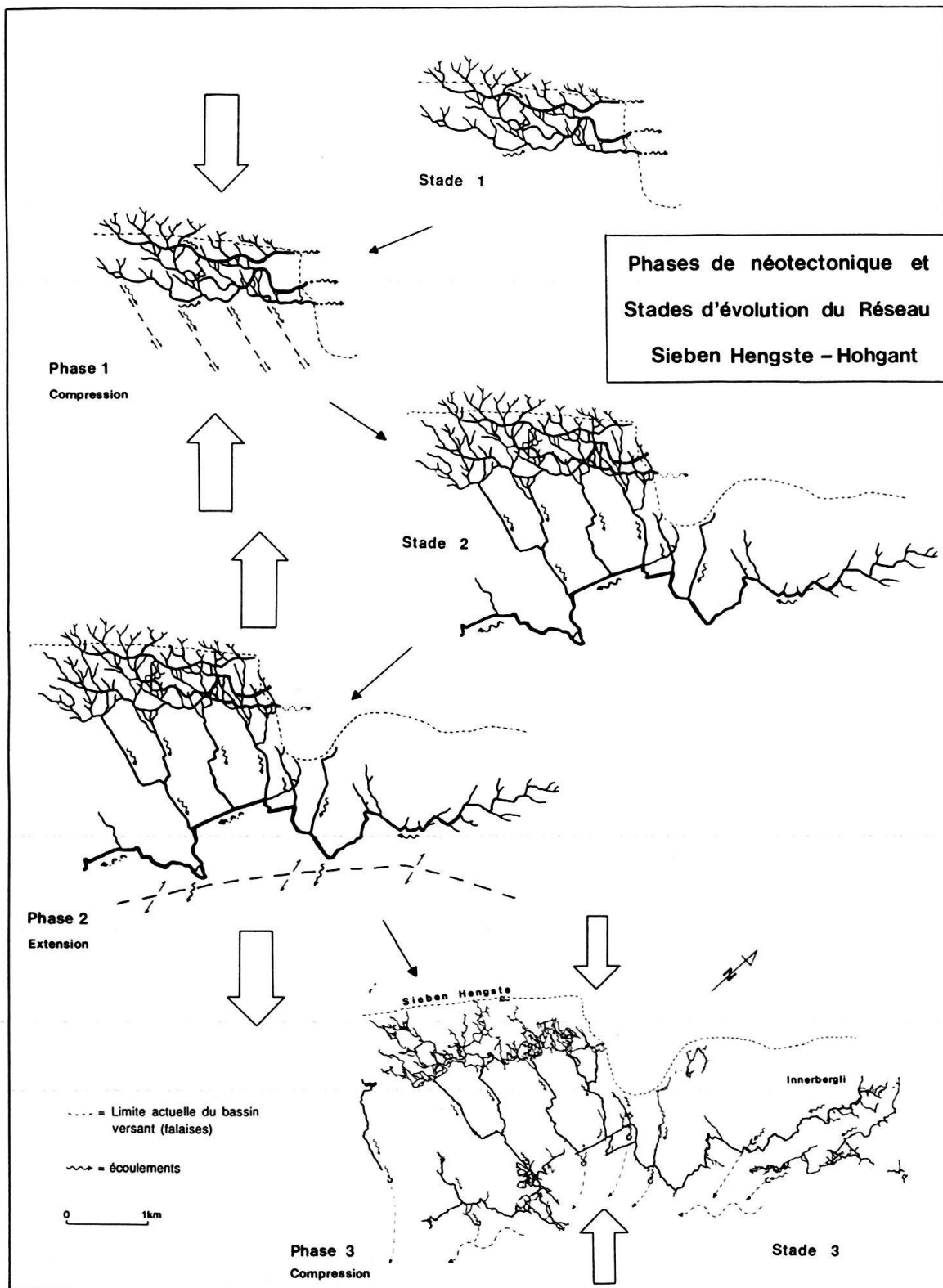


Fig. 13. Plans schématiques des stades d'évolution du Réseau Sieben Hengste – Hohgant et des phases de néotectonique. Les phases de mouvements récents semblent être à l'origine de l'ouverture des fissures qui permettent l'évolution du système karstique.

*Schematic plans of the evolution of the Sieben Hengste – Hohgant cave System with respect to the neotectonic phases. Phases of recent movements seem to open fissures which permit the evolution of the karstic system.*

L'âge de cette première phase de néotectonique, qui affecte surtout les décrochements dextres correspond parfaitement au début du stade 2 de la genèse du Réseau. Les mouvements doivent donc être à l'origine de ce changement morphologique qui semble assez rapide.

– La deuxième phase de néotectonique intervient lors de l'abaissement du niveau de base local du karst, alors barré par la faille de Sundlauenen. Il est probable que la faille barrage ait alors rejoué (extension) permettant aux eaux de descendre plus facilement. Cet abaissement marque le début du stade 3 de la genèse du Réseau.

– Actuellement ou récemment, une troisième phase de néotectonique induirait des mouvements surtout sur les décrochements dextres. Ces mouvements seraient à l'origine des éboulis présents dans la plupart des galeries situées sur ces décrochements, ils y favoriseraient aussi l'infiltration des eaux de surface.

La figure 13 résume ces conclusions.

Suite à cette étude, des observations de rejeux tectoniques contemporains à la kars-tification ont été effectuées dans différents autres karsts en Suisse et à l'étranger. Les rejeux observés semblent engendrer partout des éboulements dans les galeries et modifier les écoulements souterrains. **Les rejeux tectoniques contemporains à la kars-tification conditionnent donc fortement l'évolution génétique des systèmes d'écoulements karstiques.**

## 7.2 Conclusions géologiques

Trois phases de mouvements récents ont été mises en évidence par cette étude. La première phase résulte certainement d'une compression NNW-SSE (alpine), de même que la troisième. La deuxième phase correspond à une extension subhorizontale (E-W) et à une compression verticale. L'origine de ces contraintes pourrait être purement tectonique mais probablement aussi liée à la présence de glaciers sur le massif des Sieben Hengste.

Les mouvements semblent s'être produits par phases relativement brèves, mais les transitions entre les différents régimes tectoniques peuvent avoir été relativement lentes. Les contraintes alpines ont donc varié pendant le Plio-quadernaire.

Les directions de contraintes obtenues à partir des mesures de rejets récents sont cohérentes avec les mesures obtenues par d'autres méthodes (PAVONI 1980). La méthode présentée ici peut donner des renseignements intéressants pour les problèmes de stabilités de versants ou de sismologie.

## BIBLIOGRAPHIE

- BECK, P. 1911: Geologie der Gebirge nördlich von Interlaken. Beitr. geol. Karte Schweiz (NF) 29.
- BITTERLI, TH., & BORREGUERO, M. (trad.) 1989: Das Karstsystem Sieben Hengste – Hohgant – Schrattenfluh, Versuch einer Synthese / Le réseau karstique Sieben Hengste – Hohgant – Schrattenfluh, essai de synthèse. Stalactite, organe de la Société suisse de spéléologie 38, 1–2/88, 10–22.
- BÖGLI, A. 1969: Neue Anschauungen über die Rolle von Schichtfugen und Klüften in der karsthydrographischen Entwicklung. Geol. Rdsch. 58, 395–408.
- BREITSCHMID, A. 1978: Sedimentologische Untersuchungen in der eozänen Hohgant Serie nördlich von Interlaken. Eclogae geol. Helv. 71/1, 143–157.

- FORTI, P., & POSTPISCHL, D. 1979: Derivazione di dati neotettonici da analisi di concrezioni alabastrine. *Contr. Carta Neotelt. Italia* 135, 635–644.
- 1980: The hypothesis of the induces activity of the faults as a result of a statistical analysis of stalagmites. *European Regional Conf. Speleo., Sofia (Bulg.)*.
- 1985: Relazioni tra terremoli e deviazioni degli assi di accrescimento del stalagmitti. *Sottotera, Bol. Gruppo spel. Bolognese* 72.
- GIGON, W. 1952: *Geologie des Habkerntales und des Quellegebietes der Grossen Emme*. Verh. Natf. Ges. Basel 1952.
- GILLI, E. 1986: Néotectonique dans les massifs karstiques, un exemple dans les Préalpes de Nice: la grotte des Deux Gourdes. *Karstologia*.
- HOF, A., JEANNIN, P.-Y., ROUILLER, P. 1984: Sieben Hengste – Hohgant Höhle. Le Trou, *Bull. du Groupe spéléo Lausanne* 34.
- 1985: Le Réseau. *Bulletin Sieben Hengste – Hohgant Höhle* 0.
- JAMIER, D., & SIMEONI, J.-P. 1979: Etude statistique de la distribution spatiale des éléments structuraux dans deux massifs des Alpes helvétiques: conséquences pour l'hydrogéologie karstique. *Bull. centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel* 3, 1979.
- KNUCHEL, F. 1973: Les cinq principaux essais de coloration de la région karstique située au nord des lacs de Thoune et Brienz. *Cavernes, Bulletin des sections neuchâteloises de la Soc. suisse de Spéléologie* 17.
- JEANNIN, P.-Y. 1989: Etude géologique de la région Burst – Sieben Hengste (Chaîne bordière helvétique, canton de Berne): Apports de l'étude des cavernes à la connaissance structurale et à la mise en évidence de phases tectoniques quaternaires. *Dipl. Inst. Géol. Univ. Neuchâtel*, non publié.
- PAVONI, N. 1980: Crustal Stresses Inferred from Fault-Plane Solutions of Earthquakes and Neotectonic Deformation in Switzerland. *Rock Mechanics, Suppl.* 9, 63–68.
- PIFFNER, O.A., & BURKHARD, M. 1987: Determination of paleo-stress axes orientations from faults, twin and earthquake data. *Annales Tectonicae* I/1, 48–57.

Manuscrit reçu le 21 septembre 1989

Révision acceptée le 11 mai 1990