

RELATIONS ENTRE LA FRACTURATION, L'ORGANISATION DES ÉCOULEMENTS ET LA MORPHOLOGIE DES CONDUITS, À MONT GODINNE (BELGIQUE)

Yves DUBOIS

(6 figures)

Rue Henri Maus, 127, B-4000 Liège

RESUME. Ce travail a pour objet d'étudier le système karstique de Mont Godinne (province de Namur, Belgique). Cette étude de la relation entre tectonique et karstification consiste à mesurer les marqueurs de la déformation (stylolithes, veines d'extension, failles et stries associées), afin de reconstituer la distribution des directions principales des ellipsoïdes des contraintes et par conséquent, la distribution des plans en extension. Parmi toutes les fractures existantes, les plans en extension sont les plus ouverts et sont supposés être les plans de drainage. Cette distribution est ensuite comparée à celle des orientations de galeries, ce qui montre que les plans en extension sont les vides à l'origine du drainage karstique.

La distribution des plans de drainage permet d'approcher l'organisation spatiale des écoulements karstiques (aquifère unique ou superposé).

Cette distribution est également comparée à la distribution des discontinuités karstifiées et permet d'étudier les phénomènes induisant la morphologie des galeries. Les discontinuités karstifiées sont des fractures ou joints de stratification orientés parallèlement aux galeries et évidés par la dissolution. L'orientation des galeries est toujours parallèle à l'intersection entre une discontinuité karstifiée et un plan de drainage. Dans le cas des joints de stratification, lors du creusement d'une galerie, c'est le plan de drainage en extension qui est à l'origine de celle-ci et le phénomène de dissolution différentielle oriente la galerie dans le plan de la fracture en extension, c'est-à-dire parallèlement à la stratification dans ce cas particulier. La majorité des discontinuités karstifiées ne sont donc pas des plans de drainage et ne jouent qu'un rôle limité, à l'échelle de la galerie, sur la morphologie de celle-ci.

MOTS-CLES: plans de drainage, karst, discontinuités, Belgique, Mont Godinne, marqueurs de contraintes.

ABSTRACT. Influence of fracturation on underground drainage and conduit morphology in Mont Godinne (Belgium). This work studies the karst system of Mont Godinne (Province of Namur, Belgium). This study of the relationship between tectonic style and karstification consists in measuring the stylolites, tension veins and faults with their associated striations to draw the stress ellipsoid and the distribution of the tension veins. Among all fractures, the tension veins are most open and therefore, supposed to be the draining planes. This distribution is then compared to the distribution of the gallery orientations and this shows that the tension planes generate the karstic drainage.

This distribution allows to sketch the spatial organisation of the karstic flows (unique or superposed aquifer).

Cave development is also compared to the distribution of the karstified discontinuities: joint or bedding planes, oriented along the gallery and open by dissolution. The gallery orientation is always parallel to the intersection of a tension vein and a karstified discontinuity. In the case of bedding planes, the tension plane allows the flow, generates the gallery and the differential dissolution orients this one in the tension plane, i. e. parallel to the stratification. Therefore, the majority of these karstified discontinuities are not draining planes and are only operative on the gallery morphology.

KEYWORDS : underground drainage, karst, discontinuities, Belgium, Mont Godinne, strain markers.

1. Introduction.

Le but de cette étude est la recherche de la distribution des plans de drainage dans le massif karstique de Mont Godinne (province de Namur, Belgique, Fig. 1). Cette distribution sera ensuite comparée aux orientations des

conduits souterrains et interprétée en termes d'organisation des écoulements et de morphologies des conduits.

Cette recherche de la distribution des plans de drainage est basée sur le postulat que l'écoulement utilise tous les plans en distension. Ces plans sont les fractures dont le mouvement perpendiculaire aux épontes, ouvre celles-

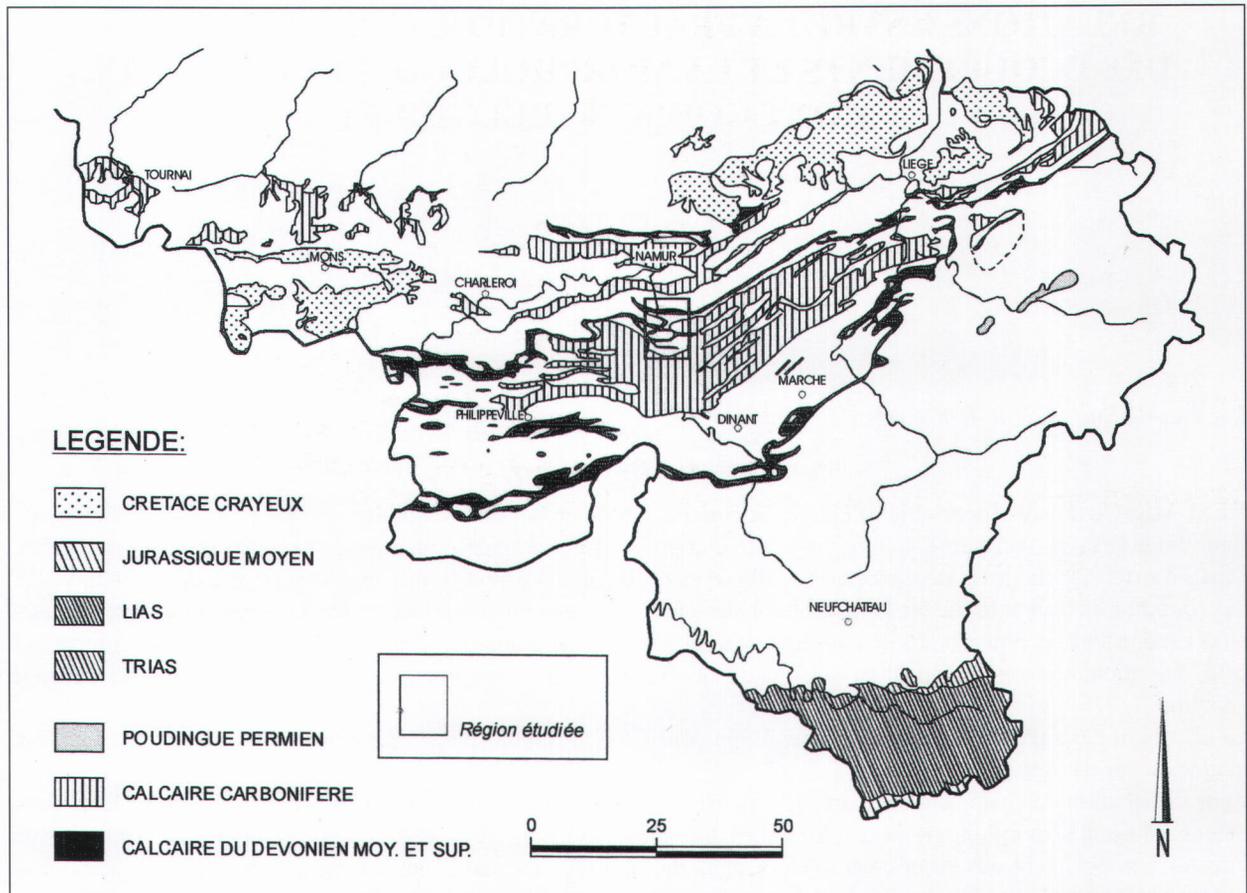


Figure 1. Carte de la répartition des formations carbonatées de la Belgique (d'après Ek 1995) et localisation de la région de Mont Godinne. Les axes des plis sont orientés ENE-WSW entre Liège et la zone étudiée. Vers l'Ouest, les plis subissent 2 flexures. Dans la région de Mont Godinne, les plis sont orientés E-W (Fig. 2) et à l'Ouest de la Meuse, ils sont orientés WNW-ESE.

Figure 1. Map of the carbonate formations of Belgium (from Ek, 1995) and localization of the "Mont Godinne" area. The axial direction of folds is ENE-WSW between Liège and the studied area. To the West, the folds undergo 2 flexures. Fold orientation is E-W in the Mont Godinne area (Fig. 2) and WNW-ESE on the western side of the Meuse river.

ci. Eraso (1985, 1986) appelle ces plans, les "plans de drainage", car ces plans, parmi toutes les fractures drainant le milieu fissuré avant la karstification, sont à l'origine de l'ensemble des vides karstifiés. Ce postulat permet d'appliquer les méthodes de la géologie structurale pour trouver la distribution des plans en extension. Ceci mérite quelques mots d'explication.

La karstification de l'endokarst nécessite quatre conditions. La première est un encaissant karstifiable. La deuxième est un agent chimique (le plus souvent, le CO₂) et sont vecteur, l'eau. La troisième est que le système doit être thermodynamiquement ouvert, c'est à dire qu'il existe des entrées et sorties et que les vides souterrains soient interconnectés pour permettre l'écoulement. Ces trois premières conditions sont bien connues et le détail de leurs implications dépasse le cadre de cet article. La quatrième condition est que ces vides sont constitués d'un grand maillage de fissures ouvertes et interconnectées à l'échelle du massif. Cette condition contient trois idées: le milieu est fissuré, les fissures sont ouvertes et l'interconnexion existe à l'échelle du massif.

1. En milieu poreux, les vitesses d'écoulement et la perméabilité, sont tellement faibles que le potentiel chimique ne peut agir que sur de faibles distances (par ex: quelques mètres). Pour que la karstification traverse le massif et finalement relie les pertes aux résurgences, il est nécessaire que le milieu soit fissuré et qu'il ait une perméabilité élevée.
2. Les massifs karstiques, comme tous systèmes dynamiques, sont régis par les lois générales de la physique. En particulier, le principe de moindre action implique que parmi tous les chemins possibles entre les entrées et les sorties, le premier chemin karstifié sera celui où la dissipation du potentiel chimique sera maximum. L'eau n'empruntera donc pas nécessairement le chemin géométriquement le plus court, mais celui où elle ira le plus vite. Ce parcours est logiquement, celui empruntant les fissures les plus ouvertes.
3. L'interconnexion des fissures doit exister à l'échelle du massif (et non pas seulement localement). Ceci entraîne que le processus à l'origine des fissures ouvertes est généralisé dans le massif et permette

l'existence de fractures de grande dimension, recoupant les différentes couches (pour de nouveau s'affranchir des petites variations locales). Il s'agit des contraintes tectoniques. Pour comprendre l'organisation des écoulements karstiques à l'échelle du massif, il faut que les phénomènes à l'origine des fractures ouvertes, n'agissant que très localement (par ex: tassement à l'échelle de la strate ou effondrement du bord d'un récif,...) soient exclus. La méthode qui permet de reconstituer la distribution des plans de drainage doit vérifier que l'origine des fissures est tectonique. On ne peut dès lors se contenter d'un relevé systématique de toutes les fissures ouvertes.

2. Situation et contexte géologique

Le village de Godinne est situé en province de Namur, dans la vallée de la Meuse. Le hameau de Mont Godinne se situe sur le plateau en rive droite de la Meuse. Son système karstique est situé dans le flanc Sud du synclinal de Rivière, dans les calcaires du Givétien et du Frasnien du bord Nord du synclinorium de Dinant (Fig. 1, 2).

Les axes des plis sont orientés ENE-WSW entre Liège et Crupet (à l'Est de Mont Godinne). A l'Ouest, les plis subissent 2 flexures. Entre Crupet et la Meuse, ils sont orientés E-W et à l'Ouest de la Meuse, ils sont orientés WNW-ESE. La zone étudiée est entièrement comprise dans la petite région où les axes des plis sont orientés E-W.

Le Givétien est principalement constitué de calcaires à bancs métriques et inframétriques alternant avec quelques petits bancs (maximum 3 mètres) de dolomie, de grès ou de schistes carbonatés ou schisto-gréseux (Coen - Aubert & Coen, 1974). Le sommet de l'étage est constitué de 7 à 10 m de schistes. Toutefois, ce banc schisteux est présent dans le flanc nord du synclinal, mais se réduit à quelques dizaines de centimètres dans le flanc sud, comme on peut l'observer au fond des Trou de l'Eglise et Trou Dury. Ces bancs non carbonatés peuvent créer des barrières imperméables et diviser l'aquifère karstique en plusieurs aquifères étagés.

Le Frasnien inférieur et moyen est constitué uniquement de calcaires à bancs métriques ou inframétriques. La puissance de l'ensemble des calcaires est d'environ 250 mètres.

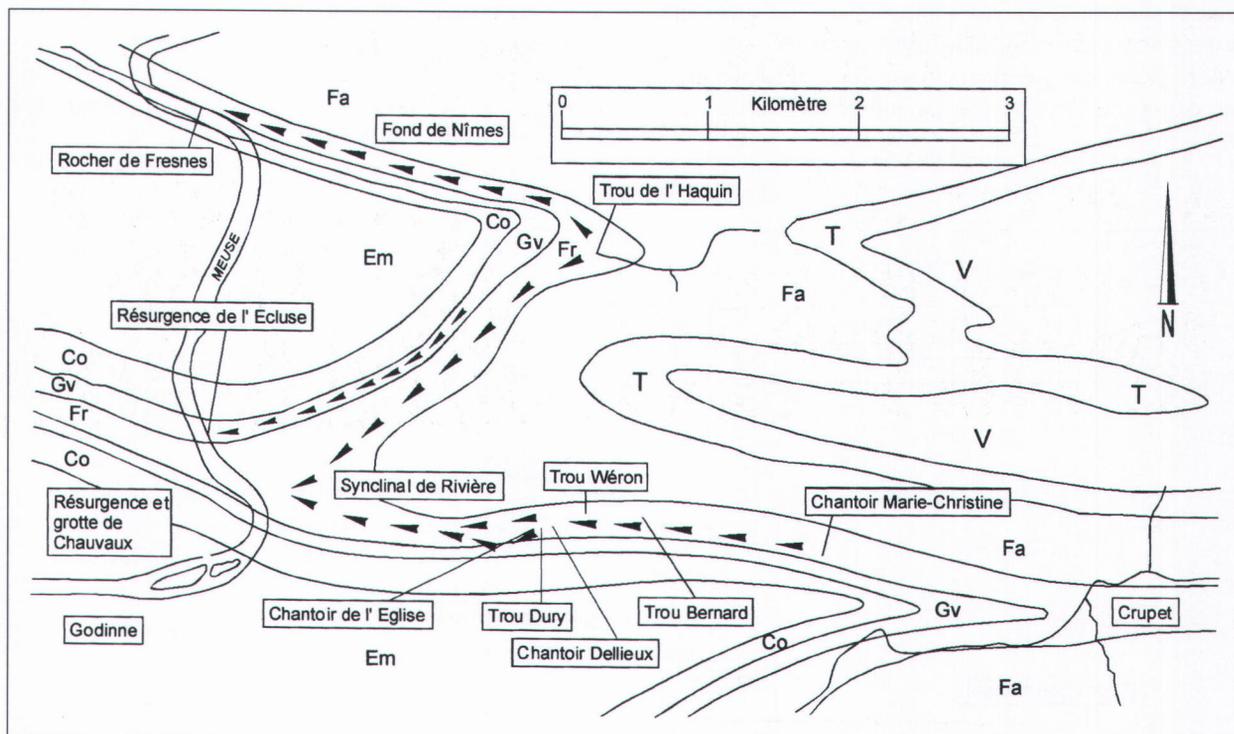


Figure 2. Contexte géologique et synthèse des traçages. Co: Couvinien, Em: Emsien, Fa: Famennien, Fr: Frasnien, Gv: Givétien, T: Tournaisien et V: Viséen. Les flèches indiquent les traçages. On remarquera que dans le flanc sud du synclinal, toutes les eaux se rassemblent à la Résurgence de Chauvaux. Par contre, dans le flanc nord du synclinal, les eaux qui disparaissent dans les chantoirs du Givétien ne ressortent qu'à la Résurgence de l'Ecluse et celles des chantoirs frasnien ne ressortent qu'à la Résurgence de Chauvaux.

Figure 2. Geological framework and synthesis of the dye tracing experiments in the Mont Godinne area. Co: Couvinian, Em: Emsian, Fa: Famennian, Fr: Frasnian, Gv: Givetian, T: Tournaisian et V: Viséan. The arrows show the dye tracing results. In the south flank of the syncline, all the different rivers resurge in the Chauvaux spring. On the contrary, on the northern flank of the syncline, the waters flowing into the givetian sinkholes appear in the Ecluse spring and the waters flowing into the frasnian sinkholes also appear in the Chauvaux spring.

Le Frasnien supérieur, essentiellement schisteux, est surmonté par les schistes et les grès fameniens. Les étages sous-jacents sont les grès couviniens et le poudingue emsien.

3. Contexte hydrologique

Le résultat des nombreux traçages réalisés dans la région est synthétisé à la figure 2 (Dubois, 1997). Dans le flanc Sud du synclinal de Rivière, toutes les eaux se rassemblent à la Résurgence de Chauvaux. Par contre, dans le flanc Nord du synclinal, les eaux qui disparaissent dans les chantoirs situés dans le Givétien, ne ressortent qu'à la Résurgence de l'Ecluse et celles des chantoirs situés dans le Frasnien, ne ressortent qu'à la Résurgence de Chauvaux.

4. Les phénomènes karstiques

Les chantoirs étudiés sont: (Figs. 2, 3) le Chantoir de l'Eglise (prof.: 78 m), le Trou Dury (prof.: 77 m) et le système Wéron-Dellieux (prof.: 110m). Ils s'ouvrent à une altitude de 110 à 130 m au-dessus du niveau de la Meuse (altitude 82m). Ce sont des pertes relativement étroites, aux galeries méandriformes, ponctuées de puits et de ressauts. Ces galeries peuvent recouper soit un tronçon de paléocollecteur, soit un autre chantoir, dans le-

quel on remonte, mais sans pouvoir ressortir à la surface. L'ensemble de ces galeries a un développement de 5250m. Pour une description détaillée, on consultera les articles de De Bie (1995) et Dubois (1999 a et b).

5. La distribution des plans de drainage (Méthode)

Pour chercher la distribution des plans en extension, l'orientation de l'ellipsoïde des contraintes. Pour cela, il existe deux méthodes (Angelier, 1994). Soit à partir d'une population de failles, on procède à l'inversion du tenseur réduit des contraintes (Angelier, 1994), ce qui permet de calculer tous les paramètres caractérisant l'ellipsoïde et donne la moyenne statistique de l'orientation de ce dernier. Soit on utilise les associations entre les marqueurs de la déformation, les stylolithes, les veines d'extension et les microfailles (Arthaud & Choukroune, 1972; Angelier, 1994; Dunne & Hancock, 1994). La méthode inventée par Arthaud, doit être complétée pour être valide dans tous les états de contraintes possibles (voir plus loin). Cette méthode graphique, permet ainsi de trouver la distribution des orientations des ellipsoïdes, ce que nous cherchons par ailleurs.

Dans un contexte de tectonique cassante, les plans en extension sont les plans contenant les directions des contraintes principales (σ_1 et σ_2) (Fig. 4B et C). Les plans perpendiculaires aux pics des stylolithes contiennent (σ_2

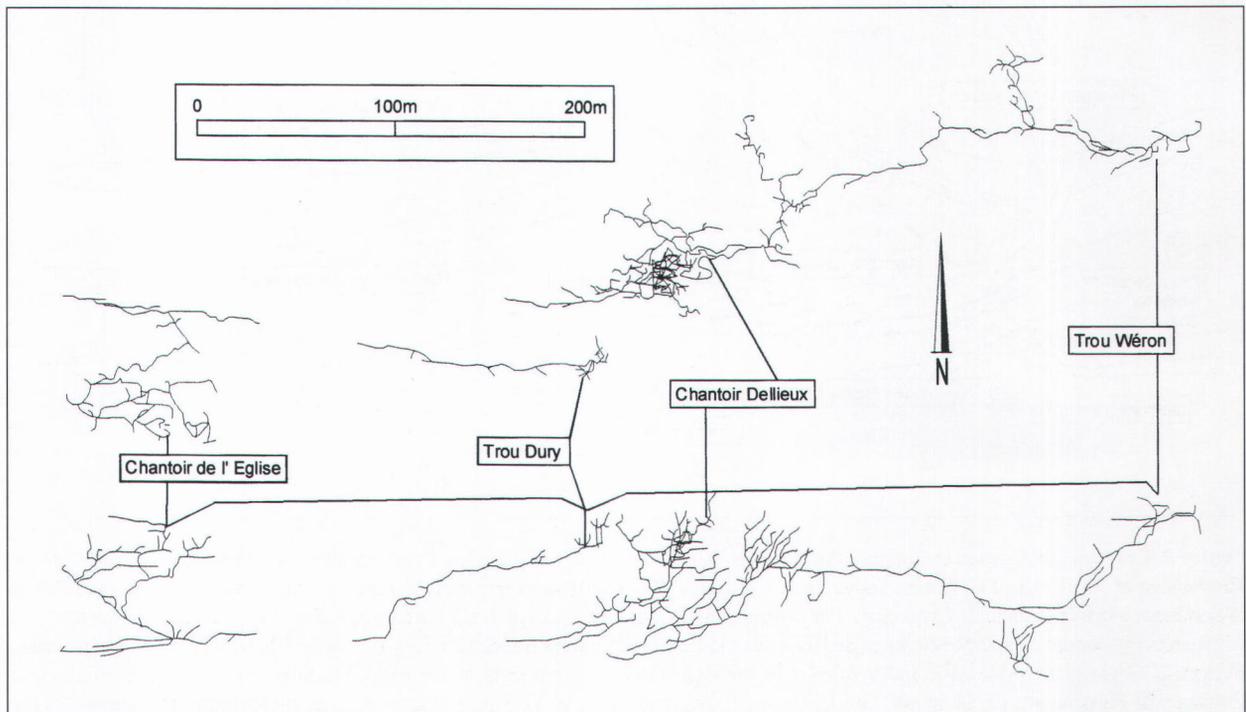


Figure 3. Plan (haut) et coupe projetée Ouest-Est (bas) du Trou de l'Eglise, du trou Dury, du chantoir Dellieux et du Trou Wéron.
Figure 3. Map (up) and West-East section (down) of the "Trou de l'Eglise", the "Trou Dury", the "chantoir Dellieux" and the "Trou Wéron".

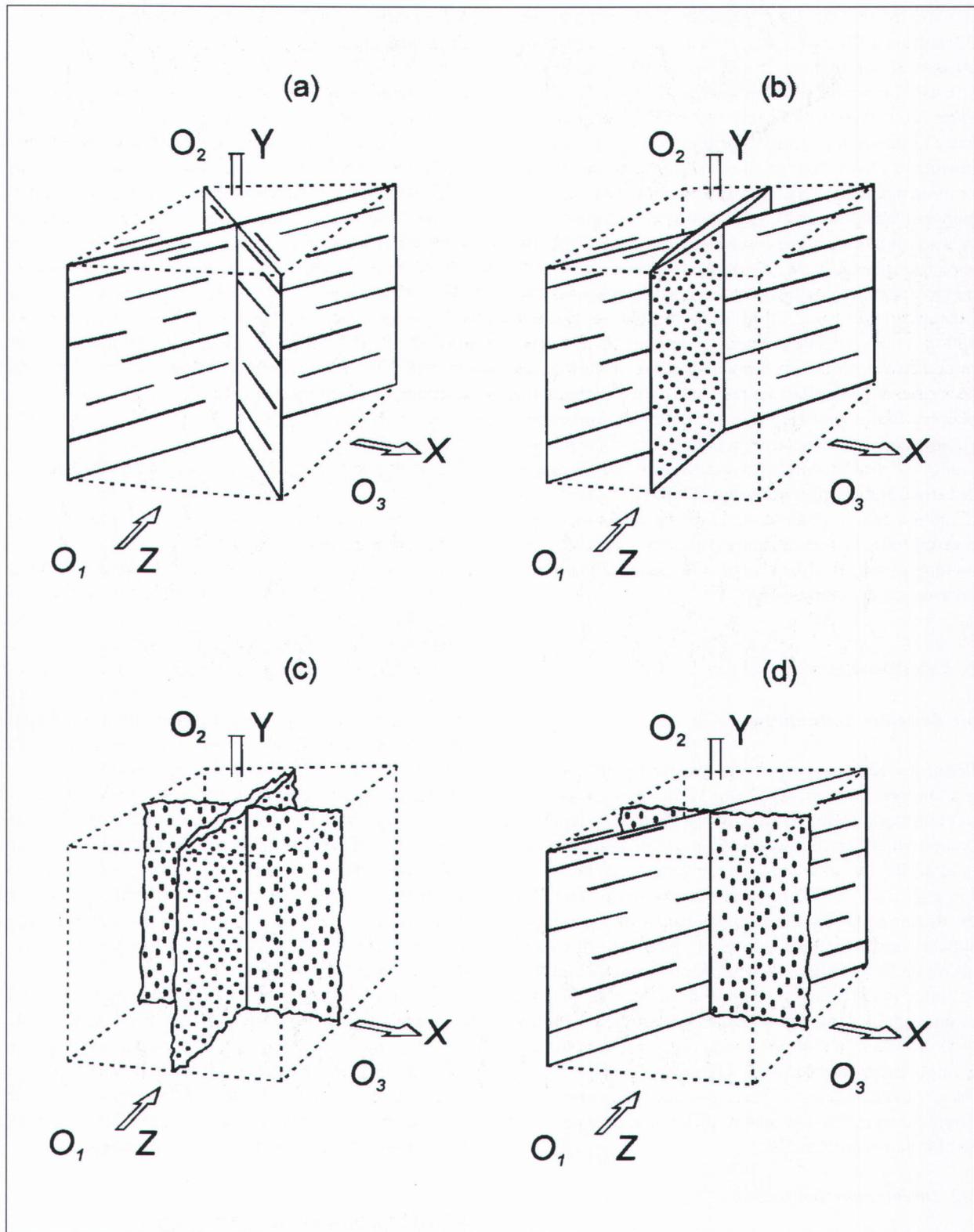


Figure 4. Associations des marqueurs de la déformation et orientations des contraintes principales (d'après Eraso, 1985). (a) Faille-Veine, (b) Stylolithe-Veine d'extension, (c) Stylolithe-Veine d'extension et (d) Faille-Stylolithe. Pour les associations (a, b et d), on vérifie que les 2 marqueurs correspondent au même état de contraintes, en testant l'orthogonalité entre les stries de faille et l'intersection des 2 plans. Dans le cas (c), on teste l'orthogonalité des 2 plans.

Figure 4. Strain marker associations and stress orientations (from Eraso, 1985). (a) Fault-Fault, (b) Fault-Tensile veins, (c) Stylolite-Tensile vein and (d) Fault-Stylolite. With regards to associations (a, b and d), we verify that 2 markers correspond to the same stress state, by testing the orthogonality between striations and the intersection of the 2 planes. In case (c), we test the orthogonality of the 2 planes.

et σ_3) (Fig.4C et D). Dans le cas de 2 failles conjuguées, σ_2 se situe à l'intersection des deux plans, les stries de glissement sont perpendiculaires à cette intersection et s_1 est la bissectrice de l'angle aigu (Fig.4A). La méthode de Arthaud & Choukroune (1972) consiste à calculer l'intersection entre 2 marqueurs et d'y placer σ_2 . Ensuite, σ_1 et σ_3 sont calculées en tenant compte de la position des marqueurs. On vérifie que 2 marqueurs sont compatibles entre eux, c'est à dire correspondent à un même état de contrainte en testant l'orthogonalité entre le plan perpendiculaire au pics du stylolithe et une veine d'extension. Mais, cette méthode, n'est valable que dans le cas particulier d'un ellipsoïde de révolution (Angelier, 1994). Pour que cette méthode s'applique au cas général, il faut ajouter un test supplémentaire : on vérifie que les stries sont perpendiculaires à σ_2 , c'est à dire que les plans de faille sont parallèles aux failles néoformées ou conjuguées. La méthode admet une tolérance de plus ou moins 10° par rapport aux mesures pour tenir compte des erreurs de mesures et des ondulations des plans. Pour l'établissement statistique de la distribution des veines d'extension, une pondération est affectée en fonction du nombre de veines observées (1 = unique, 2 = peu nombreuses et 3 = nombreuses).

6. Les données

6.1. Les plans de drainage

Parmi les 120 associations de marqueurs de la déformation, relevées sur le terrain, la méthode décrite retient 58 associations ou ellipsoïdes. Après pondération, on obtient la distribution de 153 plans de drainage (car la majorité des plans est affectée de la pondération 3). Les figures 5A et 5D montrent trois familles de plans de drainage. Les deux premières sont des plans subverticaux orientés $N110^\circ E$ (1), pour la principale, avec une forte dispersion de plus ou moins 20° et N-S (2) pour la deuxième, avec une dispersion de plus ou moins 10° . La troisième famille est orientée $N140^\circ E/60^\circ S$ avec une faible dispersion de plus ou moins 5° . L'importance du secteur de la famille (3) dans la figure 5A est exagérée, car il regroupe des plans de même orientations mais de pendages différents, comme on le vérifie dans la figure 5D.

6.2. Orientations des galeries

Les galeries présentent un trajet en ligne brisée. L'orientation mesurée est celle de chaque tronçon rectiligne. Ces tronçons ont des longueurs très différentes (entre quelques mètres et plus de 60 mètres). Pour une représentation statistique, on a pondéré celles-ci: 1 pour un tronçon ≤ 5 m, 2 pour un tronçon ≤ 10 m et ainsi de suite. La figure 5B montre deux orientations privilégiées N-S et $N100^\circ E$ et une petite famille orientée $N140^\circ$.

6.3. Les discontinuités karstifiées (fractures et joints de stratification)

Les discontinuités karstifiées sont des plans (fractures ou joints de stratification) mis en évidence par la karstification, c'est à dire que la géométrie des vides s'orientent parallèlement et de part et d'autre de ces plans (Fig. 6). Ces discontinuités planes coupent longitudinalement les galeries. Comme dans la grande majorité des tronçons rectilignes de galerie, on observe 1 ou 2 de ces discontinuités karstifiées, les explorateurs du monde souterrain, spéléologues et karstologues, admettent généralement que celles-ci sont à l'origine du creusement des galeries, c'est à dire, qu'elles sont les fractures les plus ouvertes. On verra que le problème est cependant plus complexe (paragraphe 9).

7. Interprétation: Les plans de drainage

La méthode évoquée plus haut a été utilisée dans une trentaine de cas (Eraso, 1985; 1986; Ricard *et al*, 1996), dans des contextes géologiques et tectoniques très différents. La corrélation entre les distributions des orientations des plans de drainage et des galeries, était chaque fois supérieure à 95 %. Dans le cas de Mont Godinne, la corrélation Plan de drainage-Orientation des galeries est de 96 % (test de Kolmogoroff entre les figures 5A et 5B). En réalité, cette corrélation est légèrement supérieure à 96 %, car on se rappellera que le secteur ($140^\circ - 150^\circ$) (3) rassemble des plans ayant la même orientation, mais des pendages très différents. En conclusion, les résultats obtenus dans le contexte tectonique de Mont Godinne sont très bons et la méthode utilisée se révèle très efficace pour reconstituer la distribution des plans de drainage. Ces résultats montrent qu'il existe deux familles principales de plans de drainage subverticaux orientés $N110^\circ E$ (1) et N-S (2) et une famille orientée $N140^\circ E/60^\circ S$.

Une question reste ouverte. Quel est le processus qui permet à l'ensemble de la fracturation N-S, compatible avec la direction de la phase tectonique hercynienne, d'être utilisée lors des phases de karstification fini-tertiaires et quaternaires? Tout ce passe comme si, lors de la dernière phase tectonique (la surrection de l'Ardenne), l'ensemble des fractures préexistantes recassait.

8. Interprétation hydrologique

Sur base de la distribution des plans de drainage, mesurée et similaire sur les 2 flancs du synclinal, on peut tirer deux conséquences hydrologiques.

1. On peut s'attendre à ce que l'aquifère du flanc Sud du synclinal de Rivière soit un aquifère unique et non un ensemble d'aquifères superposés. La famille de plans de drainage (N-S) est orientée perpendiculairement aux

petits bancs imperméables du Givétien orientés (N85°E/45°N). Ceci est corroboré par l'absence de résurgence dans les calcaires givétiens du flanc Sud du synclinal.

Par contre, sur le flanc Nord du synclinal, la stratification est orientée N35°E/45°S. Cette orientation oblique par rapport aux trois familles de plans de drainage est moins favorable aux recouvrements des bancs imperméables. On peut dès lors s'attendre à trouver deux aquifères distincts et superposés, frasnien et givétien, séparés par les 7 mètres de schistes du sommet du Givétien. Ceci est corroboré par les traçages (Fig. 2).

2. L'aquifère est drainé par un réseau de galeries du type 'buissonnant' occupant tout le volume du massif calcaire.

Vu que la bande calcaire et le gradient hydraulique, du flanc sud du synclinal, sont orientés E-W, comme la famille principale des plans de drainage, la silhouette du réseau de drains est allongée selon l'axe E-W. L'orientation N-S de la deuxième famille de plans de drainage est la situation la plus favorable pour avoir une grande extension latérale de cette silhouette. On peut alors s'attendre à ce que le massif soit entièrement drainé par un ensemble de galeries se rassemblant en un drain unique dans la partie avale de l'aquifère et non par un ensemble de drains parallèles divisant le bassin hydrologique en différentes zones. Ceci est corroboré par la silhouette des topographies des grottes (Fig. 3) et l'existence de la seule résurgence de Chauvaux.

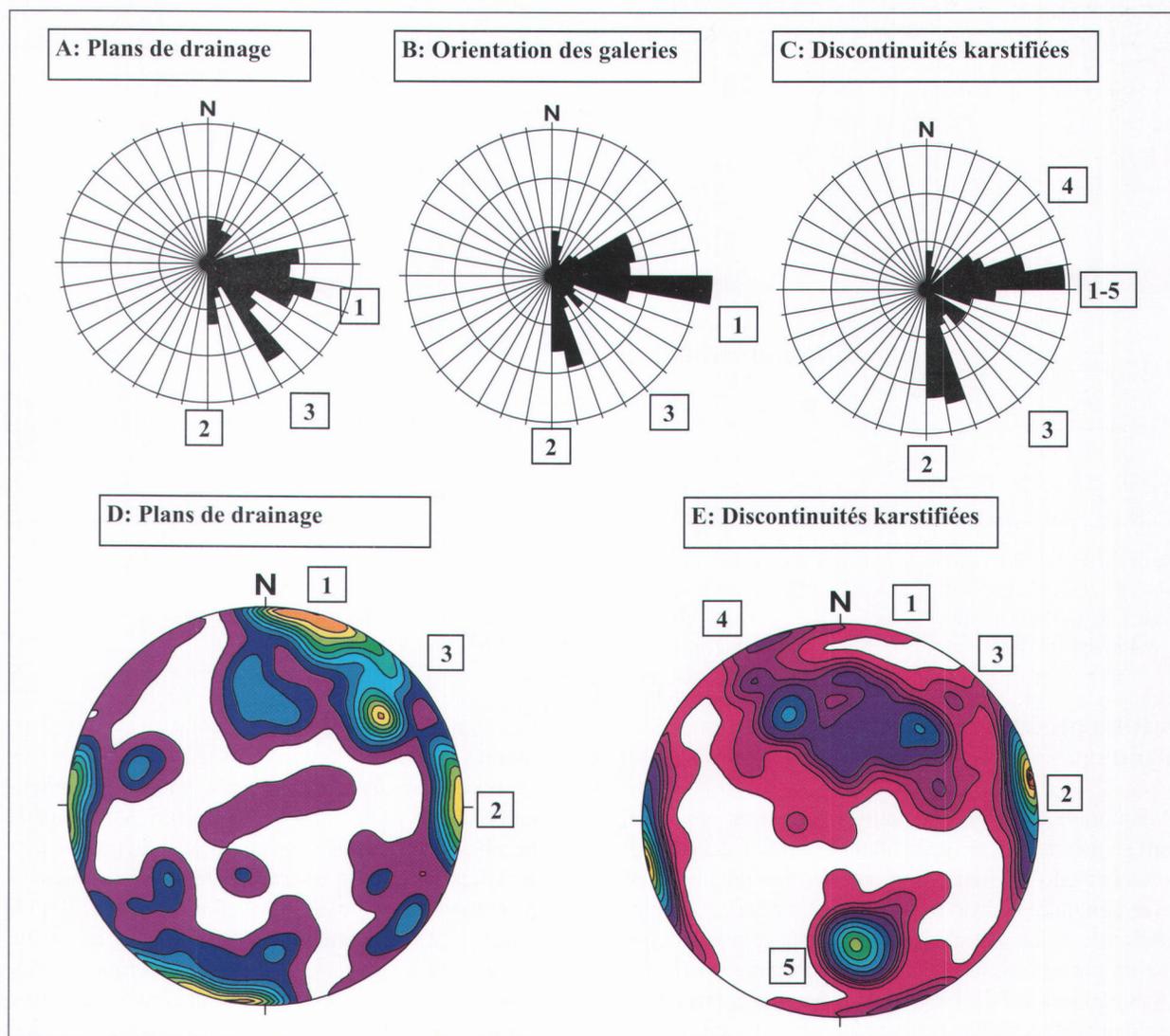


Figure 5. Comparaison de la distribution des plans de drainage, des orientations de galerie et des discontinuités karstifiées. Les histogrammes présentent les orientations des plans et des galeries. Les diagrammes stéréographiques de Schmidt représentent les pôles des plans. Le test de Kolmogoroff est appliqué aux figures A-B, et A-C. Les corrélations sont respectivement de 96% et 96,2%. La Fig. D présente les mêmes données que la Fig. A, en tenant compte des pentages (id. Fig. E et C). Commentaires dans le texte.

Figure 5. Distribution of draining surfaces, gallery orientations and karstified discontinuities. The histograms present the planes and galleries orientation. The Schmidt stereographic diagrams represent the planes poles. The Kolmogoroff test is applied to figures A-B and A-C. The correlation attains respectively 96% and 96.2%. Fig. D represents the same set of data as Fig. A considering the dip of planes (id. Fig. E and C).

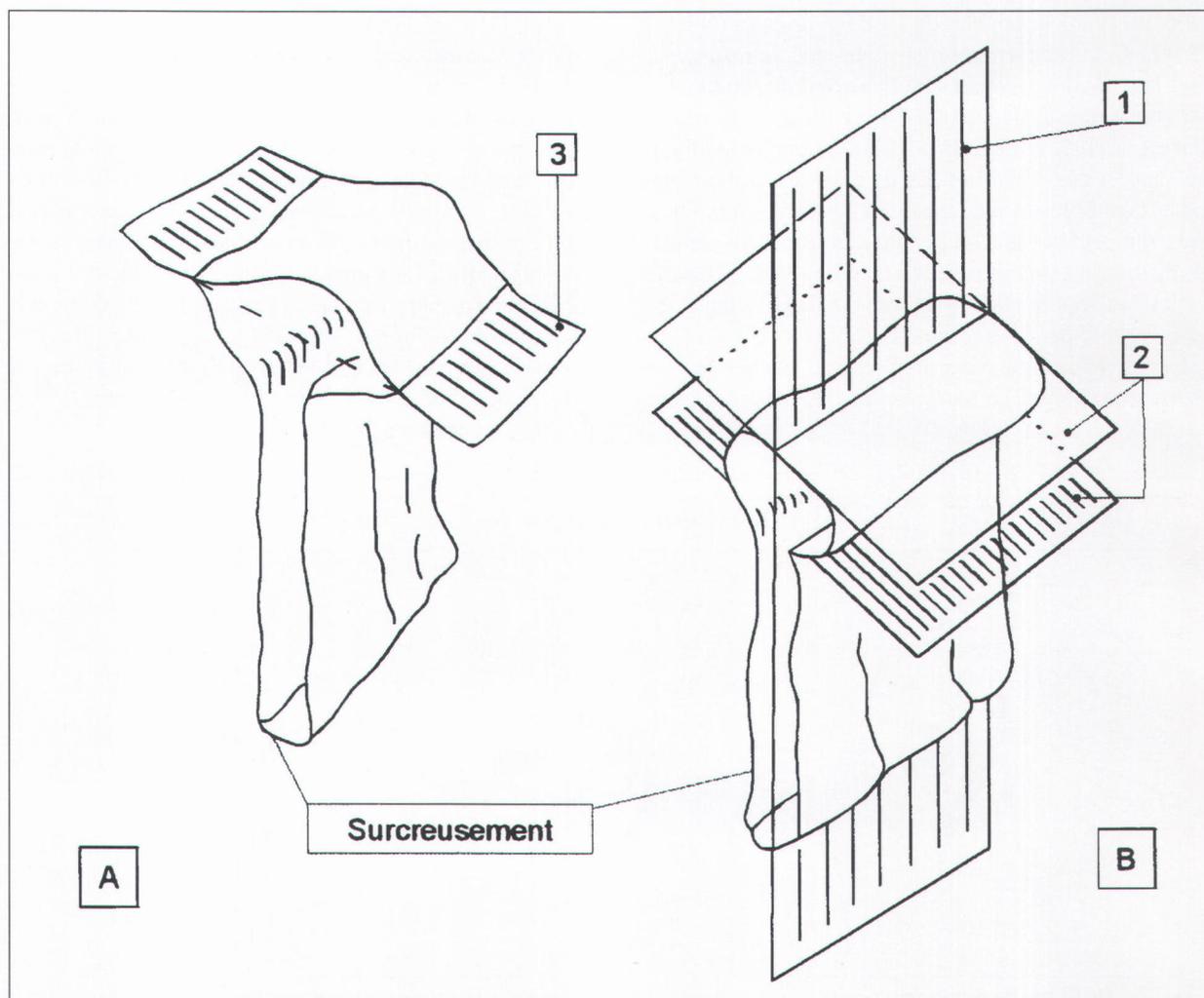


Figure 6 A. Les discontinuités karstifiées sont des fractures ou joints de stratification coupant longitudinalement les galeries et mises en évidence par la dissolution (3). **(B)** Intersection entre un plan de drainage (1) et la stratification (2).

Figure 6 A. The karstified discontinuities consist of the joints or the bedding planes oriented along the gallery and opened by dissolution (3). **(B)** Intersection between a draining surface (1) and the stratification (2).

9. Interprétation: la relation plans de drainage - discontinuités karstifiées

L'omniprésence des discontinuités karstifiées observées dans les galeries et leurs orientations longitudinales par rapport à ces galeries, font penser que ces discontinuités sont les discontinuités ouvertes à l'origine des galeries. La corrélation de 96.2 % entre les plans de drainage et les discontinuités karstifiées (test de Kolmogoroff entre les figures 5A et 5C) soutient cette hypothèse. Mais la comparaison des figures 5D et 5E montre que cette « bonne » corrélation est particulièrement trompeuse pour plusieurs raisons.

1. La famille principale des plans de drainage N110°E (1) ne fait pas partie des discontinuités karstifiées. Par contre, une des familles principales des discontinuités est constituée des joints de stratification orientés N85°E/45°N (5). On est ici induit en erreur par la similitude des orientations des deux familles de plans de pentages bien distincts.

2. Les plans de drainage N-S (2) font partie des discontinuités karstifiées.

3. Deux dernières familles de plans sont les plans d'orientation: N130°E/60°S (3) et N65°E/60°S (4). Ces deux familles de fractures, presque perpendiculaires à la stratification, correspondent aux fractures conjuguées de compression, situées sur le flanc d'un pli. La famille (3) a une orientation très proche de la famille (3) des plans de drainage. Ce sont des joints conjugués qui ont joué en extension. Par contre, la famille (4) n'est pas un plan de drainage et est abusivement corrélée avec la famille (1) des plans de drainage qui présente une large dispersion de plus ou moins 20°.

En conséquence, une grande part des discontinuités karstifiées ne sont pas des plans de drainage. Mais alors, comment expliquer leur mise en évidence par la karstification?

Dans le cas des joints de stratification, l'orientation des galeries présentant des bancs évidés, est toujours paral-

lèle à la droite d'intersection entre le plan de stratification et un plan de drainage (Fig. 6B). Dès lors, l'explication est simple: lors du creusement d'une galerie, c'est le plan de drainage en extension qui est à l'origine de celle-ci et le phénomène de dissolution différentielle oriente la galerie dans le plan de la fracture en extension, c'est à dire parallèlement à la stratification.

Dans les galeries orientées parallèlement aux fractures conjuguées, l'influence des plans de drainage est corroborée par le fait que ces galeries sont orientées parallèlement à l'intersection des plans de drainage et des plans des fractures conjuguées. Malheureusement, on ne peut invoquer ici, la dissolution différentielle. L'hypothèse que les joints conjugués soient karstifiés grâce à un phénomène hypothétique de détente du versant est également à rejeter. Dans le cas de Mont Godinne, l'orientation des joints conjugués n'est pas parallèle au versant et la distance au versant (plus de 2 km) est trop grande. Une explication possible est l'augmentation de la pression due aux mises en charge, lors des crues, ouvrant légèrement ces joints. La perméabilité à l'intersection d'un plan de drainage et d'un joint conjugué est alors localement plus grande que dans le restant du plan de drainage. Le potentiel chimique y est alors plus grand et favorise la karstification à l'intersection des 2 plans.

10. Conclusion

La méthode utilisée se révèle très efficace pour reconstituer la distribution des plans de drainage à Mont Godinne. La comparaison entre la distribution des plans en extension et l'orientation des galeries montre que ces plans sont à l'origine du creusement des drains karstiques.

Par contre, on ne peut utiliser les discontinuités karstifiées pour reconstituer la distribution des plans de drainage à l'origine de l'organisation des écoulements car celles-ci ne sont pas toujours des plans en extension. Ces discontinuités n'ont qu'une influence locale, à l'échelle de la galerie, sur la morphologie des conduits. Dans le cas des joints de stratification, l'orientation des galeries est parallèle à la droite d'intersection entre le plan de stratification et un plan de drainage. Le phénomène de dissolution différentielle oriente la galerie dans le plan de la fracture en extension, c'est à dire parallèlement à la stratification.

Dans l'avenir, il restera à étudier une éventuelle détente des massifs induisant peut être l'ouverture de fractures qui à l'origine n'étaient pas en extension. Il reste aussi à comprendre le mécanisme de mise en évidence de ces fractures par la karstification à l'échelle des galeries.

La distribution des plans de drainage à Mont Godinne (deux familles de plans subverticaux orientés N110°E pour la principale et N-S et une famille orientée N140°E/60°S) permet de prévoir que la silhouette du réseau de drainage est « buissonnante » et que dans le flanc Sud du synclinal, l'aquifère est unique. Par contre, le flanc Nord du synclinal contient 2 aquifères superposés givétien et frasnien.

11. Bibliographie

ANGELIER, J. 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In Continental deformation.

ARTHAUD, F. & CHOUKROUNE, P., 1972. De la tectonique cassante à l'aide des microstructures dans les zones peu déformées. Exemples de la plateforme Nord-Aquitaine. *Revue de l'institut français du pétrole*, XXVII (5), 715-732.

COEN - AUBERT, M. & COEN, M., 1974. Le Givétien et le Frasnien dans la vallée de la Meuse, de Tailfer à Yvoir (bord nord du bassin de Dinant). *Ann. Soc. Géol. Belgique* t. 97, 1974, 499 - 524.

DE BIE, P., 1995. Le système Eglise-Dury (Mont-sur-Meuse). Regards n°19. *Revue de l'Union Belge de Spéléologie*.

DUBOIS, Y., 1997. Etude des relations entre la fracturation, la morphologie et la karstification, à Mont Godinne, Belgique. Travail de fin d'étude de licence en minéralogie et géologie, Université de Liège, 67p.

DUBOIS, Y., 1999A. Le trou Wéron. Regards n°35, *Revue de l'Union Belge de Spéléologie*.

DUBOIS, Y., 1999b. Le chantoir Dellieux. Regards n°36, *Revue de l'Union Belge de Spéléologie*.

DUNNE, W. M. & HANCOCK, P. L., 1994. Paleostress analysis of small-scale brittle structure. In Continental deformation.

EK, C., 1995. Grottes et rivières des régions calcaires. Dans: Dumoulin A. (ed. sc.) « L'Ardenne, essai de géographie physique, Hommage au prof. A. Pissart », Liège.

ERASO, A., 1985. Metodo de prediccion de las direcciones principales de drenaje en el karst. Monografía, 292 p. 3 prog. informaticos. Madrid.

ERASO, A., 1986. The prediction method of the principal directions of drainage in karst. *Actes du 9^{ème} Congreso Internacional de Espeleologia*, Barcelona, p.46-49.

RICARD, J., BAKALOWICZ, M. & CHEVALIER-LEMIRE, G. (1996). Connaissance, évolution et protection. Les ressources en eaux souterraines du Larzac septentrional. Maitre d'ouvrage: Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable du Larzac. Ed. BRGM, CNRS Moulis, URA 903, GDR 1058 et Univ. Paul Sabatier.

Manuscrit reçu le 31 mars 1998 et accepté pour publication le 01 décembre 1998.