

Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 71 (1982)

Heft: 1-2

Artikel: Contribution à l'étude de l'hydrogéologie karstique du massif du Vanil Noir et de la chaîne des Gastlosen : Préalpes fribourgeoise Suisse

Autor: Müller, Imre / Plancherel, Raymond

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308611>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.03.2025

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

Contribution à l'étude de l'hydrogéologie karstique du massif du Vanil Noir et de la chaîne des Gastlosen (Préalpes fribourgeoises, Suisse)

par IMRE MÜLLER^{1,2} et RAYMOND PLANCHEREL²

¹Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel

²Institut de Géologie de l'Université de Fribourg

1. Introduction

Les recherches hydrologiques et hydrogéologiques dans la région du Vanil Noir remontent au début du siècle. A cette époque, la région du Gros Mont paraissait encore favorable à la création d'un lac d'accumulation et à l'implantation d'une usine hydro-électrique (MAURER, 1911–1915). Les expertises géologiques pour s'assurer des conditions d'étanchéité et préciser celles des écoulements souterrains ont été entreprises successivement par DE GIRARD (1909), SCHARDT (1913, 1928), et plus tard par TERCIER (1949, 1951). Les essais de traçage avec de la fluorescéine, effectués en 1928, 1949 et 1951 à partir du vallon des Morteys et du Gros Mont, avaient alors mis en évidence l'existence d'un drainage karstique qui, partant du synclinal du Vanil Noir et de la plaine du Gros Mont, aboutit aux sources des Planeys et à la Cascade de Jaun. Les résultats détaillés de ces expériences de traçage et les cartes géologiques levées dans un but hydrogéologique sont restés des documents en partie inédits. La Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles a eu connaissance de la coloration effectuée en 1928 par une communication de BÜCHI (1931). L'idée d'un barrage au Gros Mont fut ensuite abandonnée et l'étude hydrogéologique du massif n'a été reprise qu'en 1973 dans le cadre d'une recherche avant tout scientifique. Il s'agissait de caractériser les différentes formations lithologiques du point de vue hydrogéologique, de délimiter les différents bassins versants de la région, d'étudier le régime des sources, leur chimisme, le renouvellement des réserves et leur protection. Les grandes sources karstiques ont été repérées, régulièrement jaugées et analysées. Sur la Cascade de Jaun, un limnigraphe a été installé pendant deux ans. Les résultats de ces recherches sont en partie publiés

(MÜLLER, 1975, 1976a, 1976b, 1976c, 1981). Malheureusement, l'équipement hydro-météorologique de cette grande région n'était pas suffisant pour aboutir à des résultats quantitatifs. Notre but ici est de synthétiser toutes les observations dont nous disposons, et de présenter les méthodes d'approche indirectes qui nous ont guidés dans l'étude hydrogéologique de cette région.

2. Situation géographique et conditions géologiques

2.1. Cadre géographique

La région étudiée s'étend sur les chaînes préalpines comprises entre Charmey et Château-d'Oex (fig. 1). Elle est délimitée au N par la Jogne, à l'E par le Jaunli et le ruisseau des Fenils, au S et l'W par le cours de la Sarine.

Plusieurs sommets dépassent les 2000 m, tels le Vanil Noir (2389 m), le Vanil Carré (2198 m), la Hochmatt (2152 m) et les culminations de la chaîne des Gastlosen (Wandfluh 2133 m, Dent de Ruth 2236 m). La région est en bonne partie couverte de forêts. A partir de 1400–1600 m, ces dernières cèdent la place à une végétation de plus en plus rabougrie qui disparaît à son tour sur les pentes sommitales pierreuses.

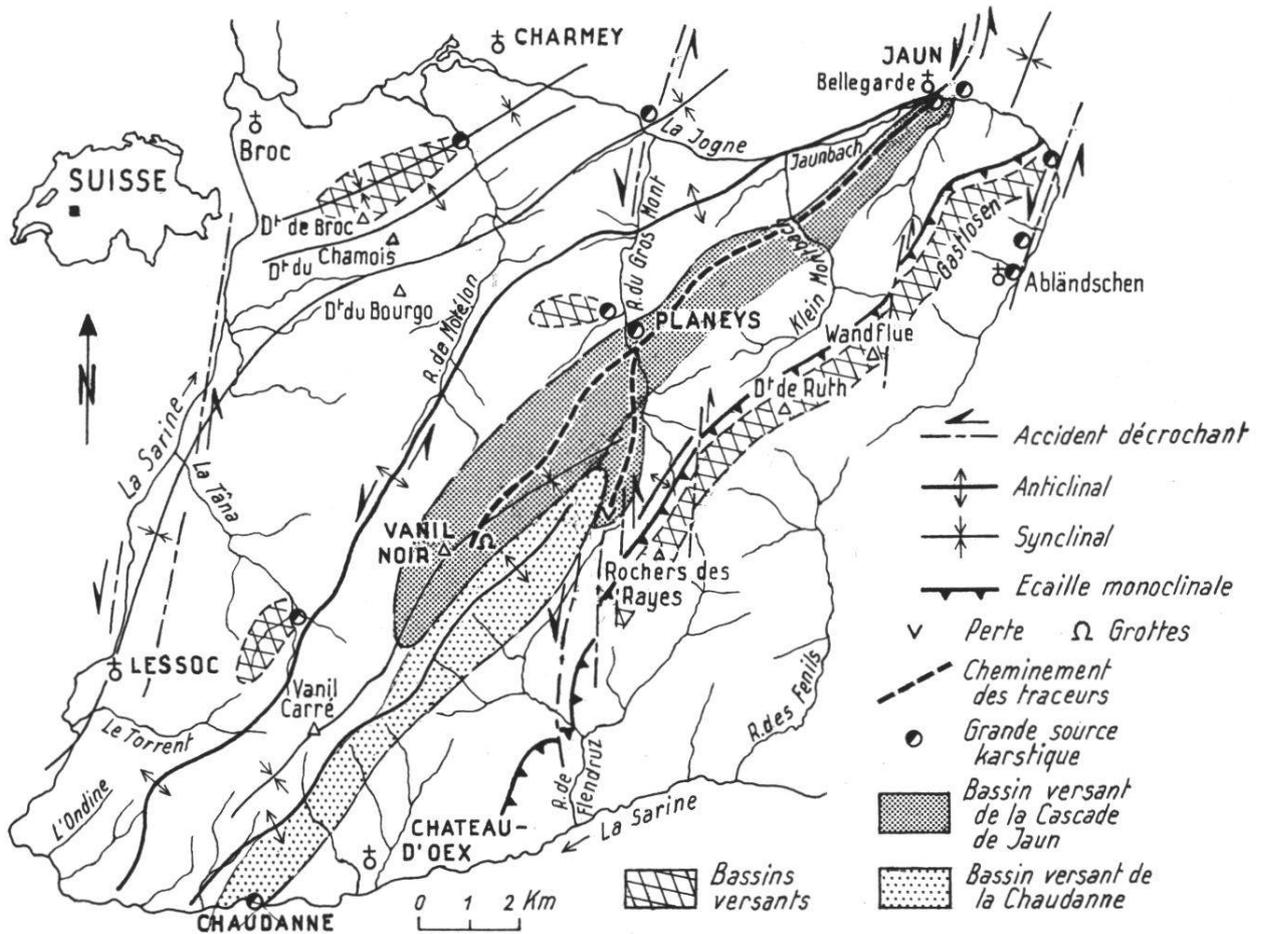


Fig. 1: Esquisse hydrogéologique et structurale de la région étudiée.

2.2. Description géologique sommaire

Du point de vue géologique, la région du Vanil Noir-Gastlosen se situe au centre de l'arc des Préalpes romandes, empilement complexe de nappes de charriage d'origine alpine interne, mais reposant en position entièrement allochtone sur l'avant-pays molassique paraautochtone et autochtone.

Les roches affleurant dans les limites du territoire étudié appartiennent à deux des unités préalpines: la nappe des Préalpes médianes et la Nappe supérieure.

La première de ces unités, – la plus vaste parmi les nappes préalpines et également la mieux représentée ici –, occupe une position médiane dans l'édifice, d'où son nom. Elle comporte des roches de nature avant tout calcaire et marneuse. Sur la base de critères stratigraphiques et structuraux, on la subdivise en un domaine externe – les Préalpes médianes plastiques, – et un domaine interne – les Préalpes médianes rigides. Le massif du Vanil Noir et ses annexes, caractérisé par une succession de plis anticlinaux et synclinaux, appartient aux Médianes plastiques. Quant à la chaîne des Gastlosen, formée pour l'essentiel d'une écaille monoclinale chevauchante, sa position la rapproche des Médianes plastiques, alors que par son style de déformation, elle s'apparente plutôt aux Médianes rigides.

Ces deux domaines des Préalpes médianes sont à leur tour recouverts en partie et séparés l'un de l'autre par les terrains appartenant à la Nappe supérieure. Cette dernière est en réalité composée de plusieurs éléments tectoniques à l'origine plus ou moins indépendants (CARON, 1972), mais qui ont pour point commun d'être constitués de roches surtout détritiques non carbonatées, – les flyschs –, auxquels ne s'associent que localement des écaillés de nature calcaire ou siliceuse non détritique (radiolarites).

La carte géologique (fig. 3) et l'esquisse structurale (fig. 1) montrent que la région est parcourue par plusieurs accidents tectoniques décrochants affectant l'ensemble des terrains des Médianes et de la Nappe supérieure: il s'agit de dislocations majeures d'orientation commune subméridienne, obliques à la direction générale du faisceau des plis et influençant de manière déterminante la géométrie des structures (PLANCHEREL, 1976, 1979).

En ce qui concerne les *caractéristiques stratigraphiques et lithologiques*, on en trouvera le détail dans les diverses monographies consacrées à la région en question (CAMPANA, 1943; CHATTON, 1947; CHENEVART, 1945; KLAUS, 1953; PAGE, 1969; SPOORENBERG, 1952). Une esquisse stratigraphique et paléogéographique de l'ensemble des Préalpes médianes romandes, résumant les travaux essentiels, a été donnée dans une publication antérieure (PLANCHEREL, 1979). Nous n'en rappellerons ici que les traits les plus marquants du point de vue hydrogéologique.

Un schéma lithostratigraphique général des Préalpes médianes plastiques, valable pour le *massif du Vanil Noir*, est représenté à la figure 2.

Mesures VLF

- Résistivités apparentes: $\rho_a(\Omega m)$
- et leurs degrés d'anisotropie:



20-100
100-500
500-1.000
1.000-10.000

Perméabilité

bonne
moyenne
faible
très faible

Sources importantes

- Débit
 - < 1 l/s
 - > 1 l/s
 - > 10 l/s

- Conductivité électrique (en μ -Siemens)

Chimisme

$\mu S/cm (20^{\circ}C)$

Mg^{++}/Ca^{++}

200 300 400

0 2,5 5 10 15%

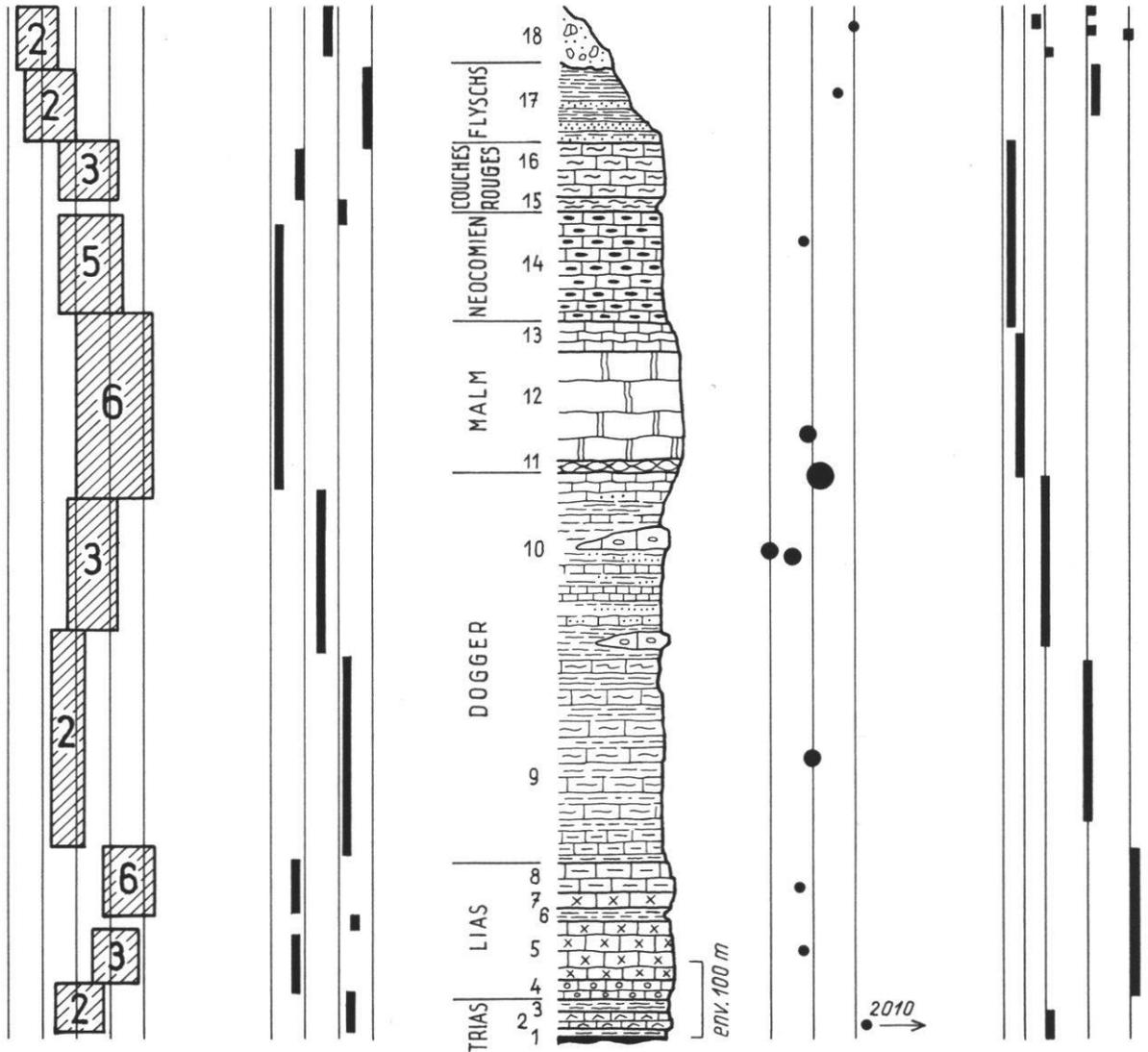


Fig. 2: Lithostratigraphie et caractéristiques physiques des formations géologiques du massif du Vanil Noir. Paramètres physico-chimiques des eaux. Pour la numérotation de la colonne lithostratigraphique, voir dans le texte. Les valeurs du degré d'anisotropie de la résistivité apparente VLF (grands chiffres dans les plages hachurées) sont des valeurs maximum possibles.

- La série débute par le *Trias* supérieur, constitué de dolomies, cornieules (brèches dolomitiques d'origine tectonique) et marnes dolomitiques (niveaux 2, 3) surmontant un niveau gypsifère basal (1). Ces faciès lagunaires sont dans l'ensemble peu perméables.

- Le *Lias* (Lias inférieur avec Rhétien, Lias moyen) comprend des faciès néritiques: calcaires gréseux et oolithiques (4), calcaires spathiques souvent siliceux (5, 7, 8), avec quelques intercalations marneuses (6). Les faciès varient rapidement dans l'espace et dans le temps. Le Lias calcaire est généralement peu karstifié parce que trop siliceux. Il est bien fissuré et on peut le considérer comme perméable. Le produit d'altération de ces calcaires est une carapace siliceuse très poreuse, qui peut contenir de l'eau en quantité non négligeable (MÜLLER, 1976c).
- Le *Dogger* (avec le sommet du Lias) se caractérise par des faciès marno-pélagiques profonds (9), admettant vers le haut des bancs de calcaires grésos-micacés et oolithiques resédimentés (10). Sur le plan hydrogéologique, la masse épaisse et relativement marneuse du Dogger inférieur (9) peut être considérée comme peu perméable. La perméabilité augmente dans la partie supérieure.
- Le *Malm*, au-dessus d'un niveau basal de marno-calcaires noduleux (11), est formé de calcaires pélagiques et calcaires néritiques resédimentés, généralement en gros bancs (12, 13). Ces calcaires très fissurés et karstifiés possèdent une grande perméabilité: aussi c'est avant tout le Malm qui assure l'unification du drainage des eaux de la région.
- Le *Crétacé inférieur* (Néocomien) est essentiellement pélagique et comprend des calcaires en bancs très minces (calcaires plaquetés) avec quelques joints schisteux (14). La forte perméabilité de ces calcaires fissurés et karstifiés est augmentée par leur tendance au plissement disharmonique.
- Le *Complexe schisteux intermédiaire* (15) est peu épais et ne semble pas jouer un grand rôle en hydrogéologie à l'échelle régionale.
- Le *Crétacé supérieur* (Couches rouges) est constitué de calcaires argileux pélagiques (16), qui semblent être moins perméables que les formations du Malm et du Néocomien.

La série stratigraphique de l'*écaille des Gastlosen* est moins complète; il y manque en particulier le Lias et le Néocomien. Les calcaires massifs karstifiés du Malm, comparables à ceux des Médiens plastiques, y surmontent directement un Dogger marno-calcaire néritique peu épais («Couches à *Mytilus*»). Du point de vue perméabilité, ce dernier peut être assimilé au Malm.

Tant dans les Plastiques que dans les Gastlosen, la série stratigraphique peut se terminer par un peu de flysch tertiaire. Mais sur le plan hydrogéologique, ce dernier se confond pratiquement avec les *masses de flyschs crétacés* (17) surmontant tectoniquement ces deux unités et les séparant (Nappe supérieure). Dans l'ensemble, ces séries schisto-gréseuses et grésos-conglomératiques constituent des masses très peu perméables. Les quelques écailles calcaires et radiolaritiques qui leur sont localement associées ne semblent pas jouer de rôle hydrogéologique notable.

Enfin les terrains de couverture quaternaires et récents (18) sont de nature très diverse. Il s'agit d'éboulis, éboulements, moraines, sédiments fluvio-glaciaires, alluvions, dont le degré de perméabilité est très variable.

La *carte géologique* (fig. 3) permet de donner un cadre géologique global à l'étude hydrogéologique. Les grandes lignes qui s'en dégagent sont les suivantes:

- La région est partagée en deux provinces hydrogéologiques. La province NW, – le massif du Vanil Noir appartenant aux Préalpes médianes plastiques –, est constituée de plis anticlinaux et synclinaux dont les descentes axiales importantes laissent déjà soupçonner des circulations rapides dans les formations karstifiées. La province SE, – la chaîne des Gastlosen, de caractère plus «rigide» –, se présente sous forme d'une grande écaille de calcaires karstiques «emballée» dans des terrains très peu perméables, ce qui indique l'existence d'un réservoir perméable mais à circulation lente.
- Les terrains perméables et karstifiés (zones hachurées verticalement ou obliquement sur la carte) occupent une surface moins importante que les terrains peu perméables (zones en grisé ou hachurées à l'horizontale).
- La carapace calcaire perméable qui forme l'ossature de la région apparaît (dans la mesure où l'échelle de la carte a permis de représenter les choses), comme considérablement fracturée, disloquée et laminée. La fracturation la plus intense semble se développer dans les directions N 130°–150° et NS. Cette carapace est susceptible de fonctionner comme drain.
- Les complexités stratigraphiques et tectoniques (juxtapositions de faciès variés, compartimentage par des dislocations transversales) vont favoriser le développement de systèmes d'écoulement locaux plus ou moins indépendants, au détriment de l'organisation des systèmes d'écoulement régionaux.

Pour compléter notre survol géologique de la région du Vanil Noir et des Gastlosen par une *note historique*, nous présentons (fig. 4) un document inédit du Professeur J. TERCIER (1949). Il s'agit de six coupes géologiques à travers la région du Gros Mont, dessinées par l'illustre géologue fribourgeois dans le cadre des études d'aménagement hydro-électrique de l'époque.

On peut déduire de l'examen de ces profils (ainsi que de la lecture des rapports originaux qui les accompagnent), que l'interprétation des écoulements souterrains reposait sur l'hypothèse d'une certaine continuité des structures dans le sens longitudinal. C'est ainsi, par exemple, qu'on voit le synclinal du Vanil Noir-vallon des Morteys et l'anticlinal Doréna-Bimis (marqué par le lieu «Randonnaire» sur le document Tercier) se prolonger vers le NE *sous* la plaine de la Verda-Gros Mont en direction de la Gueyras et du Lapé (S de la Hochmatt).

Des études d'ordre régional ont permis, depuis lors, de mettre en évidence le rôle structural prépondérant joué par un certain nombre de grandes dislocations transversales décrochantes (PLANCHEREL, 1979). Ces accidents peuvent induire, à leur passage, des modifications structurales pratiquement imprévisibles en

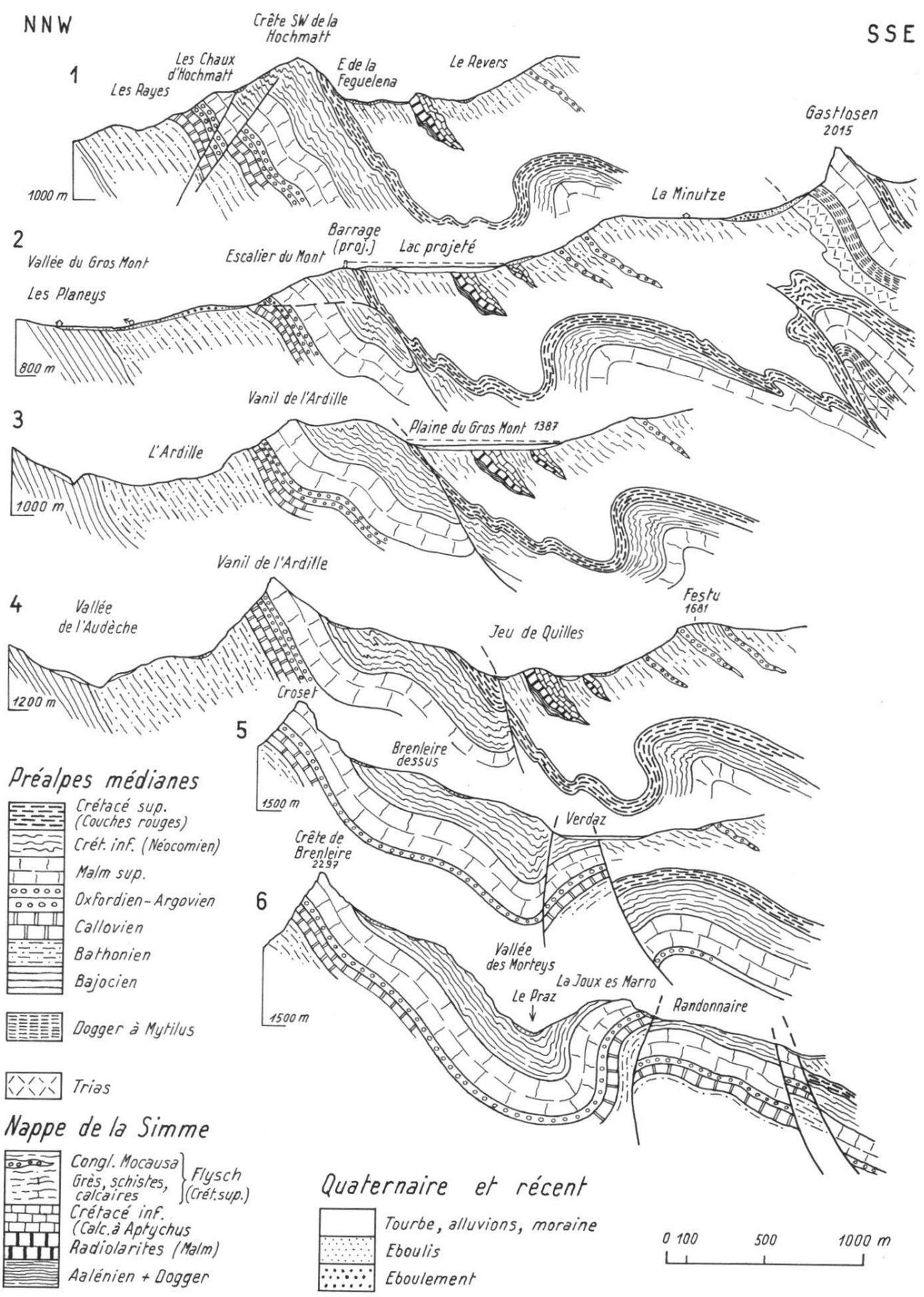
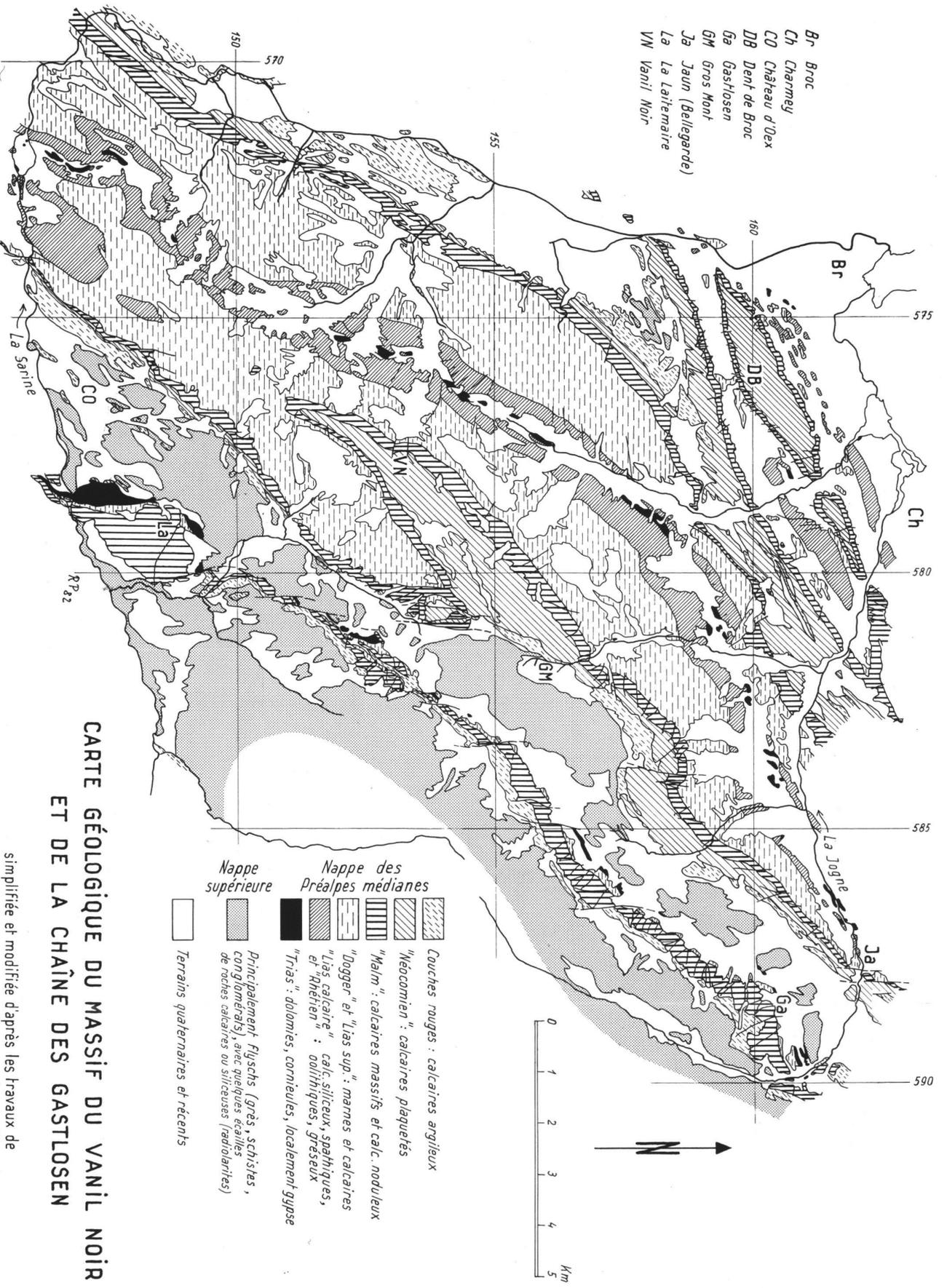


Fig. 4: Profils géologiques dans la région du Gros Mont par J. TERCIER (rapport inédit 1949).



- Br Broc
- Ch Charney
- CO Château d'Oex
- DB Dent de Broc
- Ga Gastlosen
- GM Gros Mout
- Ja Jaur (Bellegarde)
- La La Laitemaire
- VN Vanil Noir

**CARTE GÉOLOGIQUE DU MASSIF DU VANIL NOIR
ET DE LA CHÂÎNE DES GASTLOSEN**

simplifiée et modifiée d'après les travaux de
 Campana (1943), Chatton (1947), Chenevart (1945), Klaus (1953),
 Loser (non publié), Page (1969), Sporenberg (1952)

Fig. 3

l'absence d'indices directement observables en surface. Dans le cadre du Gros Mont, il en découle que, au delà des accidents qui limitent la plaine du côté W (cartes fig. 3 et 1), toute prévision quant à l'évolution des structures vers le NE devient pour le moins hasardeuse. Ce que l'on peut observer, par contre, c'est que ces accidents doivent avoir une influence non négligeable sur l'organisation spatiale des écoulements souterrains (localisation des exutoires, ici sources des Planeys).

3. Hydrogéologie

3.1. *Méthodes directes et indirectes dans l'exploration des aquifères calcaires*

L'étude hydrogéologique d'une région tend à identifier les structures qui sont susceptibles de contenir de l'eau souterraine exploitable, et à préciser le fonctionnement des aquifères en vue de la gestion et de la protection des ressources.

Dans le karst préalpin, la structure «en grand», à l'échelle des synclinaux et des anticlinaux, peut être reconnue directement, grâce à la carte géologique et en tenant compte des propriétés hydrogéologiques des différentes formations. La structure «en petit», par contre, à l'échelle de la fracturation, qui détermine le tenseur de perméabilité et les propriétés essentiellement anisotropes et hétérogènes du karst, ne peut pas être explorée et reconnue en tous points par des moyens directs: forages d'eau et essais de pompage. En effet, la structure et le fonctionnement des aquifères karstiques échappent généralement à l'observation directe, telle qu'elle a été élaborée pour l'exploration des nappes à porosité interstitielle.

Dans les roches calcaires, l'eau se trouve dans les fractures, dont la perméabilité est mille à cent mille fois supérieure à la masse environnante, qu'il est coutume de désigner par le terme de «blocs» peu perméables. La figure 5, tirée de BURGER (1979), illustre la circulation de l'eau dans ce milieu. En cas d'alimentation intense, le niveau monte très rapidement dans les fissures, où une circulation rapide s'établit vers l'exutoire. L'eau est injectée pendant ce temps dans les zones à circulations lentes, c'est-à-dire dans les «blocs» peu perméables. Lorsque l'alimentation cesse et que les fractures se vidangent, il se produit une inversion de gradient, et l'eau qui avait été préalablement emmagasinée dans les «blocs» peu perméables, alimente alors les drains pendant l'étiage. L'identification de ces deux types de réservoir, l'un à circulation rapide, constitué de drains organisés et hiérarchisés, l'autre à circulation lente, comprenant les zones peu perméables, n'est sans doute que la simplification excessive d'une réalité encore bien plus complexe. Néanmoins, c'est à cause de cette «double perméabilité» que les méthodes d'investigations directes sont mal adaptées à l'exploration hydrogéologique des aquifères calcaires.

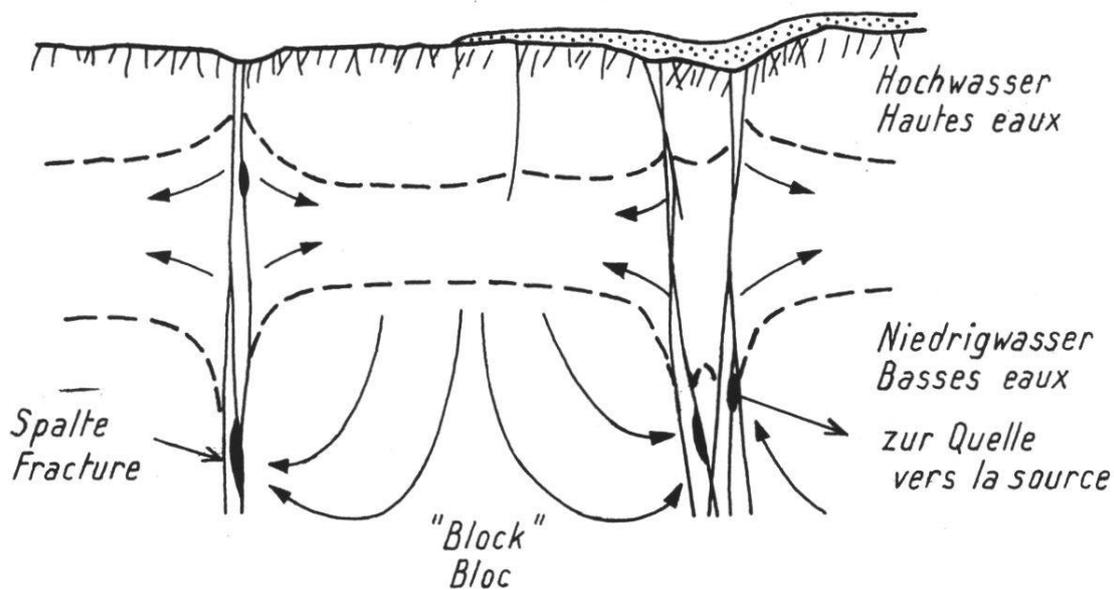


Fig. 5: Schéma du fonctionnement des aquifères calcaires (d'après BURGER, 1979).

Pour mettre en évidence le fonctionnement de ces aquifères et explorer les structures « en petit », à l'échelle de la fracturation, plusieurs *approches indirectes* sont possibles:

- Etude de l'hydrogramme des sources.
- Etude de la structure par l'analyse de la fracturation et par la géophysique.
- Etude de la karstification par la spéléogénèse.
- Etude du fonctionnement des aquifères par des traceurs naturels et artificiels.

Il est important de souligner que les méthodes indirectes ne peuvent pas et ne doivent pas remplacer ou substituer les investigations hydrogéologiques. Elles devraient seconder et vérifier les hypothèses hydrauliques et hydrodynamiques, avec lesquelles les résultats obtenus ne devraient pas être en contradiction. Dans la région étudiée, nous avons mis toutefois un accent particulier sur les méthodes indirectes parce que nous ne disposons ni de forages, ni de stations hydrométriques, à l'exception de celle de la Cascade de Jaun. Dans ces conditions, notre travail consistait avant tout à recenser toutes les sources de la région et à les étudier à l'aide des méthodes indirectes ci-dessus énumérées.

3.2. Inventaire des sources

La figure 1 donne la situation des sources karstiques importantes dont le débit d'étiage atteint au moins 10 l/s. Il est à remarquer que plusieurs d'entre elles sourdent à proximité des grands accidents décrochants.

Les bassins versants hydrogéologiques sont difficiles à délimiter. Nous avons esquissé les bassins hypothétiques de plusieurs des sources importantes. Leurs limites changent probablement selon l'état hydrodynamique des systèmes karstiques. L'ensemble des sources étudiées et régulièrement suivies est représenté à la figure 6 (A et B).

Leurs caractéristiques chimiques simplifiées, ainsi que quelques indications sur leur régime, se trouvent résumées sur la figure 2 en fonction de la lithologie drainée.

Les grandes sources karstiques, qui sourdent généralement au sommet du Dogger, drainent non seulement le Malm, mais, selon les cas, les formations qui le surmontent, calcaires du Crétacé et même flyschs (par le ruissellement de surface absorbé dans les pertes). Celles qui drainent les calcaires de la nappe des Préalpes médianes plastiques sont caractérisées par de très grandes variations de débit et du chimisme, alors que celles des Gastlosen présentent des caractéristiques très stables.

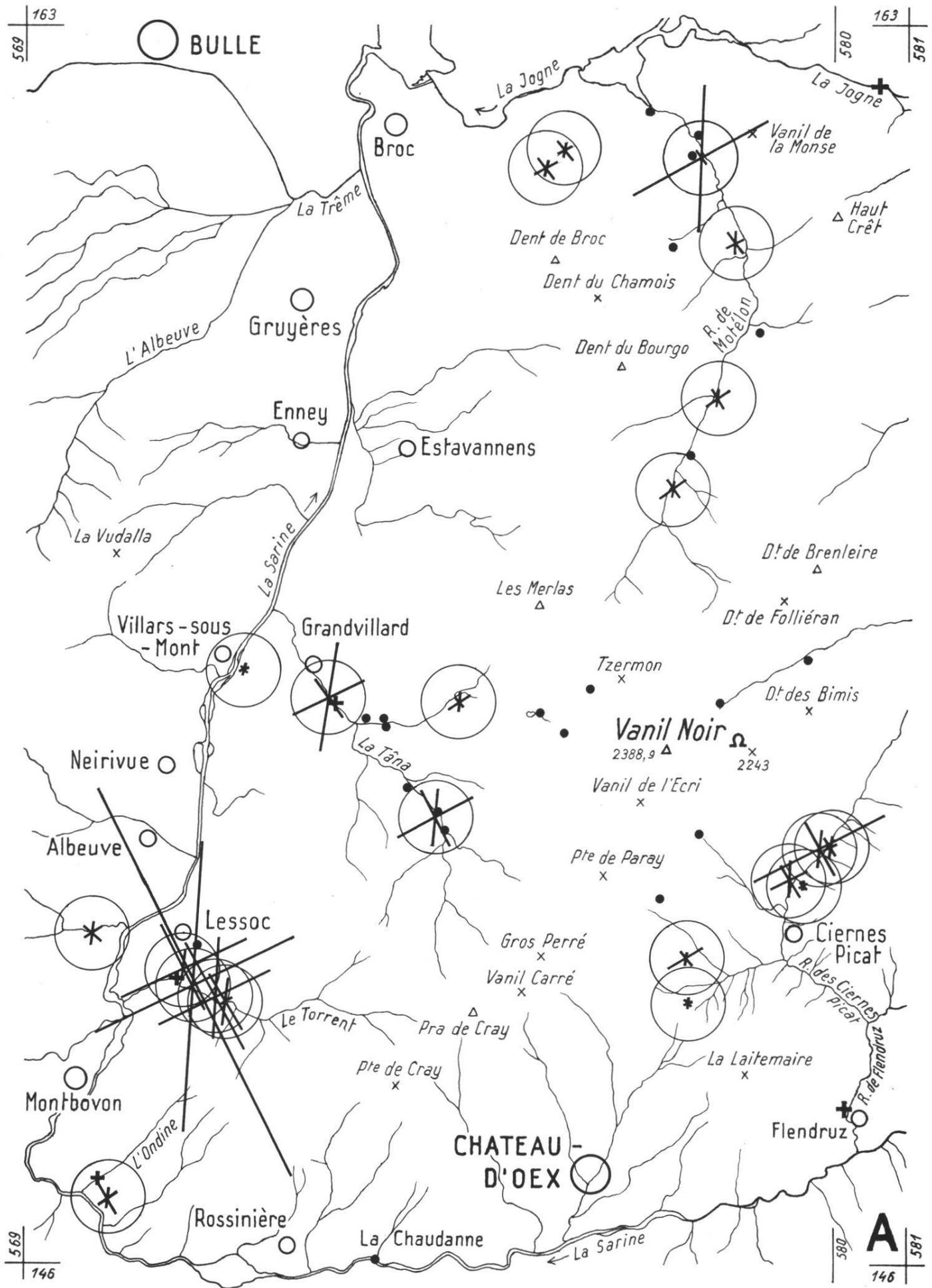
3.3. Etude de la karstification à l'aide de la géophysique

L'analyse de la fracturation, telle qu'elle a été développée par KIRALY (1969), cherche à déterminer la structure du champ des perméabilités dans le karst à l'aide des facteurs géologiques. Pour cela, il est nécessaire d'établir la fréquence, l'ouverture et l'orientation des fractures pour déterminer la grandeur et la direction du vecteur vitesse de filtration. Dans les Préalpes, les complexités stratigraphiques et tectoniques rendent ce travail particulièrement ardu. Nous avons opté pour un autre type de démarche, qui consiste à examiner les conséquences géophysiques qui résultent des processus de la fracturation et de la karstification.

Après avoir fait plusieurs essais avec la géoélectrique et la microsismique (MÜLLER, 1981), notre choix s'est arrêté à la méthode électro-magnétique VLF (Very Low Frequency). En utilisant des ondes radio à très basse fréquence, entre 15 et 25 KHz, qui servent au radioguidage des navires et des sous-marins, il est possible de mesurer la résistivité apparente des roches à plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Dans les roches calcaires, les zones fracturées et karstifiées peuvent ainsi être mises en évidence, car il existe un grand contraste de résistivité entre la roche massive peu fissurée et les zones affectées par la fissuration. La mesure se fait entre deux électrodes, espacées de 5 m, à l'aide d'un récepteur dont l'antenne doit être orientée vers l'émetteur. Les mesures de résistivité sont de ce fait directionnelles et renseignent sur *l'anisotropie de la résistivité*. Celle-ci est une conséquence directe de la karstification, puisque les propriétés électriques de la roche sont essentiellement modifiées par la présence de l'eau et de l'argile qui accompagnent la karstification.

Les méthodes électro-magnétiques VLF sont sans doute parmi les techniques géophysiques les mieux adaptées à l'exploration du milieu fissuré. Grande sélectivité verticale, sensibilité directionnelle, bonne profondeur de pénétration, grande rapidité de l'exécution, faible poids et encombrement, tels sont les avantages incontestables de la prospection VLF.



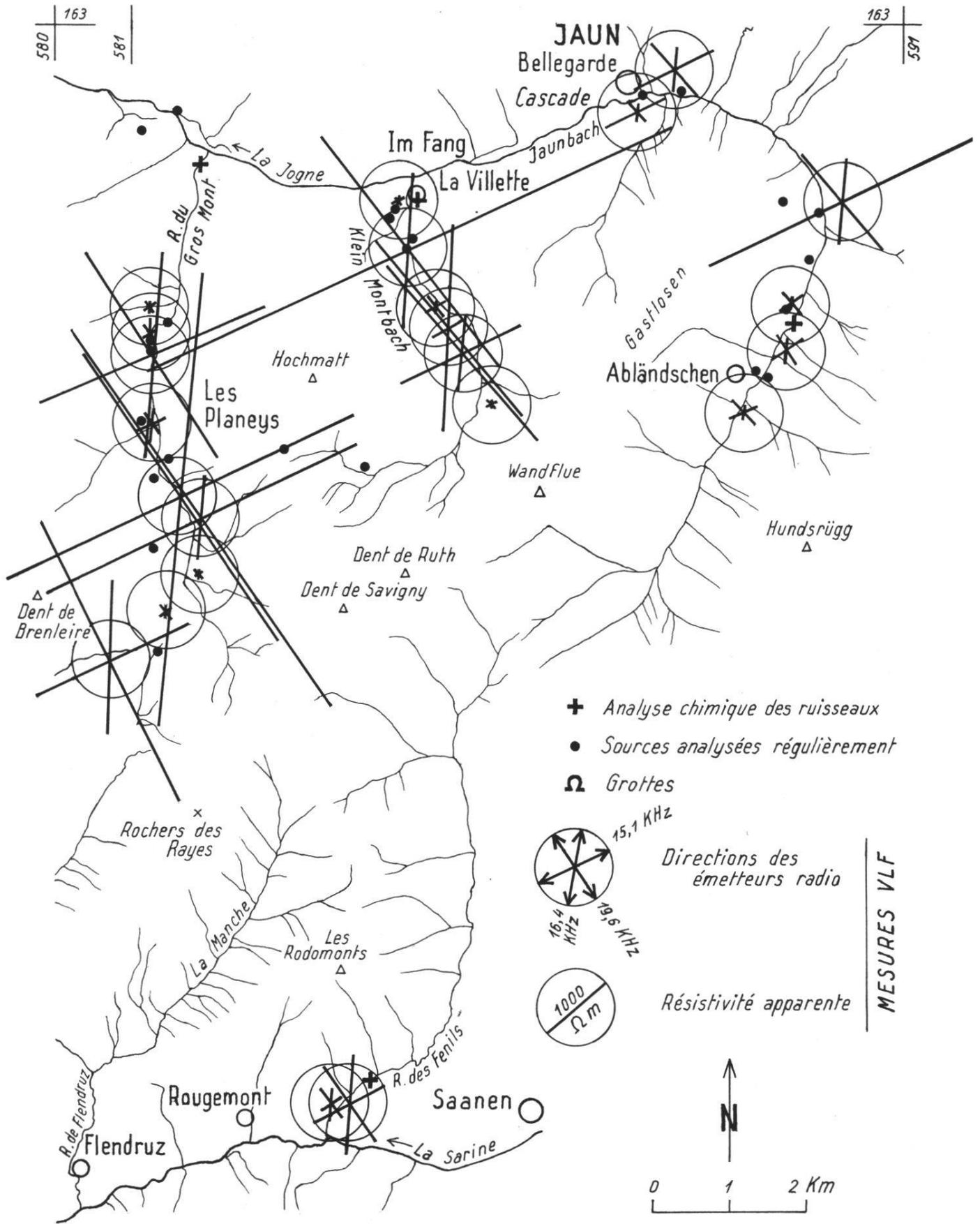


Fig. 6 : SITUATION DES SOURCES ET STATIONS DE MESURES VLF

MESURES VLF

591
146

Nous avons choisi des stations émettrices dont la position géographique nous a permis d'analyser la résistivité apparente, et donc la karstification, dans les directions de N10° (décrochements sénestres), N130°–150° (fractures de tension plus ou moins perpendiculaires aux axes des plis), N60° (fractures de raccourcissement et joints de stratification, parallèles aux axes des plis). Les trois fréquences de radio sont : la France: 15,1 KHz, la Grande Bretagne: 19,6 KHz et un émetteur scandinave: 16,4 KHz.

Les stations et les résultats des mesures directionnelles sont représentés sur la figure 6 (A et B). Pour l'interprétation de la résistivité apparente, il est important de remarquer que c'est la valeur élevée de la résistivité qui indique la direction de la karstification (BRION, 1976).

Comparée à la carte géologique (fig. 3) et au schéma tectonique (fig. 1), cette carte de résistivité permet de faire les remarques suivantes :

- a) La grande majorité des stations indiquent une plus ou moins grande anisotropie directionnelle de la résistivité.
- b) Les formations géologiques peuvent être caractérisées à la fois par une valeur absolue de leur résistivité et par son degré d'anisotropie. On obtient le degré d'anisotropie (grands chiffres sur les plages hachurées de la figure 2) en divisant la plus grande valeur de la résistivité d'une station par la valeur la plus faible.

Nous avons essayé de mettre en parallèle les propriétés électriques ci-dessus mentionnées avec nos estimations de la perméabilité des différentes formations (fig. 2). A remarquer que le degré d'anisotropie indiqué donne des *valeurs maximum possibles*, qui ne sont bien entendu pas toujours observées.

Dans les formations de flysch et dans les marnes peu perméables, les valeurs de la résistivité sont faibles et l'anisotropie l'est également. Dans les roches calcaires, c'est l'inverse, à savoir les valeurs élevées de la résistivité sont accompagnées d'une forte anisotropie.

- c) On constate également que les valeurs les plus faibles de la résistivité sont *généralement* orientées dans la direction N10°. Cela signifierait que les accidents décrochants ne fonctionnent généralement pas, ou rarement, comme des drains, mais plutôt comme des écrans peu perméables. L'écoulement s'organiserait selon les autres directions et les exutoires qu'on repère au voisinage des accidents majeurs seraient dus au fait que l'eau souterraine bute sur l'obstacle d'une moindre perméabilité.

3.4. Etude de la karstification avec l'apport de la spéléogénèse

La relation qui existe entre la fracturation et le développement des cavités karstiques a été mise en évidence par KIRALY & SIMEONI (1971) et KIRALY et al. (1971). Dans la région du Vanil-Noir, durant les dix dernières années, le Spéléo-Club des Préalpes Fribourg (SCPF) avait découvert et exploré un grand

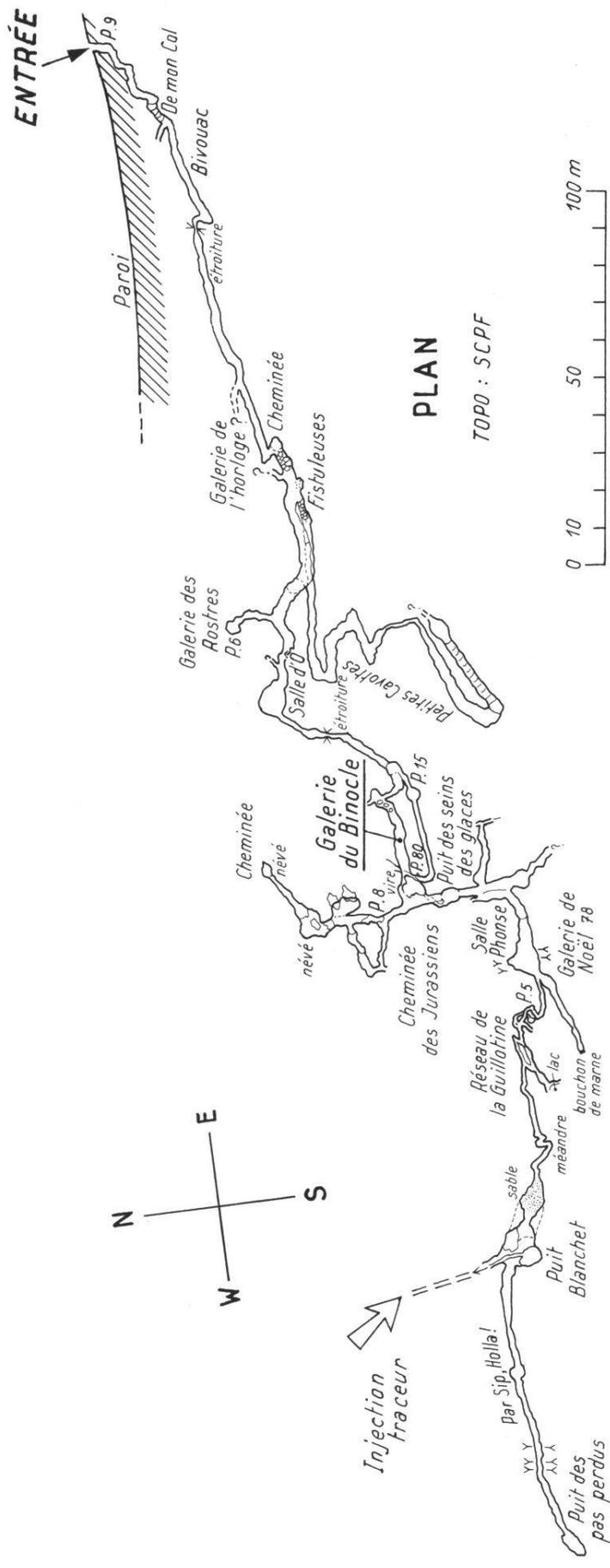


Fig. 8: Relevé topographique de la Grotte du Binocle.

202 m de profondeur, se développent sur la direction N-S, c'est-à-dire dans la direction des accidents décrochants. Les ouvertures qui prolongent la cavité (couloirs plus ou moins horizontaux) sont par contre alignées sur des fractures de tension N140°, ou suivent les joints de stratification N60°. Comparé aux segments N-S, le développement en plan des autres directions est plus important.

Tel est également le cas pour la grotte du Binocle, située à proximité (coord. 578 590/153 090; alt. 2020 m), dont le plan est donné à la figure 8.

Ces deux exemples illustrent ce qu'on peut également constater sur les plans d'autres cavités de la région :

- La direction N-S est moins souvent karstifiée que les autres directions. Elle permet le *développement vertical* des réseaux.
- Les directions correspondant aux joints de stratification et aux diaclases de tension sont souvent karstifiées. Le *développement horizontal* des cavités s'effectue surtout dans ces directions.

Ainsi l'examen des plans des cavités ne semble pas être en contradiction avec les mesures géophysiques, parce que la spéléogenèse met également en évidence que la direction la moins fréquemment karstifiée est celle des décrochements sénestres.

3.5. Etude des sources karstiques à l'aide des traceurs naturels

L'emploi du contenu chimique et isotopique de l'eau en tant que traceur hydrodynamique ou comme indicateur du milieu, repose sur des hypothèses concernant les circulations et les interactions entre eau et roche.

En reprenant le schéma de la figure 5, on voit intuitivement que, lors des alimentations, les infiltrations peuvent s'effectuer très rapidement et directement dans le réseau karstique par des pertes, ou alors d'une manière lente et diffuse dans les parties peu perméables du réservoir. Il y aura de ce fait une hétérogénéité même au niveau des infiltrations, qui aura des conséquences sur la variabilité du chimisme des sources karstiques (KIRALY & MÜLLER, 1979). En effet, on constate que les vitesses de circulation dans les drains sont si élevées et le contact entre eau et roche si bref que les réactions chimiques de dissolution n'ont pas le temps de s'effectuer pleinement. Les eaux fraîchement infiltrées, qui gagnent les exutoires par les drains à grande conductivité hydraulique, y introduisent des modifications du chimisme par des phénomènes de dilution. Les infiltrations dispersées, qui circulent lentement dans les parties peu perméables du réservoir et qui y séjournent longtemps, vont attaquer la roche et vont s'enrichir de substances dissoutes. Elles alimenteront les exutoires surtout pendant les périodes de basses eaux.

Pour illustrer ces mécanismes, nous prenons comme exemple l'une des plus belles sources karstiques de la région : la Cascade de Jaun (cf. fig. 9). L'hydrogramme de la source pour l'année 1974, avec les fluctuations de la

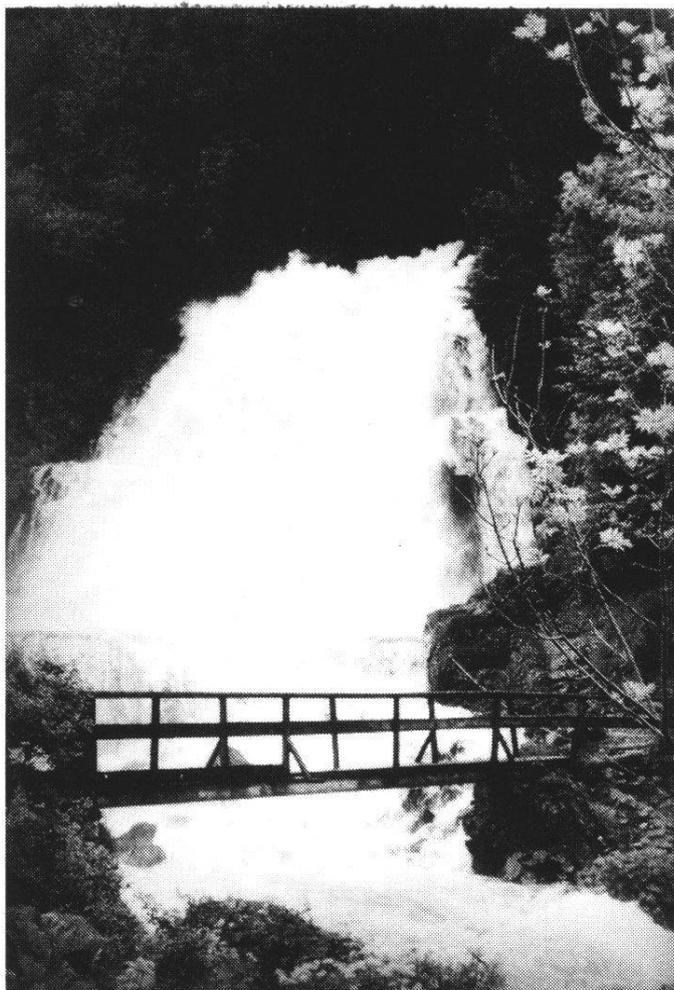


Fig. 9: La Cascade de Jaun à la fonte des neiges.

température et de la dureté des eaux, est donné à la figure 10. Les mesures hebdomadaires des paramètres physico-chimiques de l'eau témoignent de l'existence d'un réservoir à écoulement lent, qui alimente la source pendant l'étiage, et d'un réservoir à écoulement rapide, qui, lors des crues, introduit de fortes dilutions et une baisse sensible de la température de l'eau. La rapidité des infiltrations efficaces dans ce réservoir est particulièrement bien visible lors des fontes des neiges au printemps en cas de beau temps. L'ensoleillement fait fondre la neige, qui gagne rapidement la nappe karstique et la met en charge. Cette pression se propage et augmente le débit à l'exutoire. Le refroidissement nocturne cause l'effet inverse. La figure 11 présente ce phénomène, dont le résultat est l'évolution du débit en «dents de scie» avec un maximum vers minuit et un minimum vers midi.

Le volume du réservoir librement écoulable est calculé par l'analyse de l'hydrogramme de tarissement. On utilise couramment la formule de Maillet:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

où Q_t = le débit à l'instant t , en m^3/s ; Q_0 = le débit au début du tarissement en m^3/s ; e = la base des logarithmes népériens; α = le coefficient de tarissement; t = le temps écoulé depuis le début du tarissement, en jours.

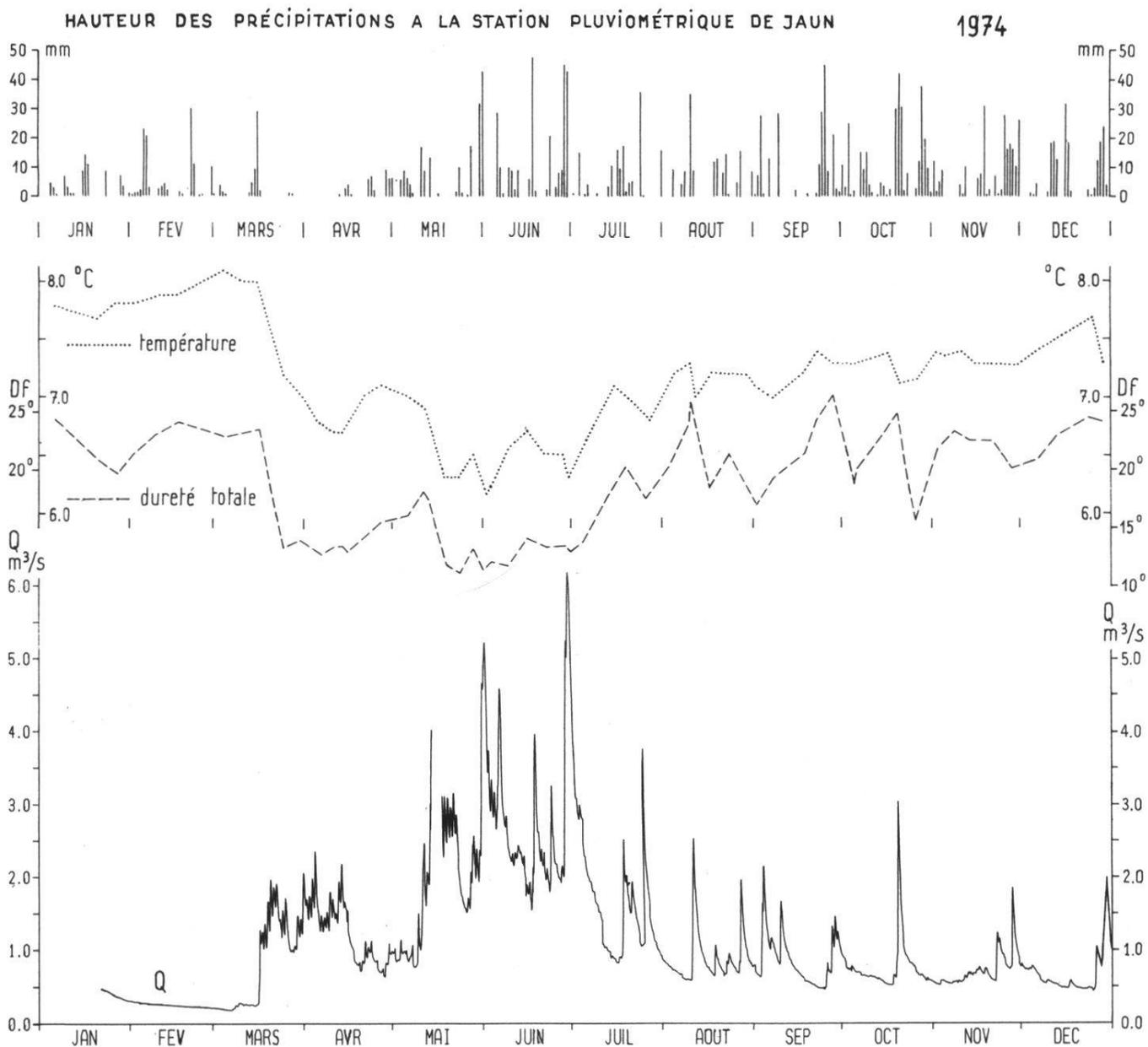


Fig. 10: Hydrogramme et fluctuations physico-chimiques des eaux de la Cascade de Jaun pour 1974.

Pour la période de tarissement de mars-avril 1975 (cf. fig. 12), le coefficient de tarissement est: $\alpha = 0,0068$, avec $Q_0 = 0,33 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le volume d'eau W emmagasiné à l'instant t_0 dans les formations aquifères alimentant le débit de tarissement peut être calculé (CASTANY, 1968):

$$W = \int_{t_0}^{\infty} Q_0 \cdot e^{-\alpha t} dt = \frac{86400 \cdot Q_0}{\alpha} = 4.10^6 \text{ m}^3$$

Cela représente une lame d'eau de 0,5 m de haut, répartie sur 8 km². Distribuée dans une zone noyée de l'ordre de 200 m d'épaisseur, la porosité efficace des formations qu'on pourrait ainsi déduire spéculativement, serait d'environ 0,5%.

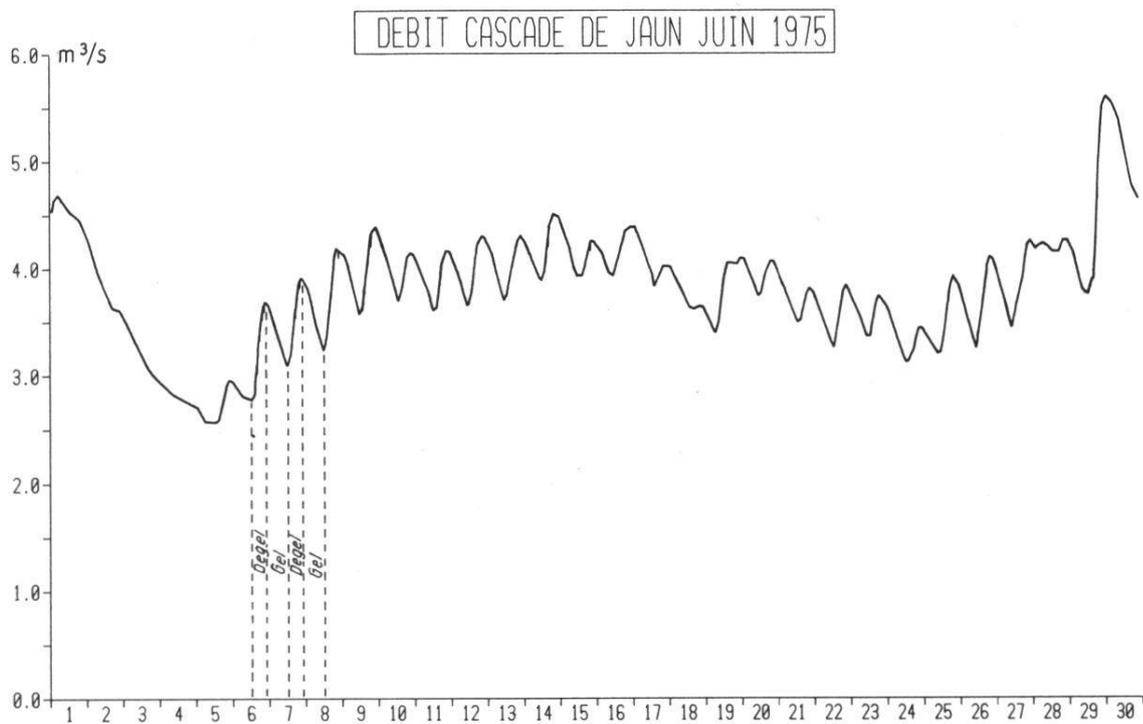


Fig. 11: Influence journalière de la fonte des neiges sur le débit de la Cascade de Jaun.

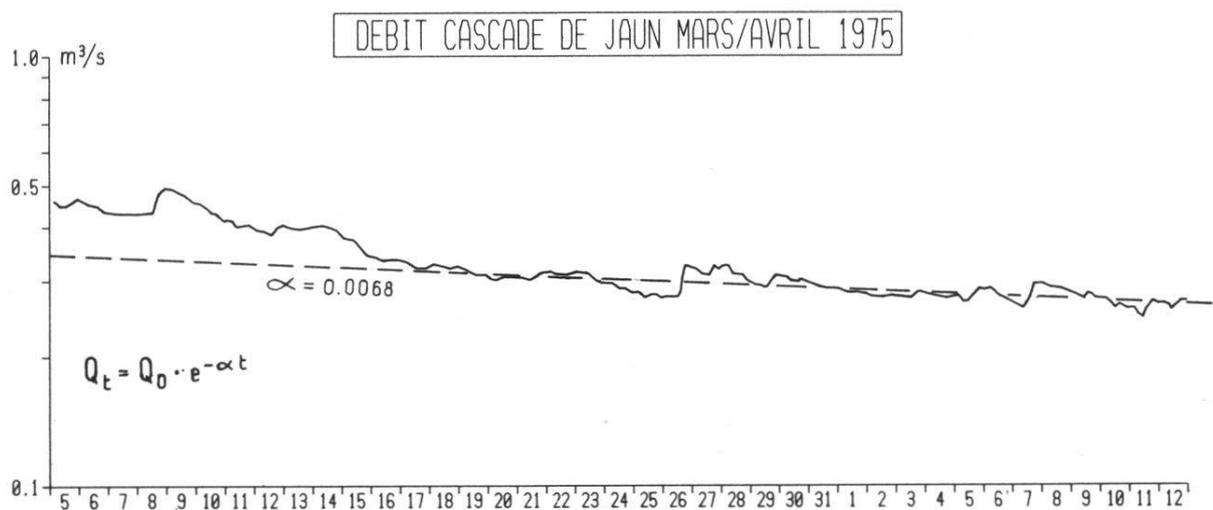


Fig. 12: Analyse d'une courbe de tarissement de la Cascade de Jaun.

Le mécanisme des crues a été étudié d'une manière particulièrement détaillée lors d'un multitraçage effectué en août 1980. La figure 13 compare l'évolution du débit et du chimisme des trois principales sources karstiques qui drainent les formations des Préalpes médianes plastiques du massif du Vanil Noir. Les pluies des 15, 16 et 17 août provoquent une crue importante dans les sources, dont le chimisme réagit de façon différente.

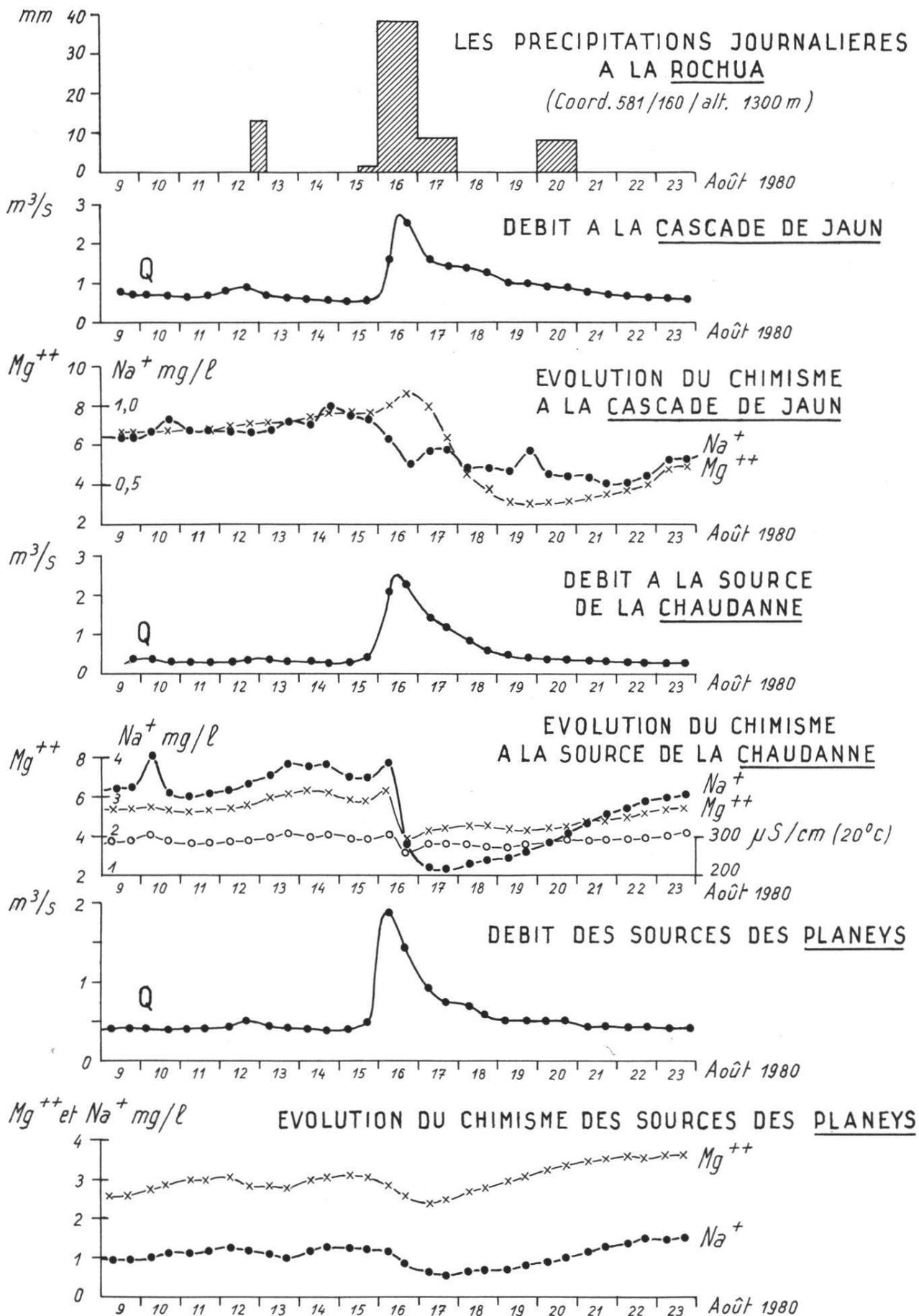


Fig. 13: Fluctuations des paramètres physico-chimiques de l'eau en fonction de l'hydrogramme pour les principales sources du massif du Vanil Noir.

A la *Cascade de Jaun*, un effet « piston » bien marqué et prolongé se manifeste, pendant la montée de la crue, par l'augmentation de la concentration en Mg^{++} . Par contre, la concentration de l'ion Na^+ diminue. Cette apparente contradiction pourrait s'expliquer par l'expulsion des eaux d'un réservoir profond, riches en Mg^{++} , mais pauvres en Na^+ . Le maximum de dilution dû aux infiltrations rapides qui arrivent à l'exutoire, se produit vers le 20 août, c'est-à-dire quatre à cinq jours après l'orage.

Tel n'est pas le cas à la *Source de la Chaudanne*, où, après un bref effet « piston », tous les paramètres accusent un maximum de dilution 24 heures après les pluies.

Aux *Sources des Planeys*, l'effet « piston » manque et les dilutions relativement faibles se produisent dans un délai comparable à celui observé à la Chaudanne.

Les traceurs naturels nous renseignent ici sur la vitesse et les modalités de transfert des masses d'eau dans le karst.

La *Cascade de Jaun* possède des réserves situées sous le niveau de l'exutoire (réseau plongé jusqu'à 70 m de profondeur; cf. BRANDT, 1976) dans un niveau calcaire étroit, mais long de plusieurs kilomètres. Une partie de ces réserves est expulsée par l'eau peu minéralisée qui progresse lentement vers la source.

A la *Chaudanne*, la situation géologique est très différente (cf. fig. 3). Le drain se trouve dans un flanc anticlinal de calcaire très perméable, alimenté en grande partie par le ruissellement de surface du Dogger, situé ici plus haut dans la topographie. Les dilutions sont rapides et importantes. Les *sources des Planeys* constituent l'exutoire le plus proche d'un synclinal crétacé à descente axiale prononcée. Les circulations y sont rapides, d'où la « réponse » très prompte de ces sources, dont le chimisme est très vite influencé même par de faibles précipitations (12 et 13 août).

En comparant, sur la base d'analyses hebdomadaires ou mensuelles, le contenu chimique des eaux pour l'ensemble des sources étudiées, on constate que les sources qui drainent les diverses formations lithologiques se différencient à la fois par leur conductivité électrique et par le rapport de la concentration en ions calcium et magnésium.

Ces observations se trouvent synthétisées à la figure 2 (deux dernières colonnes). On y voit que la teneur des eaux en Mg^{++} diminue depuis le Lias jusqu'au Crétacé, alors que les eaux des flyschs sont de nouveau riches en Mg^{++} . Ce phénomène s'explique par la composition chimique des sédiments.

La minéralisation totale des eaux, exprimée par la conductivité, caractérise à la fois les conditions lithologiques et celles de la perméabilité: dans les roches peu perméables, les eaux circulent lentement et deviennent minéralisées. La variabilité de cette minéralisation, toujours exprimée par l'intermédiaire de la conductivité électrique, est représentée à la figure 14, d'une part pour les eaux de surface et d'autre part pour les grandes sources qui drainent les Préalpes

médianes plastiques et les Gastlosen. Les caractéristiques physico-chimiques de ces deux grands groupes de sources sont en outre résumées sur le tableau 1.

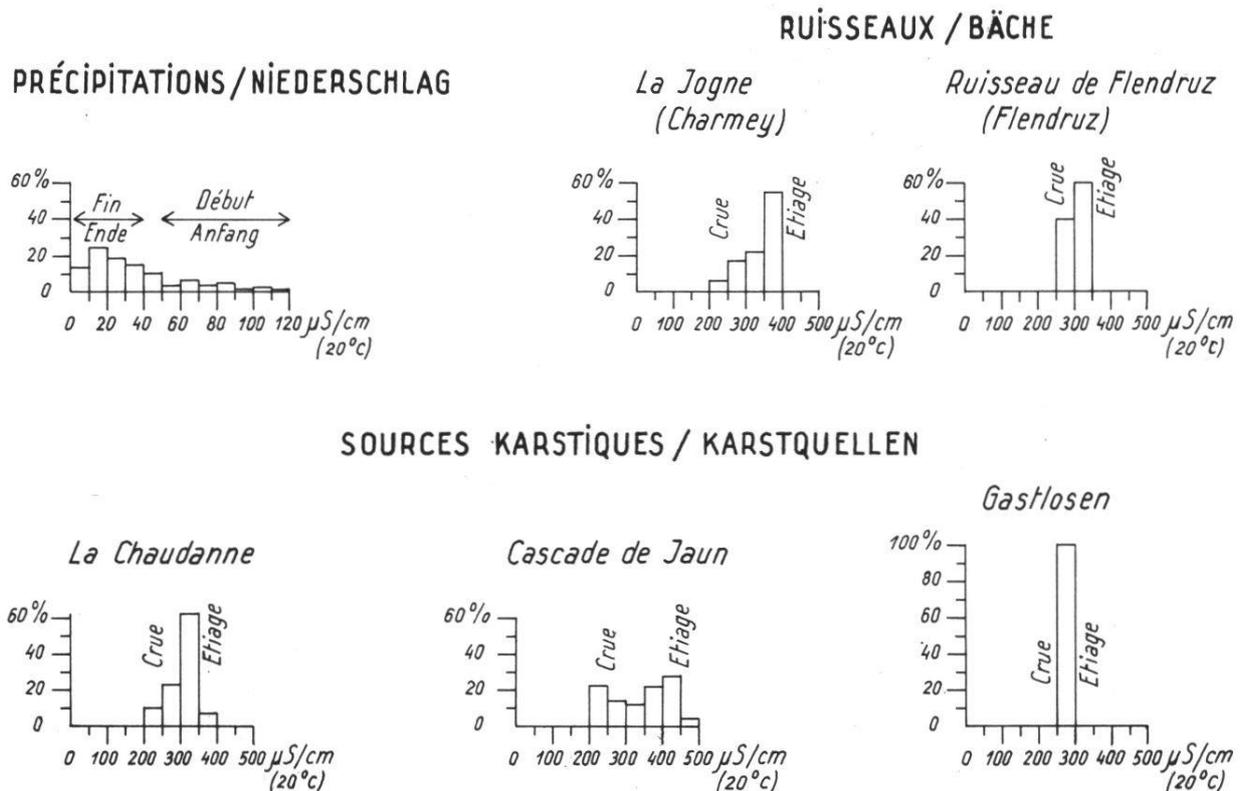


Fig. 14: Histogrammes de fréquence des valeurs de la conductivité électrique dans les précipitations, dans les eaux de surface, et dans les sources karstiques. Les valeurs de la conductivité pour les précipitations ont été extrapolées à partir de données provenant principalement du Jura (La Brévine, Les Verrières, Clef d'Or) et seulement accessoirement des Préalpes (Villarbeney).

Les remarques et les commentaires concernant ces données sont les suivants:

- Les valeurs de la pluie ont été établies sur la base d'une centaine d'analyses dans le Jura et quelques-unes dans les Préalpes (MÜLLER & ZÖTL, 1980).
- Les eaux de surface qui drainent des formations calcaires à perméabilité variable (exemple la Jogne à Charmey) possèdent une variabilité de la conductivité plus étendue que celles qui drainent des formations siliceuses peu perméables (Ruisseau de Flendruz).
- Les sources karstiques qui constituent les exutoires dans les structures plissées et à fortes descentes axiales, - telles la Chaudanne et la Cascade de Jaun -, connaissent des variations importantes de débit et de chimisme. Les sources qui sourdent au pied des Gastlosen, - alimentées par une nappe retenue dans une écaille calcaire monoclinale par une enveloppe de terrains très peu perméables -, se caractérisent au contraire par des propriétés physico-chimiques et des débits pratiquement stables (fig. 14 et tabl. 1).

Source	T (°C)	D. tot. (d.f.)	D. pas. (d.f.)	D. per. (d.f.)	µS/cm Conductivité à 20°C	pH	$\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}} \cdot 100$	Ω /s
Cascade de Jaun	n=63 7,14 s=0,47	n=62 19,29 s=4,51	n=62 13,77 s=1,09	n=62 5,53 s=3,68	n=63 335 s=76,7	n=63 7,77 s=0,12	n=12 7,97% s=1,95	1088 mesuré 1974
Chaudanne	n=40 8,38 s=0,51	n=74 17,63 s=2,09	n=74 16,98 s=1,92	n=74 0,65 s=0,32	n=74 305 s=36,8	n=74 7,59 s=0,09	n=12 7,09% s=0,8	600 estimé
Planeys	n=23 5,86 s=0,81	n=23 14,14 s=1,89	n=23 13,81 s=1,83	n=23 0,34 s=0,16	n=23 245 s=31,9	n=23 7,84 s=0,1	n=23 7,31% s=1,62	400 estimé
Sources des Gastlosen	n=12 6,41 s=0,04	n=12 16,42 s=0,64	n=12 11,8 s=0,41	n=12 4,61 s=0,63	n=12 287 s=11	n=12 7,89 s=0,05	n=12 7,06% s=0,94	100 à 150 estimé

n = nombre des mesures
s = écart-type

Tabl. 1: Caractéristiques physico-chimiques des eaux et leur variabilité dans les grandes sources karstiques du massif du Vanil Noir et de la chaîne des Gastlosen.

3.6. Les investigations à l'aide des traceurs artificiels

L'emploi des traceurs artificiels a une grande importance en hydrogéologie karstique, pour délimiter les différents bassins versants et estimer les vitesses des écoulements dans le réseau pour différentes situations hydrodynamiques. Il faut être conscient toutefois que les traceurs artificiels ne donnent pas de renseignements sur les parties peu perméables des systèmes karstiques.

Le multitraçage que nous avons effectué, grâce à l'aide bénévole des spéléologues, avait comme but de préciser les conditions d'écoulement à la limite des bassins versants hydrogéologiques de la Chaudanne et de la Cascade de Jaun. Des essais analogues ont déjà été effectués (SCHARDT, 1927; TERCIER, 1951), mais les moyens de détection des traceurs fluorescents étant considérablement améliorés depuis, nous espérons obtenir des données quantifiables. Nos résultats sont présentés sur les figures 1 et 15 et sur le tableau 2.

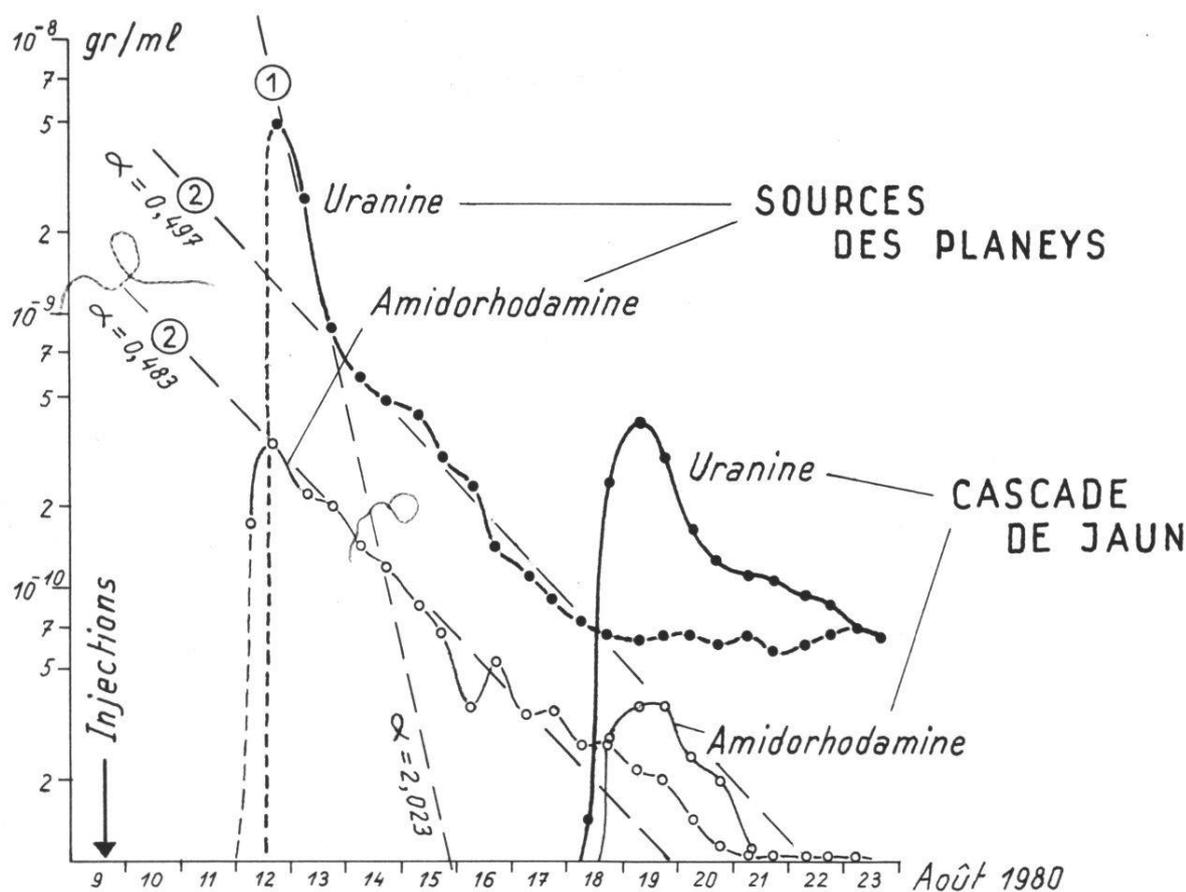


Fig. 15: Courbes de restitution des traceurs fluorescents. (Pour le coefficient α , voir figure 12).

L'injection des traceurs a eu lieu le 9 août 1980, à deux endroits différents : à la Grotte du Binocle et aux pertes (entonnoirs) des Chapelles (cf. fig. 1 et tabl. 2). L'uranine et l'amidorhodamine ont été utilisées. Les analyses ont été effectuées au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel avec le spectrofluorimètre Perkin Elmer, modèle 204.

Traceur	Lieu et date de l'injection (débit de la perte)	Quantité injectée	Lieu et date de la détection	Vitesses de propagation (Conc. des pics)	Taux de restitution
Uranine (Fluka)	Grotte du Binocle 9.8.1980 à 15.00h (10 l/min)	2,8 kg	Sources Planeys 12.8.1980	90 m/heure (0,048 g/m ³)	70-75 %
			Cascade Jaun 18.8.1980	*45 m/heure (0,004 g/m ³)	10-15 %
Amido-rhodamine G - extra	Perte des Chapelles 9.8.1980 à 13.00h (1-2 l/s)	1 kg	Sources Planeys 12.8.1980	65 m/heure (0,0033 g/m ³)	70-75 %
			Cascade Jaun 18.8.1980	*45 m/heure (0,00037 g/m ³)	10-15 %

* Vitesse de propagation entre les sources des Planeys et la Cascade de Jaun

Tabl. 2: Résultats du multitraçage effectué le 9 août 1980 dans le massif du Vanil Noir.

Pour essayer d'interpréter les courbes de restitution des traceurs, nous avons reporté les mesures sur un graphique semi-logarithmique. L'alignement des points sur une droite indique que cette restitution suit une loi exponentielle, d'où l'idée de caractériser ces courbes à l'aide de l'équation de Maillet (cf. fig. 12). Ceci nous permet de trouver des coefficients de restitution α tout à fait comparables entre les courbes des deux traceurs aux sources des Planeyts. Il nous apparaît probable que ce coefficient exprime la propagation des traceurs dans la zone noyée et dans la même structure hydrogéologique. En effet, semblables expériences dans le karst jurassien permettent de supposer que les traceurs qui évoluent dans la même structure hydrogéologique ont un coefficient de restitution comparable.

La première partie de la courbe de restitution de l'uranine, à coefficient α plus élevé, est vraisemblablement due à la progression rapide de ce traceur dans la zone dénoyée.

4. Comparaisons

Nous recourons une fois de plus au traceur naturel de l'eau le plus caractéristique, la conductivité électrique, pour comparer le chimisme des eaux karstiques des Préalpes médianes plastiques aux eaux karstiques d'autres régions de la Suisse.

La figure 16 illustre la distribution de fréquences des valeurs de la conductivité des eaux pour différentes régions. On constate qu'il existe une relation entre la minéralisation des eaux et l'altitude des régions considérées. La minéralisation augmente quand l'altitude des bassins diminue.

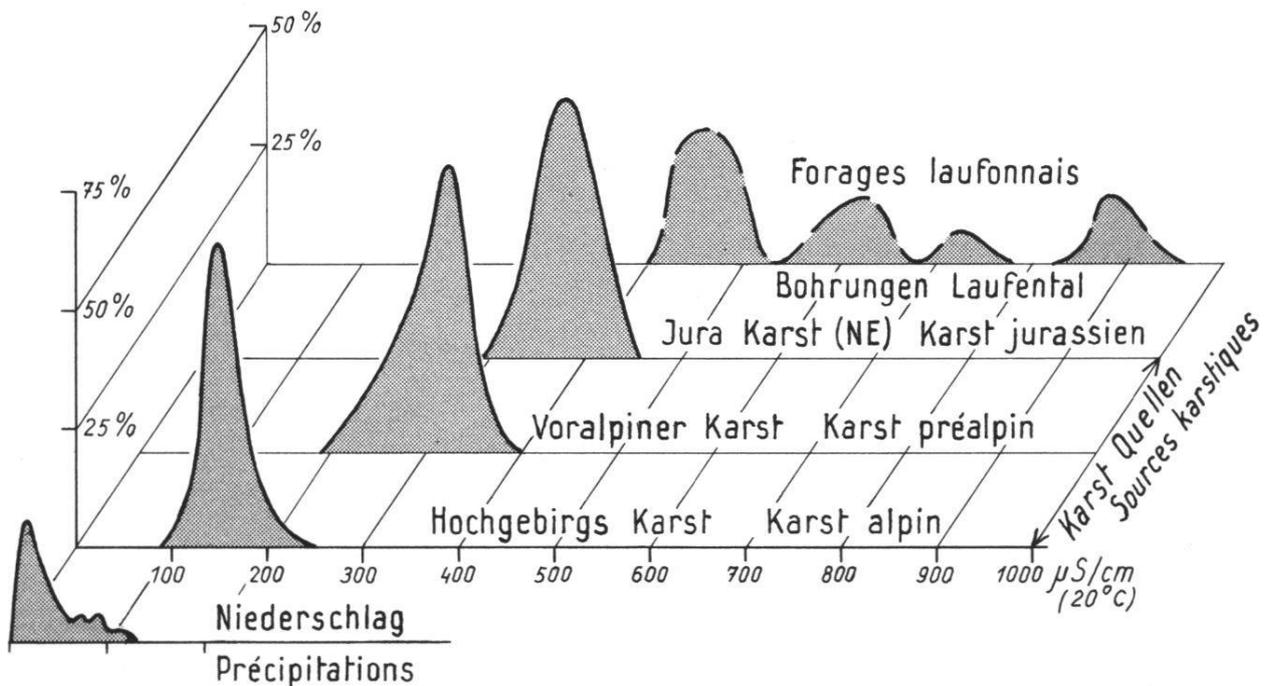


Fig. 16: Comparaison entre les courbes de fréquence des valeurs de la conductivité de l'eau dans les différents karsts de la Suisse.

Dans les Hautes Alpes Calcaires, la conductivité des eaux reste faible même pendant l'été (WILDBERGER, 1981). La fonte de la neige augmente le débit des sources en juillet-août et baisse la minéralisation de l'eau. Dans les sources préalpines, les crues consécutives à la disparition de la couverture neigeuse parviennent déjà en mai-juin, et encore plus tôt dans les sources jurassiennes (MÜLLER & ZÖTL, 1980). Ces dernières sont en crue pendant de courtes périodes de dégel même en plein hiver. Les aquifères calcaires profonds du Laufonnais ont un chimisme très stable. Leurs eaux sont souvent minéralisées.

Ces comparaisons entre karsts de différentes régions montrent que si les valeurs absolues de la minéralisation de l'eau sont influencées par l'altitude des bassins versants, les variations autour de la moyenne sont par contre dues aux conditions d'écoulement, déterminées par la structure des réservoirs. Par conséquent, la minéralisation de l'eau ne dépend pas uniquement de l'altitude des bassins, mais également des conditions de perméabilité et du temps de séjour de l'eau dans les formations.

Une autre comparaison possible est celle des conditions de karstification dans les Préalpes et dans le Jura. Le rôle hydrogéologique des structures «en petit», c'est-à-dire le rôle de la fracturation dans le développement de la karstification, peut être comparé, grâce aux travaux de KIRALY & SIMEONI (1971) et de JAMIER & MATHEY (1977). Ces auteurs montrent que, dans le Jura neuchâtois, les fractures les plus fréquemment karstifiées sont les fractures perpendiculaires et parallèles aux axes des plis, les décrochements étant moins fréquemment karstifiés. Dans les Préalpes médianes, les investigations électro-magnétiques (VLF) nous permettent d'arriver aux mêmes constatations.

5. Conclusions

Les investigations hydrogéologiques dans la région Vanil Noir –Gastlosen ont mis en évidence deux grandes familles de sources karstiques :

- Au NW, les sources du massif du Vanil Noir qui drainent les synclinaux et les anticlinaux des Préalpes médianes plastiques; elles présentent de grandes variations de débit, accompagnées de fortes fluctuations des paramètres physico-chimiques des eaux.
- Au SE, les sources qui sourdent au pied des Gastlosen possèdent par contre des caractéristiques hydrauliques et chimiques très stables.

Les caractéristiques hydrodynamiques diamétralement opposées de ces deux familles de sources s'expliquent avant tout par la structure des réservoirs. Ces derniers sont constitués, dans la partie NW de la région, de séries calcaires intensément replissées, où les descentes axiales des synclinaux sont prononcées. Dans les réservoirs de ce type, les gradients hydrauliques sont élevés et, selon le degré de karstification, les écoulements sont rapides. Dans les bassins à drainage

rapide, qui se développent dans l'axe des structures géologiques, les effets de la «double perméabilité» sont accentués. Les exutoires des bassins se trouvent souvent à proximité d'accidents cisailants majeurs, qui disloquent les structures, ou dans les gouttières synclinales (cf. fig. 1).

Dans la partie SE, par contre, le réservoir est constitué par une grande écaille calcaire monoclinale, entourée de terrains très peu perméables. Les conditions d'alimentation et d'écoulement sont de ce fait très différentes. Dans ce réservoir, les gradients sont probablement faibles et les circulations lentes. Il doit y exister, sous les niveaux des exutoires, des réserves importantes, qui seraient «piégées» dans la zone non écoulable. Malgré la perméabilité élevée des formations calcaires, le réservoir débite avec très peu de fluctuations 100 à 150 l/s. Les effets de «double perméabilité» sont émoussés. Ici aussi, les exutoires sont probablement déterminés par la proximité d'accidents décrochants.

Les investigations hydrogéologiques dans la région du Vanil Noir et des Gastlosen ont mis en évidence d'importantes ressources en eau peu ou pas encore exploitées. La qualité de ces réserves, liée à la fluctuation des différents paramètres, est sans doute meilleure dans les sources qui drainent la chaîne des Gastlosen.

Remarque

Les analyses chimiques des sources, les mesures hydrométéorologiques et les données géophysiques qui ont servi à l'élaboration de la présente synthèse sont déposées au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel.

Remerciements

Messieurs les Professeurs A. Burger, Neuchâtel, et C. Caron, Fribourg, ont favorisé nos recherches dans le cadre des Programmes nationaux sur le cycle de l'eau financés par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique. Monsieur le Professeur L. Pugin a mis à notre disposition les documents d'archives concernant les anciens projets d'aménagement hydroélectrique, et les Entreprises Electriques Fribourgeoises ont bien voulu nous en accorder la libre utilisation. Nous avons bénéficié des conseils judicieux de Monsieur Dr L. Kiraly, de l'assistance technique désintéressée des membres du Spéléo-Club Préalpes Fribourg, de l'hospitalité et de la collaboration des Familles A. Buchs à Bellegarde, Hämmerli à la Chaudanne, et C. Menoud au Gros Mont. Madame F. Mauroux a dactylographié le manuscrit avec diligence et Monsieur G. Papaux a exécuté, avec son talent coutumier, la plupart des dessins. Que tous soient ici sincèrement remerciés.

Résumé

Les investigations hydrogéologiques du karst préalpin dans la région du Vanil Noir et des Gastlosen (Préalpes fribourgeoises) sont effectuées principalement à l'aide de méthodes indirectes, hydrochimiques et géophysiques. Deux domaines sont à distinguer :

- Un domaine NW, comprenant les séries plissées des Préalpes médianes plastiques, où les sources karstiques sont avant tout caractérisées par de fortes fluctuations de débits et par des variations importantes des paramètres physico-chimiques des eaux.
- Un domaine SE, constitué par la chaîne des Gastlosen, grande écaïlle calcaire entourée de terrains peu perméables, dont les exutoires sont remarquables par la stabilité des débits et des caractéristiques physico-chimiques des eaux.

Les différences entre ces deux types d'aquifère calcaire s'expliquent par la structure et le fonctionnement des réservoirs. Ce dernier est exploré pour les grandes sources par l'étude des traceurs naturels et artificiels en fonction des débits.

Les résultats géophysiques (VLF) et la spéléogénèse indiquent que la karstification et le drainage se développent le plus souvent parallèlement ou perpendiculairement aux axes structuraux. Des accidents cisailants transversaux, moins karstifiés, recoupent les drains et donnent naissance à de grandes sources par un effet de barrage.

Les réserves en eau, actuellement peu exploitées, sont importantes.

Zusammenfassung

Karsthydrogeologische Untersuchungen im Gebiet Vanil Noir – Gastlosen (Freiburger Voralpen) wurden mit Hilfe hauptsächlich indirekter hydrochemischer und geophysikalischer Methoden durchgeführt. Es können zwei Provinzen unterschieden werden:

- Ein NW-Gebiet – auf den Faltenbau der «Préalpes médianes plastiques» beschränkt –, in welchem die Quellen große Schwankungen der Schüttung und physikalisch-chemischen Eigenschaften aufweisen.
- Ein SE-Gebiet – der Gastlosenkette, einer langgezogenen, in wenig durchlässige Schichten eingebetteten Kalkschuppe entsprechend –, in welchem sich die Quellen durch eine gewisse Stabilität in Schüttung und physikalisch-chemischen Eigenschaften auszeichnen.

Die unterschiedlichen Eigenschaften dieser beiden Kalkspeicherarten erklären sich durch verschiedene Strukturen und verschiedenes hydrodynamisches Verhalten. Letzteres wurde für die größeren Quellen mit Hilfe natürlicher und künstlicher Tracer in bezug auf Schüttung erforscht.

Die geophysikalischen Messungen (VLF) und die Speleogenesis zeigen, daß Karstbildung meistens senkrecht und parallel zum Streichen der Strukturen auftritt. Schief laufende Scherzonen sind weniger verkarstungsfähig und bilden deshalb Stauzonen, an denen große Quellen austreten.

Die Wasserreserven, bis jetzt noch wenig ausgenutzt, sind bedeutend.

Abstract

Hydrogeological studies of the Prealps karst in the Vanil Noir and Gastlosen areas of Fribourg were essentially based on indirect hydrochemical and geophysical methods. Two zones can be distinguished:

- To the North-West (folded terranes of the «Préalpes médianes plastiques»), showing karstic springs with very irregular flow and variable physico-chemical parameters.
- To the South-East (Gastlosen slice embedded in low permeability terrane), showing springs with regular flow and stable physicochemical parameters.

The differences between the two aquifers are explained by the structure and behaviour of the reservoirs. The latter was examined by study of major sources, using natural and artificial tracers according to rates of flow.

Geophysical (VLF) and speleogenetic data show that the karst and its pattern of flow are generally developed parallel and perpendicular to fold directions. Transverse strike-slip faults or zones, less karstified, cut the drainage pattern and give major sources by a dam effect.

Water resources, hardly exploited to date, are considerable.

Bibliographie

- BRANDT, C.: L'Emergence de Bellegarde. « Le Trou », Bull. Groupe Spéléo Lausanne, 11, 14–16 (1976).
- BRION, M.: L'étude du phénomène de l'anisotropie électrique appliquée au milieu carbonaté fracturé. Thèse Univ. Sc. et Techn. du Languedoc, Montpellier 1976.
- BÜCHI, O.: Die Färbung des Rio des Morteys und die Quelle von Jaun. Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. 30, 97–105 (1931).
- BURGER, A.: Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines karstiques contre la pollution. Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 3, 115–154 (1979).
- CAMPANA, B.: Géologie des nappes préalpines au NE de Château-d'Oex. Matér. Carte géol. Suisse (n.s.) 82 (1943).
- CARON, C.: La Nappe Supérieure des Préalpes: subdivisions et principaux caractères du sommet de l'édifice préalpin. Eclogae geol. Helv. 65, 57–73 (1972).
- CASTANY, C.: Prospection et exploitation des eaux souterraines. Dunod: Paris 1968.
- CHATTON, M.: Géologie des Préalpes médianes entre Gruyères et Charmey (région de la Dent de Broc). Mém. Soc. Frib. Sc. Nat. 13 (1947).
- CHENEVART, C.: Les nappes des Préalpes médianes et de la Simme dans la région de la Hochmatt (Préalpes fribourgeoises). Mém. Soc. Frib. Sc. Nat. 12 (1945).
- GIRARD, R. DE: Rapport géologique sur le Gros Mont. Dans: MAURER, H.: Projet d'une usine hydro-électrique au Gros Mont, 20–25. Impr. St-Paul: Fribourg 1909.
- JAMIER, D., et MATHEY, B.: Fissuration et orientation des dépressions karstiques (Jura neuchâtelois, Suisse). Bull. Soc. Neuchâtel. Sc. Nat. 100, 149–156 (1977).
- KIRALY, L.: Statistical analysis of fractures (orientation and density). Geol. Rundschau 59, 125–151 (1969).
- – , MATHEY, B., et TRIPET, J. P.: Fissuration et orientation des cavités souterraines: Région de la Grotte de Milandre (Jura tabulaire). Bull. Soc. Neuchâtel. Sc. Nat. 94, 99–114 (1971).
- – , et MÜLLER, I.: Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: Effet sur la variation du chimisme des sources karstiques. Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 3, 237–285 (1979).
- – , et SIMEONI, G.: Structure géologique et orientation des cavités karstiques: la Grotte de « Chez le Brandt » (Jura neuchâtelois). Bull. Soc. Neuchâtel. Sc. Nat. 94, 91–97 (1971).
- KLAUS, J.: Les Couches rouges et le Flysch au Sud-Est des Gastlosen (Préalpes romandes). Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. 42, 5–128 (1953).
- MAURER, H.: Projet d'une usine hydro-électrique avec accumulation d'eau au Gros Mont. Impr. St-Paul: Fribourg 1911/1915.

- MÜLLER, I. : Premiers résultats des études hydrogéologiques dans la région du Vanil Noir (Préalpes fribourgeoises). Actes 5^e Congr. nat. Spéléologie Interlaken, 138–144 (1975).
- – : Observations hydrogéologiques dans la région du Vanil Noir (Préalpes fribourgeoises). *Eclogae geol. Helv.* 69, 481–499 (1976a).
- – : Résultats des recherches hydrogéologiques dans la région des Gastlosen orientales (Préalpes fribourgeoises et bernoises). *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 65, 165–181 (1976b).
- – : L'hydrogéologie des calcaires spathiques et siliceux du Lias dans la Vallée du Gros Mont (Préalpes fribourgeoises). *Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel* 1, 61–66 (1976c).
- – : Spéléologie et hydrogéologie. Etat des recherches dans le massif du Vanil Noir (Préalpes fribourgeoises). *Stalactite* 31, 10–17 (1981).
- – , und ZÖTL, J. : Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). *Steir. Beitr. Hydrogeol.* 32, 5–100 (1980).
- PAGE, C. : Observations géologiques sur les Préalpes au NW des Gastlosen orientales. *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 58, 83–177 (1968/69).
- PLANCHEREL, R. : Essai d'interprétation de la dislocation transversale Bellegarde – Lac Noir (Préalpes médianes fribourgeoises). *Eclogae geol. Helv.* 65, 461–469 (1976).
- – : Aspects de la déformation en grand dans les Préalpes médianes plastiques entre Rhône et Aar. Implications cinématiques et dynamiques. *Eclogae geol. Helv.* 72, 145–214 (1979).
- SCHARDT, H. : Rapport géologique sur le projet de création d'un bassin d'accumulation d'eau au Gros Mont sur Charmey. Dans: MAURER, H. : Projet d'une usine hydro-électrique au Gros Mont, 90–109. Impr. St-Paul: Fribourg 1913.
- – : Rapport géologique et hydrologique sur l'exploration du bassin du Gros Mont et des environs du 17 au 20 août 1927. Rapport géologique inédit EEF (1927).
- – : Rapport sur l'essai de coloration du ruisseau des Morteys, le 14 septembre 1928. Rapport géologique inédit EEF (1928).
- SPOORENBERG, J. : Les Préalpes médianes au NW de Château-d'Oex. Thèse Univ. Fribourg 1952.
- TERCIER, J. : Les conditions géologiques de la région du Gros Mont (Préalpes fribourgeoises). Rapport géologique inédit EEF (1949).
- – : Interprétation géologique des résultats des colorations d'eaux souterraines dans la région du Gros-Mont (Canton de Fribourg). Rapport géologique inédit EEF (1951).
- WILDBERGER, A. : Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet. *Beitr. z. Geol. der Schweiz, Hydrologie* 27, 1–175 (1981).