

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

SPÉCIALITÉ GÉOLOGIE APPLIQUÉE

par

LUC BELLEVILLE

HYDROGEOLOGIE KARSTIQUE
GEOMETRIE, FONCTIONNEMENT ET KARSTOGENESE
DES SYSTEMES KARSTIQUES DES GORGES DE L'ARDECHE
(ARDECHE, GARD)

Thèse soutenue le 30 Octobre 1985 devant la commission d'examen:

M. R. MICHEL	Professeur, U1 Grenoble	Président
M. J. SARROT-REYNAUD	Professeur, U1 Grenoble	Directeur thèse
M. P. ELOUARD	Professeur, Lyon 1	Rapporteur
M. J. C. FOURNEAUX	Maître-assistant, U1 Grenoble	Rapporteur
M. J. J. DELANNOY	Assistant, IGA Grenoble	Examineur
M. M. TERRAMOSI	Préfet de l'Ardèche, Commissaire de la République	Invité

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

SPÉCIALITÉ GÉOLOGIE APPLIQUÉE

par

Luc BELLEVILLE

HYDROGEOLOGIE KARSTIQUE .
GEOMETRIE, FONCTIONNEMENT ET KARSTOGENESE
DES SYSTEMES KARSTIQUES DES GORGES DE L'ARDECHE
(ARDECHE, GARD)

Thèse soutenue le 30 Octobre 1985 devant la commission d'examen:

M. R. MICHEL	Professeur, U1 Grenoble	Président
M. J. SARROT-REYNAUD	Professeur, U1 Grenoble	Directeur thèse
M. P. ELOUARD	Professeur, Lyon 1	Rapporteur
M. J. C. FOURNEAUX	Maître-assistant, U1 Grenoble	Rapporteur
M. J. J. DELANNOY	Assistant, IGA Grenoble	Examineur
M. M. TERRAMOSI	Préfet de l'Ardèche, Commissaire de la République	Invité

AVANT-PROPOS

Au terme de ce travail, effectué dans le cadre de contrats, d'une part avec la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique et d'autre part avec le Ministère de l'Environnement et l'Etablissement Public Régional Rhône-Alpes sur proposition du Comité Scientifique de la Réserve Naturelle des Gorges de l'Ardèche et avec l'appui de Monsieur le Préfet de l'Ardèche, il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation et qui ont bien voulu le juger :

- Monsieur R. MICHEL, Professeur à l'Institut Dolomieu, qui m'a toujours aimablement reçu pour discuter de problèmes hydrogéologiques et me fait l'honneur de présider ce jury ;

- Monsieur J. SARROT-REYNAUD, Professeur à l'Institut Dolomieu, qui m'a confié ce sujet à la fois passionnant et délicat ; il a su m'encourager tout au long de sa réalisation ;

- Monsieur P. ELOUARD, Professeur à l'Université de Lyon, Président du Conseil Scientifique de la Réserve Naturelle des Gorges de l'Ardèche, que j'ai eu le plaisir de rencontrer plusieurs fois sur le terrain où il animait la sympathique équipe scientifique pluridisciplinaire attachée à la Réserve ;

- Monsieur J.C. FOURNEAUX, Maître-Assistant à l'Institut Dolomieu, détaché au CERN de Genève, à qui je dois des conseils toujours judicieux malgré son récent éloignement ;

- Monsieur J.J. DELANNOY, Assistant à l'Institut de Géographie Alpine, qui a volontiers accepté de discuter des épineux problèmes de kartogénèse.

Je tiens également à remercier pour leur disponibilité et leurs conseils : Monsieur J. ROCHAT qui m'a accueilli dans son laboratoire de l'UER de Pharmacie et permis de réaliser de nombreuses analyses de spectrofluométrie ; Monsieur G. MONJUVENT qui a, par une active correction, largement orienté la discussion sur la karstogénèse ; Madame ARNAUD-VANNEAU qui a gracieusement daté des niveaux urgoniens par la détermination des micro-organismes.

Sur le terrain, j'ai toujours été chaleureusement accueilli par Michel et Agnès BOSSE, à Gaud : la base de la Réserve. Je les en remercie. Je salue également les permanents et saisonniers du GIGA qui m'ont prêté main forte en différentes occasions. Je n'oublierai pas les spécialistes de tous horizons : Philippe VERVIER, Sylvain DOLEDEC, Gilbert COCHET, ... qui ont avec moi sillonné les Gorges depuis plusieurs années et m'ont fait partager l'enthousiasme qu'ils portent à leur domaine d'étude. Je tiens à saluer d'autre part l'ensemble des spéléologues qui ont bien voulu, à différents degrés, collaborer à ce travail : Y. BOUSQUET, T. MARCHAND, B. LEGER, D. BENARD, P. LEROUX, ...

Je remercie Annie MERLIN qui a consciencieusement assuré la frappe de ce mémoire.

J'adresse enfin mes amitiés à ceux qui, au cours de ces dernières années ont partagé dans la bonne humeur ma vie dauphinoise ou l'ambiance "feutrée" des salles de 3ème cycle.

J'aimerais dire, plus intimement, à mes parents, mon frère, ma famille, que je n'oublierai pas que la sève, elle, vient de Chablais, Faucigny et Genevois

A Catherine et Romain.

RESUME

En bordure de la vallée du Rhône, le massif urgonien des Gras est profondément entaillé par les gorges de l'Ardèche au niveau desquelles émergent de nombreux systèmes karstiques.

Les caractéristiques lithologiques de l'aquifère urgonien et des formations adjacentes, la fracturation induite par la présence d'un accident majeur : la faille de Saint-Remèze, définissent la répartition et la nature des émergences du massif.

L'étude du comportement hydrogéologique des mégaaccidents N. 50 et N 140, les opérations de traçages systématiques, aboutissent à une délimitation des bassins versants de l'Ardèche, du Rhône et de la Cèze.

L'évaluation des volumes d'eau infiltrée, à partir des données hydroclimatiques, met en évidence l'importance des réserves renouvelables. Des jaugeages différentiels sur l'Ardèche confortent ces résultats en quantifiant les apports immergés durant une période d'étiage.

Les modalités de circulation des eaux sont appréhendées grâce aux études hydrochimiques, hydrodynamiques et à des expériences de traçage. Le karst actif se révèle peu évolué et varie de zones de calcaires fissurés à des réseaux à collecteur développé, mais à faibles réserves. La vulnérabilité de cet aquifère qui tend à augmenter avec la pression touristique sur le plateau, est principalement marquée au niveau des pertes de ruisseaux.

La collecte des données géomorphologiques prouve l'existence de plusieurs épisodes de karstification. Une phase de karstification profonde, localisée dans l'axe des gorges et en bordure de la vallée du Rhône, est mise en relation avec le creusement des gorges. Ces deux événements sont liés à la régression fini-miocène. Une puissante zone noyée occupe ces réseaux anciens dont le toit est recoupé par l'Ardèche et le karst actuel. De fortes potentialités aquifères inexploitées s'ajoutent aux réserves de surface.

Mots clés :

Hydrogéologie karstique, karstogenèse, limites de bassins versants, ressources en eau, vulnérabilité, Basse-Ardèche.

INTRODUCTION

1 - LES MOTIVATIONS DE L'ÉTUDE

2 - CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

3 - PROBLÈMES POSÉS ET MÉTHODES D'ÉTUDE

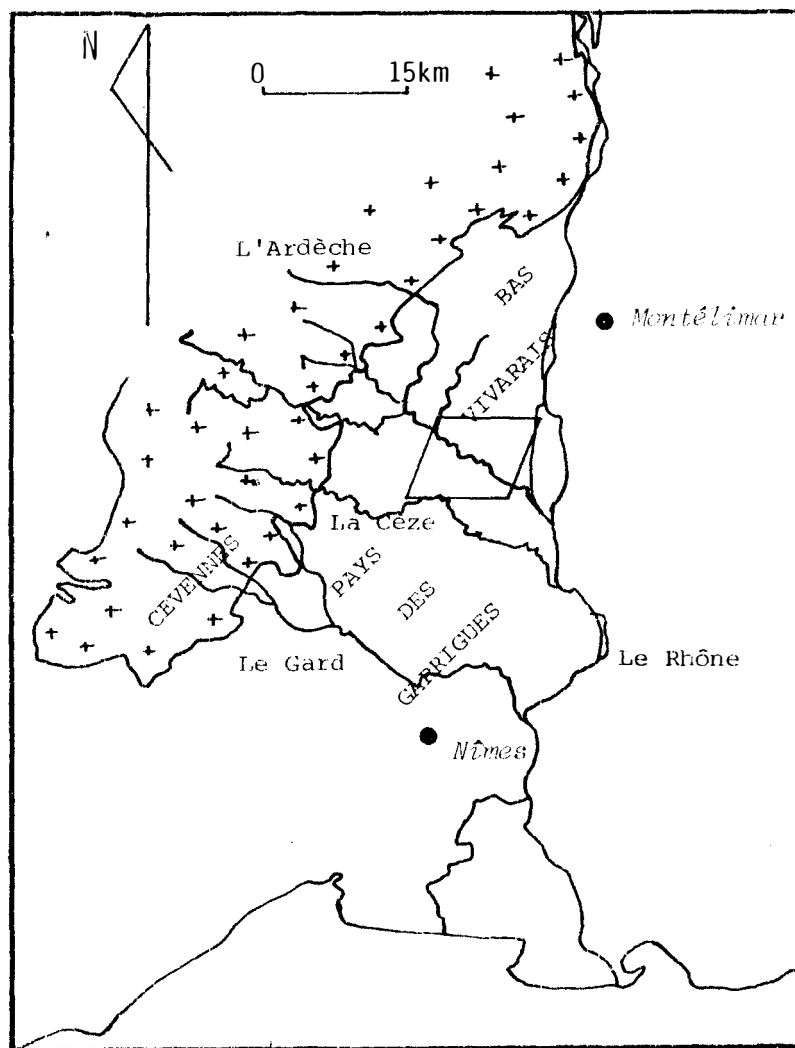


fig. 1 : Situation géographique.

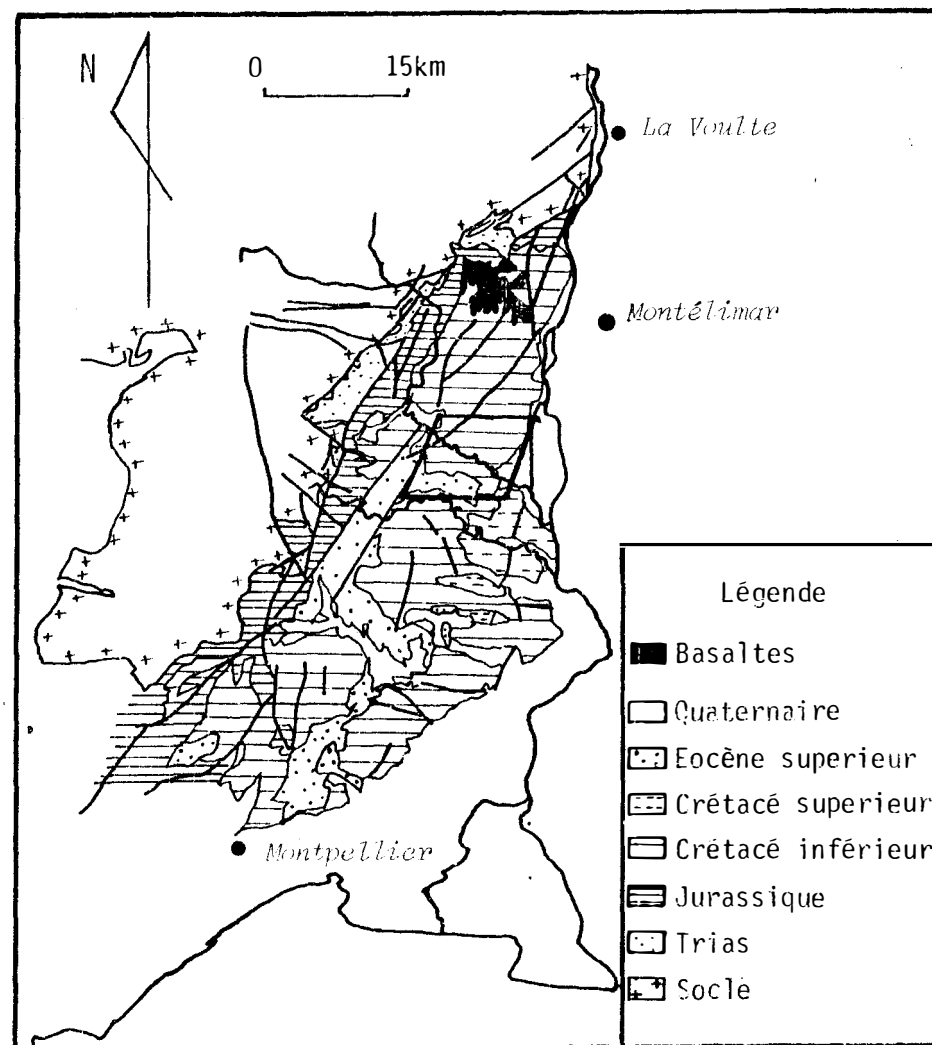


fig. 2: Cadre géologique..

INTRODUCTION

1 - LES MOTIVATIONS DE L'ÉTUDE

L'essor spectaculaire que connaît depuis quelques années l'activité touristique dans le secteur des gorges de l'Ardèche, est à l'origine de ce travail pour au moins deux raisons.

- La création de la Réserve Naturelle des gorges de l'Ardèche a été une réponse à ce développement et une initiative indispensable à la préservation du patrimoine naturel. L'une de ces premières réalisations fut le lancement d'un programme d'études scientifiques dont le but était d'assurer une meilleure connaissance du milieu naturel. Notre étude sur l'hydrogéologie du karst des gorges s'inscrit dans cette démarche.

- La seconde motivation est plus pragmatique. L'augmentation démesurée de la population durant les pointes estivales crée de nombreuses contraintes du point de vue de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement. Outre les agglomérations qui connaissent le plus souvent d'épineux problèmes de réserves en eau, l'existence de nombreux campings ou d'autres pôles d'activité décentralisés, incline à rechercher des sources d'alimentation locales, saines et au débit maintenu durant l'étiage d'été. Le karst urgonien dont les caractéristiques restent très hétérogènes peut présenter ces qualités selon certaines conditions. Le problème de l'évacuation des eaux usées du plateau des Gras et de la définition de zones sensibles d'infiltration se pose également de manière cruciale.

Cette étude semble pouvoir contribuer à la résolution de certains de ces problèmes.

2 - CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

2 - 1. CADRE GEOGRAPHIQUE (fig. 1)

Les gorges de l'Ardèche correspondent à la partie terminale du cours de l'Ardèche. La rivière entaille alors profondément le plateau urgonien des Gras. Ce massif, de près de 400 km², appartient à un vaste ensemble sédimentaire qui sépare à l'Ouest les reliefs cristallins et cristallophylliens des Cévennes et leur prolongement septentrional : le Haut-Vivarais, de la vallée du Rhône à l'Est. Deux régions s'individualisent dans ce vaste gradin qui s'étend de la Voulte-sur-Rhône au Nord à la région nord-montpellierienne au Sud : le Bas-Vivarais et le pays des Garrigues. La Basse-Ardèche constitue la limite de ces deux régions naturelles qui s'inscrivent respectivement dans les départements de l'Ardèche et du Gard.

2 - 2. CADRE GEOLOGIQUE (fig. 2)

La couverture orientale du massif cévenol s'organise en une succession de terrains de direction générale NNE-SSW qui s'échelonnent vers l'Est, du Trias au Crétacé inférieur. La dernière unité, la plus massive, correspond à notre secteur d'étude. Elle regroupe les calcaires barrémo-bédouliens à faciès urgonien du plateau des Gras. Cet agencement est recoupé par le fossé d'effondrement d'Alès, comblé par les sédiments détritiques oligocènes. La dépression de Barjac-Issirac est une anastomose de ce bassin qui interrompt la formation urgonienne. Cette dernière réapparaît au Sud où elle est entaillée par les gorges de la Cèze. A l'Est, les dépôts plio-quaternaires de la vallée du Rhône limitent le massif en surface.

2 - 3. CADRE STRUCTURAL (fig. 3)

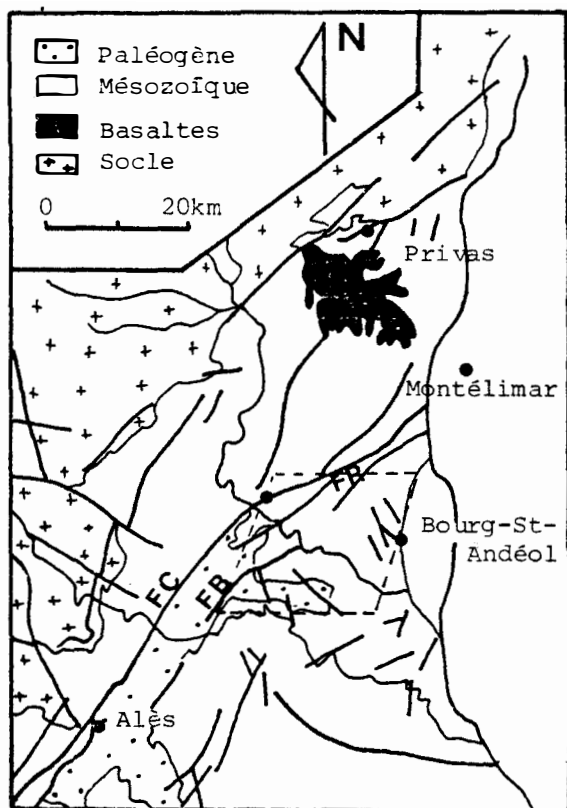
Un puissant faisceau d'accidents de direction générale NNE-SSW à NE-SW et d'importance régionale : le faisceau cévenol, recoupe le secteur. Le fossé d'Alès est contrôlé par deux failles bordières grossièrement orientées N 35 : la faille des Cévennes et la faille de Barjac. Cette dernière oblique vers la direction N 50 lors de sa traversée du plateau des Gras pour passer à la faille de St-Remèze. En bordure de la vallée du Rhône, de nombreux accidents N 140 s'individualisent.

2 - 4. MORPHOLOGIE - VEGETATION

Le plateau des Gras est un vaste domaine calcaire de près de 400 km², aux allures monotones. Les plus forts reliefs sont localisés au NW et dominant la vallée de l'Ibie à l'Ouest et la dépression de St-Remèze à l'Est. Ils culminent à 719 m à la Dent de Rez et 667m au Serre du Barrès (fig. 4). A l'Est, ce plateau retombe en pente douce et selon le pendage sur la vallée du Rhône. Au Sud de l'Ardèche, le plateau urgonien s'adoucit pour passer à la dépression de Barjac-Issirac. D'importantes surfaces planes s'étagent entre 350 et 400 m : Bois de Ronze, de Laval, du Malbosc, plaine de St-Remèze. Elles pourraient correspondre à une surface d'érosion ancienne. Une surface inférieure, aux cotes comprises entre 250 et 300 m, surmonte les gorges de l'Ardèche : plateau de Bidon, plaine des Crottes...

Les formes karstiques de surface sont rares. Il est vrai que le calcaire est rarement mis à nu sur de grandes étendues. Des sols maigres, une végétation arbustive dense de chênes verts et blancs et de buis rendent cette zone impénétrable et les observations difficiles.

Hameaux et villages sont peu fréquents et soulignent alors des conditions favorables : dolines tectoniques de Bidon, Champ Vermeil, le puits de Ronze, Mayres ou dépressions marnocalcaires de St-Remèze ou calcaréo-gréso-argileuses de Labastide-de-Virac. Le plateau urgonien se caractérise en effet par son absence d'écoulements. Les vallées ou combes autochtones sont sèches et seules, les vallées allogènes assurent un écoulement qui reste temporaire sur leur parcours urgonien.



FC Faille des Cévennes s.s.
 FB Faille de Barjac
 FR Faille de St-Remèze

fig.3: Schéma structural régional.

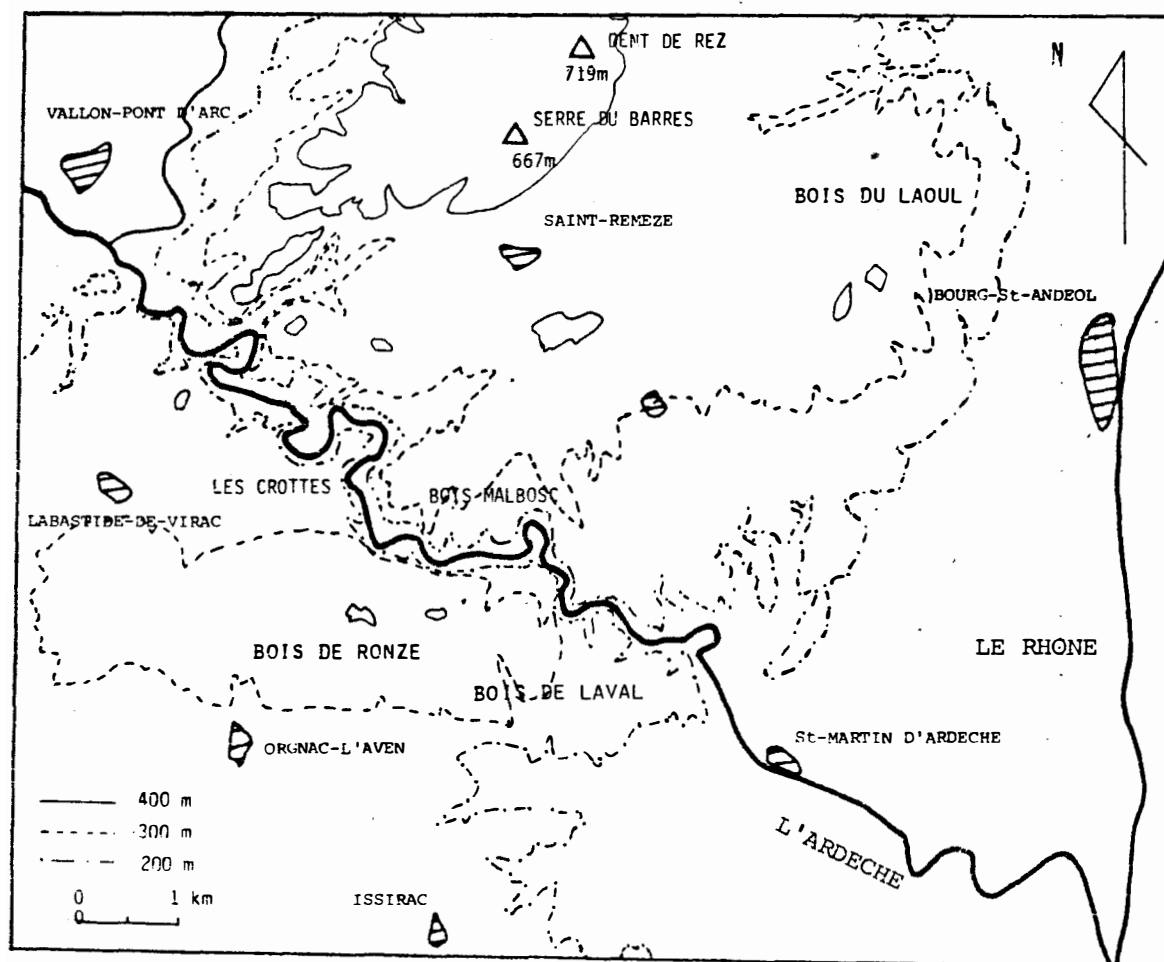


fig. 4 : Carte topographique.

3 - PROBLÈMES POSÉS ET MÉTHODES D'ÉTUDE

Lors de la mise en route de cette étude, seuls quelques aspects de l'hydrogéologie karstique du plateau des Gras avaient été abordés. R. MAZELLIÉ (1971), après avoir dressé un premier inventaire des exurgences, notait le rôle déterminant de l'Ardèche dans leur émergence et l'existence d'apports immergés difficilement estimables. R. GUERIN (1973), après une étude tectonique, montrait l'importance des directions de fracturation, successivement ébauchées, dans le creusement des galeries karstiques fossiles et actives. Une expérience de traçage (G.R.B., 1976) avait prouvé les relations entre Goule et Event de Foussoubie.

Le problème des apports du karst était posé. Sa résolution semblait passer par une étude hydrologique de la Basse-Ardèche grâce à deux stations limnigraphiques disposées à l'amont et l'aval des gorges. Il s'avèrera rapidement qu'en l'absence d'un soutien logistique d'une équipe d'hydrologues, cette méthode était irréalisable. Des jaugeages différentiels pratiqués en période d'étiage ont toutefois permis d'estimer les apports du karst à une époque donnée. Seule une détermination précise du bassin versant des gorges de l'Ardèche pouvait alors permettre une quantification de ces apports.

Nous avons donc successivement effectué :

- une étude géologique portant sur les caractères lithologiques et les propriétés hydrogéologiques des différentes formations et mettant en évidence les relations entre la formation urgonienne et les formations voisines. Plusieurs coupes géologiques ont été réalisées à cet effet. L'étude a d'autre part été étendue à toutes les zones ne présentant pas une limite de bassin versant nette avec le bassin versant supposé de l'Ardèche. Au Sud, elle a ainsi été prolongée jusqu'aux gorges de la Cèze ;

- une étude de la fracturation et de son histoire. Les analyses photogéologiques et de terrain ont été comparées au sein des deux zones structurales préalablement définies ;

- une étude des conditions d'émergence des exurgences et des directions des galeries karstiques. Le rôle hydrogéologique des différentes familles de fractures a ainsi été mis en évidence ;

- des expériences nombreuses de traçage. Elles ont permis de définir des sens d'écoulement et de préciser la délimitation des bassins versants ;

- une étude hydroclimatique. La détermination d'une valeur de pluies efficaces affectée à la surface du bassin versant fournit un volume infiltré global.

Deux autres problèmes ont par ailleurs été abordés

- . le fonctionnement du karst a pu être approché grâce aux études hydrochimiques, hydrodynamiques et à certaines expériences de traçage ;

- . l'histoire de la karstification a été retracée à partir de la comparaison des données géologiques, géomorphologiques et de l'analyse des directions de galeries karstiques.

CHAPITRE I

ETUDE GEOLOGIQUE

1 - CONTEXTE GÉNÉRAL

2 - ÉTUDE DES FORMATIONS

3 - ÉTUDE DES CALCAIRES URGONIENS SUR LE TRACÉ DE L'ARDÈCHE

4 - LES UNITÉS STRUCTURALES



V: Vallon-Pont d'Arc ; St R: Saint-Remèze ;Bg: Bourg-Saint-Andéol ;
La: Labastide-de-Virac ; B: Barjac ; O: Orgnac l'Aven ; La: Laval-
Saint-Roman ; I: Issirac ; St M: Saint-Marcel.

fig. 5: Carte géologique du plateau des Gras et de ses limites .
(d'après la carte géologique au 1/250 000, feuille Valence)

ETUDE GEOLOGIQUE

1 - CONTEXTE GÉNÉRAL

La zone étudiée englobe les formations les plus récentes de la couverture orientale du socle cristallin du Vivarais. Les terrains mésozoïques se succèdent en bandes SW.NE de la bordure cévenole à la vallée du Rhône. Le plateau des Gras correspond à la large bande des calcaires du Crétacé inférieur. Cette dernière est recoupée par le fossé d'Alès à l'Ouest et limitée par la vallée du Rhône à l'Est (fig. 5).

En rive gauche de l'Ardèche, l'Hauterivien affleure au milieu de la carapace urgonienne dans la dépression de St-Remèze. En rive droite, une bande oligocène rattachée au fossé d'Alès interrompt le plateau urgonien qui va de l'Ardèche à la Cèze.

En l'absence de la carte géologique au 50 000ème de Bourg St Andéol, nous nous sommes appuyés sur la carte géologique au 1/80 000ème (feuille Orange, 3ème édition, 1968). Tout en fournissant le cadre global de l'étude, cette dernière reste assez incomplète. On note une absence de subdivisions au sein du faciès urgonien prépondérant. Les termes et les formations paléogènes sont également à réviser. Nous avons utilisé, pour l'extrême sud de notre étude, la carte au 1/50 000ème de Pont-Saint-Esprit. Les travaux de D. LAFARGE (1979) sur le Crétacé inférieur de la région de St-Remèze et ceux de C. SIGNOLLES (1980) sur le Crétacé supérieur de la bordure occidentale ont complété cette documentation.

Après une reconnaissance des différentes formations, nous avons recueilli, à l'échelle de notre étude, les informations complémentaires nécessaires à l'élaboration d'une carte structurale et de coupes géologiques interprétatives.

Nous aborderons les problèmes importants de fracturation dans un chapitre ultérieur.

2 - ÉTUDE DES FORMATIONS

Nous étudierons les différentes formations rencontrées d'un point de vue lithologique et stratigraphique et nous signalerons leur rôle hydrogéologique. Nous nous attarderons plus longuement sur les calcaires urgoniens.

2 - 1. LE CRETACE INFÉRIEUR

2 - 1.1. L'Hauterivien

Cette formation affleure uniquement en rive gauche de l'Ardèche, au niveau du bombement de St-Remèze et dans la vallée du Tiourre.

Cette série, d'une puissance de 600 m dans le forage de Vallon-Pont d'Arc, se sépare en deux termes monotones d'égale importance : les marno-calcaires à la base, les calcaires argileux à miche au sommet. Le toit de cette formation va constituer un horizon imperméable pour les aquifères sus-jacents.

2 - 1.2. Le Barrémien basal

Cette appellation regroupera les formations d'âge Barrémien à faciès non urgonien. Sa répartition et son importance vont donc être liées à la paléogéographie du Barrémien inférieur que nous évoquerons dans le paragraphe suivant.

Au niveau du vallon du Tiourre, c'est une formation de 100m de calcaires marneux contenant quelques horizons bioclastiques.

Au Nord de St-Remèze, cette formation, plus puissante, de l'ordre de 150 m, devient plus marneuse.

Ces calcaires argileux, du fait de leur relative imperméabilité par rapport aux calcaires urgoniens, vont jouer le rôle de mur imperméable plus ou moins efficace.

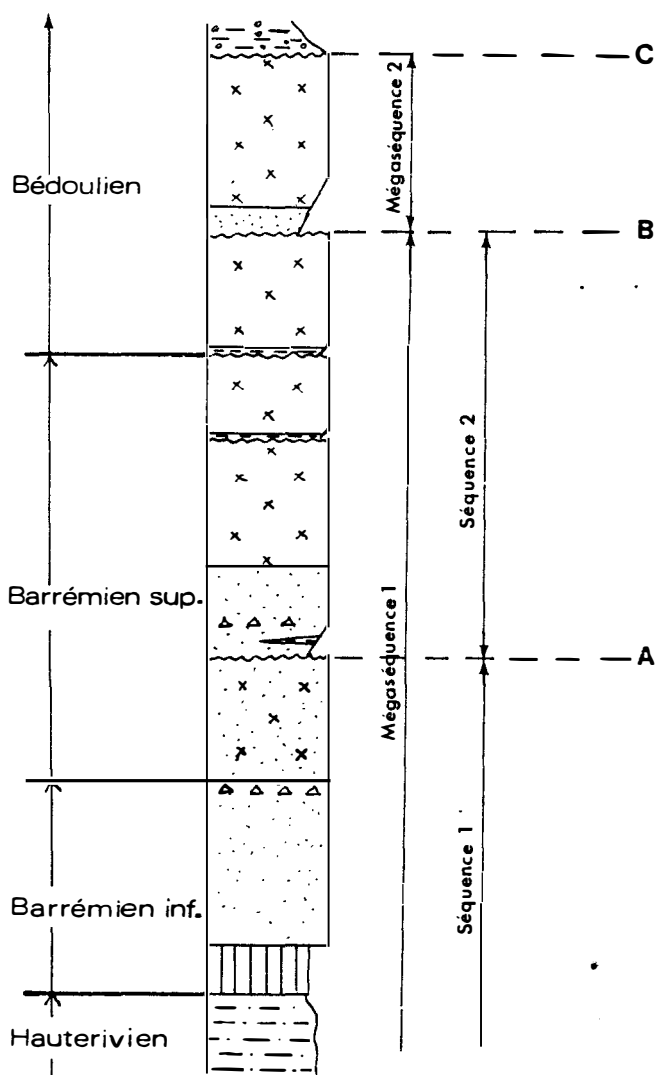
2 - 1.3. Les faciès urgoniens barrémo-bédouliens (s.l.)

Il s'agit d'une épaisse série (400 m) de calcaires de plate-forme, variés et hétérochrones.

La succession des dépôts correspond à petite et grande échelle à l'étalement des sédiments du talus au continent. On observe ainsi des passages des calcaires bioclastiques de plate-forme externe aux calcaires récifaux (à cnidaires) puis aux calcaires à rudistes de plate-forme interne (calcaires urgoniens s.s.). Deux mégaséquences peuvent ainsi être décrites (fig. 6), séparées par une discontinuité intrabédoulienne B. La première mégaséquence peut être divisée en deux séquences du second ordre limitées par une discontinuité A. Ces deux discontinuités marquent le retour de calcaires bioclastiques (calcaires oolithiques, calcarénites rousses, ...) après l'installation de calcaires à rudistes. La discontinuité A est surmontée localement à l'amont des gorges (Serre de Tourre, belvédère de Gaud) par un horizon de quelques mètres de marnes fossilifères. La formation urgonienne est interrompue à son sommet par un hardground : la discontinuité C, qui n'est visible que localement, en général en présence de l'Aptien.

D'un point de vue paléogéographique, ces dépôts correspondent à la plate-forme méridionale de la fosse vocontienne. L'installation des calcaires de plate-forme (D. LAFARGE, 1978) débute dès le Barrémien inférieur pour les deux haut-fonds du Serre de Tourre (rive gauche des gorges) et de la Dent de Rez. Durant le Barrémien supérieur, les calcaires à rudistes vont s'installer sur, puis autour de ces deux haut-fonds. Après une évolution régressive au cours du Bédoulien, on observe une généralisation des faciès à rudistes.

La série urgonienne, toujours tronquée, est observable au niveau des gorges de l'Ardèche même si de nombreuses zones restent inaccessibles.



Légende des faciès:

- | | | | |
|-------|--------------------------|-------|-------------------------------------|
| — — — | Calcaires hémipélagiques | x x | Calcaires urgoniens s.s. à rudistes |
| | Calcaires de transition | Δ Δ | Calcaires àcnidaires |
| | Calcaires bioclastiques | --- | Marnes |
| | | -o-o- | Marnes à orbitolines |

fig.6 : Les divisions stratigraphiques des calcaires urgoniens (d'après Cotillon et al., 1979).

D'un point de vue hydrogéologique, ces calcaires sont intensément karstifiés et constituent l'aquifère principal. Il n'existe pas d'horizons marneux équivalents à ceux rencontrés dans les massifs subalpins du Vercors et de Chartreuse pouvant jouer le rôle de niveau de base local.

Un complément d'étude sur cette formation, exposé au § 3, a d'autre part été réalisé.

2 - 1.4. L'Aptien

Cette formation, largement érodée, n'est conservée qu'en bordure de la vallée du Rhône et du fossé d'Alès, ainsi qu'en rive droite de l'Ardèche (Laval - Saint Roman, Labastide de Virac).

Le Bédoulien est composé de 20 à 30 m de calcaires argileux ou de marnes parfois glauconieuses (marnes vertes). Il est localement riche en orbitolines.

Le Gargasien, de quelques dizaines de mètres d'épaisseur, est inégalement représenté. Indifférencié du Bédoulien ou inexistant à l'Ouest, il s'individualise à Laval - Saint Roman et en bordure du Rhône. Cette formation comporte des marnes bleues surmontées d'un faible niveau de calcaires. Des sables verts coiffent cet ensemble.

2 - 1.5. L'Albien

Localisé au Sud-Est de notre secteur d'étude à l'extrémité du synclinal d'Issirac, il comprend un niveau phosphaté fossilifère puis des sables rutilants sur quelques dizaines de mètres.

2 - 2. LE CRETACE SUPERIEUR

Des zones de subsidence très localisées, au fonctionnement irrégulier, ont conditionné ces dépôts (C. SIGNOLLES, 1980).

2 - 2.1. Le Céno-manien

Localisé dans la dépression de Labastide de Virac où il atteint une puissance de près de 100 m, il est représenté principalement par des grès et sables (faciès tavier) et se termine par des niveaux ligniteux puis calcaires.

2 - 2.2. Le Turonien

Cette formation est présente sur toute la bordure occidentale du massif urgonien. Elle est localement puissante (200 à 300 m à Salavas) et constituée d'une alternance de formations marneuses, sableuses (faciès ucétien) et calcaires.

2 - 2.3. Le Sénonien

Cette formation est également limitée au secteur occidental. Le Coniacien renferme des calcaires à rudistes dont la limite septentrionale est située à Salavas et des grès calcaires.

Le Campanien comprend une importante sédimentation de marnes et de conglomérats. Ce faciès marque l'activité de la faille des Cévennes et traduit l'érosion de son compartiment NW surélevé.

2 - 3. LE TERTIAIRE

Le Paléogène n'a été conservé dans le Languedoc oriental que dans deux types de structures : des plis est-ouest comme le pli de Barjac-Issirac, des axes distensifs oligocènes NW-SE comme le fossé d'Alès.

Le Néogène, lié aux incursions marines, n'est présent qu'en bordure de la vallée du Rhône.

2 - 3.1. L'Eocène

- L'Eocène inférieur

Ce sont des argiles et des sables bariolés à faible extension latérale, connus près d'Ornac et du Garn. Leur datation reste incertaine puisque basée sur une analogie avec des dépôts similaires. Ils pourraient, au moins en partie, correspondre à des sédiments de la fin du Crétacé supérieur.

- Le Lutétien

Cette formation n'est visible qu'à l'Est et au Sud de Laval-Saint-Roman sous la forme de marnes blanchâtres surmontées de calcaires lacustres blancs.

- Le Bartonien

Les marnes rouges de cet étage, de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, n'affleurent que sur le flanc méridional du synclinal d'Issirac-Barjac.

- Le Ludien

Cette formation transgressive sur les terrains allant de l'Urgonien à l'Eocène, remplit le synclinal Est-Ouest de Barjac-Issirac. Elle s'enfonce à l'Ouest sous les dépôts oligocènes du fossé d'Alès. C'est une série d'une centaine de mètres de calcaires blancs micritiques, en petits bancs ou plaquettes, très fossilifères. Ces calcaires lacustres constituent un niveau aquifère notable. Ils passent latéralement au NE du fossé d'Alès (de Vagnas à Labastide de Virac) à des dépôts plus détritiques marnogréseux. On observe également un passage à des calcaires argileux dans le secteur d'Issirac. Ces derniers, s'ils semblent mal datés, doivent correspondre à un terme élevé dans la série lacustre à la limite du Ludien et du Stampien. Ces petits bancs dont la puissance totale oscille entre 30 et 60 m sont riches en matière organique et débris végétaux.

2 - 3.2. L'Oligocène

Il correspond à l'épaisse série du fossé d'effondrement d'Alès. Elle comporte une alternance de marnes, grès et poudingues.

2 - 3.3. Le Miocène

Il se limite à un seul lambeau d'Aquitaniens en bordure de la vallée du Rhône (NW de St-Marcel). Cette formation lacustre comprend des argiles et des calcaires.

2 - 3.4. Le Pliocène

Les argiles marines pliocènes (plaisanciennes) apparaissent le long de la vallée du Rhône (Saint-Martin-d'Ardèche, Trignan, Saint-Montan). Elles surmontent des argiles d'origine continentale qui n'affleurent pas. Cette série, d'une épaisseur de quelques dizaines de mètres en rive droite du Rhône, atteint plus de 200 m à l'Est de Pierrelatte, là où le surcreusement fini-miocène a été le plus important. Les dépôts de Sauze au débouché des gorges de l'Ardèche et à la cote de 60 m indiquent un creusement anté-pliocène quasi-défini-tif.

2 - 4. LE QUATERNAIRE

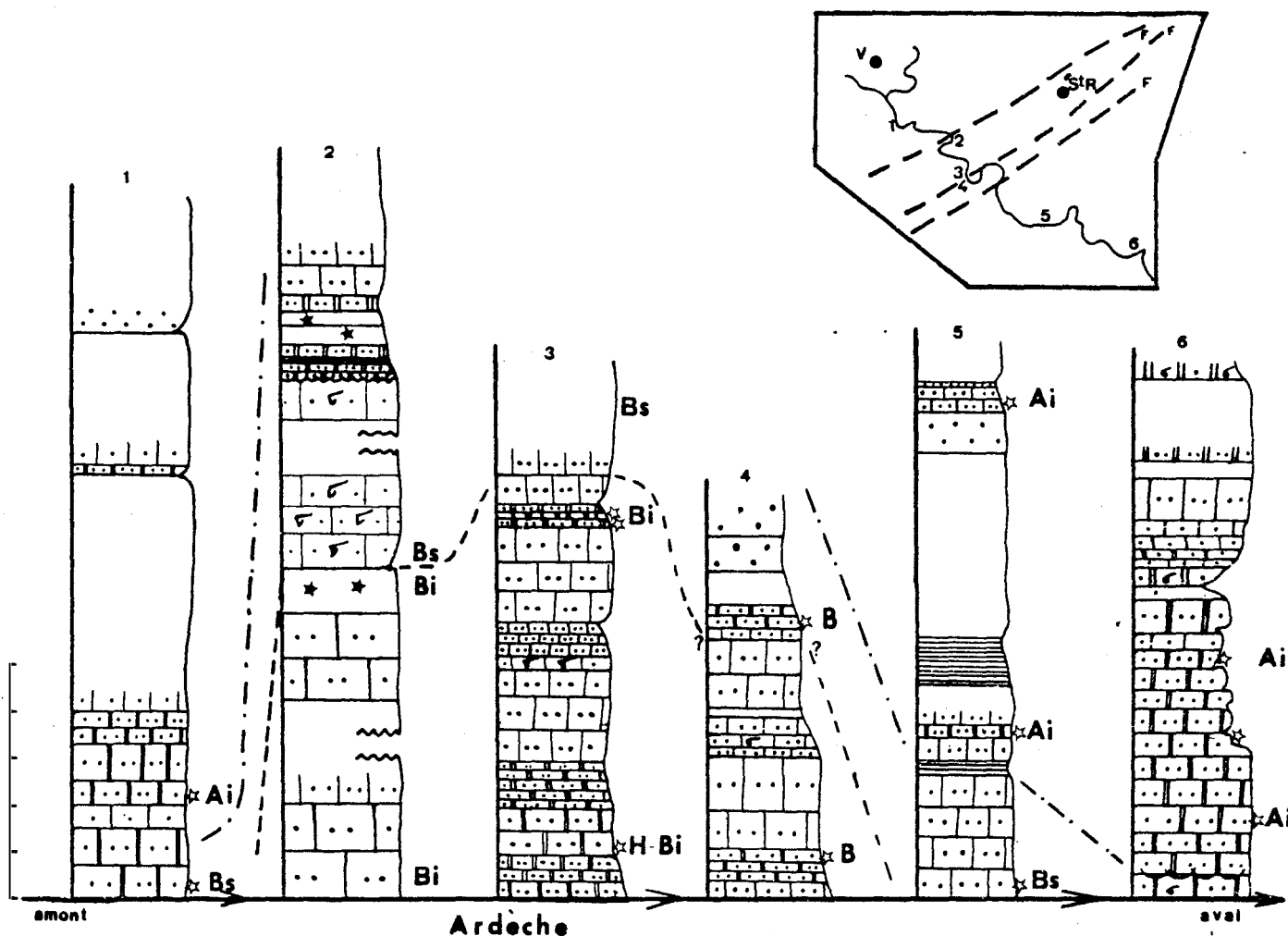
Ces dépôts sont situés, pour l'essentiel, en bordure de la vallée du Rhône. Les terrasses les plus anciennes, probablement villa-franconiennes, importantes à l'Ouest de St Marcel et de Bourg-Saint-Andéol, ont été déposées à des cotes élevées proches de la cote 150m. Ces cailloutis sont essentiellement constitués de quartzites rubéfiées. Des terrasses plus récentes, à l'âge mal défini, jalonnent la rive droite du Rhône. Elles sont le plus souvent tapissées par des loess et limons. Les plus hautes (Riss ?) affleurent à la cote de 70 m. Elles surmontent des terrasses dont la cote avoisine 50 m (wurm ?) qui dominent elles-mêmes les alluvions actuelles du Rhône (cote 45m).

3 - ÉTUDE DES CALCAIRES URGONIENS SUR LE TRACÉ DE L'ARDÈCHE

L'Ardèche entaille profondément la formation urgoniennne sur l'ensemble de son parcours des gorges. Peu de repères stratigraphiques sont observables au niveau de la rivière. La base de la formation n'apparaît ainsi furtivement qu'au niveau du vallon du Tiourre où elle est représentée par des assises calcaréo-marneuses du Barrémien basal. Le sommet de la série n'est également jamais traversé par la rivière. Il n'existe, d'autre part, pas de repères lithologiques aisément identifiables qui permettent à la fois de situer un horizon dans la série et de corrélérer différents points des gorges.

Pour le besoin de notre étude hydrogéologique, il était nécessaire de posséder quelques niveaux repères dans cette formation urgoniennne. C'est principalement au niveau de la rivière où se localise l'activité karstique que ces connaissances étaient utiles.

Nous avons donc levé six coupes grossières de la base des assises urgoniennes au niveau de l'Ardèche. Ces coupes sont échelonnées sur toute l'étendue des gorges (fig. 7). L'accès, souvent difficile en falaise, a interdit de nombreuses zones ou portions de coupes. Des prélèvements puis 2 à 3 lames minces par coupe ont été réalisés. La détermination des micro-organismes par A. ARNAUD-VANNEAU a fourni un âge approximatif de ces calcaires, fermement identifiés au niveau du sous-étage. Une corrélation a alors été tentée entre ces différentes coupes.



Localisation des coupes

- 1 LA CHAIRE
- 2 SERRE DE TOURRE
- 3 DENT NOIRE-HIRONDELLE
- 4 LA DRAGONNIERE
- 5 LA MADELEINE
- 6 SAINT-MARCEL

Lithologie

- Calcaire sparitique grossier
- Calcaire sparitique fin
- Calcaire micritique
- Zone non accessible
- Récifs
- Rudistes

Chronostratigraphie (détermination des microorganismes par A. Arnaud-Vanneau)

H	HAUTERIVIEN		
Bi	BARREMIEN inférieur	---	Limite Barrémien inférieur-Barremien supérieur
Bs	BARREMIEN supérieur		
B	BARREMIEN indifférencié	-.-.-	Limite Barrémien supérieur-Bédoulien
Ai	BEDOULIEN		

fig.7 : Essai de corrélation stratigraphique des calcaires urgoniens au niveau de l'Ardèche.

Plusieurs résultats découlent de cette rapide étude :

- L'Ardèche traverse successivement des niveaux d'âges différents. A l'entrée des gorges, elle rencontre des assises du sommet du Barrémien supérieur. Elle s'enfonce alors jusqu'au Barrémien basal, atteint à la confluence du Tiourre, puis à la Dent Noire. Elle remonte enfin dans la série pour recouper le Bédoulien à la sortie des gorges.

- Les changements lithologiques associés à la traversée de ces différents sous-étages sont faibles. Tout au moins, peut-on apercevoir une tendance plus forte au développement en petits bancs pour les termes les plus anciens correspondant au second quart du parcours des gorges.

- Des accidents plurikilométriques N50 jouent un rôle fondamental dans cette succession d'horizons. Ils font apparaître des terrains plus récents sur le compartiment Sud-Est effondré (voir cartouche de la figure 3). Le rejeu vertical semble atteindre pour chacun des 3 accidents repérés un minimum d'une centaine de mètres.

4 - LES UNITÉS GÉOLOGIQUES

L'examen de la carte structurale (fig. 8) a permis de dégager plusieurs unités géologiques. Son établissement a nécessité la mesure de nombreux pendages sur les deux rives de l'Ardèche. L'absence de repères stratigraphiques dans l'Urgonien (pour un non spécialiste) limite en effet la reconnaissance des structures. Aussi, seule la cartographie des mesures de pendage a permis de déceler l'anticlinal E-W du Bois de Ronze et de préciser l'axe du synclinal d'Issirac-Barjac. En rive gauche, l'axe de l'anticlinal de St-Remèze a été tracé à partir d'une étude stratigraphique fine du Barrémien inférieur (D. LAFARGE, 1978). Des coupes géologiques ont été réalisées. Elles sont repérables sur la carte de localisation (fig. 9). On peut observer du Nord au Sud :

- Le bombement anticlinal de St-Remèze, d'axe E-W dévié NE-SW, au sein duquel les terrains hauteriviens affleurent. La dénomination de bombement est liée à la divergence des pendages de toutes parts. La coupe 1 (fig. 10) correspond au bombement de St-Remèze et à sa retombée occidentale. L'ensemble est fracturé par un réseau de failles NE-SW. A l'Ouest, les terrains aptiens marneux et turoniens recouvrent l'Urgonien au niveau d'une flexure.

- L'anticlinal urgonien du Bois de Ronze, d'axe environ N100, est limité à l'Ouest par la "bande faillée de St-Remèze" qui dirige alors les structures. A l'Est, une terminaison périclinale laisse la place à une structure monoclinale pentée vers la vallée du Rhône.

- Le synclinal d'Issirac, à armature urgonienne, s'étend d'Orgnac-l'Aven aux gorges de la Cèze. Les formations ludiennes cachètent directement l'Urgonien à l'Ouest. A l'Est, elles recouvrent les formations aptiennes, albiennes ou éocènes.

Deux coupes de l'Ardèche à la Cèze (coupes 2 et 3, fig. 11 et 12) illustrent ces deux types d'agencement. Les contours des formations aptiennes et éocènes sont inconnus à l'Ouest car masqués par les calcaires ludiens. Cette question est d'importance puisqu'elle conditionne l'alimentation des calcaires urgoniens par ces derniers.

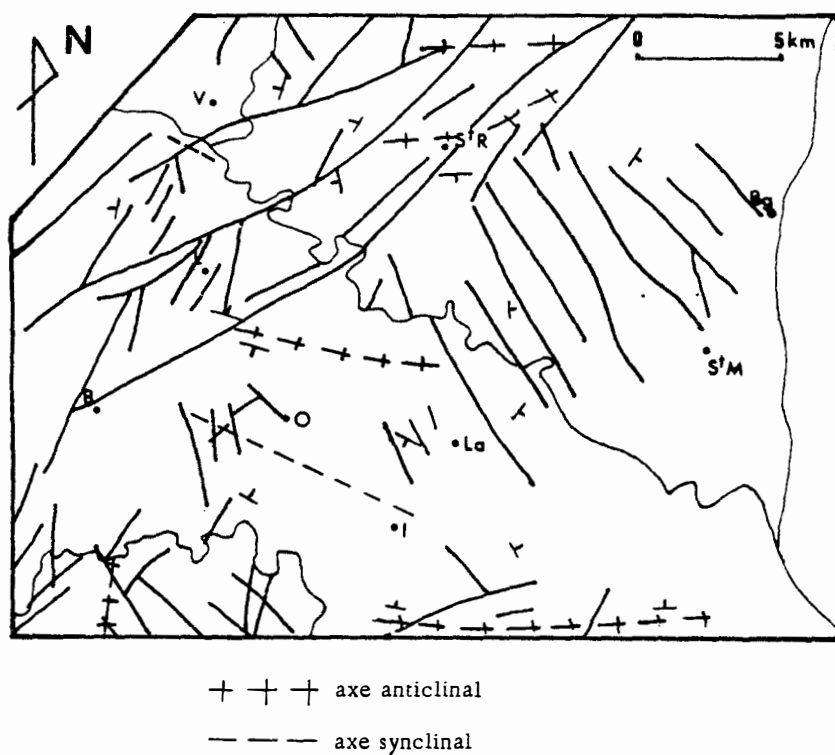


fig. 8 : Carte structurale du plateau des Gras

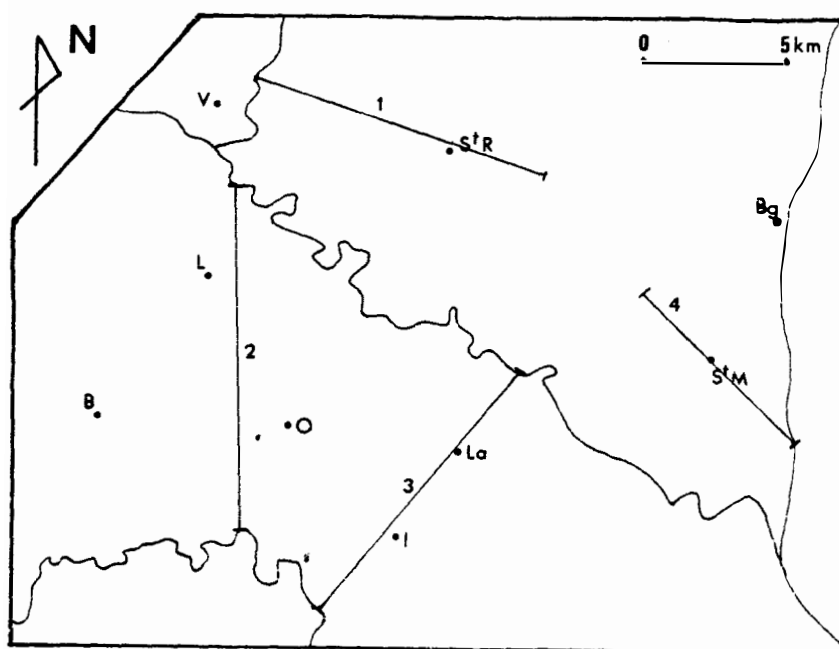


fig. 9 : Carte de localisation des coupes géologiques

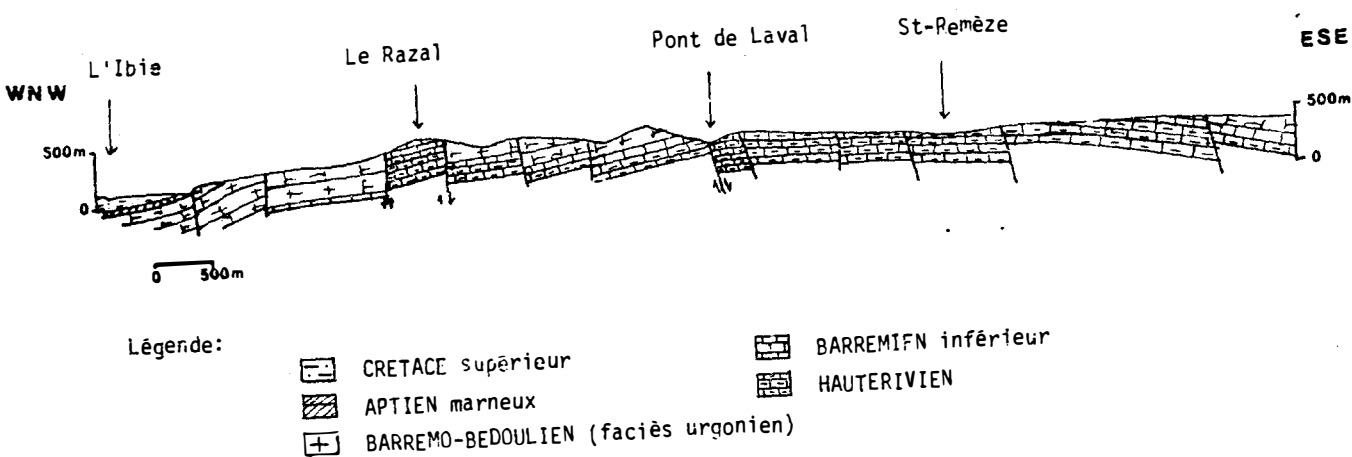


fig. 10: Coupe géologique WNW-ESE de la bordure occidentale du plateau de Saint-Remèze. (Coupe 1)

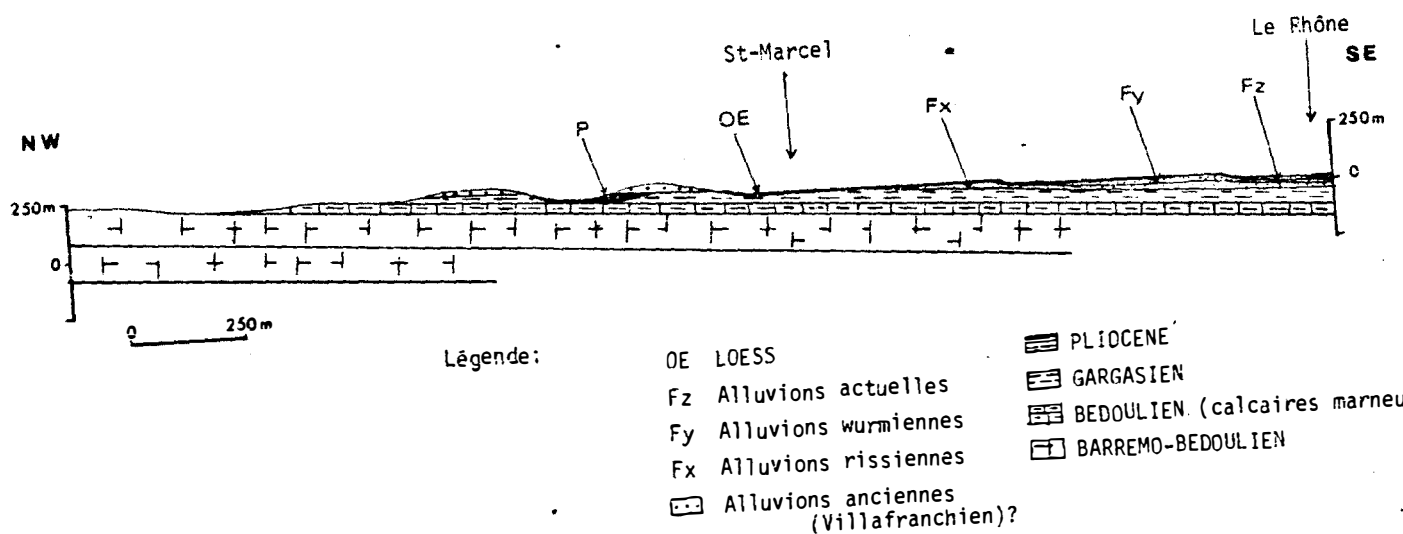


fig. 13: Coupe 4 : Coupe géologique schématisée de la bordure orientale du plateau de Saint-Remèze.

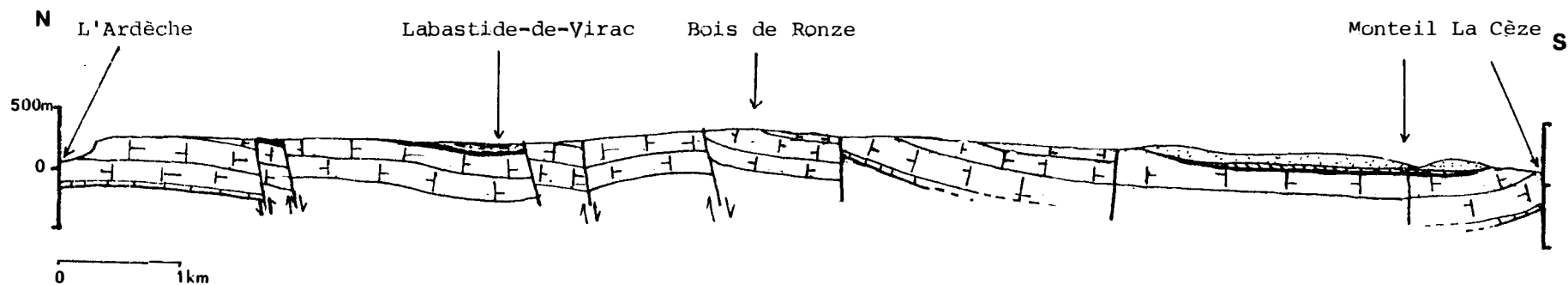
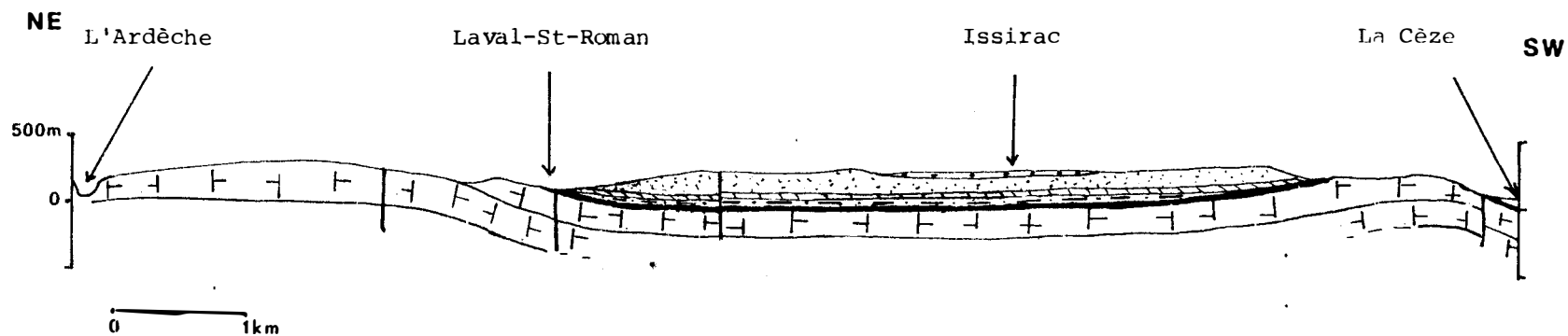


fig.11 : Coupe2: Coupe géologique méridienne du plateau d'Orgnac.



Légende:

Calcaires argileux d'Issirac (Ludien?)	Eocène moyen	Aptien
Ludien	Albien	Barrémo-Bédoulien

fig.12 : Coupe 3 : Coupe géologique NNE-SSW à l'Est du plateau d'Orgnac.

Le bassin d'Alès et la vallée du Rhône limitent ces unités respectivement à l'Ouest et à l'Est.

- La terminaison septentrionale du bassin d'Alès laisse apparaître d'importantes formations détritiques oligocènes surmontant les calcaires ludiens. Cet ensemble repose sur le Crétacé supérieur (Salavas) ou sur l'Urgonien plus au Sud. La bande ludienne Barjac-Issirac constitue un appendice du fossé d'Alès, elle occupe la dépression du synclinal.

- Sur la bordure orientale, les formations urgoniennes et aptiennes qui plongent vers la vallée du Rhône, sont recouvertes par des formations quaternaires. La coupe 4 (fig. 13) schématisée, décrit ces types de contact. Les formations marneuses aptiennes ne semblent pas permettre, en l'absence de structure favorable, une alimentation directe des calcaires urgoniens vers les terrasses quaternaires.

Le plateau urgonien, monoclinal et monotone, tel qu'il peut être déduit de l'observation de la carte géologique au 1/80 000ème de la feuille Orange, paraît en fait beaucoup plus structuré. Les circulations aquifères, loin de se faire arbitrairement, vont être guidées par ces structures.

CHAPITRE II

TECTONIQUE ET FRACTURATION

1 - CONTEXTE STRUCTURAL RÉGIONAL

2 - HISTOIRE TECTONIQUE

3 - ÉTUDE DE LA FRACTURATION DU PLATEAU DES GRAS

TECTONIQUE ET FRACTURATION

Les circulations d'eau dans les massifs rocheux se font essentiellement le long de tous les plans de discontinuité de la roche, d'où la dénomination de milieux fissurés.

La connaissance de l'état de fissuration du massif (répartition, nature, remplissage des fissures, ...) revêt donc une importance primordiale pour la compréhension des écoulements.

L'étude fine des problèmes de fracturation fera suite à une présentation des structures régionales et de leur mise en place.

1 - CONTEXTE STRUCTURAL RÉGIONAL

L'essentiel du paysage structural du Bas-Vivarais calcaire est guidé par les accidents régionaux NE-SW à NNE-SSW. Ces mégafractures, reprenant une direction du socle hercynien, relie par de multiples failles successives le Languedoc aux massifs subalpins des Alpes du Nord. On les regroupera sous le nom d'accidents cévenols au sens large.

Chronologiquement, ces accidents ont tout d'abord commandé la sédimentation durant le Mésozoïque jouant alors en failles ou en flexures contrôlant la subsidence vers le Sud-Est. Ceci est vérifié au moins localement au Dogger (S. ELMI, 1967), à l'Oxfordien (J.P. BOURSEAU et S. ELMI, 1980) et régionalement pour l'Urgonien semble-t-il (A. ARNAUD et al., 1979) : les limites de faciès s'alignent en effet selon la direction cévenole, que ce soit sur les plateaux de la rive droite du Rhône (Ardèche, Gard) ou dans les massifs subalpins septentrionaux (Vercors, Chartreuse). Les sondages profonds confirment l'augmentation d'épaisseur de la série mésozoïque du NW au SE (J. DEBELMAS, 1974). Ces accidents ont joué en décrochement durant les dernières phases de compression horizontale : décrochement sénestre pour la phase pyrénéo-provençale, dextre pour la phase alpine. Ces décrochements ont encaissé les déformations de telle sorte que les plissements sont de faible importance. De nombreuses failles associées ont par contre été induites ou ont rejouées. Le plateau des Grés a donc une allure relativement monoclinale et présente une fracturation importante.

Lors de la phase de distension oligocène, ces accidents ont connu un rejeu en faille normale particulièrement marqué. Son paroxysme est atteint au niveau de la faille des Cévennes (au sens strict), où un véritable fossé d'effondrement, le bassin d'Alès, prend naissance. La terminaison septentrionale de ce bassin constitue la limite occidentale de notre zone d'étude.

A l'échelle du Sud-Est de la France (fig. 14), l'accident cévenol revêt une importance particulière. Son jeu décrochant sénestre durant la phase pyrénéenne s'accompagne d'un déplacement de grande ampleur du compartiment oriental, tout au moins en ce qui concerne la couverture (F. ARTAUD et M. SEGURET, 1981).

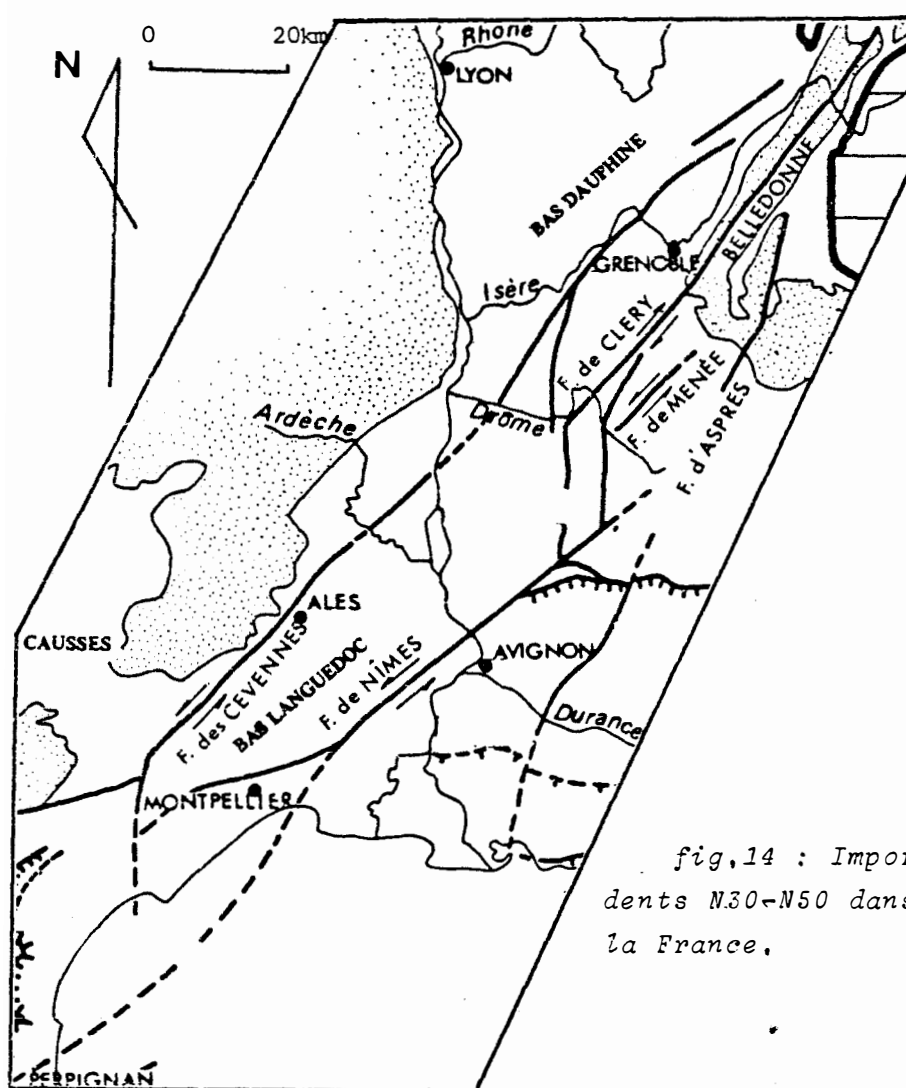
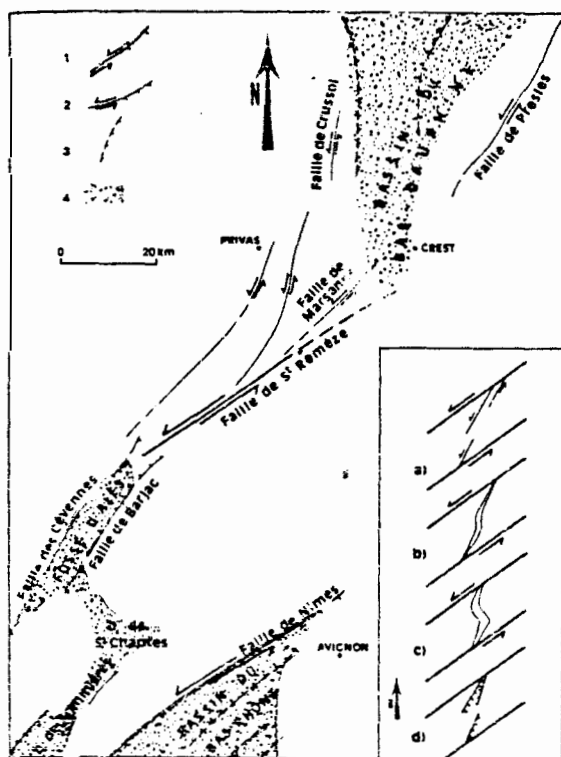


fig.14 : Importance des accidents N30-N50 dans le Sud-Est de la France.



1 : voies de coulisements principales, 2 : décrochements de second ordre (pour 1 et 2, les barbelures indiquent le rejeu en faille normale postérieur au jeu décrochant). 3 : failles masquées des fossés de Valence et du Bas-Rhône (d'après J. Gagnel, 1948 et la carte géologique Nîmes à 1/50 000). 4 : Oligocène des fossés du Bas-Dauphiné, d'Als et du Bas-Rhône.

Dans le cartouche : représentation schématique de l'évolution du fossé d'Als. a : début du coulisement, b et c : ouverture et torsion sigmoïde, d : effondrement du fossé.

fig.15 : Voies de coulisement senestres régionales et association spatiale des grands fossés oligocènes in BERGERAT, 1981.

Son rôle est déterminant dans l'édification des structures de l'avant-pays alpin et des massifs subalpins septentrionaux. On peut le considérer comme une famille d'accidents, homogène sur tout son parcours. Pour F. BERGERAT (1981), la faille de St-Remèze, de direction Nord 50 et son homologue méridionale la faille de Nîmes ont joué un rôle privilégié dans l'ébauche des structures de cette région. Cet auteur voulait résoudre, à partir d'une étude tectonique et microtectonique des rives de la vallée du Rhône, le problème de la rupture de l'alignement Nord-Sud des fossés d'effondrement oligocènes du fossé du Rhin au fossé du Bas-Rhône.

" L'hiatus des phénomènes distensifs" au niveau de Montélimar est comblé à l'Ouest par le chapelet des bassins d'effondrement d'Alès-St-Chaptes - Sommières, dont l'allure sigmoïde serait induite par un décrochement senestre (voir fig. 15). Les 2 failles, de direction Nord 50, auraient créé durant la phase pyrénéenne un couloir de cisaillement à jeu senestre responsable de cet agencement. Lors d'un changement de l'état de contrainte, les failles annexes de Riedel (dont la faille des Cévennes s.s.) ont cessé de jouer en décrochement pour jouer en faille normale. Le jeu décrochant principal se maintenant, les accidents annexes ont subi une torsion durant leur affaissement. A l'Oligocène, lors de la distension générale, les fossés d'effondrement s'individualisent et en particulier sur cette structure. La faille de St-Remèze et son homologue constituent donc pour l'auteur des failles transformantes continentales par rapport au rift Ouest-Européen Nord-Sud qui relie la Baltique au bassin du Bas-Rhône.

Le rôle majeur de cet accident ayant été souligné, nous allons évoquer la mise en place des différents éléments structuraux.

2 - HISTOIRE TECTONIQUE

L'étude de la tectonique cassante et de la microtectonique qui lui est associée permet d'établir une chronologie relative entre différentes phases tectoniques et de déterminer les contraintes qui les induisent. Les arguments géologiques locaux ou régionaux permettent la datation plus ou moins fine de ces épisodes. Nous nous appuyerons sur les travaux de R. GUERIN (1973) sur le Bas-Vivarais calcaire, confortés par les travaux plus régionaux de F. BERGERAT sur la vallée du Rhône.

Il existe peu d'indices de phases tectoniques anté-éocènes. On peut toutefois signaler des phases de distension durant le Jurassique et le Crétacé, responsables d'une sédimentation différentielle du NW au SE. Dans la région de Laval - St-Roman, une discordance angulaire des calcaires lacustres lutétiens sur des termes urgoniens à albiens pourrait laisser apparaître une phase de compression horizontale de contrainte nord-sud (R. GUERIN, 1973). Cette discordance pourrait correspondre par exemple à la discordance du Crétacé supérieur du Dévoluy. L'hypothèse de mouvements épirogéniques doit également être retenue.

- La phase pyrénéenne

A l'Eocène supérieur, une phase de compression horizontale nord-sud s'installe. La déformation, largement absorbée par le décrochement sénestre de la faille cévenole, n'a produit que des plis est-cuest à grand rayon de courbure. Le synclinal d'Issirac, en rive droite de l'Ardèche, est le dernier pli septentrional est-ouest bien marqué. En rive gauche de l'Ardèche, D. LAFARGE (1979) a toutefois mis en évidence une succession de plis grossièrement est-ouest, grâce à une fine étude stratigraphique du Crétacé inférieur. Ce sont, du Sud au Nord, l'anticlinal de St-Remèze d'axe N80 rapidement dévié en Nord 30 au voisinage de la faille de St-Remèze, le synclinal des Gras et l'anticlinal de St-Vincent.

Des décrochements sénestres NE-SW et dextres NW-SE, ainsi que des failles inverses E-W, sont associés à cet épisode.

- La distension oligocène

Cette phase, d'axe d'allongement principal grossièrement N110, est particulièrement marquée le long des accidents cévenols NE-SW à NNE-SSW. La formation du fossé d'Alès en est le résultat le plus visible. Une sédimentation de pied de faille active souligne le jeu normal de la faille des Cévennes durant toute la période de comblement. A l'extrémité nord du fossé d'Alès (Vallon-Pont-d'Arc), des flexures et basculements de couches font plonger les terrains urgoniens vers la zone affaissée. Le rejeu normal de la faille de St-Remèze est également important. L'abaissement du compartiment sud-est a pu être évalué à plus d'une centaine de mètres par comparaison entre les différents faciès (D. LAFARGE, 1979 et ch. I & 3). Les failles antithétiques délimitent des coins tectoniques de Turonien effondrés (Larnas, Ruisseau de Pisseveille).

Cette distension a pu débuter dès le Ludien : les calcaires blancs de Barjac sont affectés de failles normales synsédimentaires; elle s'est prolongée durant l'Oligocène et a touché l'Aquitainien (Larnas, St-Montan).

- La phase alpine

Cette phase de compression horizontale est-ouest qui débute au Miocène terminal s'est principalement répercutée sur les décrochements NE-SW et NW-SE à jeu respectif dextre et sénestre. Quelques plis d'axe nord-sud d'amplitude décamétrique signalent cette phase.

- Une phase de distension subméridienne semble expliquer les failles normales N 90 à N 120. Elle pourrait être contemporaine des émanations volcaniques des Coirons (F. BERGERAT, 1981).

3 - ÉTUDE DE LA FRACTURATION DU PLATEAU DES GRAS

Les grandes structures que nous venons d'évoquer sont susceptibles de constituer des conditions aux limites pour les écoulements aquifères. A plus petite échelle, une étude de la fracturation va permettre d'approcher la connaissance de l'agencement fissural du massif dont dépend l'hydrogéologie.

3 - 1. LES METHODES UTILISEES

L'étude de la fracturation a été menée à partir de deux méthodes complémentaires :

- L'étude photogéologique réalisée à partir de clichés IGN noir et blanc à l'échelle voisine du 1/30 000ème, permet d'une part de tracer les grands accidents qui affectent le massif, d'autre part de raisonner statistiquement sur les directions des fractures. Une carte photo-interprétative de la fracturation a donc été levée à l'échelle du 1/30 000ème.

Des histogrammes de direction, au pas de 10% en pourcentage du nombre de fractures de la zone retenue ou de la longueur cumulée de celles-ci, traduisent les directions préférentielles de la fracturation.

- Les mesures de terrain réalisées à une échelle métrique à décimétrique complètent ce tableau de la fracturation. N'ayant pas, personnellement, effectué suffisamment de mesures pour une utilisation statistique, nous nous appuyerons sur les nombreuses mesures de R. GUERIN. Dans un souci de comparaison, nous utiliserons des histogrammes de direction en pourcentage du nombre de fractures, dressées en différentes zones du plateau. Chaque histogramme correspond à l'addition de plusieurs stations voisines de manière à raisonner sur des directions représentatives.

3 - 2. L'ETUDE PHOTOGEOLOGIQUE

L'utilisation de cette méthode appelle plusieurs remarques dans le cadre de notre étude :

- Les alignements morphostructuraux repérés sur les photos aériennes correspondent à l'intersection du plan de faille et de la surface topographique.

Il s'agit donc bien de la direction de la faille en zone tabulaire comme sur les plateaux de l'Ardèche. Des erreurs de plusieurs degrés peuvent par contre être faites au niveau des gorges de l'Ardèche, du fait de la topographie mouvementée.

- Le recouvrement végétal, très irrégulier, diminue arbitrairement la densité de fracturation de certaines zones en milieu boisé. Le Bois de Ronze, en rive droite de l'Ardèche, est particulièrement insondable. A l'opposé, le territoire de la commune de Bidon où les calcaires affleurent sur de très grandes surfaces dénudées, délivre de nombreuses traces d'accidents. Selon la zone étudiée, la finesse de l'analyse en sera affectée.

3 - 2.1. La carte de fracturation (fig. 16)

Pour respecter l'esprit statistique de la méthode, seules les portions visibles des fractures ont été dessinées, à l'exclusion des parties probables ou hypothétiques.



*fig. 16 : Carte photointerprétative
de la fracturation du plateau des Gras*

Cette carte souligne l'aspect de la "faille de St-Remèze" : large bande de près de cinq kilomètres au niveau des gorges, où de nombreux accidents se relaient latéralement. A l'Est, s'individualise une autre zone structurale où les accidents plurikilométriques de direction Nord 140 sont majoritaires. Ces accidents sont réfractés en Nord 160 au voisinage de la "faille de St-Remèze".

3 - 2.2. Les histogrammes de direction (fig. 17 et 18)

La grande étendue du massif et l'importance relative des familles de fractures d'un point à un autre ont nécessité l'individualisation de plusieurs zones, au sein desquelles ont été construits les histogrammes. Plusieurs éléments ont guidé ce découpage :

- Les mégafractures peuvent séparer deux zones structurales ou diviser arbitrairement une zone homogène trop étendue ou à variation peu sensible. Ainsi, la zone 1 et la zone 7 se trouvent à l'Ouest de l'accident Nord 50 le plus occidental. La zone 2 est située au sein de la bande faillée de St-Remèze. Les zones 4 et 5 sont séparées par un accident Nord 140 plurikilométrique.

- Le découpage en unités hydrogéologiques cohérentes a commandé les autres limites. Ainsi, l'Ardèche qui constitue le niveau de base du plateau individualise les zones nord et sud où les préoccupations hydrogéologiques sont différentes. La zone 3, qui correspond à une zone de transition entre deux zones structurales, est isolée car elle recoupe le bassin versant potentiel de grands réseaux karstiques (Richemalle-Midroï, Guigonne).

En rive droite, le recouvrement végétal ne laisse apparaître parfois que trop peu d'accidents pour construire des histogrammes représentatifs. Seules les zones ouest et est sont différenciées, la partie centrale se rapprochant de la zone 2.

Certaines directions restent présentes sur l'ensemble du massif dans des proportions variables.

- La direction Nord 50-60, très inégalement représentée, devient prépondérante dans la zone de passage de la faille de St-Remèze.
- La famille Nord-Sud variant de Nord 160 à N 10 selon les zones est régulièrement observée.
- La direction Nord 140, dominante dans la partie orientale du massif, est toujours présente.
- La direction N 110 reste discrète mais homogène sur l'ensemble du massif.

Signalons quelques particularités propres à chaque zone :

- La zone 1 voit l'amorce de la famille N 30-40 beaucoup plus visible au Nord de la zone étudiée dans la région de Lagorce.

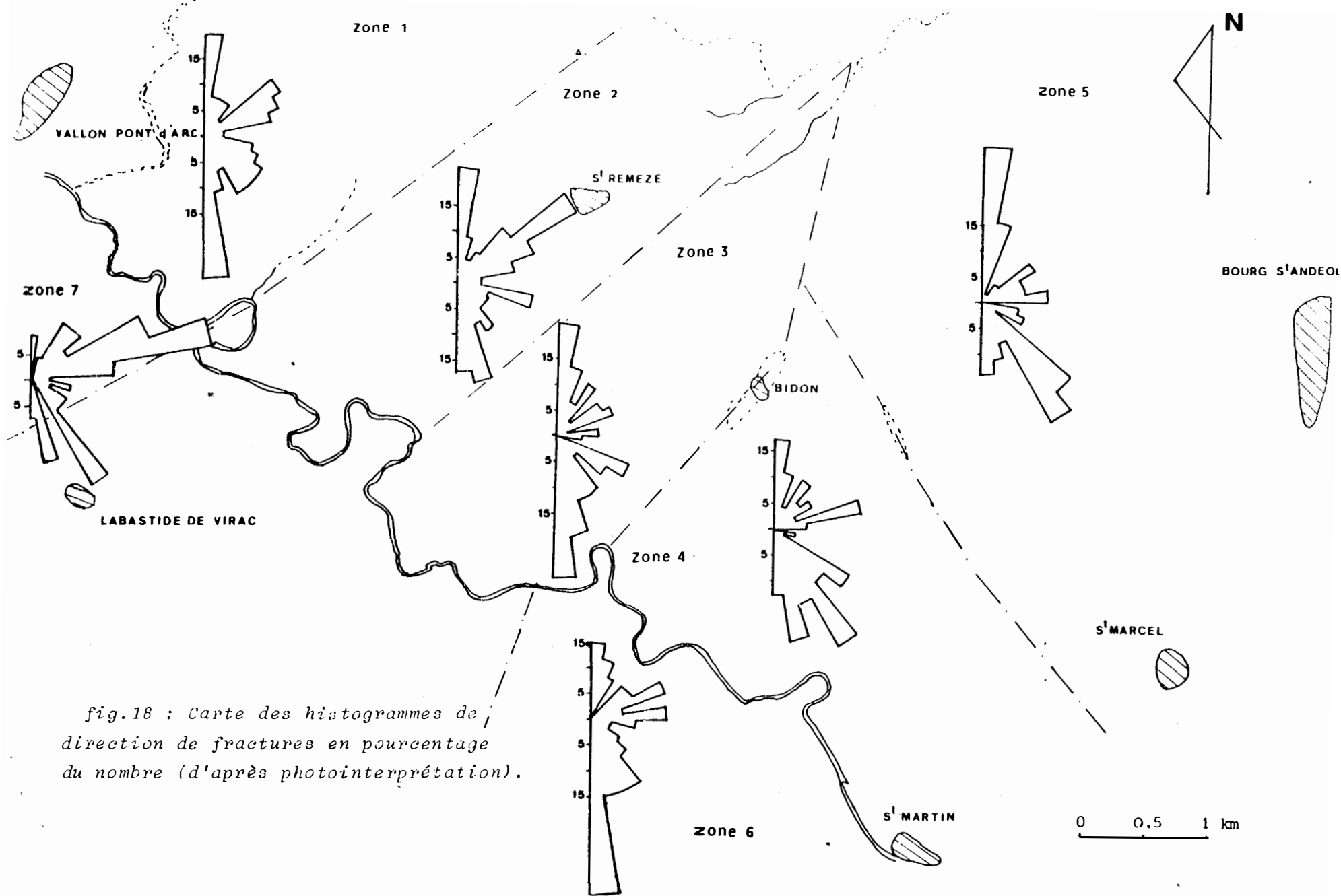


fig.18 : Carte des histogrammes de direction de fractures en pourcentage du nombre (d'après photointerprétation).

La zone 3 est une zone charnière entre deux zones dont les directions prépondérantes sont respectivement Nord 50 et Nord 140. Ce passage voit l'éclosion de la famille subméridienne N 170 N 10.

Les réfractions des accidents Nord 140 laissent apparaître un faisceau de direction N 140 à N 170 très étendu dans la zone 4. Il est beaucoup plus fin: Nord 130 à 150 dans la zone 5 où une famille est-ouest s'individualise.

3 - 3. ANALYSE DE TERRAIN

Nous utiliserons les données très complètes de R. GUERIN. Les histogrammes de direction en nombre de fractures de la figure 19 ont été tracés à partir de plusieurs stations de 10 mètres de longueur, à l'intérieur desquelles toutes les fractures ont été comptabilisées. Chaque histogramme recouvre une petite surface et correspond à un cliché de la fracturation dans une partie du massif. Cette approche est indispensable pour déterminer, d'une part que toutes les familles sont présentes à cette échelle, d'autre part, pour définir par une étude qualitative la chronologie relative et par là même la cinématique des différents épisodes tectoniques.

L'observation des histogrammes du nombre de fractures appelle plusieurs remarques :

- Si toutes les principales familles de fractures sont représentées globalement, seules deux à trois directions s'affirment localement (sur 200 à 300 fractures).

- Certaines directions peuvent être valorisées par rapport à la photo-interprétation. Ainsi, la direction Nord 90 - Nord 110 est omniprésente sur les histogrammes des zones de la vallée de l'Ibie, du cirque de la Madeleine, d'Ornac : c'est-à-dire en dehors de la faille de St-Remèze. En photo aérienne, cette direction discrète recouvrirait de nombreuses failles de petite dimension à l'exclusion de grands accidents.

- Au sein de la bande faillée de St-Remèze, les histogrammes demeurent similaires (stations du Pont d'Arc, Rimouren, Labastide-de-Virac). Deux directions s'individualisent : N 50-70 et N 130-N 150.

- La direction Nord 10 - Nord 30 est nettement affirmée, particulièrement en dehors de la bande Nord 50. Il est à noter que ces failles associées aux accidents Nord 50 sont remplacées par des directions subméridiennes dans l'étude photo-aérienne. Nous ne pouvons expliquer cette rotation entre deux directions à signification proche.

L'étude microtectonique permet de déterminer les directions principales de déformation qui correspondent à celles des fentes d'extension. Il apparaît que les accidents plurikilométriques les modifient localement. Ainsi, la direction principale de rapprochement pyrénéenne globalement nord-sud devient Nord 170 au voisinage des accidents N 50 et Nord 10 près des accidents Nord 140. Ceci explique les variations d'histogrammes selon les zones étudiées. On peut toutefois schématiquement distinguer :

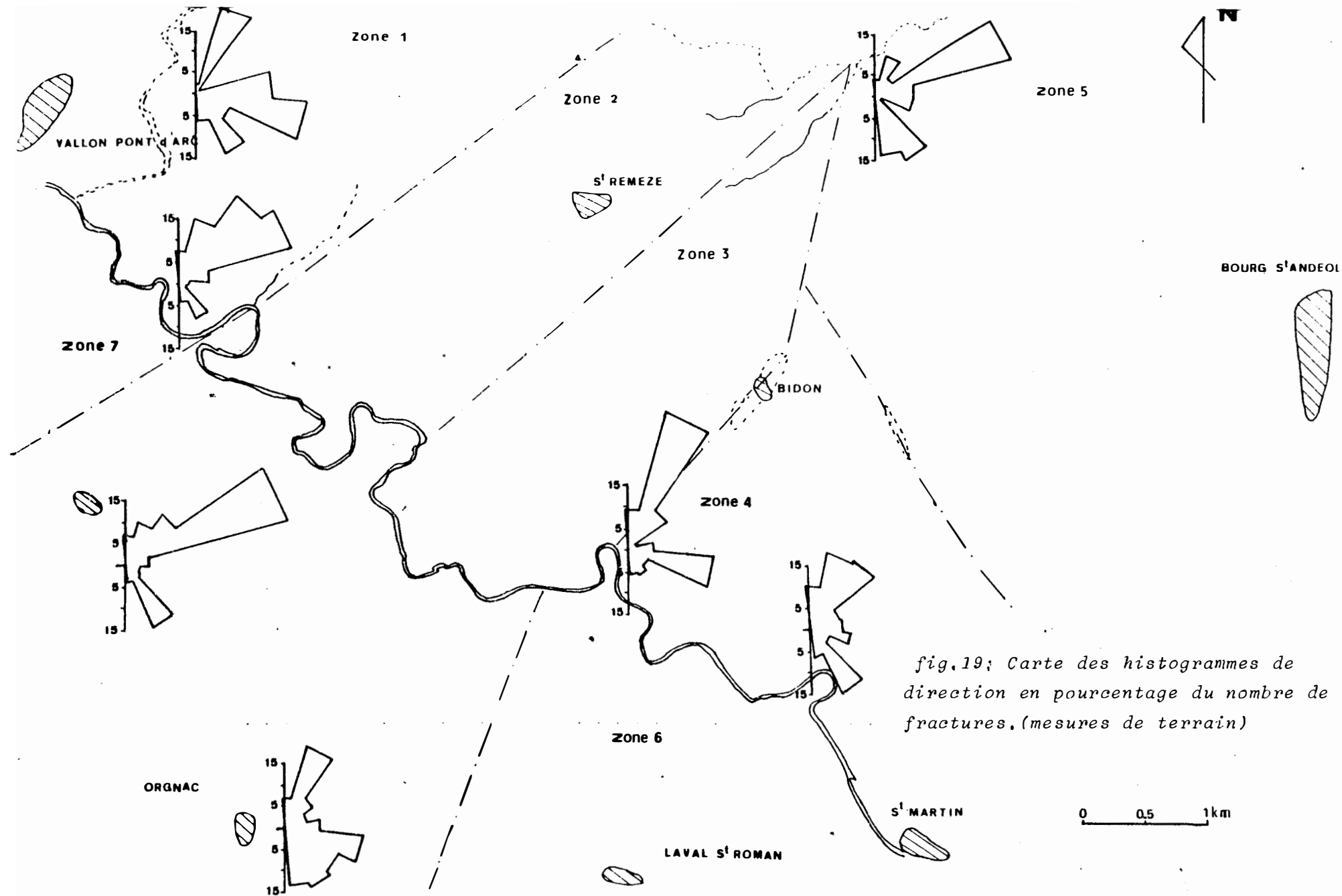


fig.19; Carte des histogrammes de direction en pourcentage du nombre de fractures. (mesures de terrain)

. des failles Nord 50 plurikilométriques, généralement fortement pentées vers le Sud-Est, où trois jeux de stries peuvent se superposer: senestre pyrénéen, normal oligocène et dextre alpin. Les failles primitivement peu pentues ont joué en failles inverses lors de la phase pyrénéenne et en faille normale lors de la phase alpine ;

. des failles Nord 140. Elles ont subi une histoire comparable au sens de direction des mouvements près. Ces deux familles d'accidents sont jalonnées localement par d'épais filons de calcite ;

. des failles Nord 90 - Nord 110. Elles ont joué en failles inverses lors de la phase pyrénéenne au sein de la bande de St-Rémèze; en failles normales lors de la distension oligocène et en décrochement écartement durant la phase alpine. Ces accidents présentent le plus grand degré d'ouverture parmi les failles rencontrées ;

. des failles N 170 à N 30 ont joué en décrochement senestre durant la phase pyrénéenne, en faille normale durant la distension oligocène. Ces accidents sont particulièrement fermés à l'affleurement.

3 - 4. CONCLUSION

On observe une bonne correspondance entre les états de fracturation déduits de l'étude photo-interprétative et de l'analyse de terrain. Deux familles de grandes mégafractures très inégalement réparties sur l'ensemble du massif deviennent prépondérantes dans certaines zones : la direction N 50 - N 60 dans la zone centrale, la direction N 140 - N 150 dans la zone orientale. Elles structurent ainsi l'ensemble du plateau de l'Ardèche.

Deux familles beaucoup plus régulièrement présentes, regroupant des accidents de plus faible ampleur, très individualisées sur le terrain, dont les directions sont N 170 - N 20 et N 90 - N 120, complètent les mailles précédemment découpées.

Le jeu en décrochement sénestre des accidents N 50 lors de la phase pyrénéenne paraît prépondérant dans l'édification de l'état de fracturation actuel. Cet état est parfaitement modélisé par le schéma classique des fractures liées à une zone de décrochement (voir fig. 20).

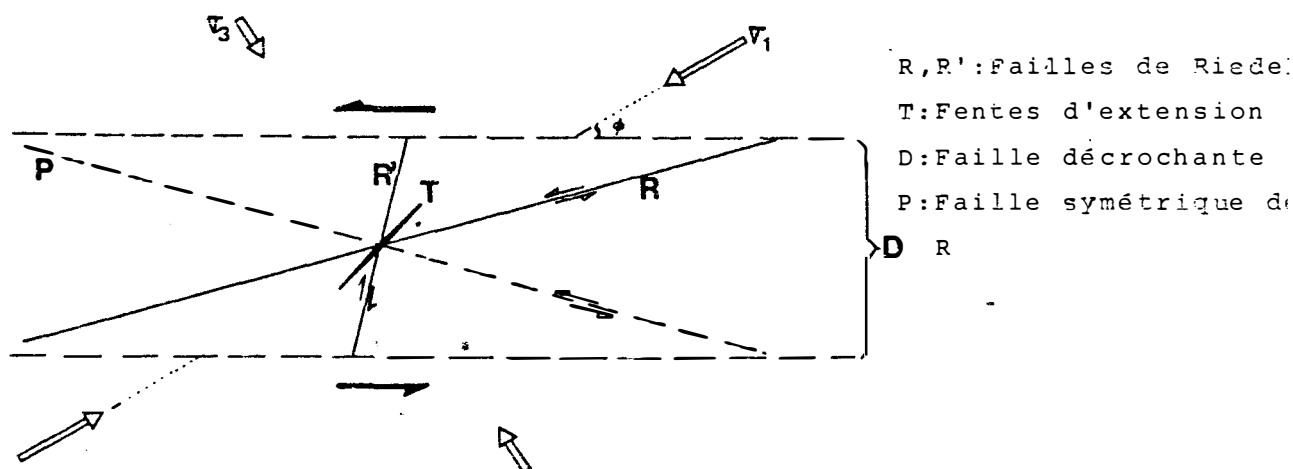


fig. 20 : Fracturation induite par un cisaillement sénestre.

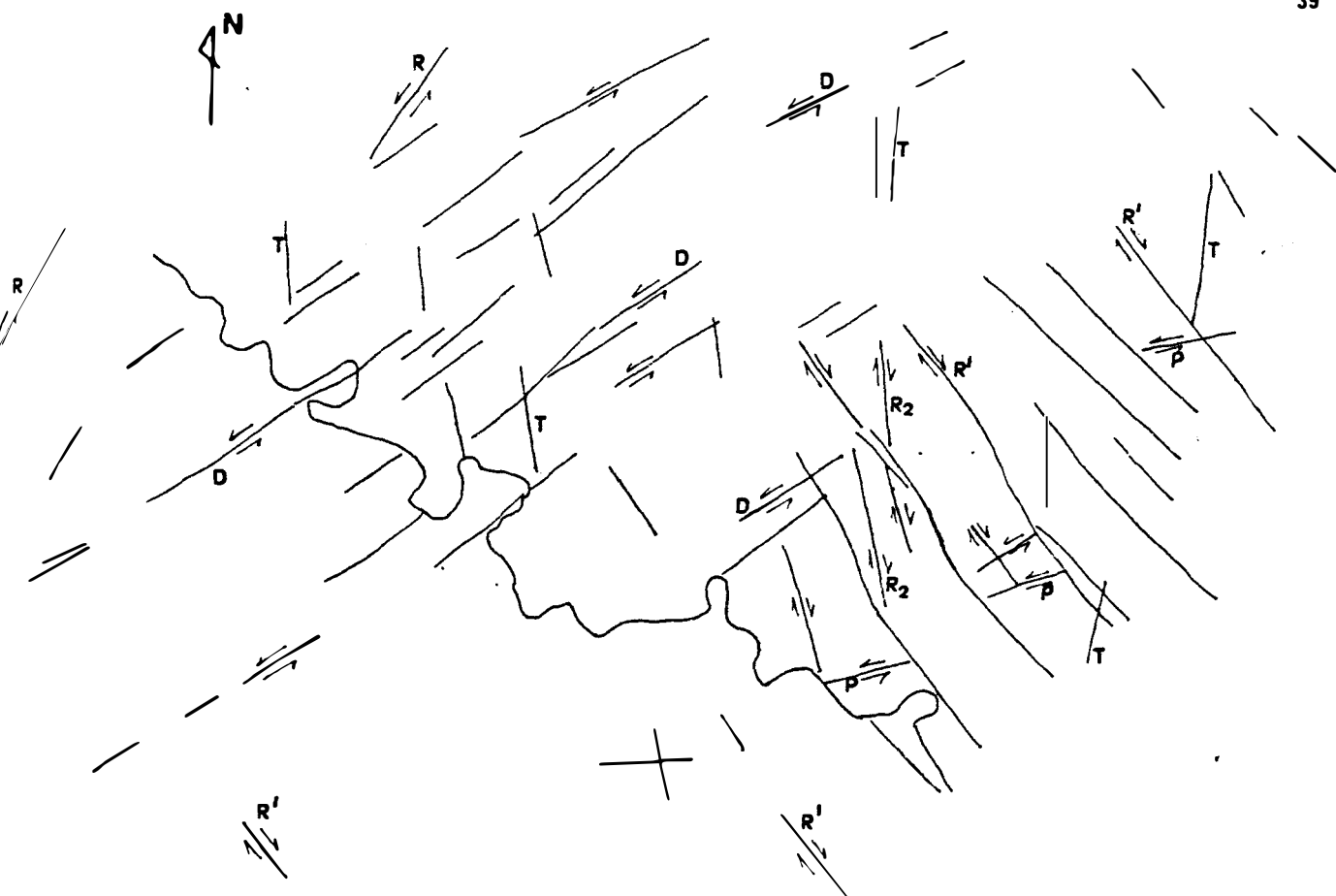
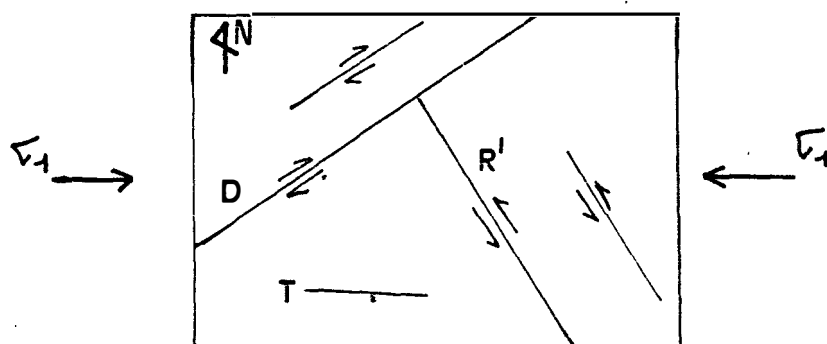


fig.21 : Schéma interprétatif de la fracturation induite par la phase pyrénéenne.

fig.22 : Schéma de la fracturation induite par la phase alpine.



Chaque famille correspond aux failles synthétiques R ou P, aux failles antithétiques R', aux fentes d'extension T (voir fig.21). Les deux phases postérieures vont réutiliser ces directions. Lors de la phase alpine, les sens de décrochement vont s'inverser, les accidents est-ouest vont avoir tendance à s'ouvrir en fentes d'extension, les accidents nord-sud à se refermer sous la compression est-ouest (fig. 22).

Un contexte similaire rapproche ces résultats d'études effectuées dans les Alpes du Nord (GOURGAND, 1983)... Les mêmes familles sont présentes du fait du jeu pyrénéen sénestre N 50 de grands accidents.

CHAPITRE 3

RELATIONS ENTRE GEOLOGIE, FRACTURATION ET ECOULEMENTS

- 1 - GÉOMORPHOLOGIE KARSTIQUE
- 2 - NATURE ET RÉPARTITION DES ÉMERGENCES
- 3 - HISTOIRE DE LA KARSTIFICATION
- 4 - CONSÉQUENCES HYDROGÉOLOGIQUES DE LA COMPARAISON DES
DONNÉES GÉOLOGIQUES, STRUCTURALES ET KARSTOLOGIQUES

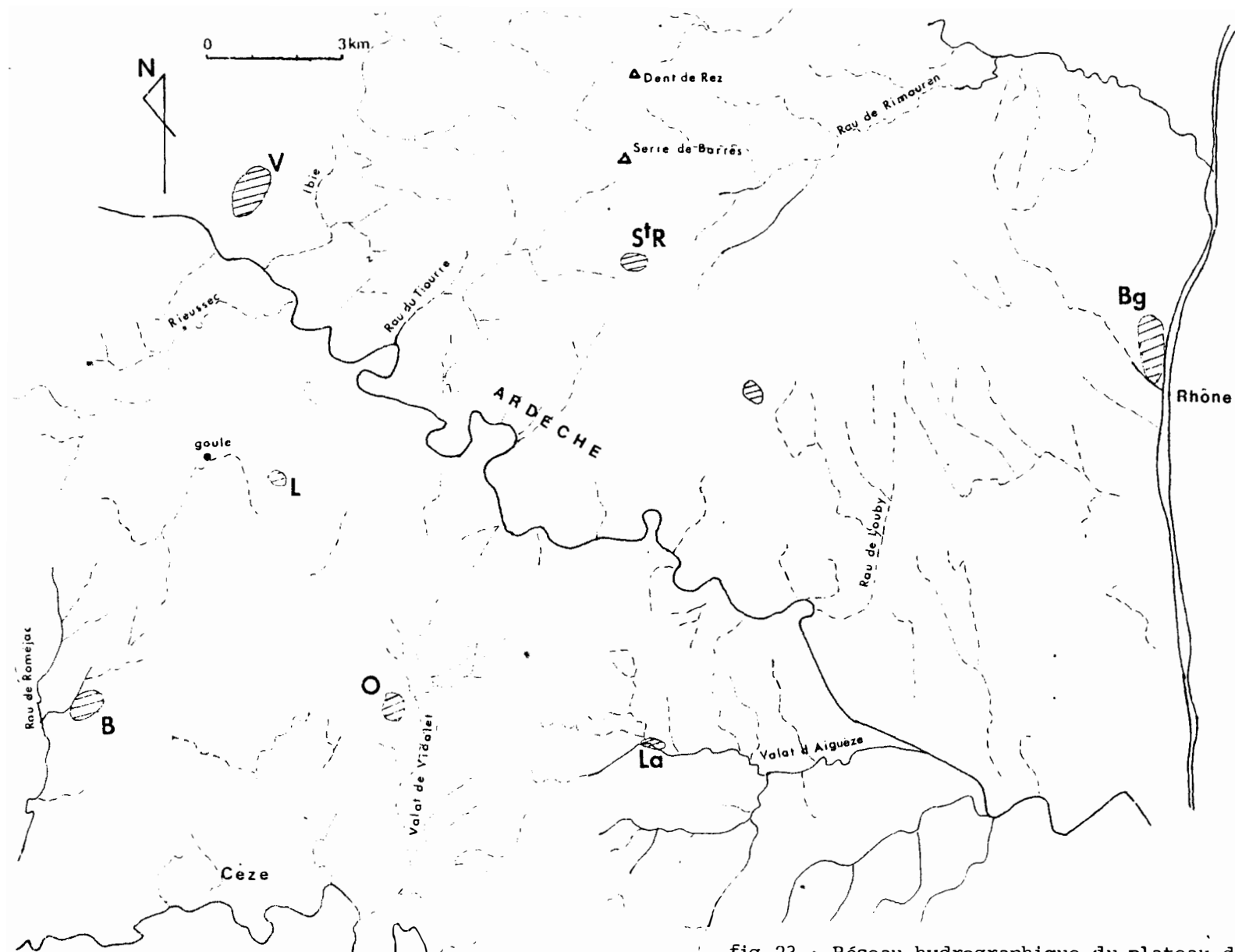


fig.23 ; Réseau hydrographique du plateau des Gras.

RELATIONS ENTRE GEOLOGIE, FRACTURATION ET ECOULEMENTS

Après avoir analysé la géologie et la fracturation, nous allons utiliser ces données pour mieux comprendre le modèle karstique obtenu, la répartition des formes karstiques fossiles et actives et leurs directions préférentielles d'écoulement. Un essai de reconstitution de l'histoire de la karstification va d'autre part être tenté.

1 - GÉOMORPHOLOGIE KARSTIQUE

1 - 1. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Les principaux axes drainants du plateau des Gras sont constitués par des rivières allogènes qui le traversent comme l'Ardèche ou le bordent comme la Cèze au Sud et le Rhône à l'Est. Ce dernier joue le rôle de niveau de base majeur avec une cote proche de 45 m. L'Ardèche voit sa cote s'abaisser de 80 à 45 m sur le parcours des gorges, la Cèze de 100 à 80 m sur la partie de son tracé susceptible de drainer le plateau d'Ornac (fig. 23).

Les fluctuations marines affectant la vallée du Rhône au Néogène sont responsables de l'encaissement de l'Ardèche, dominée actuellement par une épaisse série de 200 à 300 m d'épaisseur.

Le réseau hydrographique du plateau, bien que développé, est en grande partie inactif durant la majorité de l'année. Il se raccorde difficilement aux niveaux de base précédemment cités. Ceci est particulièrement vrai pour l'Ardèche dont les affluents gagnent la rivière par des "combes" fortement pentues et sèches. La nature de la roche a favorisé l'infiltration au détriment des écoulements aériens lors de l'enfoncement de la rivière.

Les seuls écoulements pérennes sont issus du drainage de terrains non urgoniens. Ils se perdent rapidement après leur incursion en terrain calcaire. En rive droite, le ruisseau du Rieussec se perd dans son parcours urgonien, de manière diffuse jusqu'à la perte totale. En crue, les eaux gagnent l'Ardèche par de petites gorges creusées de marmites de géants. Le ruisseau de la Planche se perd totalement dans la goule de Foussoubie abandonnant une vallée sèche perchée. En rive gauche, l'anticlinal marno-calcaire de St-Remèze est drainé sur ses deux flancs par les ruisseaux de Rimouren et de Pissevieille qui s'infiltrèrent en domaine urgonien.

L'Ardèche reçoit tout d'abord, en rive gauche, l'Ibie, issue des massifs marno-calcaires septentrionaux. Tout le rebord occidental des reliefs de la Dent de Rez et du Serre de Barrès est drainé superficiellement par cet affluent. Le ruisseau du Tiourre, après avoir reçu le ruisseau de Pissevieille, rejoint ensuite l'Ardèche. Ces deux ruisseaux suivent le trajet d'une faille N 50 plurikilométrique.

L'Ardèche ne reçoit plus alors que de petites combes sèches jusqu'au ruisseau de Louby au débouché des gorges. Curieusement, ce ruisseau recoupe toutes les structures (failles N 140) pour revenir sur l'Ardèche.

Un important drainage vers le Rhône (souvent à partir de combes N 140) complète ce réseau hydrographique. Le ruisseau de Rimouren, guidé par un accident N 50, prend sa source aux abords de St-Remèze. Le plateau des grands avens, à l'Ouest de Bidon, est dépourvu de toutes traces d'écoulement superficiel. Cette zone qui correspond d'ailleurs à une zone charnière entre deux zones structurales, représente un secteur d'infiltration totale. Ceci est vrai pour le karst actuel et pour la période de karstification antérieure au vu de l'abondance des avens fossiles.

En rive droite, l'Ardèche reçoit le ruisseau du Rieussec dans sa partie amont. La dépression de Vagnas-Labastide-de-Virac était drainée vers ce dernier avant que la perte de la goule de Fousoubie n'entre en activité. Seules quelques combes gagnent l'Ardèche jusqu'à la sortie des gorges. A l'aval d'Aiguèze, le valat d'Aiguèze draine toute la partie orientale du plateau, recoupant les horizons urgoniens et post-urgoniens.

Le valat de Vidalet et le réseau hydrographique qui s'y rattache se jette dans la Cèze après avoir traversé toute la rive droite. Ses racines se situent à 2 km de l'Ardèche. Le secteur des avens appartenant au triangle Labastide-Ornag-Barjac, est lui aussi totalement vide d'éléments hydrographiques. C'est une zone d'infiltration totale. Le ruisseau de Roméjac draine vers la Cèze les calcaires oligocènes des environs de Barjac.

Cette rapide étude hydrographique permet de poser un certain nombre de problèmes.

L'Ardèche est bien le niveau de base principal des écoulements dans les calcaires urgoniens. Ceux-ci peuvent se tourner localement vers le Rhône et la Cèze, mais dans quelles proportions ? Deux zones d'infiltration préférentielle ont été dégagées sans que leurs directions de drainage soient connues.

Les calcaires ludiens ne semblent pas connaître d'exutoires en rapport avec leur surface d'affleurement. Seule la source de Pierre Brune, alimentant le Valat d'Aiguèze et les écoulements du Roméjac à l'Ouest, joue ce rôle. Le problème de leur drainage souterrain est également posé.

1 - 2. LES FORMES KARSTIQUES

Nous distinguerons ici les formes appartenant au karst actif : lapiez, pertes, réseaux des gorges de l'Ardèche, des formes issues du karst fossile : avens, réseaux perchés. Nous reprendrons la chronologie de la karstification du massif dans un paragraphe ultérieur.

Le plateau des Gras se caractérise par la rareté des formes superficielles actives et par l'abondance des formes souterraines fossiles, mettant ainsi en opposition deux karsts aux dimensions et à l'activité différentes.

1 - 2.1. Le karst fossile

Les avens sont les seuls vestiges superficiels du karst fossile. Ces gouffres s'ouvrent directement sur la surface du plateau le plus souvent sur des fractures. Ils permettent d'atteindre, grâce à une succession de puits, des profondeurs parfois importantes comme aux avens de Vigne Close (- 187 m), du Faux-Marzal (- 186 m), du Marteau (- 106 m) et de la plaine du Bois d'Issirac (- 100 m) en rive droite. Ces avens sont parfois en relation avec des galeries horizontales pour former un réseau fossile important : aven d'Orgnac (- 168 m), aven de Rochas (- 157 m).

87 avens ont été répertoriés grâce à la synthèse de plusieurs inventaires (Balazuc, 1956 ; Plattier, 1977 ; Bouschet, 1979 ; GRB, 1982)(annexe 1 et fig. 24). Tous ces avens sont rigoureusement secs et ne recoupent pas de systèmes actifs. On peut toutefois citer deux exceptions : l'aven de Vigne Close traversé en son fond par un petit écoulement, l'aven de Rochas qui débouche sur les siphons du réseau de Midroï en bordure de l'Ardèche. La fossilisation de ces avens a été un handicap à l'extension de la campagne de traçages.

Ces avens sont localisés dans trois secteurs principaux :

- à l'Est de la vallée de l'Ibie,
- sur la plaine de Malbosc à l'Ouest de Bidon,
- sur les hauteurs du Bois de Ronze pour la rive droite.

D'autres parties du plateau, également en terrain urgonien, en sont dépourvues comme les secteurs au Nord de Labastide-de-Virac ou à l'Est de St-Remèze. La partie orientale correspondant à la retombée urgonienne sur la vallée du Rhône n'offre pour sa part que de très rares avens.

Cette répartition mérite que l'on s'y attarde en recherchant les paramètres guidant cette installation.

On peut tout d'abord remarquer que la majorité des avens (hormis ceux de la zone de Vallon-Pont-d'Arc) se situent à une cote supérieure à 300 m, allant jusqu'à 380 m. Cette constatation est même renforcée pour les avens de plus de 50 m puisque 17 sur 20 s'ouvrent au-dessus de cette altitude. Les avens se trouvent donc sur le plateau sommital et ses premières pentes. Les avens des niveaux inférieurs (aux environs de 250 m) correspondent à des cavités de plus petite dimension, souvent plus proches de l'Ardèche. Les avens du secteur de l'Ibie se situent à des cotes plus faibles comprises entre 160 et 250 m. Des mouvements verticaux différentiels entre le centre du massif et ses bordures sont à l'origine de ce décalage. L'affaissement du fossé d'Alès et la surrection corrélative du coeur du plateau explique donc les cotes du secteur occidental. La bordure orientale, ménagée par l'érosion du fait de l'enfoncement de la vallée du Rhône, ne laisse entrevoir que de rares avens. Le décapage a été insuffisant pour laisser apparaître les anciens drains verticaux.

La répartition des avens semble d'autre part obéir à des contraintes structurales. Ces avens sont séparés en deux nuages situés sur les limites orientales et occidentales de la zone faillée de St-Remèze (fig. 25). Cette zone centrale semble avoir défavorisé le développement

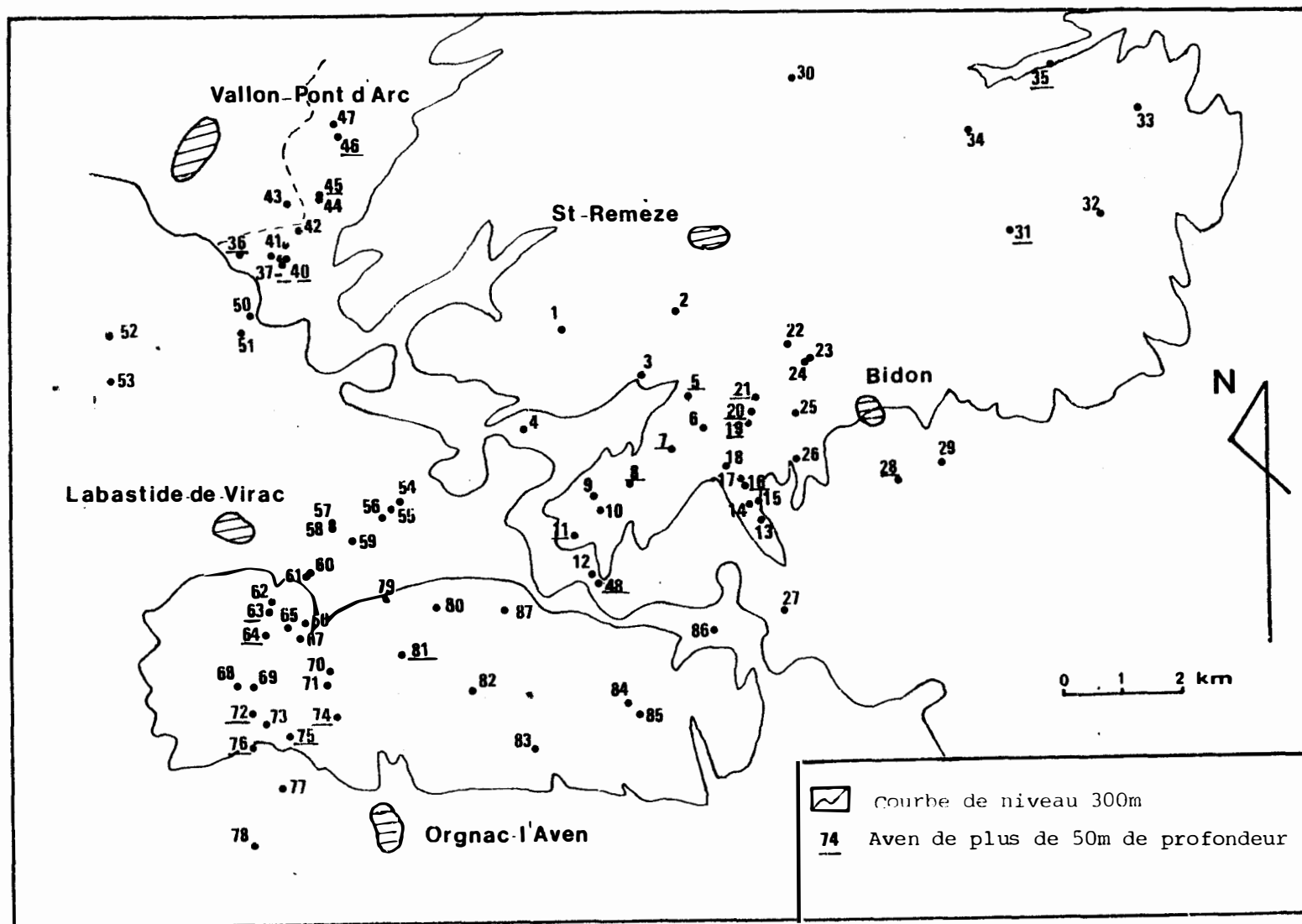


fig. 24: Répartition des avens du plateau des Gras

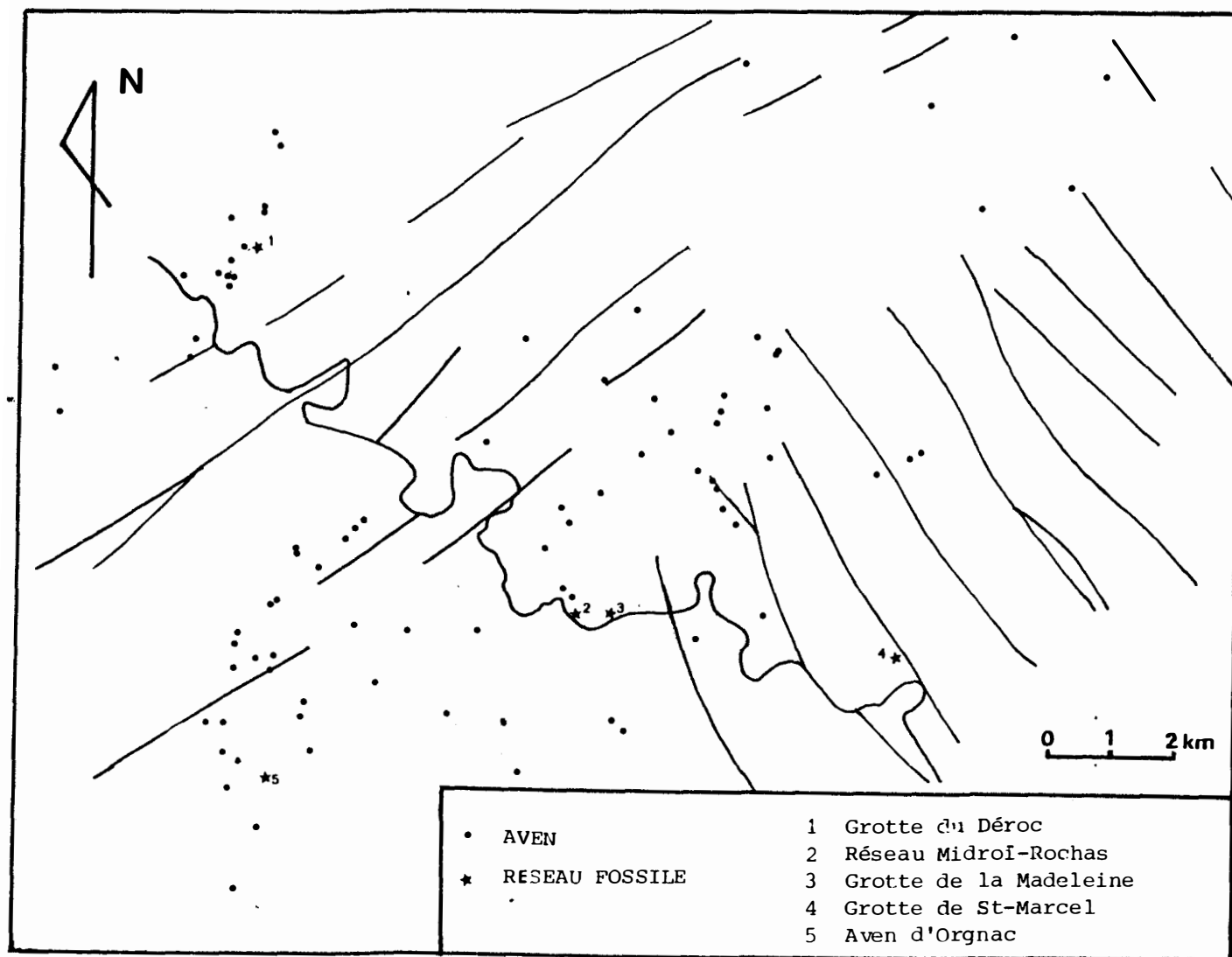


fig. 25 répartition des formes karstiques fossiles selon les zones structurales

d'une zone d'infiltration rapide par des conduits verticaux de type aven. Les accidents N 50 qui caractérisent ce secteur ont joué en failles normales lors de la distension oligocène et constituent des accidents aisément karstifiables jusqu'à la phase alpine. Leur fréquence très importante a par contre pu être un frein à l'élaboration d'un karst développé et hiérarchisé. Cet agencement structural favorise en effet une karstification diffuse sur chaque accident. A défaut d'accidents secondaires, drainants, de taille notable, il ne peut se créer de maille de karstification suffisante pour ébaucher des formes affirmées. La karstogenèse s'organise par contre favorablement dans les zones bordières de la "zone de St-Remèze" du fait d'un dosage plus équilibré des directions de fractures.

Les réseaux fossiles

La région des Gras offre de très nombreux réseaux fossiles. Ils peuvent être reliés à une partie active ou recoupés par elle. La partie aval des gorges présente des systèmes importants comme le complexe aven de Rochas-évent de Midroï de près de 6 km de développement. C'est une succession de puits et de galeries intermédiaires aboutissant à la zone noyée.

- Le système de St-Marcel (26 km) est une immense cavité regroupant plusieurs réseaux se développant à des cotes différentes. Les dimensions du réseau principal tranchent avec la modestie des émergences actuelles.

- Le réseau perché de la Madeleine (600 m de développement) débouche sur les parois des gorges.

- De nombreux petits réseaux ont été découverts en bordure de la vallée de l'Ibie : signalons la grotte du Deroc (900 m de développement).

- Sur le plateau d'Ornac, l'aven d'Ornac (4600 m de développement) permet l'accès d'une grande galerie pentée vers le Sud. Cette dernière donne sur plusieurs puits toujours à sec. Un point bas à - 168 m est atteint.

Il apparaît que la répartition de ces réseaux fossiles est liée comme pour les avens à l'appartenance à une zone structurale donnée (fig. 25). La zone faillée de St-Remèze n'a pas permis le développement de réseau élaboré pour des raisons similaires à celles évoquées pour les avens.

1 - 2.2. Le karst actuel

Les formes de surface sont peu nombreuses pour un plateau de cette étendue et de plus, souvent enfouies sous le couvert végétal.

Des lapiatz sont visibles sur l'ensemble du plateau. Ils sont en général peu évolués, décimétriques à métriques (de 2 à 3 m) et se développent selon une fracture locale prépondérante. Le calcaire est rarement mis à nu sur de grandes surfaces, mis à part dans le secteur de Bidon. La garrigue relativement dense masque généralement ces zones d'infiltration préférentielles.

Les dolines sont peu répandues et souvent de petites dimensions. Elles se développent principalement sur des accidents tectoniques dont les directions sont souvent, pour les plus étendues, N 50 et N 140. La grande doline de Bidon et à l'Est celle de Champ Vermeil sont limitées par des failles N 150. La doline de Mayres, dominant le vallon du Tiourre et celle du puits de Ronze en rive droite, suivent un accident majeur N 50. Des dolines ont également été observées sur les calcaires ludiens des environs d'Issirac (Cros d'Arène).

Les pertes ont déjà été évoquées dans un paragraphe précédent, elles sont peu nombreuses et situées à la limite des terrains urgoniens. La goule de Foussoubie constitue une perte particulière puisqu'elle est associée à un poljé. Une importante surface de plus de 10 km², en partie non karstique, est drainée vers la goule qui tient le rôle de ponor. La vaste dépression allant de Vagnas à Labastide-de-Virac (ce dernier village est situé sur un relief bordier : le ham) est parcourue par de nombreux ruisseaux dont celui de la Planche. De fréquentes inondations ont créé une accumulation de limons à l'amont de la perte.

Le système de Foussoubie est le seul réseau qui permette d'accéder à la zone noyée depuis le plateau. L'étude directe du karst profond peut partiellement s'effectuer à partir des exurgences des gorges dont nous allons aborder l'analyse.

2 - NATURE ET RÉPARTITION DES ÉMERGENCES

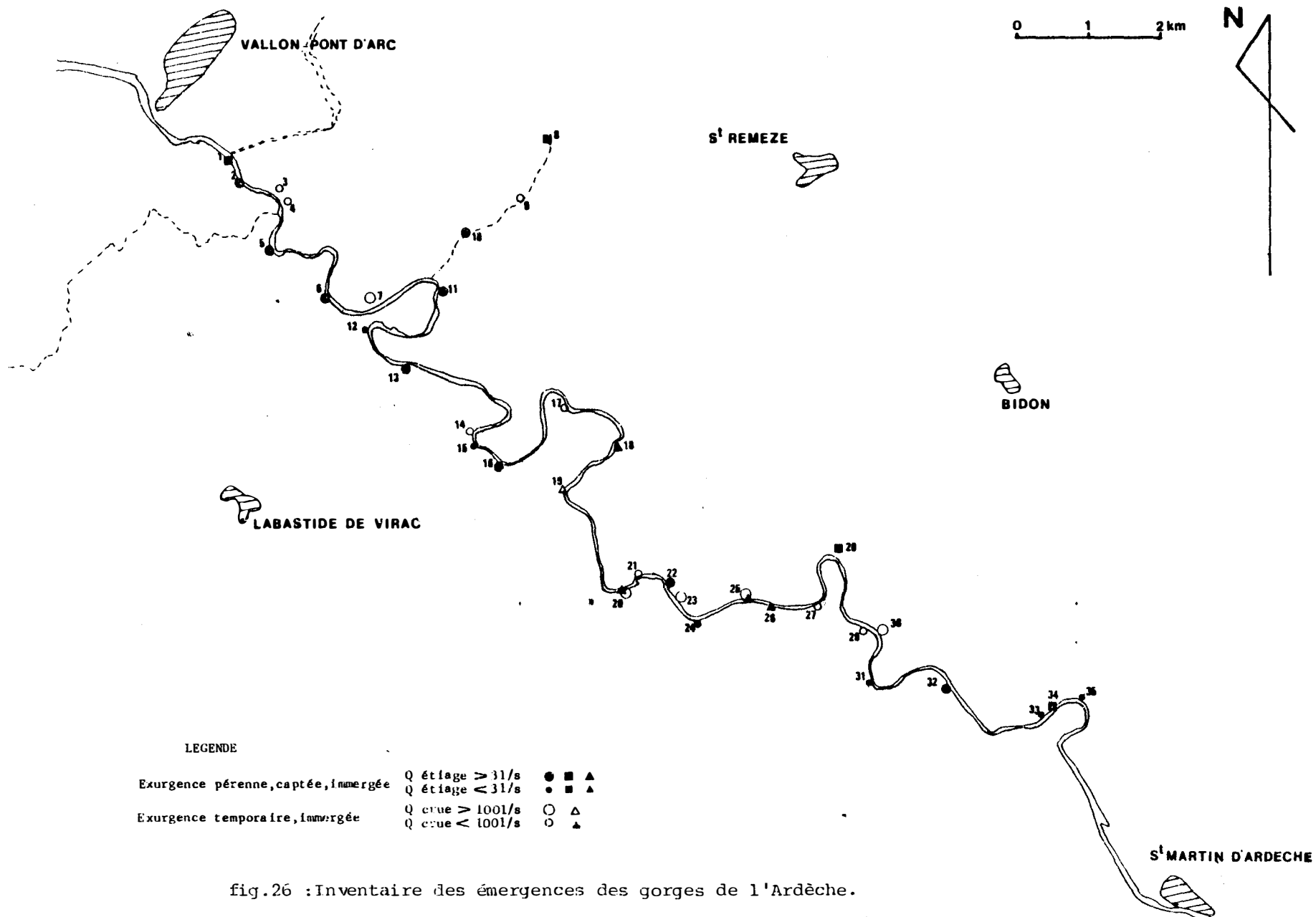
2 - 1. LES EMERGENCES DES GORGES

2 - 1.1. Caractères généraux

Un inventaire des émergences des gorges de l'Ardèche a été dressé (fig. 26). Il complète celui de Mazellier (1971). L'Ardèche est recoupée tout au long de son cours par de nombreuses exurgences, distantes de quelques centaines de mètres seulement et le plus souvent de faible importance. Leur répartition est relativement homogène sur l'ensemble du canyon et entre les deux rives. Trois types d'émergence, d'ailleurs compatibles pour un même réseau, ont été rencontrées :

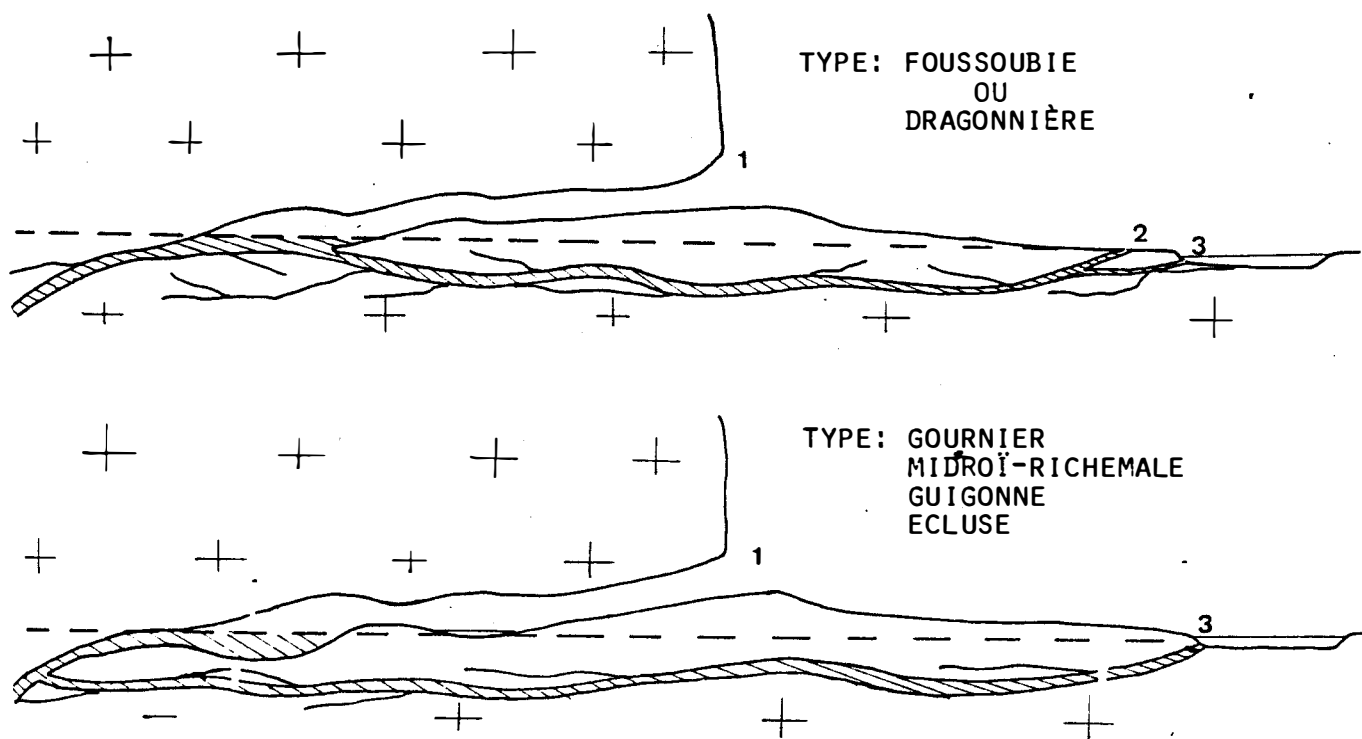
- Les exurgences immergées. Elles arrivent sous pression dans le lit de la rivière. Elles ne sont localisables que quand elles sont suffisamment concentrées et importantes. Des profils en longueur de la rivière, grâce à une sonde température et résistivité, ont permis de localiser certains apports souterrains lors de l'étiage d'été. La période de début d'étiage semble la plus favorable : elle concilie des débits faibles de l'Ardèche et des débits encore soutenus des venues souterraines. Cette pratique demeure toutefois aléatoire au regard des dimensions du cours d'eau et au caractère souvent diffus des apports. Ce type d'émergence a particulièrement été reconnu au cœur des gorges, de la châtaigneraie au Cirque de la Madeleine.

- Les exurgences aériennes sont situées au niveau du lit d'étiage de l'Ardèche ou quelques mètres au-dessus. Elles sont pérennes dans la plupart des cas, mais certaines se tarissent lors de périodes d'étiage trop longtemps maintenues.



- Les orifices supérieurs, perchés à une dizaine de mètres au-dessus de l'Ardèche peuvent servir de trop-pleins temporaires en périodes de crues. Ils donnent généralement sur une galerie de grande dimension qui permet d'accéder à la zone noyée. Ces réseaux supérieurs indiquent des écoulements antérieurs, sous-pression (marqués par une contre-pente), à une période où les débits qui transitaient étaient plus conséquents. Ils fonctionnent maintenant en périodes de crue conjointe du karst et de l'Ardèche. La remontée de quelques mètres de la rivière crée une surpression sur les arrivées immergées et facilite l'utilisation des galeries supérieures.

Ces trois types de sortie sont parfois associés pour un même système. C'est le cas de la goule de Foussoubie et de la Dragonnière (fig. 27). Le plus souvent, la circulation pérenne est immergée et une galerie aérienne déverse les trop-pleins de crue (Gournier, Midroï-Richemale, Guigonne).



1 : Event temporaire ; 2 : Exurgence pérenne aérienne ; 3 : Exurgence pérenne immergée
Toit de la zone noyée

fig.27 : Schéma de l'exutoire d'un système karstique des gorges.

Nous allons passer en revue les différentes exurgences d'amont en aval en précisant le type d'émergence, la topographie éventuelle du réseau pénétrable ainsi que les contrôles lithologiques et tectoniques qui conditionnent le point d'émergence.

2 - 1.2. Nature et conditions d'émergence des sources

1) Source du Boeuf (fig. 28)

Située légèrement au-dessus du lit d'étiage de l'Ardèche, en rive droite, cette source arrive sous pression par plusieurs orifices. Son captage est assuré quelques mètres à l'amont grâce à deux forages. Près de 100 m³/h sont ainsi prélevés pour le compte du Syndicat des Eaux de Barjac qui regroupe 12 communes de la rive droite de l'Ardèche. Une terrasse d'alluvions surplombant l'Ardèche de 5 mètres, masque le contact tout proche entre les calcaires urgoniens et les grès turoniens. Une importante flexure des calcaires urgoniens (les couches sont localement pentées de 60° vers le NW) annonce le synclinal de Salavas à coeur crétacé supérieur. Cette flexure semble accentuée par un accident N 70. Cette source paraît étroitement liée au réseau de la Chaire comme le montreront les expériences de traçage sur les pertes du ruisseau du Rieussec, ainsi que l'étude de leurs caractères physico-chimiques respectifs.

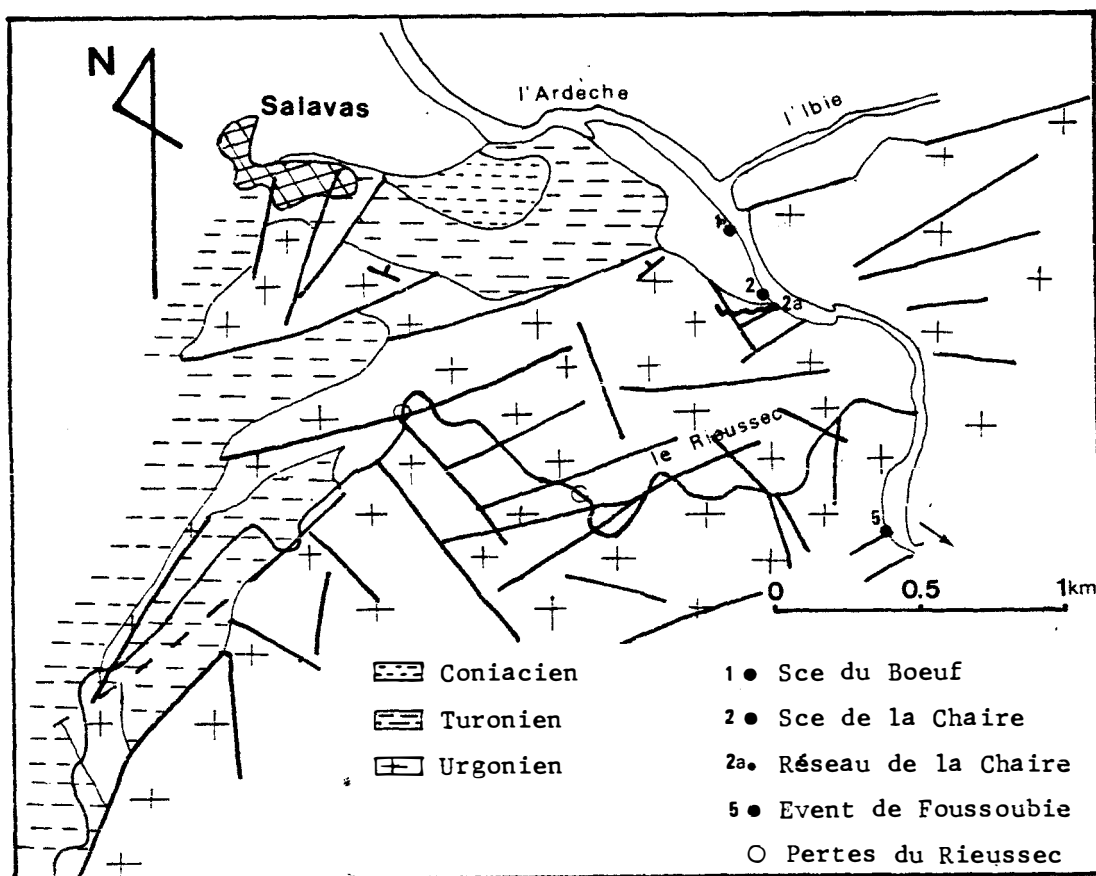


fig.28 : Contexte géologique et structural du bassin versant du Rieussec.

2) Source de la Chaire (fig. 28 et 29)

Cette source, située à 200 mètres à l'aval de la première, s'écoule jusqu'à l'Ardèche par un petit émissaire d'une dizaine de mètres. En crue, une fissure légèrement surélevée entre en activité. Une galerie de grande dimension domine ces émergences d'une quinzaine de mètres. Elle constitue le départ d'un réseau important dont le développement est de 600 m. Plusieurs galeries se superposent, marquant ainsi l'adaptation du réseau à l'enfoncement de la rivière. La pénétration s'interrompt sur la zone noyée, le siphon Vin, plongé à - 17m depuis une cote proche de celle de l'Ardèche.

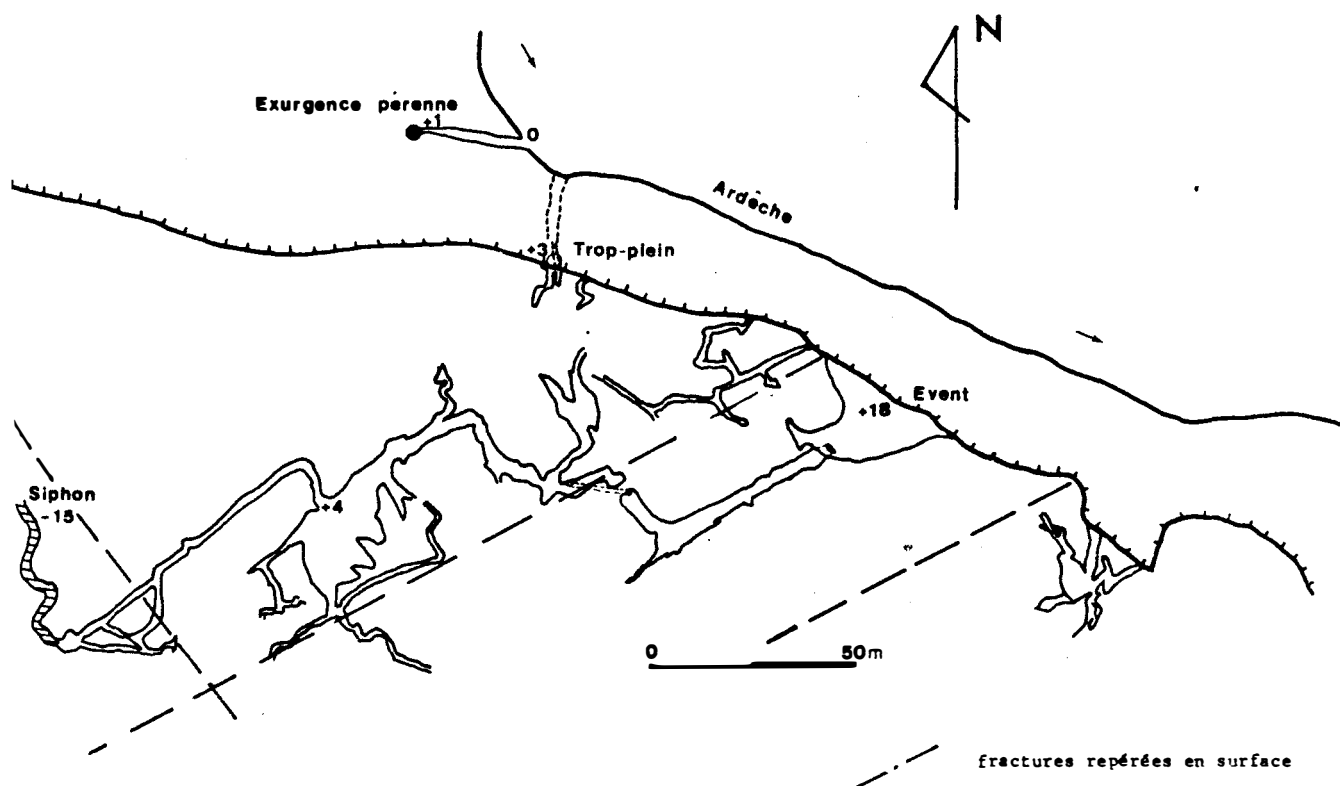


fig.29 : Conditions d'émergence du réseau de la Chaire.

(d'après topographie du G.R.B.:Groupe de recherches biospéléologiques)

Un log stratigraphique schématique a permis de préciser la nature des calcaires urgoniens intéressés. Ce sont des calcaires bioclastiques très grossiers en bancs massifs datés de la limite du Barrémien supérieur et de la base du Bédoulien.

La flexure urgonienne vers le Nord-Ouest, constitue une limite d'extension probable. Le Bois des Egaux est affecté par de nombreux accidents N 50 - N 70 qui découpent cette zone d'alimentation. Au niveau de l'émergence, cette direction guide en partie les écoulements sans que son rôle hydrogéologique soit clairement défini.

Nous reviendrons sur le fonctionnement karstique de ces deux sources après l'étude hydrochimique et hydrodynamique.

3-4) Sources temporaires des grottes de la Forge et des Huguenots

Ces deux grottes aménagées s'ouvrent à une quinzaine de mètres au-dessus de l'Ardèche, sur sa rive gauche. En période de crue, elles sont parcourues par un petit cours d'eau temporaire pouvant atteindre plusieurs litres par seconde pour la grotte de la Forge. Ces circulations sont relativement perchées au-dessus de la rivière et appartiennent encore à la zone non saturée. Leur relation avec un réseau immergé n'a pu être mis en évidence. Ces cavités orientées grossièrement E-W se sont développées respectivement sur des accidents N 75 et N 95.

5.) Event de Foussoubie (fig. 30)

L'évent de Foussoubie permet d'accéder à un important réseau de 23100 mètres. C'est une galerie de grande dimension en contre-pente qui donne rapidement sur la zone noyée. Elle sert de trop plein au système en période de grande crue. Les écoulements pérennes sont assurés par une exurgence aérienne située en bordure de l'Ardèche et par des venues immergées dans le lit de la rivière, légèrement en aval. Ce système fonctionne en résurgence : les eaux du ruisseau de la Planche sont absorbées par la goule de Foussoubie et gagnent l'évent après un trajet à vol d'oiseau de 3,4 km et une dénivellation de 124 mètres. Deux réseaux parallèles : les galeries SSN amont et SCUCL traversent la partie amont pour se dédoubler et s'anastomoser dans la partie aval. Ces différents conduits sont étagés sur plusieurs mètres, mais tous sont susceptibles d'être actifs. Cette éventualité est peu probable pour le réseau supérieur des Pyjamas, concrétionné et riche en sédiments (Y. CALLOT, 1978). Inversement, le réseau inférieur SSN aval débite des eaux en conduite forcée en crue et marque par ses nombreux siphons le toit de la zone noyée en période d'étiage. D'après les données topographiques de P. LEROUX (Dossiers du GRB), ce toit est, à cette période et au niveau de l'évent, à une cote supérieure de 5 mètres à celle de l'Ardèche.

La goule de Foussoubie est située au contact des calcaires argileux "ludiens" et des calcaires urgoniens sommitaux. Les niveaux de l'Aptien marneux et du Cénomaniens affleurent en effet latéralement. Ce drainage aérien intéresse toutes les formations non-urgoniennes de la dépression de Vagnas-Labastide de Virac. La perte est également située sur le trajet de mégafracture N 50 Vagnas-Pas de Mousse - St-Remèze. Cet accident semble avoir facilité la concentration des eaux de surface qui s'orientent N 140 à l'intérieur de la goule. Au niveau de l'évent, un important accident N 60 guide les écoulements vers l'Ardèche, tout en limitant la karstification du réseau à son compartiment SE.

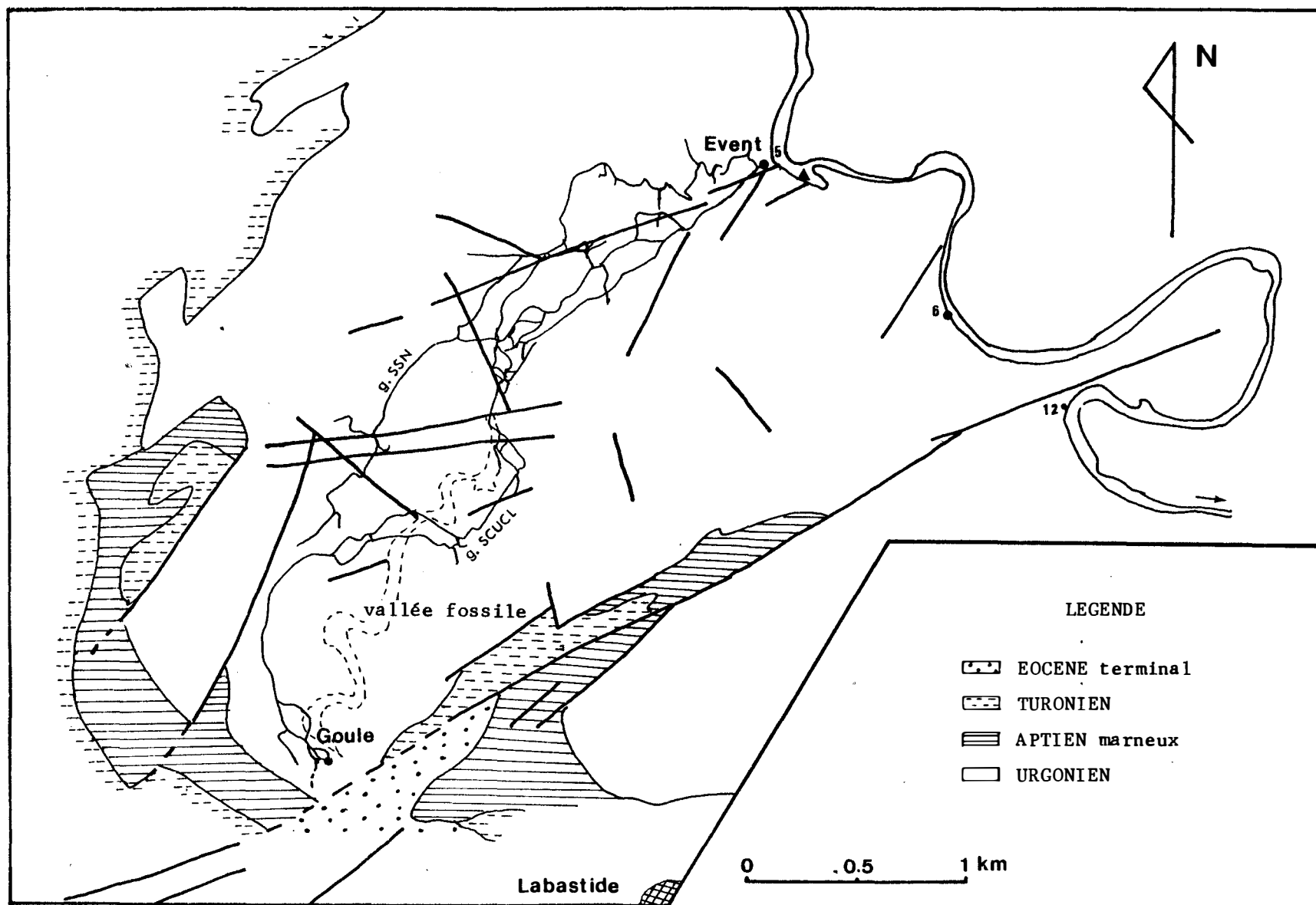


fig.30 : Environnement géologique et structural du réseau de Foussoubie.

6) Source de Vanmalle (fig. 30)

Cette émergence est située au niveau du lit de l'Ardèche où un porche s'interrompt rapidement sur un siphon. Plusieurs siphons successifs ont été plongés sur ce réseau totalisant près de 500 mètres de développement. La zone noyée s'étend sous l'Ardèche puisqu'un puits a permis d'atteindre un point bas à - 45 m. Les conditions d'émergence n'ont pu être précisées. Les calcaires appartiennent toutefois à la base de la série urgonienne (Barrémien inférieur).

7) Exsurgence de l'Ibie

Cette exsurgence temporaire de la rive gauche est éloignée d'une centaine de mètres de l'Ardèche qu'elle domine de 15 mètres. Elle n'entre en activité que lors de crues violentes. Un autre réseau important (1200 m de galeries) a été signalé en 1984 légèrement au Nord dans la vallée de Chames. Ces deux réseaux appartenant au même système, se développent en grande partie en zone noyée. Des arrivées pérennes immergées dans l'Ardèche pourraient servir d'exutoires à ces cavités. Le réseau inférieur s'ouvre à la limite des calcaires argileux du Barrémien basal et des calcaires urgoniens.

8-10) Emergences du vallon du Tiourre

Ce vallon est en fait une reculée de 2.5 km, créée par la source du Tiourre. Cette source, actuellement perchée à 240 m, est captée par gravité pour l'alimentation en eau de Vallon-Pont-d'Arc. Elle émerge d'une grotte rapidement siphonnante et impénétrable. Les eaux s'infiltrant immédiatement pour réapparaître épisodiquement dans le lit du ruisseau du Tiourre. La source de la Minoterie constitue une de ces résurgences. La source du Bas-Moulin, au débouché du vallon, paraît moins directement liée à ce type d'écoulements. Ces sources sont pérennes, elles sont issues de calcaires peu ou pas karstifiés et ne présentent pas de grandes variations de débits.

La reculée s'est développée en bordure du méga-accident N50 du Pas de Mousse - St-Remèze pour obliquer ensuite selon la direction N 20. Elle a ainsi mis à nu les marno-calcaires hauteriviens du compartiment surélevé NW. La source du Tiourre émerge à la base des calcaires urgoniens, à la limite des calcaires argileux du Barrémien basal. Les sources de la Minoterie et du Bas-Moulin apparaissent dans les assises de l'Hauterivien.

11) Source de l'Aiguille

Disposée à une vingtaine de mètres au-dessus de l'Ardèche, cette source n'est accompagnée d'aucune forme karstique remarquable. De nombreux dépôts de tufs jalonnent les différents plans de stratification ayant été utilisés par les eaux.

Cette exsurgence est située à la base d'une falaise verticale de calcaires urgoniens massifs du Barrémien inférieur. La mégafracture N 50 du Pas-du-Mousse les met en contact avec les marno-calcaires hauteriviens.

12) Source des Trois Eaux

C'est une source modeste de la rive droite, pérenne, bien que ne présentant jamais de débits supérieurs au litre par seconde. Elle est située sur un accident N 90 qui limite au Nord la falaise du rocher de Saleyron.

12) Grotte du Colombier

On ne connaît pas de système actif lié à cette grotte de la rive droite. Elle présente plusieurs orifices étagés qui dominent légèrement l'Ardèche. Ils sont reliés à la rivière par un talweg bien marqué, à l'aval duquel on peut observer de nombreux blocs de tufs. De petites venues se jettent dans l'Ardèche en périodes de hautes eaux. Des circulations immergées non repérées doivent être en mesure d'expliquer ces quelques indices d'activité.

13) La source de Fare

Trois cents mètres à l'aval, cette source s'écoule à partir d'une petite vasque située dans les dalles du lit majeur de l'Ardèche. Cette exsurgence présente des caractères physico-chimiques (température élevée, abondance de gaz carbonique dissous) qui la différencie des eaux des gorges. Elle se trouve dans le prolongement d'un accident E-W, à près d'un kilomètre de la mégafracture N 50 du Pas de Mousse.

14) Source du Figuier

Cette source temporaire de la rive droite, dominant l'Ardèche de 10 mètres, est repérable par un important cône de tufs. A son sommet, la source est pénétrable sur 70 mètres par un étroit conduit. Cette exsurgence est située à la base d'une barre de 30 mètres de calcaires massifs au contact de calcaires en bancs décimétriques. Ces calcaires bioclastiques grossiers sont datés de la base du Barrémien inférieur. Le point d'émergence situé sur le plan stratigraphique précédemment défini, est déterminé par un accident N 140.

15) Source de la Langue du Boeuf

Cette exsurgence temporaire, située à l'aval de la précédente, a également créé un cône de tufs. Les conditions lithologiques sont similaires : de petits bancs permettent l'émergence à la base d'une barre de calcaires massifs. Ces calcaires sont toutefois situés plus haut au sein de la série urgonienne.

16) Source de la Dragonnière

Cette source pérenne s'écoule au niveau de l'Ardèche. Des venues immergées ont été repérées à son aplomb. En période de crue, des orifices latéraux légèrement à l'aval évacuent les eaux. L'évent qui domine la rivière d'une dizaine de mètres est, quant à lui, rarement mis en charge. Il permet d'accéder au réseau noyé par des galeries étagées. Le siphon terminal plongé sur 200 mètres laisse entrevoir une puissance de la zone noyée dépassant 50 mètres.

Ce réseau est situé sur le trajet d'un accident plurikilométrique N 50 abaissant le compartiment sud-est. C'est sur ce compartiment que se développe le réseau dans des calcaires bioclastiques grossiers du Barrémien inférieur. Le report des grandes fractures sur la topographie de la cavité (fig. 31) permet de souligner le rôle de faille écran de l'accident N 50. Une faille annexe de direction N 75 guide les écoulements vers l'Ardèche.

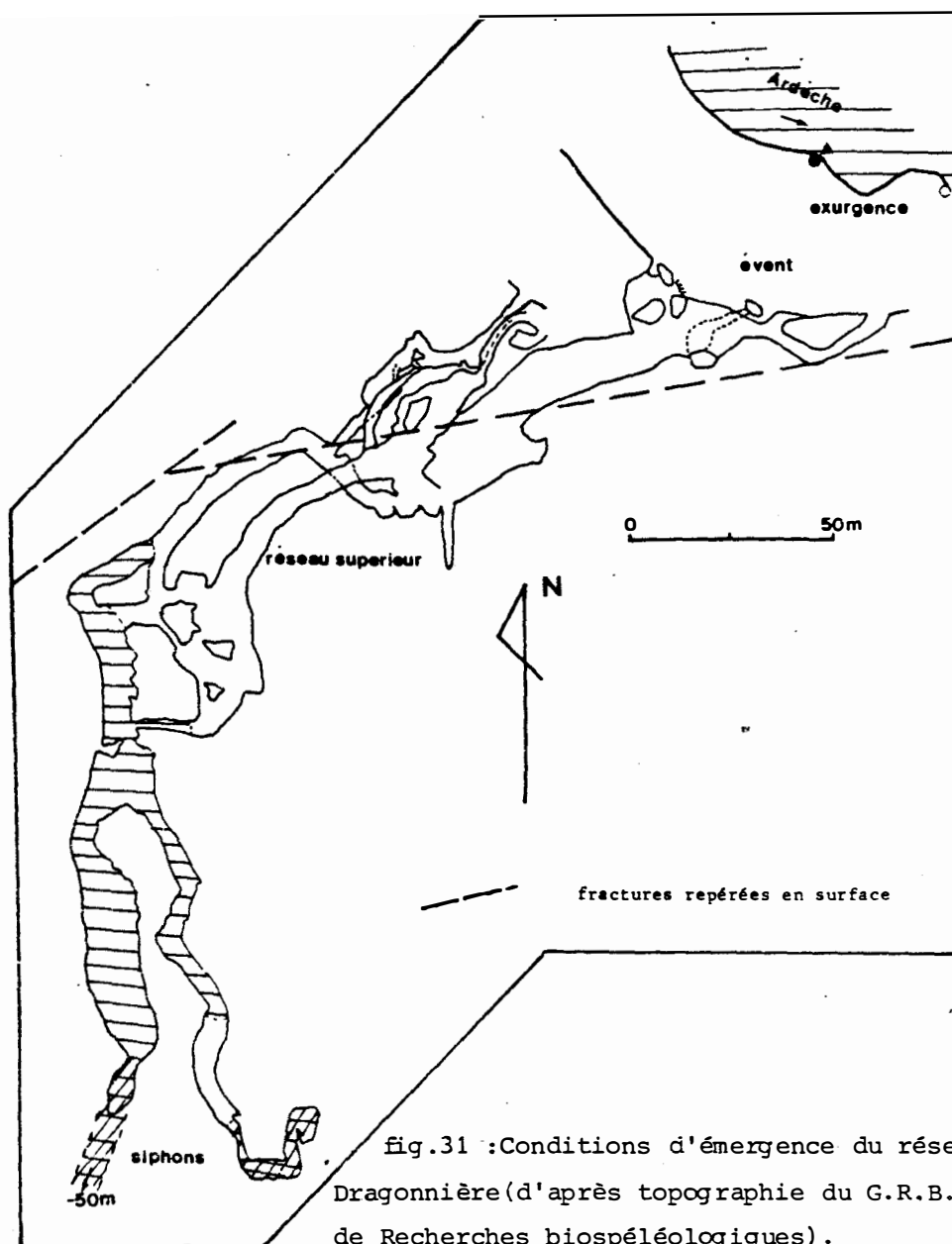


fig.31 : Conditions d'émergence du réseau de la Dragonnière (d'après topographie du G.R.B.: Groupe de Recherches biospéléologiques).

17) Source de la Châtaigneraie

C'est une source temporaire de la rive droite de moindre importance. Elle émerge dans des calcaires en bancs décimétriques à métriques à la base d'un ensemble plus massif.

18) Source du Platane

Cette source pérenne de la rive droite est totalement immergée sous l'Ardèche. Il est donc difficile d'en apprécier les débits. Elle se situe également au contact d'un accident plurikilométrique N 50 qui commande ici le tracé de la rivière. Une faille N 75 semble déterminer la direction d'écoulement au voisinage de l'exurgence.

19) Source du Parapluie

Cette exsurgence immergée est située sur le même accident N 50 en rive droite. Elle peut être particulièrement visible en période de crue par les remous qu'elle provoque. Des écoulements aériens peuvent être visibles en hautes eaux.

20) Event de Gournier (fig. 32)

L'évent de Gournier s'ouvre légèrement au-dessus du lit majeur de l'Ardèche sur un réseau de 600 m de développement.

L'écoulement pérenne est assuré par des arrivées immergées au niveau de la "toupine" : véritable canal naturel d'une dizaine de mètres de profondeur. L'évent n'entre en activité que durant les dernières crues de la période de hautes eaux quand les deux conditions suivantes sont réalisées : l'ensemble du réseau doit être saturé et le niveau de l'Ardèche suffisamment élevé pour favoriser l'utilisation des réseaux supérieurs. L'évent n'a ainsi pas fonctionné durant le printemps 1982 alors qu'il restait en activité durant un mois au printemps 1983. Les débits maximums observés en avril et mai 1984 ont été évalués à quelques m³/s. A 15 mètres au-dessus de l'évent, un orifice supérieur donne également sur le réseau. La zone noyée dont la cote est voisine de l'Ardèche, n'a guère pu être reconnue. La position de l'évent est particulièrement liée à un accident N 160. Reporté sur la topographie, celui-ci semble jouer le rôle de limite de la karstification du réseau. Dans cette zone légèrement excentrée par rapport à la "bande faillée de St-Remèze", la direction N 50 semble avoir été très utilisée par les écoulements et ceci en l'absence d'accidents majeurs en surface. D'un point de vue lithologique, ces niveaux de calcaires massifs d'origine bioclastique à ciment fin, semblent marquer une élévation dans la série urgonienne.

21) Source de Gournier

Cette petite source disposée au niveau du lit d'étiage de l'Ardèche draine les alluvions de la terrasse de Gournier.

22-23) Source de Richemale - Event de Midroï (fig. 33)

Ces deux exsurgences de la rive gauche paraissent en liaison, bien qu'aucune preuve n'en ait été faite. La source de Richemale à l'amont, débouche d'une étroite fissure pénétrable sur quelques mètres, au niveau du lit d'étiage de la rivière. Elle se trouve donc périodiquement immergée. Elle présente des débits soutenus de plusieurs dizaines de litres par seconde en période de basses eaux. Il n'existe pas d'équivalent connu sur l'ensemble des gorges. Au niveau de l'exurgence des fractures N 60 drainent les écoulements, elles sont rapidement interrompues par un accident N 90 dont le rôle hydrogéologique est probablement déterminant.

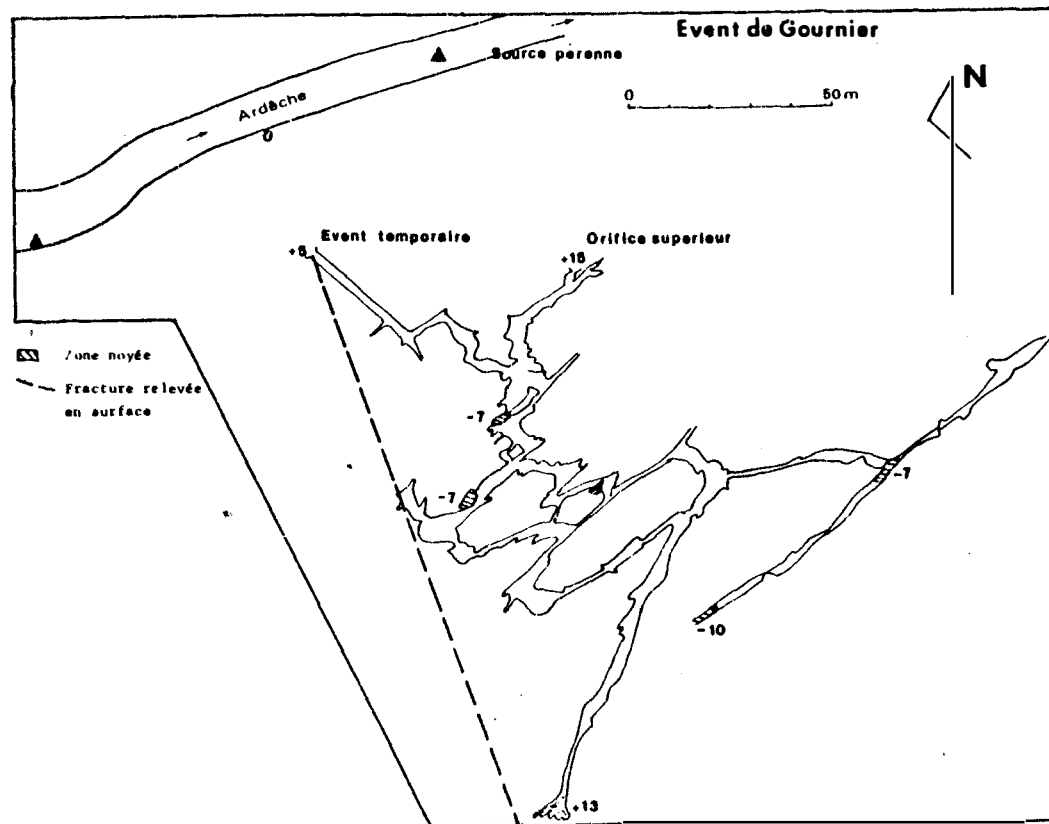
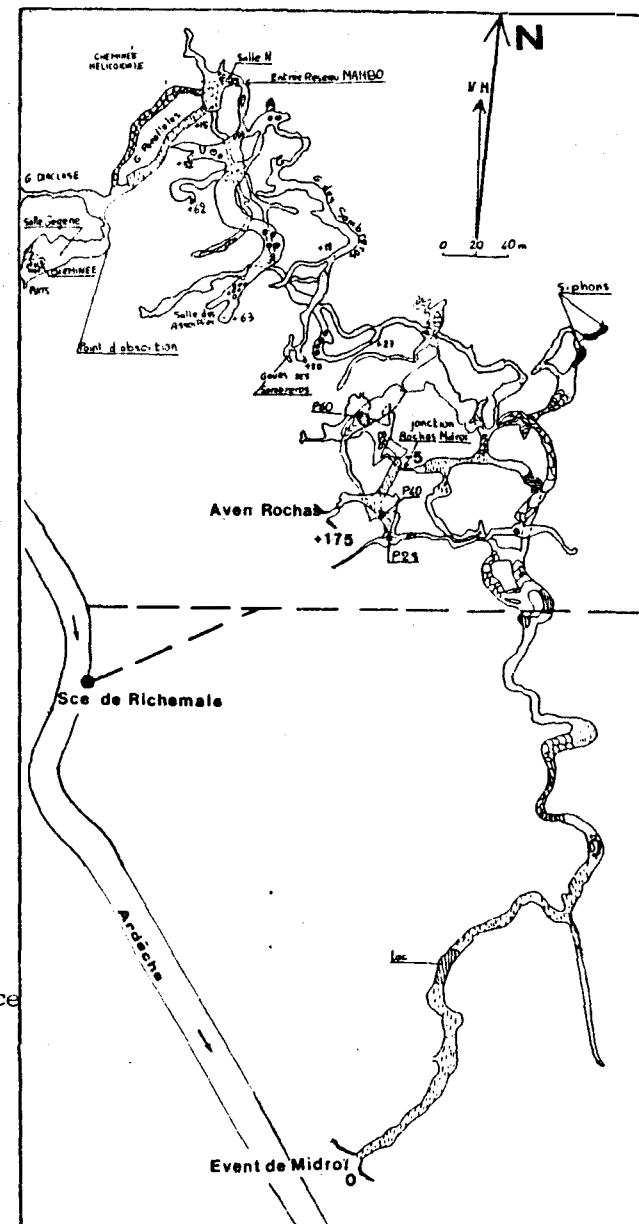
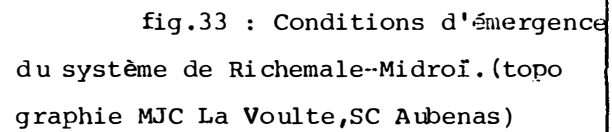


fig.32 : Conditions d'émergence de l'évent de Gournier.



L'évent de Midroï, situé à 300 m en aval, livre accès à un vaste réseau de 6000 m de développement. Les galeries terminales de très grandes dimensions mènent à des zones siphonnantes reconnues sur plus de mille mètres en plongée. Ce réseau est relié au plateau par l'intermédiaire de l'aven Rochas qui s'ouvre à 260 m à l'aplomb des gorges. Ce dernier gagne la zone noyée par de nombreux puits successifs. Il est intéressant d'observer à la base du premier puits (cote 220 m) une galerie de près de 200 m : la galerie de l'Ours. Elle marque un niveau de base fossile très élevé.

L'évent ne fonctionne qu'exceptionnellement lors de grandes crues. Les écoulements pérennes du système sont évacués par la source de Richemale.

La faille N 90 séparant la source de Richemale et l'aven de Rochas a été grossièrement reportée sur la topographie du réseau. Elle semble délimiter au Nord un réseau labyrinthique et peu structuré, au Sud un collecteur semi-fossile de grande dimension.

24) Source de Cayrebelou

Cette petite source pérenne de la rive droite émerge au niveau de l'Ardèche, au milieu de blocs effondrés, à la base d'une combe sèche.

25_) Event de la Guigonne

Cet événement s'ouvre à 30 m de l'Ardèche. Une galerie de grande dimension permet d'accéder rapidement à la zone noyée. Les circulations pérennes sont uniquement assurées par des venues d'eau dans le lit de la rivière. Leur ampleur est difficilement estimable. Lors de la mise en charge totale du réseau (à la fin de la période de hautes eaux) et à condition que l'Ardèche soit en crue, il arrive que l'évent soit actif. Il peut alors fournir des débits supérieurs au m³/s (mai 1984), mais, cet écoulement aérien n'excède pas quelques jours. Le réseau se présente comme une unique galerie dépourvue d'anastomoses pénétrables, ce qui caractérise une galerie collectrice souvent en charge. Après 500 m de galerie relativement horizontale, le réseau s'enfonce pour se stabiliser à - 40 m. Il se sépare alors en deux branches respectivement de 850 m et de 230 m (fig. 34).

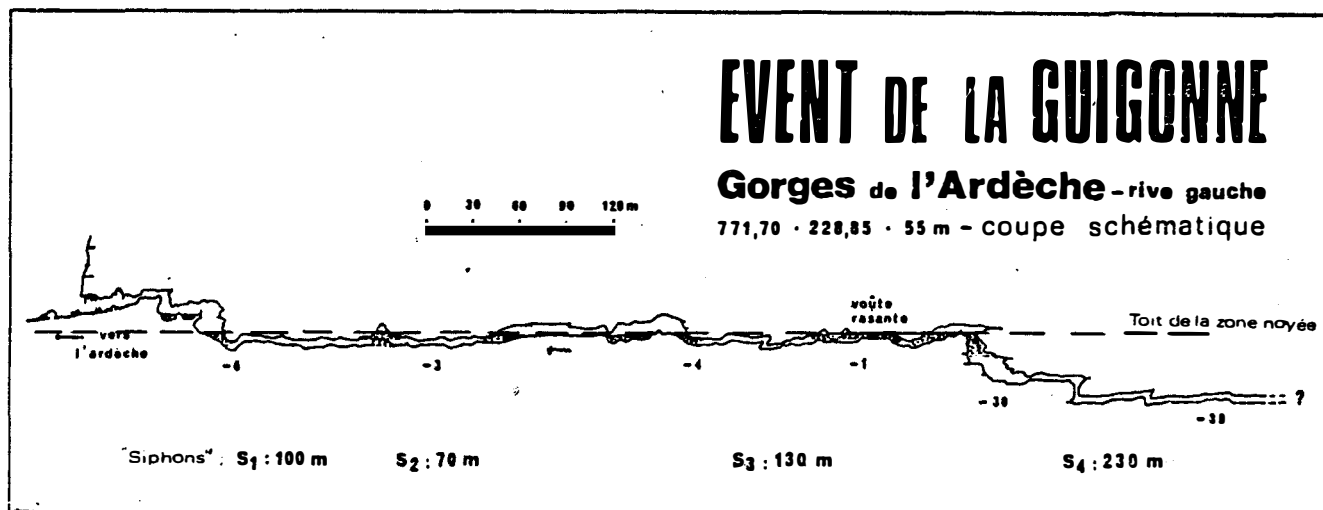


fig.34 : Réseau de la Guigonne (topographie F.Le Guen, 1978).

Le levé d'un log stratigraphique sommaire a permis de préciser l'âge du bas de la série urgonienne : ces calcaires bioclastiques sont du Barrémien supérieur. L'événement est situé sur une fracture N 175 qui a influencé la direction des écoulements à l'entrée du réseau. Cette direction subméridienne N 160 - N 180 est particulièrement développée sur le plateau directement à l'amont de l'exurgence. La non connaissance des azimuts du réseau ne nous permet pas d'interpréter le rôle de ces accidents. Les plongées souterraines ont toutefois permis de noter une puissance minimale de la zone noyée de 40 m.

26) Exurgence du Castor

Cette exurgence, totalement immergée, n'est pénétrable que par le lit de la rivière. Sa confluence avec l'Ardèche est nettement marquée par des remous en période de crue, attestant des débits importants. Cette galerie de grande dimension a été reconnue sur plus de 600m, un point bas à - 68 m ayant été franchi. La zone noyée dont le toit correspond au niveau de l'Ardèche se développe donc sur plus de 70m au-dessus de cette cote.

27) Source de l'Aulagnière

Cette petite source mineure de la rive droite est située à l'amont du méandre du Cirque de la Madeleine. Elle se tarit régulièrement lors d'étiages prolongés.

28) Lac du Cirque de la Madeleine

Une entrée accessible uniquement par l'Ardèche permet, après un parcours de 300 m, d'arriver sur un petit lac de 20 m de profondeur. Ce point d'eau est utilisé pour l'alimentation en eau du camping des Templiers. Il se trouve réalimenté même en période d'étiage et ce malgré les pompages. Aucun exutoire naturel ne lui est connu, il doit toutefois exister sous forme de venues dans l'Ardèche. En hautes eaux, un écoulement aérien traverse la galerie d'entrée.

Cette cavité se trouve à l'intersection de deux accidents N10 et N 60. La galerie d'entrée de vaste dimension suit l'accident N60 qui est marqué par un filon de calcite métrique bien visible au toit de la cavité. En surface, ce filon, mis en relief par l'érosion, individualise l'accident.

29) Source de la Madeleine

Cette source mineure de la rive droite se tarit lors d'étiages trop soutenus. Elle émerge sur un accident subméridien.

30) Exurgence de Mayagar

La grotte de Mayagar s'ouvre par un large orifice à plus de 20 m au-dessus de l'Ardèche. Deux cents mètres de galeries mènent sur un puits siphonnant. En période de crue, ce réseau évacue les eaux vers l'Ardèche. Des venues immergées pourraient assurer l'écoulement pérenne.

31) Source de la Fève

C'est une petite source pérenne de la rive droite qu'aucune forme karstique remarquable n'accompagne.

32) Source du Crapaud

Sur la même rive, cette source située au niveau du lit d'étiage de l'Ardèche est également dépourvue de formes karstiques voisines.

33) Source du Passeron

Cette source pérenne émerge légèrement au-dessus de l'Ardèche.

34) Source de l'Ecluse - Grotte Deloly

Ces deux cavités de la rive gauche sont situées au débouché de la combe du Pouzat. L'exsurgence de l'Ecluse émerge dans le lit de l'Ardèche par deux galeries. La galerie amont est totalement immergée et permet l'accès de la grotte du Bateau par un puits remontant. La galerie aval est pénétrable sur 20 m par une grotte qui s'ouvre sur la rivière. Elle s'interrompt alors sur un siphon que 60 m de plongée sépare de la branche amont. Un puits a été reconnu au-delà de cette bifurcation jusqu'à la cote - 60 m. La zone noyée se développe donc largement sous le niveau de l'Ardèche. Cette exsurgence est captée par un pompage pour l'alimentation en eau du camping de St-Marcel.

Cette exsurgence semble en liaison avec la grotte Deloly semi-active, distante de 150 m et perchée de 25 m au-dessus de l'Ardèche. Cette dernière peut entrer en activité lors d'épisodes pluvieux. L'ensemble de ce réseau prend une direction sensiblement est-ouest.

D'un point de vue lithologique, ces exurgences proviennent de calcaires bioclastiques très grossiers formant une falaise massive au niveau de l'Ardèche. Ces niveaux ont été datés de la fin du Barrémien supérieur et du Bédoulien, c'est à dire dans les niveaux les plus élevés de la formation urgonienne, rencontrés sur le tracé de l'Ardèche.

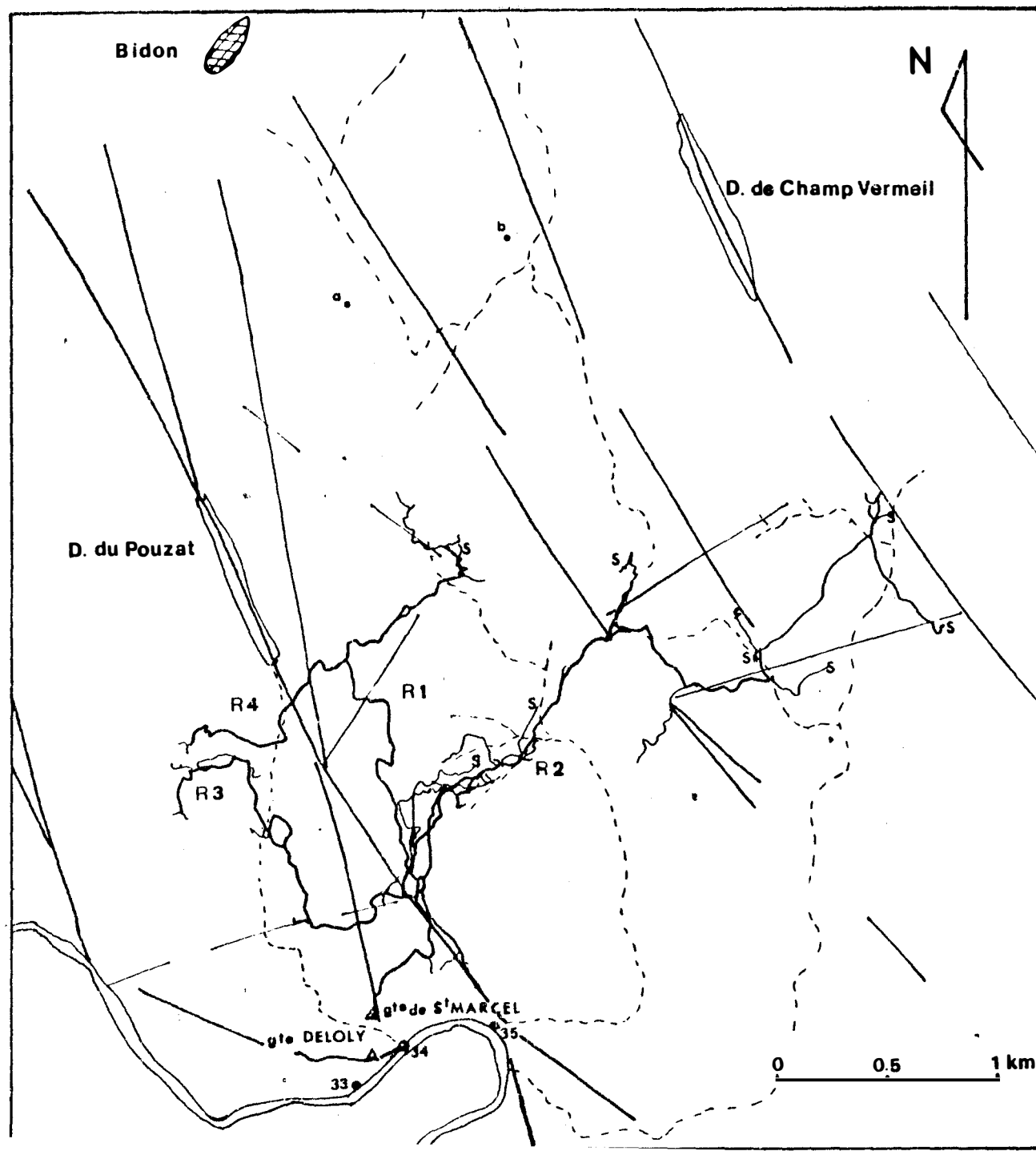
Notons la présence à l'Est d'un mégaccident N 140. La grotte Deloly ainsi que l'entrée du vaste réseau de St-Marcel sont alignés sur une faille annexe N 170 (fig. 35). Le réseau est-ouest Deloly-Ecluse émergeant sur cet accident semble se développer selon une faille N 115.

35) Source du ruisseau de Font-Ponchon

Cette source, située au débouché de cette vallée sèche, présente de faibles débits mais ne semble pas tarir. Elle a édifié des cônes de tufs importants. Elle se trouve sur le parcours de la mégafracture N 140 précédemment citée.

2 - 1.3. Conclusions

Les exutoires du massif karstique des Gras se présentent au niveau des gorges de l'Ardèche, comme une succession d'arrivées d'importance souvent modeste. Cette dispersion des écoulements constitue un argument en faveur d'un karst à faible niveau d'évolution. Plusieurs types d'émergences ont toutefois été rencontrés. Des émergences de



- D. Doline
- S. "Siphon"
- R Réseau de St-Marcel
- a Aven de Fontlongue
- b Aven de Fontanilles
- c Aven Despeysse
- 33 Sce du Passeron
- 34 Sce de l'Ecluse
- 35 Sce de Font Ponchon

fig.35: Extension et position structurale des réseaux de St-Marcel et de la grotte Deloly-source de l'Ecluse.

calcaires fissurés, non accompagnées de formes karstiques et ne présentant pas une grande variabilité des débits s'opposent à des émergences karstifiées aux débits très contrastés. Ces dernières s'ouvrent sur un réseau développé et donnent accès à la zone noyée, parfois reconnue sur une forte épaisseur. La nature des écoulements pérennes permet également de différencier des émergences aériennes et des émergences immergées. La répartition de ces différents types de sources n'est pas aléatoire et semble directement liée aux conditions tectoniques et stratigraphiques du secteur étudié.

Eléments structuraux et répartition des émergences (fig. 36)

Rappelons que l'étude de la fracturation a mis en évidence plusieurs zones structurales selon la répartition des accidents plurikilométriques N 50 et N 140. La zone centrale des gorges qui voit le passage de la "bande faillée de St-Remèze" est dominée par les mégaaccidents N 50. D'un point de vue hydrogéologique, cette zone comprend principalement des exurgences aériennes correspondant à des sources de calcaires fissurés comme les sources du Tiourre, de l'Aiguille, de la Fare, du Platane (qui est une source immergée)... Un début de karstification est plus affirmé aux sources de Vanmalle et de la Dragonnière. La partie aval des gorges, recoupée par les mégaaccidents N 140, laisse place à des réseaux plus développés, de vastes dimensions dont les écoulements pérennes sont immergés. On peut citer les réseaux de l'évent de Gournier, de l'évent de Midroï, de la Guigonne, de l'Ecluse. Notons enfin que la zone amont, traversée par les derniers accidents N 50 occidentaux, présente des systèmes très karstifiés, alimentés en partie par des pertes provenant de terrains non urgoniens. C'est le cas de la source de la Chaire et de l'évent de Foussoubie.

L'explication de cette différence de karstification au niveau des gorges semble plus à rechercher dans l'existence de facteurs défavorables dans la zone faillée N 50 que par des prédispositions de la zone structurale orientale.

La zone centrale est en effet affectée d'accidents N 50 largement dominants à toutes les échelles d'observation. L'intensité de fracturation est d'ailleurs maximale dans cette zone. L'axe de raccourcissement Z de la compression alpine a pu être précisé à l'aide de fentes de tension datées de cette phase. Pour cette zone structurale, GUERIN (1973) a donné une direction variant entre N 100 et N 120. Elle s'oppose donc à une karstification des fractures N 50 sans laquelle tout développement important est possible. Il en résulte par contre un aquifère finement fissuré, caractéristique de cette zone. Un mégaaccident N 50 pourra cependant être emprunté par un collecteur à proximité de l'Ardèche. C'est le cas du petit système karstique de la Dragonnière. La zone aval a subi pour sa part une évolution classique dans une formation calcaire aussi favorable à la karstification, avec le développement de grands collecteurs.

Variations lithologiques et répartition des émergences

Des variations lithologiques peuvent également être à l'origine de la répartition de certains caractères des émergences.

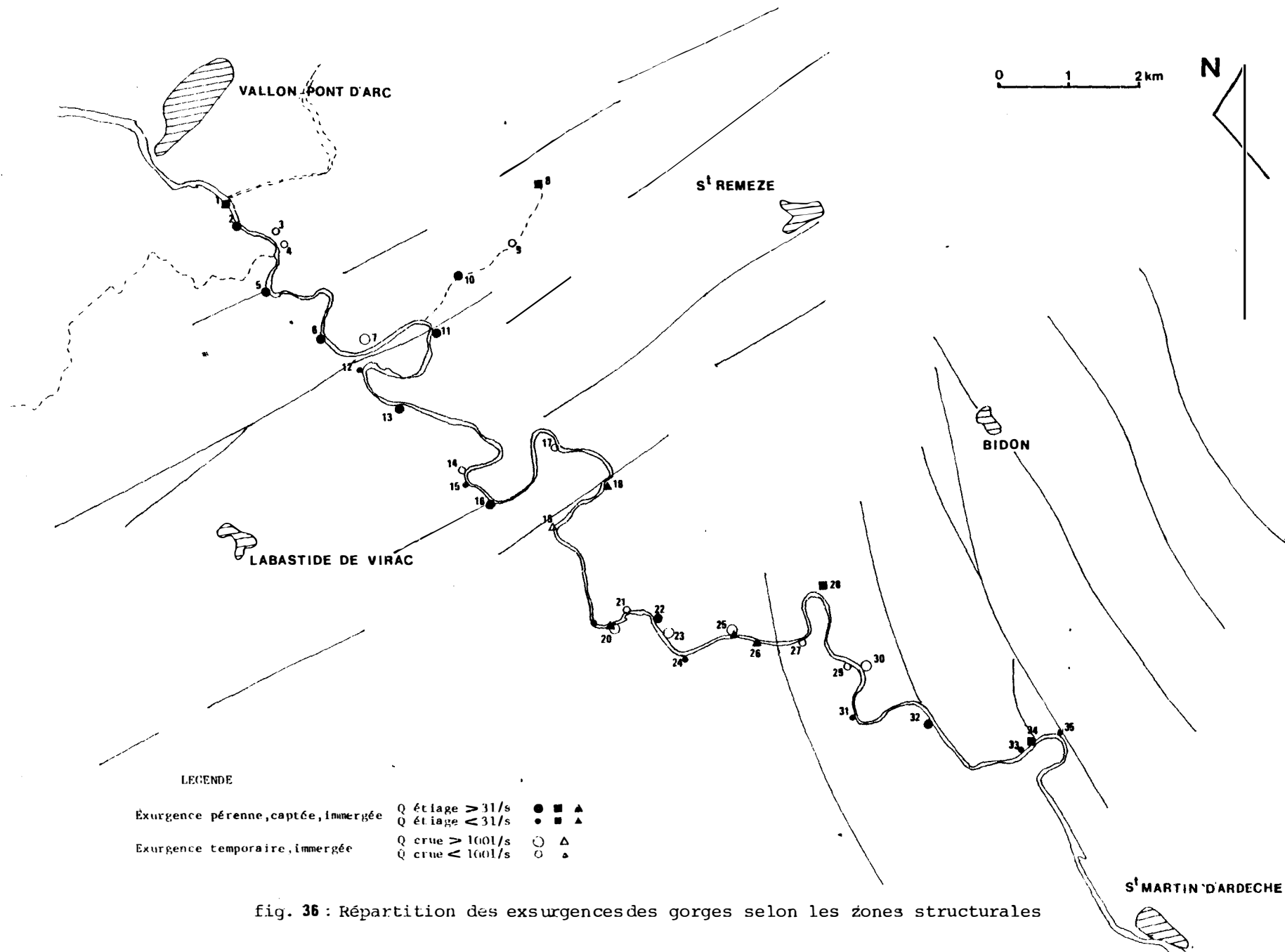


fig. 36 : Répartition des exurgences des gorges selon les zones structurales

On peut ainsi constater dans la zone centrale des gorges, l'existence de nombreux niveaux de base potentiels constitués par des changements lithologiques. Des petits bancs surmontés d'une barre massive peuvent en effet exercer un contrôle lithologique sur les exurgences. L'intersection de ce contact avec l'Ardèche : le niveau de base majeur, sera marqué d'une part, par l'existence d'un rapide sur la rivière et indiquera d'autre part, une émergence potentielle aérienne.

Signalons ainsi les sources du Figuier, de la Langue de Boeuf de la Dragonnière, de la Châtaigneraie, du Parapluie. A l'amont et à l'aval des gorges, ces variations lithologiques sont moins fréquentes au niveau de l'Ardèche. Un contrôle tectonique va essentiellement s'opérer et définira avec le niveau de l'Ardèche les conditions d'émergence. Les écoulements ne seront pas limités par un plan subhorizontal d'origine stratigraphique et auront tendance à s'enfoncer. Les écoulements sortiront alors directement dans le lit de l'Ardèche, n'assurant une circulation aérienne qu'en période de crue.

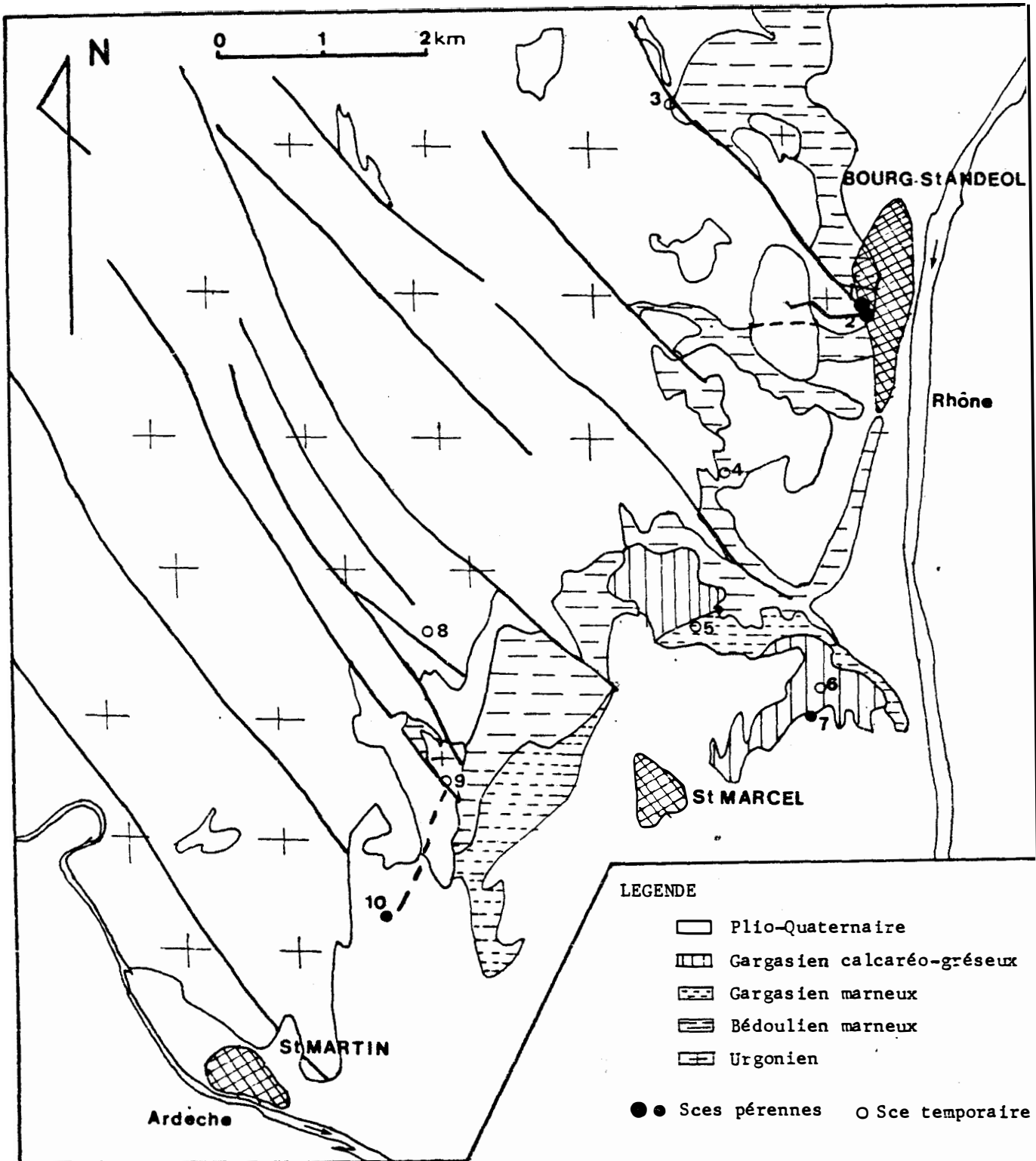
Ces observations sont à mettre en liaison avec les données stratigraphiques recueillies sur les coupes des calcaires urgoniens. L'Ardèche traverse des niveaux allant de l'Hauterivien au Barrémien inférieur de la source de Vanmalle à la source du Platane, c'est à dire jusqu'au dernier mégaaccident N 50. Chaque accident de cette famille fait apparaître des terrains plus récents vers l'aval. Ces niveaux varient du Barrémien supérieur au Bédoulien sur le reste du tracé en se présentant plus régulièrement sous la forme de calcaires massifs. La tendance à l'immersion des apports du karst sera donc plus générale.

Rôle hydrogéologique des mégaaccidents N 50 et N 140

Un très grand nombre d'émergences des gorges se situent sur des mégaaccidents N 50 : évent de Foussoubie, sources de l'Aiguille, du Tiourre, de la Dragonnière, du Platane et du Parapluie. La connaissance des topographies de réseau permet parfois de trancher sur le rôle hydrogéologique de telles failles. La goule de Foussoubie est ainsi recoupée par le mégaaccident du Pas du Mousse. Le réseau karstique ne se développe pas sur cet accident mais sur l'ensemble du bloc délimité par cette faille et sa première homologue occidentale. Cette dernière joue le rôle d'écran et détermine l'émergence de l'évent de Foussoubie. Le réseau de la Dragonnière voit également sa karstification interrompue sur un accident N 60 qui permet l'émergence.

La rareté des données spéléologiques ne permet pas de confirmer un tel comportement des accidents N 140 de la zone orientale. Des émergences plus rares se positionnent sur les quelques failles de cette famille qui recoupent les gorges. On peut citer la source de l'Ecluse et les différents réseaux de la grotte de Saint-Marcel. Le réseau de l'Ecluse - grotte Deloly d'orientation E-W émerge sur une telle fracture.

Il apparaît qu'aucun réseau karstique ne franchit un accident plurikilométrique N 50 ou N 140. Le rôle déterminant de ces failles écrans sur l'émergence des réseaux a plusieurs fois été mis en évidence. L'étude des émergences du plateau, suivie d'une campagne de traçage, va tenter de confirmer ces premiers résultats et de les étendre à l'échelle du massif.



- | | | |
|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| 1 Goul du Pont | 4 Sce de St-Férréol | 7 Fontaine des Pères |
| 2 Goul de la Tannerie | 5 Sce de Pradel | 8 Sce de Salivaud |
| 3 Sce du Haut-Darbousset | 6 Sce de la Combe du vin | 9 Fontaine Crottée |
| | | 10 Font Abrisou |

fig.37 : Conditions d'émergence des exurgences du bassin versant du Rhône.
(d'après la carte géologique de Mazellier(71) et Guérin(73))

2 - 2. LES EMERGENCES DE BORDURE DU MASSIF KARSTIQUE

Situées à la périphérie du massif karstique, ces émergences vont recueillir les écoulements non drainés vers les gorges de l'Ardèche. Différentes dépressions vont ainsi entrer en concurrence avec l'Ardèche pour étendre leur zone d'influence. Le Rhône, l'Ibie, la terminaison septentrionale du fossé d'Alès, la Cèze, sont les niveaux de base à proximité desquels des sources vont émerger.

2 - 2.1. Les émergences de la vallée du Rhône (fig. 37)

A l'Est, la retombée du massif urgonien sur la vallée du Rhône laisse apparaître les formations à composante marneuse du Bédoulien et du Gargasien. Cette succession est cachetée ou tronquée par les formations quaternaires de la vallée du Rhône. Les sources de ce versant vont émerger à proximité du contact Urgonien-Bédoulien marneux.

Les sources de Tourne

Elles émergent dans l'agglomération de Bourg-Saint-Andéol au débouché du ruisseau sec de Sardagne. Ces deux exutoires distants de 50 mètres représentent la plus grande émergence du massif des Gras du point de vue des débits. Le Goul de la Tannerie à l'aval et le Grand Goul semblent en effet drainer le même réseau. Un captage latéral contribue à l'alimentation en eau potable de l'agglomération. Une récente étude de la SECMAEP (1984) a préconisé l'exploitation d'un forage de reconnaissance dans la galerie principale du Goul de la Tannerie. Cette galerie a été plongée sur 1020 m selon une direction générale WNW-ESE. Après 700 m de galeries subhorizontales, des puits successifs permettent d'atteindre la cote de - 125 m sous l'exutoire soit - 65 m NGF ... Le Grand Goul a été plongé sur 200m. La cote de - 115 m est ici très rapidement atteinte. La puissance minimale de la zone noyée s'avère donc considérable.

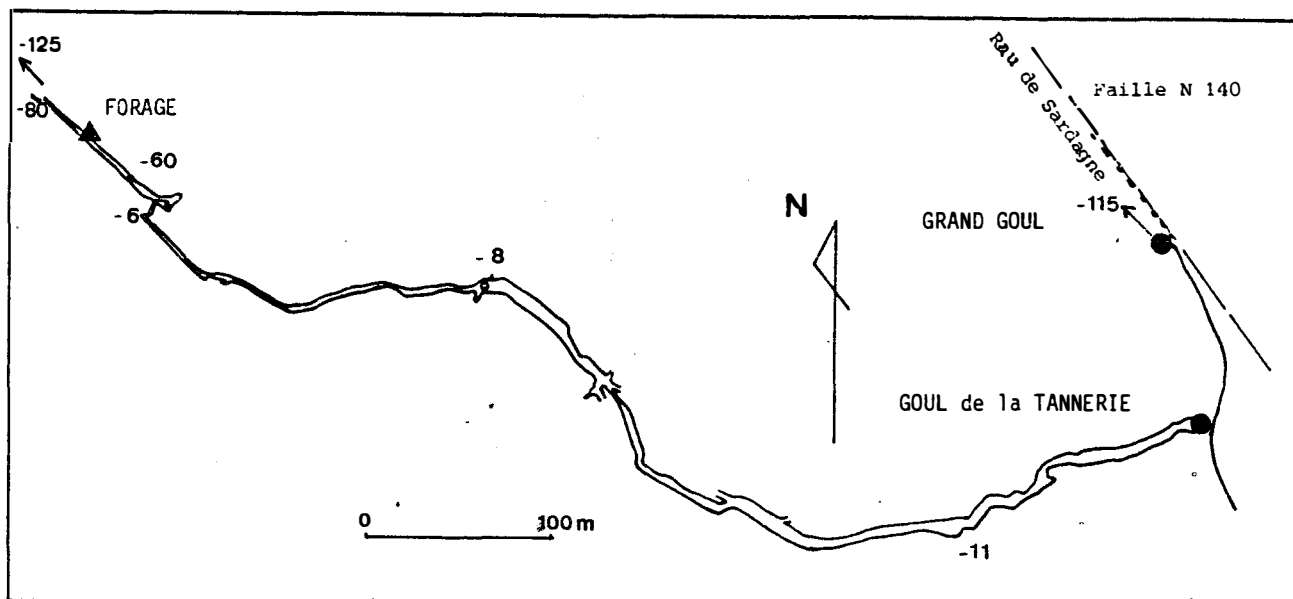


fig.38 : Conditions d'émergence des sources de Tourne. (topographie B.Léger, 1982)

L'émergence s'effectue au contact des calcaires urgoniens et des marnes bédouliennes qui exercent un véritable contrôle lithologique. Ces exutoires sont également situés sur le tracé d'un accident plurikilométrique N 140 (fig. 38). La position de l'émergence est totalement déterminée par ces deux contraintes lithologique et structurale. Le rôle hydrogéologique de la faille N 140 est difficile à interpréter, mis à part au voisinage des émergences où elle canalise les écoulements. Le rôle de faille-drain ne semble pas se confirmer à l'amont.

La source du Haut-Darbousset

Cette petite source temporaire émerge à l'amont du vallon de Sardagne à une cote de 180 m. Elle est située sur le même accident que les sources de Tourne et au contact des calcaires urgoniens et des marnes bédouliennes.

La source du Pradel, les fontaines des Pères et de la Combe du vin émergent dans des terrains aptiens à une cote légèrement supérieure à 100 m. Les deux dernières correspondent au drainage des sables verts gargasiens. La source temporaire de Salivaud émerge dans la formation urgonienne dans le prolongement d'un accident N 140. La Fontaine Crottée (160 m) est également située sur le trajet d'une mégafaille N 140 : la faille de Champ Vermeil près de la zone de transition entre calcaires urgoniens et marnes aptiennes.

La source pérenne de Font Abriou (145 m) émerge dans des alluvions qui masquent un changement lithologique identique. Elle se situe sur le prolongement de la faille N 140 de Bidon.

Mis à part le réseau de Tourne, les exurgences de ce bassin versant sont donc mineures. Les marnes bédouliennes qui ceignent le massif urgonien permettent l'émergence de ces écoulements.

Les mégaaccidents N 140 jouent également un rôle fondamental (probablement un rôle de faille-écran) dans l'apparition des émergences. D'un point de vue quantitatif, il semble que le cumul des débits de ces différentes exurgences ne traduise pas l'importance du drainage vers la vallée du Rhône.

2 - 2.2. Les émergences de la bordure orientale (fig. 39)

La basse vallée de l'Ibie constitue une limite orientale pour le karst urgonien. Après avoir une première fois traversé la formation urgonienne, l'Ibie s'écoule sur les assises turoniennes. Peu avant sa confluence avec l'Ardèche, elle réentaille les calcaires urgoniens. Ce parcours accidenté se traduit par une perte des écoulements sous le lit de la rivière. Peu d'arrivées karstiques ont été inventoriées sur ce versant du plateau de St-Remèze. Toutes temporaires, elles semblent posséder des écoulements pérennes sous le niveau de l'Ibie rejoignant ainsi le niveau d'étiage de la rivière.

L'évent de Rives, à quelques mètres du lit de l'Ibie, livre l'accès à une galerie de 40 m stoppée sur un siphon. Il peut présenter des débits de crue importants de plusieurs centaines de litres par seconde. Des arrivées sont également repérables en bordure du lit de l'Ibie. L'évent de Marichard, éloigné de 150 m et légèrement perché au-dessus de l'évent de Rives, constitue le trop plein exceptionnel du système. Ces deux émergences sont alignées sur un accident N 65 mettant en relation d'une part les calcaires urgoniens, d'autre part les alluvions actuelles de l'Ibie. Ces deux cavités se développent sur des directions transverses à cet accident N 140 à N 160.

Plus à l'aval, à l'entrée du défilé urgonien, un événement temporaire s'ouvre sur un réseau de plus de 100 m de galeries. Il peut présenter de forts débits en crue. Un écoulement souterrain semble probable. La cavité se développe selon une direction N 50.

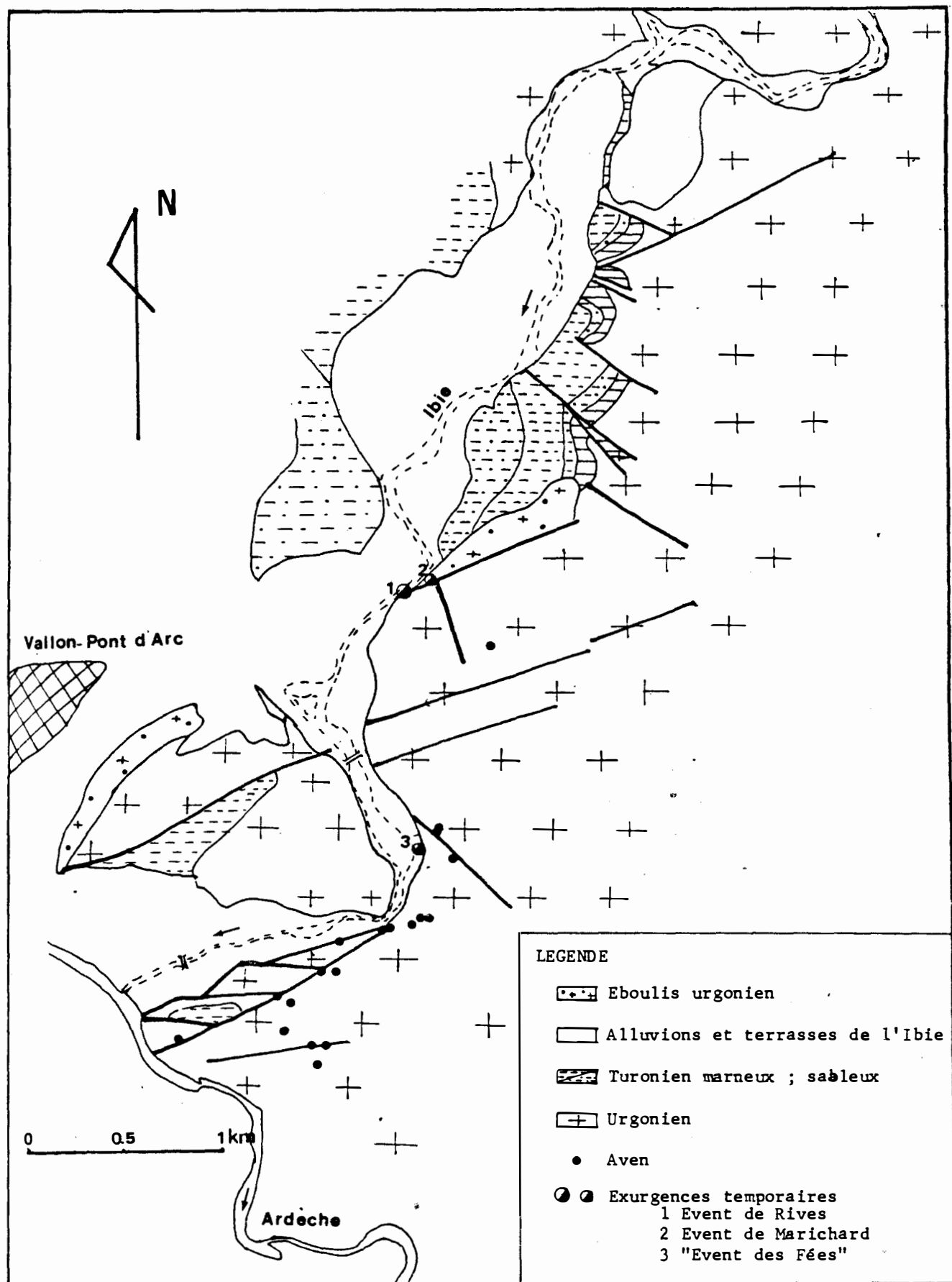


fig.39 : Conditions d'émergence des exurgences de la bordure occidentale.
(d'après les données géologiques de C.Signolles,1980)

Au Nord de cette zone urgonienne en contact direct avec l'Ibie, des terrains marneux bédouliens ainsi que des terrains turoniens de diverse nature (sables, marnes, calcaires) délimitent le massif karstique. Aucune exsurgence n'est ici décelée malgré les conditions favorables d'émergence créées par la présence de l'imperméable marneux.

L'enfoncement de la rivière Ibie a pu défavoriser ces zones au profit de secteurs exclusivement urgoniens où les réseaux karstiques se sont mieux adaptés à cette évolution. Deux zones de drainage en résulteraient : le secteur amont surmontant la portion E-W de l'Ibie et le secteur à l'Ouest de Vallon Pont d'Arc.

Il est également possible que les écoulements s'infiltrèrent sous les terrains marneux du Bédoulien alimentant ainsi une nappe captive urgonienne pouvant facilement s'écouler vers le Sud et gagner le cours de l'Ibie.

2 - 2.3. Les émergences du plateau d'Ornac (fig. 40)

Aucune émergence karstique n'a été repérée sur le plateau urgonien de la rive droite de l'Ardèche. Le problème de l'établissement d'une limite méridionale de bassin versant nous a amené à étudier la répartition des exurgences dans les formations rencontrées jusqu'à la Cèze.

Les calcaires blancs du Ludien occupent une importante surface correspondant au coeur du synclinal Issirac-Barjac. De rares sources temporaires apparaissent au coeur de cette formation. Elles sont localisées au fond des combes qui au Sud d'Ornac découpent le plateau et assurent le drainage méridional de surface. On peut signaler d'Ouest en Est les sources de la combe des Blaches, de Monteil, de la combe de Claux et de la Font de Vidourle. La présence de formations plus anciennes à dominante marneuse à l'Est et au Sud-Est laisse apparaître de nombreuses exurgences pérennes. La source de Pierre Brune est située ainsi au contact des calcaires blancs et des marnes lutétiennes. Le mur imperméable est en fait constitué par les marnes bleues gargasiennes dont un pointement est visible à la base du Lutétien. Un accident N 150 limite ces deux ensembles de formations. Cette émergence est captée pour l'alimentation en eau de la commune de Laval-Saint-Roman. Elle est à l'origine d'un ruisseau ouest-est : émissaire des calcaires blancs qui gagne successivement le valat d'Aiguèze puis l'Ardèche. Une exsurgence plus méridionale alimente le valat d'Avenças dans des conditions similaires d'émergence. Ce dernier se jette également dans le valat d'Aiguèze.

Au Sud d'Issirac, deux familles d'émergence issues des calcaires paléogènes ont pu être mises en évidence. Les fonts de Cancoule et d'Agas émergent au contact des marnes bleues gargasiennes au Sud-Est. La limite des calcaires ludiens et des marnes bartoniennes, qui s'étend au Nord de la Cèze d'WNW à ESE, voit d'autre part l'émergence de quelques sources temporaires.

Seules les sources de la bordure Est traduisent un drainage des calcaires blancs ludiens : aucun indice d'un écoulement méridional, occidental ou septentrional, n'a par ailleurs été décelé sur cette formation.

Les calcaires urgoniens de la rive gauche de la Cèze ne présentent pour leur part qu'une seule émergence pérenne de grande importance : la source de Monteils. Le problème de son rayon d'influence est posé. Une alimentation intra-urgonienne depuis les zones enfouies ou à partir des calcaires paléogènes ne semble pas se concrétiser. Ces hypothèses ne peuvent toutefois être écartées.

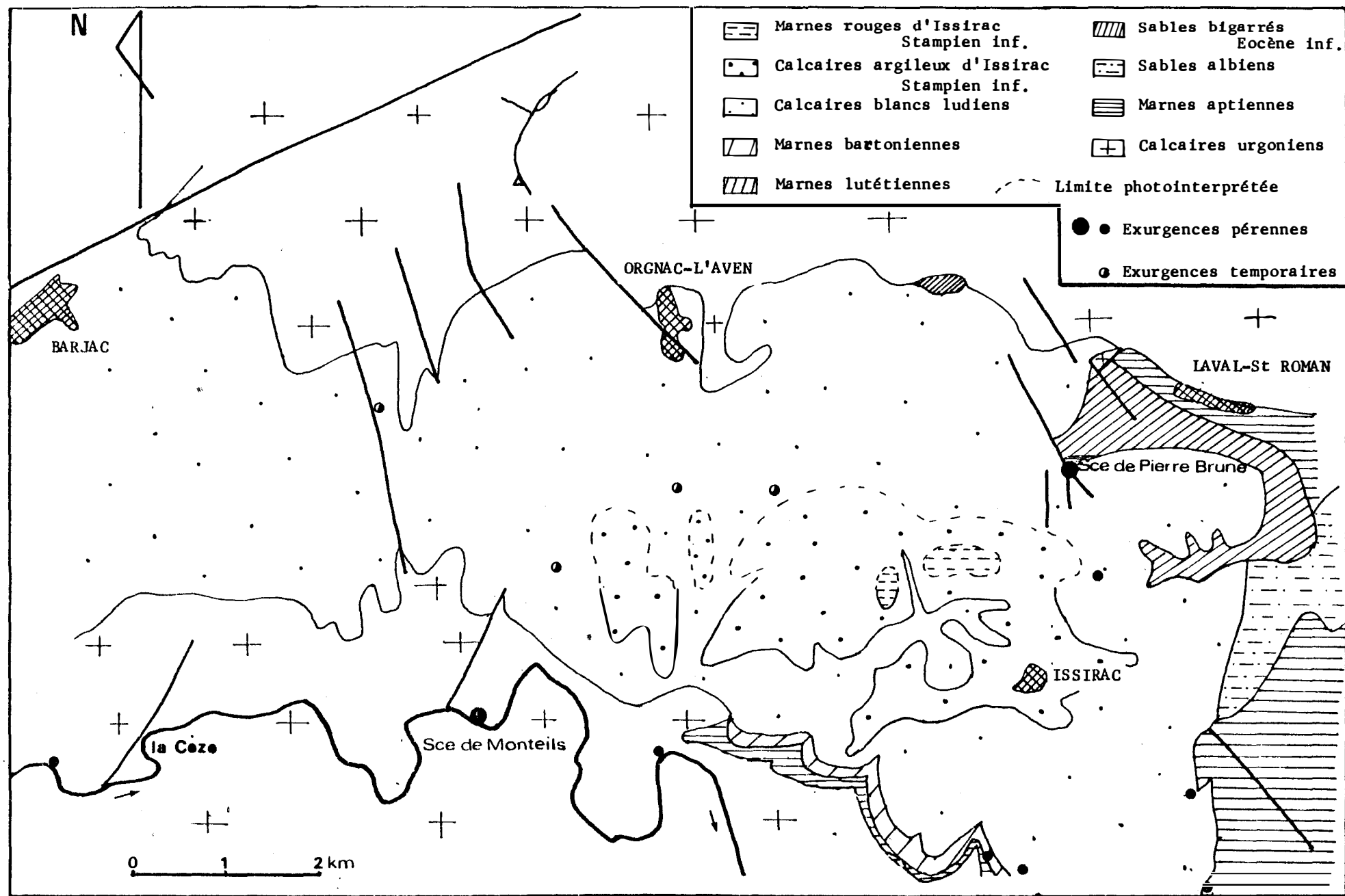


fig.40 : Situation géologique des exurgences du plateau d'Ornac.

En bordure de la terminaison septentrionale du fossé d'Alès, peu d'émergences ont été recensées. Au Sud de Vagnas, plusieurs exurgences temporaires issues des calcaires urgoniens émergent au niveau des calcaires paléogènes.

2 - 3. CONCLUSION

Le creusement du plateau des Gras par l'Ardèche est un élément déterminant dans l'hydrogéologie de ce massif karstique. Ce niveau de base a orienté une grande partie des écoulements et se trouve jalonné par un chapelet d'émergences. Les écoulements se dirigent également vers la périphérie du massif où d'autres niveaux de base prévalent : le Rhône, l'Ibie, la Cèze. Les exurgences du pourtour du massif sont principalement guidées par le contexte stratigraphique. Les limites de contact entre les calcaires urgoniens et les marnes aptiennes (bordure orientale) d'une part ou les marnes éocènes (plateau d'Orgnac) d'autre part, constituent des lieux privilégiés d'émergence. Des accidents structuraux interviennent également dans cette localisation. Les failles N 50 à l'Ouest et les failles N 140 à l'Est demeurent les directions les plus propices aux émergences.

Les exurgences intra-urgoniennes des gorges de l'Ardèche voient leurs émergences déterminées pour l'essentiel par les accidents structuraux (voir § 2.1.3.).

3 - HISTOIRE DE LA KARSTIFICATION

Les différentes étapes de la karstification du plateau des Gras seront abordées dans ce paragraphe. La karstogenèse ne peut être dissociée du processus de creusement des gorges de l'Ardèche sur lequel nous nous attarderons.

De nombreux auteurs ont tenté des reconstitutions pour expliquer le creusement des gorges et le replacer dans l'histoire géologique régionale. Citons tout d'abord F. ROMAN (1950), pour qui "cette partie du cours de l'Ardèche résulte de la mise au jour d'un réseau souterrain dont la partie supérieure a aujourd'hui disparu". L'arche du Pont d'Arc serait le dernier vestige de cette configuration que cet auteur daterait du Quaternaire ancien. Pour R. MAZELLIER (1971), la rivière s'est surimposée au massif calcaire durant le Tertiaire. Un enfouissement progressif au droit de fractures ayant joué à l'Oligocène s'amorce alors durant le Miocène. Le problème de la formation du Pont d'Arc (dont l'existence suggère la première théorie) est abordé par P. ELOUARD (1982). Au sein d'un méandre, l'érosion régressive des versants intérieurs peut isoler un pédoncule (méandre du Pas du Mousse et de la Maladrerie) et dans un second temps créer une brèche utilisée par la rivière (Pont d'Arc). Pour J. BLANC (1976), un argument géologique local semble déterminant. L'existence d'un affleurement d'argiles plaisanciennes (Pliocène supérieur) à Sauze, au débouché des gorges, à la cote de 50 m, prouve le creusement avancé du canyon à cette époque. Une limite postérieure est donc établie. Sans argument complémentaire, cet auteur date l'individualisation des gorges du Pliocène.

Nous allons tenter de reprendre cette discussion à l'aide de données géologiques, géomorphologiques et structurales.

3 - 1. DONNEES GEOLOGIQUES

La seule analyse du bassin de Basse-Ardèche ne va pas permettre de résoudre les deux problèmes posés : quelles sont les différentes étapes de la karstification et quels sont leurs liens avec le creusement des gorges ? C'est donc en partie à l'échelle du bassin du Sud-Est qu'il faudra raisonner en s'intéressant plus particulièrement à la formation de la vallée du Rhône.

- L'émersion de la majeure partie du domaine du Bas-Vivarais date de la régression de la fin du Crétacé supérieur. Une érosion intense va alors s'installer et se poursuivre durant l'Eocène. Des dépôts de sables et d'argiles bariolées apparentés à l'Eocène inférieur (B. ALABOUVETTE et C. CAVELIER, 1984) ont été découverts dans des poches karstiques aux environs d'Ornac, Le Garn et Lagorce. Une première phase de karstification, d'âge probable crétacé supérieur, est donc mise en évidence.

- A la suite de la phase de compression pyrénéo-provençale de l'Eocène supérieur, une longue phase de distension va s'installer. De direction N-S à NE-SW, elle se prolonge du Rhin au Bas-Rhône. Un premier paroxysme est discernable dès le Ludien. Localement, il se traduit par l'ouverture du fossé d'Alès et le réhaussement corrélatif du plateau urgonien. Ce bassin continental a alors vraisemblablement attiré les cours d'eau issus des Cévennes et du Vivarais. Les dépôts fluvio-lacustres de la région méridionale de Labastide-de-Virac pourraient attester un tel écoulement. Aucune liaison entre les massifs cristallins et le futur Pré-Rhône n'existe alors. Un second paroxysme va définitivement privilégier cet axe Nord-Sud durant l'Oligocène supérieur.

- Le Miocène est marqué par les transgressions progressives de l'Aquitainien mais surtout du Burdigalien et de l'Helvétien qui envahissent la rive gauche du Rhône actuel et forment un sillon périalpin. La sédimentation détritique provenant du Massif Central n'est présente que par de rares dépôts sur la bordure orientale de cette mer miocène. Il est vrai que la longue période d'érosion n'a engendré que des reliefs très mous, parcourus par un réseau hydrographique de faible importance ayant gagné son profil d'équilibre (DEMARCO, 1970). Cet auteur signale toutefois deux cours d'eau aux environs de Tournon et Vienne. Plus proche de notre zone d'étude, le secteur de Condillac-La Laupie au Nord de Montélimar laisse apparaître un paléorelief comblé par des sables helvétiques. Des passées grossières d'éléments granitiques témoignent d'une alimentation issue du Massif Central. Il apparaît donc au moins à l'Helvétien une alimentation, même réduite, de la mer miocène par les cours d'eau centraliens. Ce développement se veut être un argument pour l'installation d'une "Pré-Ardèche" sur les formations du Crétacé inférieur des Gras. Aucune donnée stratigraphique ne vient étayer cette hypothèse dans la vallée du Rhône.

Un autre élément caractérise cette période. A la suite des travaux de J. NICOD (in M. JULIAN et J. NICOD, 1984), il a été mis en évidence l'existence de vastes surfaces d'aplanissement miocènes à la périphérie des Alpes. Ebauchées par altération sous climat chaud et humide, elles ont nécessité la présence d'une nappe phréatique proche. Les surfaces d'aplanissement observées entre les cotes 250 et 300 m sur le plateau des Gras semblent devoir être rattachées à cet épisode (Y. CALLOT, 1979). C'est sur cette surface que se serait installée la paléo-Ardèche. Les surfaces supérieures cotées 350 à 400 m pourraient marquer une pénépléation au Crétacé supérieur.

- Une phase de régression va s'amorcer dès le Tortonien moyen. Elle atteindra toute son ampleur lors du Messinien basal durant la crise de salinité de la Téthys. L'influence de la phase tectonique rhodanienne qui crée le soulèvement général du Sud-Est et l'abaissement du niveau de la Téthys de 200 à 300 m vont permettre l'enfoncement d'un important réseau hydrographique préfigurant celui du Rhône. Cette intense phase de creusement semble être l'épisode le plus favorable à l'encaissement de l'Ardèche. Le réseau anté-pliocène ne présente que peu de modifications pour les cours d'eau provenant du Massif Central, par rapport au réseau actuel.

- Au Pliocène, une transgression sud-nord installe la ria rhodanienne jusqu'aux abords de Lyon. Plusieurs bassins s'individualisent séparés de seuils. Le bassin de Pierrelatte est ainsi délimité par les seuils de Donzère au Nord et de Mondragon au Sud. Une importante période de comblement prend place : des dépôts marneux marins font suite à des dépôts marneux lagunaires. Au débouché des gorges de l'Ardèche, les affleurements marins de Sauze et de Saint-Just, limités latéralement par le substratum crétacé, soulignent l'ancien tracé de l'Ardèche terminale.

- A la limite Pliocène-Quaternaire, un nouvel exhaussement du bassin rhodanien dû aux dernières secousses alpines réentame le processus de creusement et laisse apparaître le réseau hydrographique actuel du Rhône. Des mouvements tectoniques verticaux différentiels affectent les bordures de la vallée du Rhône, ils se prolongent durant le Pleistocène. Au Quaternaire, rythmé par les phases glaciaires, des périodes d'enfoncement interglaciaires alternent avec les épisodes de dépôt de terrasses. Ce creusement atteint 90 m au Mindel-Riss à la latitude de Valence (P. MANDIER, 1979) et 60 m près d'Orange (synthèse géologique du Sud-Est, 1984), soit un niveau proche de la cote actuelle au débouché de l'Ardèche. L'encaissement de l'Ardèche n'a guère du excéder plus de 15 m depuis le Pliocène supérieur.

Un tableau chronologique met en place l'histoire du creusement des gorges telle que nous l'avons présentée dans le contexte du Sud-Est de la France. La figure 41 illustre également la mise en place du réseau hydrographique Ardèche-Rhône.

Les différents mouvements relatifs de l'Ardèche et du Rhône depuis la fin du Miocène vont conditionner les épisodes de karstification les plus récents. Les indices de telles variations doivent être relevés dans le bassin de Pierrelatte. La figure 42 indique les affleurements pliocènes du bassin de Pierrelatte (BALLELIO, 1972). Le substratum crétacé affleurant et sous-alluvial a été représenté : il laisse entrevoir le cours très oriental du Rhône pliocène et la bifurcation vers le Nord-Est de l'Ardèche terminale.

Les campagnes de géophysiques menées à l'occasion de l'installation du CEA à Pierrelatte ont mis en évidence une faille dans l'axe de la vallée. Cet accident sépare (R. MICHEL, 1980) :

. à l'Ouest un synclinal crétacé dont le flanc oriental affleure à Pierrelatte. La formation pliocène possède une épaisseur qui ne doit pas dépasser quelques dizaines de mètres ;

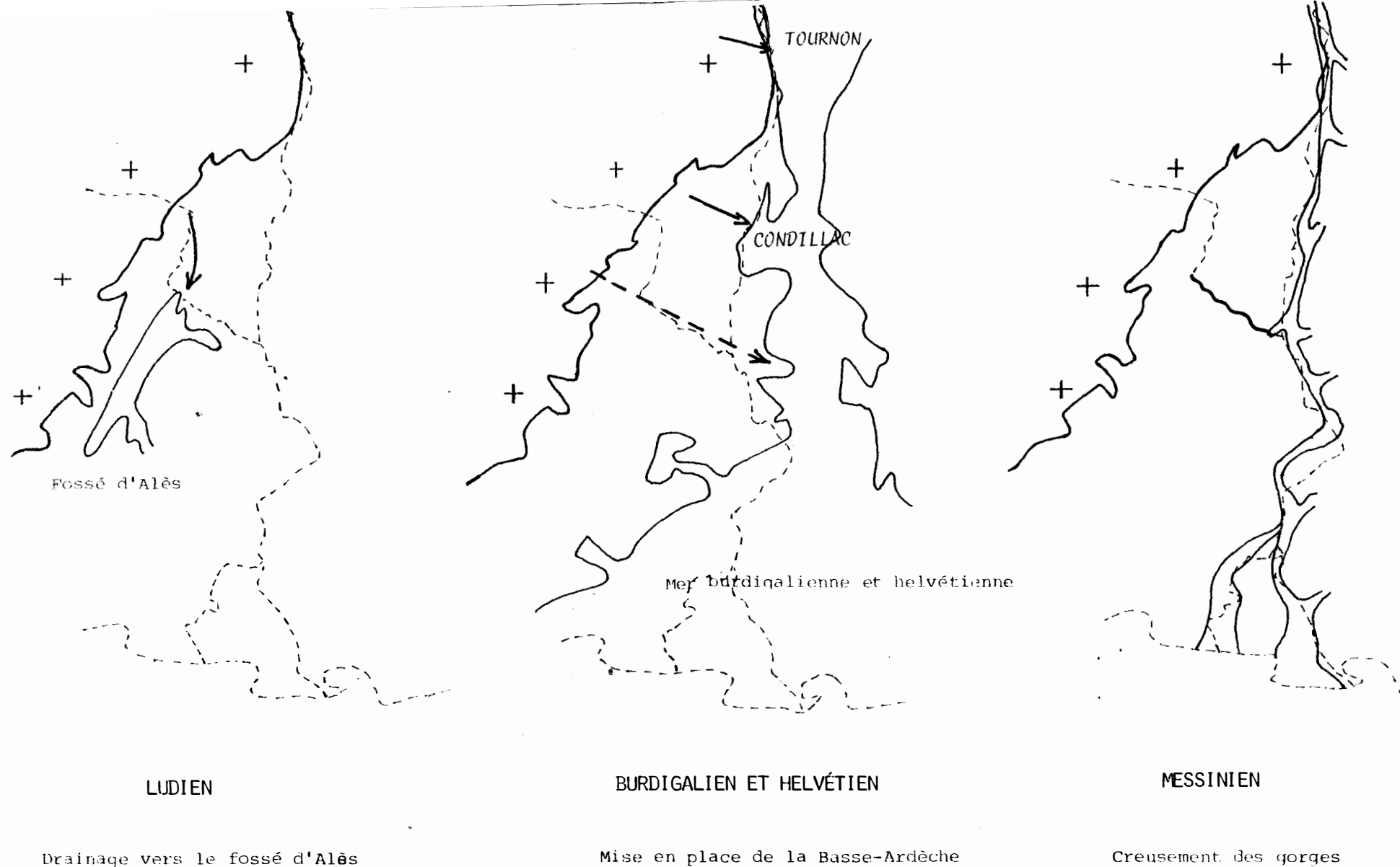


fig. 41: Mise en place du réseau hydrographique Ardèche-Rhône

ÉPOQUES		PHASES TECTONIQUES ÉVÉNEMENTS EUSTATIQUES	DONNÉES GÉOLOGIQUES LOCALES	HYPOTHÈSES HYDROGRAPHIQUES
CRETACE supérieur		- Régression générale et Erosion intense	- 1 ^{ère} Phase de karstification	
PALEOGENE	EOCENE	.Compression Pyrénéo-Provençale Nord-Sud	Dépôts de sables bariolés piégés dans des poches karstiques (Orgnac, Le Garn)	
	OLIGOCENE	.Phase de distension NNE-SSW du Rhin au Bas-Rhône - Transgression Sud-Nord de l'Aquitainien à l'Helvétien	- Affaissement du fossé d'Alès et Soulèvement du plateau des Gras	- Drainage des écoulements des Cévennes et du Vivarais vers le bassin continental d'Alès
NEOGENE	MIOCENE	- <u>Régression messinienne</u>	- Drainage de cours d'eau centraux vers la mer périalpine (Tournon, Condillac)	- Installation de la Proto-Ardèche sur le plateau des Gras
	PLIOCENE	.Compression alpine Est-Ouest - Transgression pliocène: installation de la ria rhodanienne - Régression fini-pliocène	- Enfoncement du réseau hydrographique: individualisation du Pré-Rhône - Phase de remblaiement: dépôts de marnes plaisanciennes (Sauze, St-Just) - Mise en place du Rhône actuel	- Creusement des gorges et Karstification profonde
QUATERNAIRE		- Glaciations	- Alternance de phases de remblaiement et d'encaissement	- Creusement actuel atteint durant les interglaciaires (Mindel-Riss)

tableau 1 : Réconstitution de l'histoire de la Basse-Ardèche.

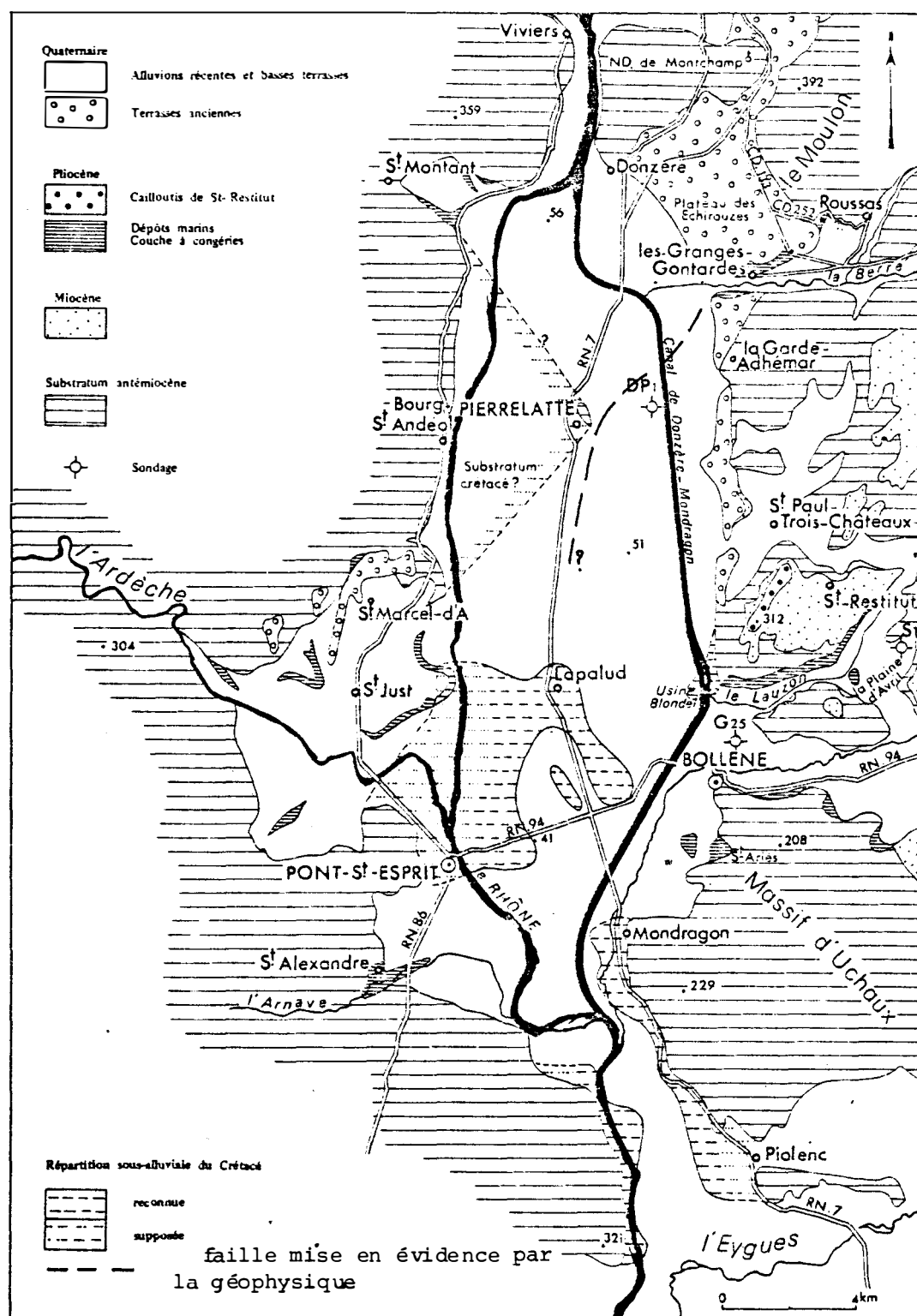


fig.42 : Géologie du bassin de Pierrelatte. (in Ballésio;1972)

. à l'Est, un remplissage pliocène important. Le sondage DPl de la CNR situe le niveau hydrographique pré-Pliocène à la cote N6F de - 236 m mettant ainsi en évidence l'importance du surcreusement puis du comblement de la vallée du Rhône.

Malgré la forte éventualité de mouvements verticaux négatifs et d'un rejeu de la faille de Pierrelatte durant le Pliocène, il semble que l'Ardèche ne se soit totalement adaptée au surcreusement fini-Miocène du Rhône que dans la partie terminale de son cours. Cette constatation pourra avoir des conséquences hydrogéologiques que nous examinerons postérieurement (cf. § 3.4.).

3 - 2. DONNEES GEOMORPHOLOGIQUES

Nous allons faire ici appel à des données topographiques touchant d'une part les cavités karstiques, d'autre part les affluents de l'Ardèche. La distribution altitudinale des différents phénomènes karstiques va permettre de les replacer dans le creusement des gorges et de différencier plusieurs phases de karstification.

1. Position topographique des cavités fossiles

Nous allons tenter de faire apparaître différentes phases de karstification à l'examen des cotes des cavités. Deux objections peuvent s'élever contre cette méthode à la lueur des données géologiques (cf. § 3.1.).

- Le principe de superposition (une cavité plus élevée est antérieure à celle qu'elle domine) n'est pas généralisable. Les différentes oscillations du niveau de base du Rhône et de l'Ardèche à partir du Pliocène peuvent introduire des anomalies importantes. Cette objection peut être rapidement rejetée en ce qui concerne les cavités dont la cote dépasse 100 m N6F. Toutes les observations accordent à la régression messinienne un caractère rapide sans oscillations ni paliers. Les cavités situées directement au-dessus du cours actuel de l'Ardèche de 0 à + 10 m ont vraisemblablement une valeur quaternaire et ont été creusées durant un interglaciaire. Le Mindel-Riss constitue avec l'époque actuelle les époques de creusement maximal. Il est par contre beaucoup moins facile de trancher pour des cotes intermédiaires.

- Les mouvements verticaux différentiels liés à la néotectonique durant le Pliocène et le Pléistocène ont affecté le plateau des Gras de mouvements positifs, la vallée du Rhône et le fossé d'Alès de mouvements négatifs. Il devient ainsi peu aisé de comparer les cotes de cavités situées en bordure de dépressions et au centre du massif. Ce fait est particulièrement marqué pour les réseaux fossiles situés à l'amont des gorges qui malgré un âge présumé ancien présentent des cotes relativement proches de l'Ardèche.

Parmi les cavités fossiles, il apparaît en théorie que les plus anciennes sont des cavités aux cotes élevées dont la mise en place a précédé l'installation de l'Ardèche. Leur direction d'écoulement peut donc être indépendante de celle de l'Ardèche actuelle. Puis viennent des cavités qui tout en gardant une altitude élevée, attestent l'existence de la rivière. Les arguments manquent le plus souvent pour apparenter les cavités à l'une ou l'autre de ces deux familles.

C'est le cas pour l'Aven d'Ornac, les avens des plateaux d'Ornac et de Bidon. Les galeries horizontales (fig.43) repérées aux avens d'Ornac, du Cadet, Double et Rochas (galerie de l'Ours) ne semblent pas incompatibles avec un drainage vers l'Ardèche. Si on adopte la chronologie précédente, il s'avère donc que ces réseaux sont antérieurs ou d'âge Miocène moyen.

La grotte de la Madeleine de 600 m de développement s'ouvre sur la paroi sommitale des gorges aux cotes NGF de 210 et 250 m. Par ailleurs, la grotte du Déroc parallèle à l'Ibie présente un développement de 1000 m à une altitude proche de 200 m. Ces deux grottes apparemment guidées par l'Ardèche semblent appartenir à la période séparant l'installation de la rivière du début de son encaissement, c'est à dire durant le Tortonien.

Les galeries vont alors s'étager en fonction de leur âge. Il s'avère qu'il existe toutefois une grande lacune entre les cavités supérieures et les cavités dominant directement l'Ardèche. Au centre des gorges, cette interruption atteint 100 à 150 m. La rapidité du creusement messinien pourrait expliquer l'absence de développement des stades intermédiaires.

C'est principalement pour les cavités situées à quelques dizaines de mètre du fond des gorges que se pose le problème de leur âge. De nombreuses oscillations du niveau de base régional : le Rhône sont en effet survenues depuis le Pliocène. Leurs amplitudes et les répercussions sur l'évolution du niveau de l'Ardèche sont mal connues.

La grotte de St-Marcel constituée de 4 réseaux complexes offre plusieurs générations de galeries, retraçant donc une partie de la karstification du plateau des Gras. Cette succession d'épisodes a déjà fait l'objet d'observations par J. BLANC (1976). Nous ne nous associerons pas à cet auteur sur le problème de la karstogenèse de cette cavité. Ce dernier base la chronologie des différents réseaux sur leur direction d'écoulement par rapport à l'Ardèche et sur leur cote relative. S'appuyant sur une topographie incomplète, il utilise un étagement qui s'avère inexact. La stricte utilisation du principe de superposition dont nous avons vu les limites suppose le creusement préliminaire des réseaux 1 et 4 dont la cote moyenne avoisine régulièrement 180 m N6F soit + 130 à + 140 m au-dessus de l'Ardèche. Cette phase de karstification semble s'être installée au début du creusement des gorges. La morphologie imposante du réseau 1 indique l'arrivée d'un grand collecteur en charge. Les réseaux 2 et 3 ainsi que l'entrée de la grotte présentent un cote moyenne de 100 m N6F soit + 50 m par rapport à l'Ardèche. Ces réseaux peuvent être rattachés à un stade avancé du creusement des gorges. Certaines portions basses recoupant ces différents réseaux (1, 2 et 3) et actuellement actives marquent une phase de karstification quaternaire (fig.44). La comparaison des cotes des cavités a permis de mettre en évidence plusieurs phases de karstification et de les caler par rapport au creusement des gorges.

Cette méthode présente toutefois rapidement ses limites. Elle ne permet pas de différencier des karstifications anciennes. Elle fournit des informations sporadiques souvent difficiles à corréler. La collecte de données étant effectuée, cette analyse est par contre nécessaire à la compréhension de la karstogenèse.

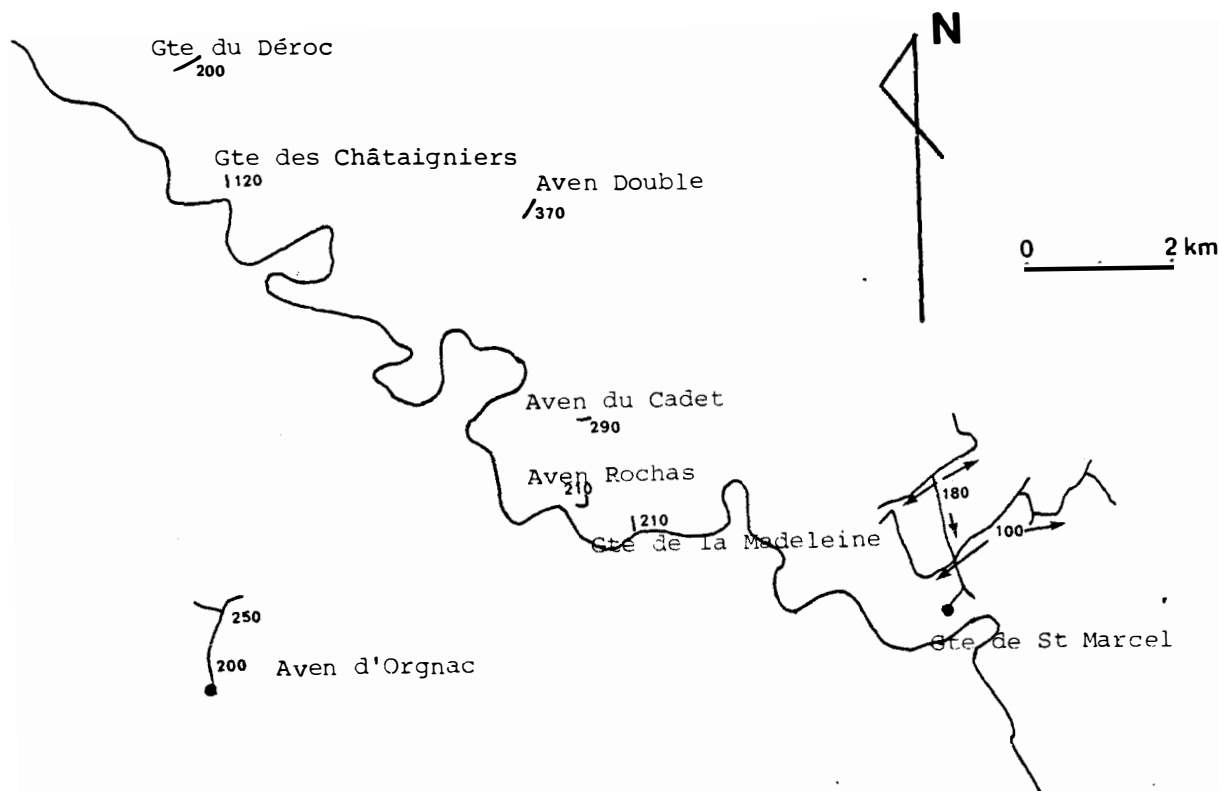


fig.43 : Répartition et cote des réseaux fossiles à composante horizontale principale.

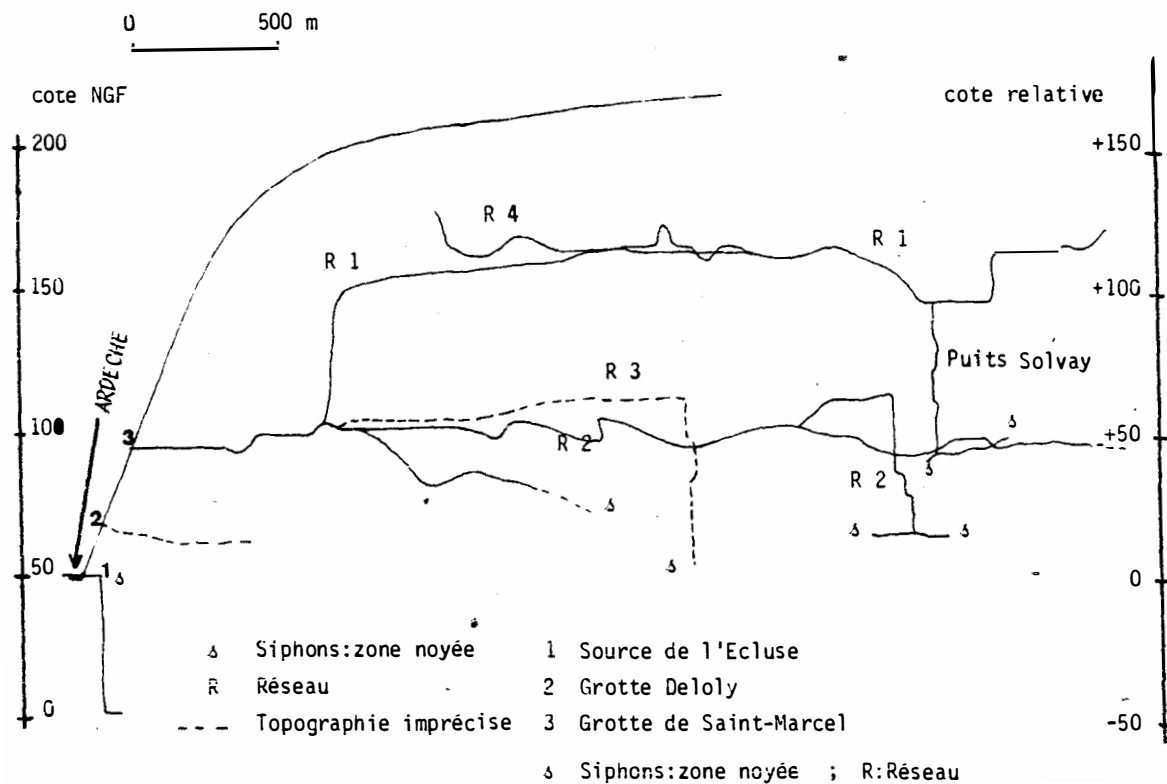


fig.44 : Coupe développée de la grotte de St-Marcel: position relative des réseaux par rapport à l'Ardèche.

2. Profil en long des affluents de l'Ardèche

Largement utilisée par les géographes, la technique de l'établissement de profils en long permet de retracer assez finement les oscillations du niveau de base pour une période donnée. Utilisée sur les affluents de l'Ardèche, cette méthode ne peut intéresser que les épisodes postérieurs à la mise en place de la rivière allochtone que nous avons précédemment datée du Burdigalien à l'Helvétien. Parmi les vallées sèches retenues, citons les ruisseaux du Rieussec et la vallée fossile de Foussoubie étudiés par Y. CALLOT (1979), géomorphologue.

La vallée sèche de Foussoubie est perchée au-dessus de la perte de la Goule de près de 15 m. Une vallée à fond plat totalement fossile est relayée vers l'aval par une vallée encaissée à plus forte pente. Une marche de quelques mètres raccorde ce talweg au cours d'eau régulier du Rieussec. C'est dans cette zone de confluence que se déplace selon la saison la perte totale du Rieussec. A l'aval, ce ruisseau présente également un encaissement, lié à une augmentation de la pente, avant de gagner l'Ardèche (fig. 45).

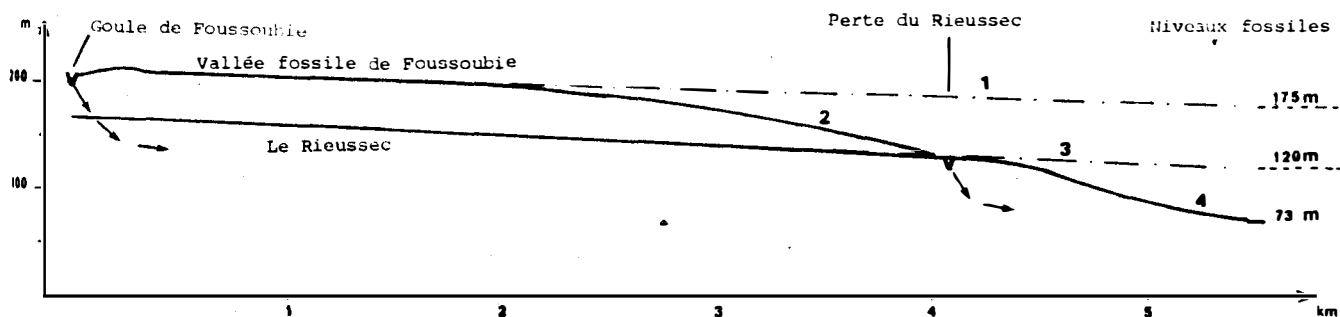


fig.45 : Mise en évidence de phases de karstification et de niveaux de base fossiles par l'étude des profils en long des ruisseaux du Rieussec et de Foussoubie (inspiré de Y. Callot, 1979).

La chronologie des événements semble être la suivante :

1. établissement d'un profil d'équilibre dont seule la portion amont de la vallée fossile de Foussoubie est le témoin ;
2. enfoncement corrélatif de l'Ardèche, du Rieussec et de la partie aval du ruisseau de Foussoubie ;
3. nouvel enfoncement de l'Ardèche suivi par le Rieussec. Le ruisseau de Foussoubie se fossilise ;
4. un nouvel enfoncement de l'Ardèche ne voit que le Rieussec aval s'adapter.

Telle est l'évolution mise à jour par Y. CALLOT. Nous ferons deux remarques complémentaires, fondamentales pour la compréhension de l'histoire de la karstification.

- Par deux fois, on a pu observer un enfoncement sélectif de la seule partie aval d'un talweg. L'absence d'érosion régressive vers l'amont semble pouvoir s'expliquer par la création de circulations souterraines qui court-circuitent le réseau hydrographique. L'abaissement du niveau de base : l'Ardèche, augmente la composante verticale de l'écoulement des eaux et par là même les possibilités de sous-tirages. Ce phénomène se déclenche lorsque l'affluent entaille son mur imperméable constitué par un colmatage argileux.

L'entrée en activité de la goule de Foussoubie ou d'une perte voisine associée à ce complexe est donc replacée dans cette chronologie et s'avère "ancienne" (phase 2). La perte du Rieussec se met en place lors d'un creusement beaucoup plus avancé de l'Ardèche (phase 4).

- Il paraît d'autre part intéressant de prolonger les profils d'équilibre qui se sont successivement ébauchés de manière à mettre en évidence la cote de l'Ardèche à ces différentes époques.

Le profil d'équilibre le plus ancien (phase 1), aligné sur la vallée supérieure de Foussoubie, se raccorde au niveau de l'Ardèche à une cote NGF de + 175 m. Cette cote élevée peut avoir deux significations. Elle peut indiquer un premier degré d'enfoncement de la rivière (Tortonien supérieur à Messinien) ou traduire une absence de creusement que les mouvements verticaux négatifs pliocènes de la bordure orientale du massif masquent et donc un âge sensiblement Helvétien. La mise en activité de la Goule, liée au premier encaissement notable de la rivière semble prendre un âge messinien (phase 2).

Le second profil d'équilibre aligné sur le cours amont du Rieussec indique une confluence avec l'Ardèche à la cote NGF de 125 m. Le processus de creusement des gorges est alors très avancé. Une accélération de ce phénomène pourrait être responsable de la mise en activité des pertes du Rieussec. Seules les cotes élevées des profils d'équilibre favorisent le choix d'une chronologie fin-Miocène aux dépens d'une chronologie plus récente.

3 - 3. ANALYSE DES DIRECTIONS D'ÉCOULEMENTS KARSTIQUES

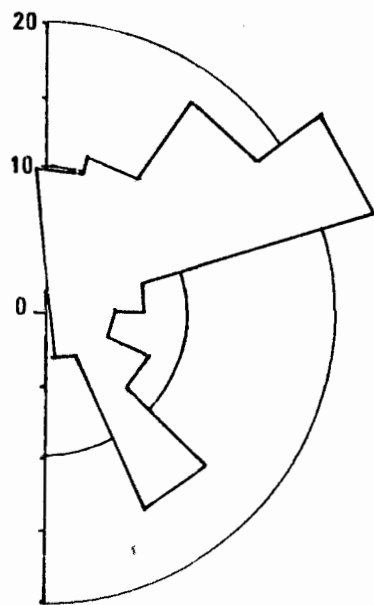
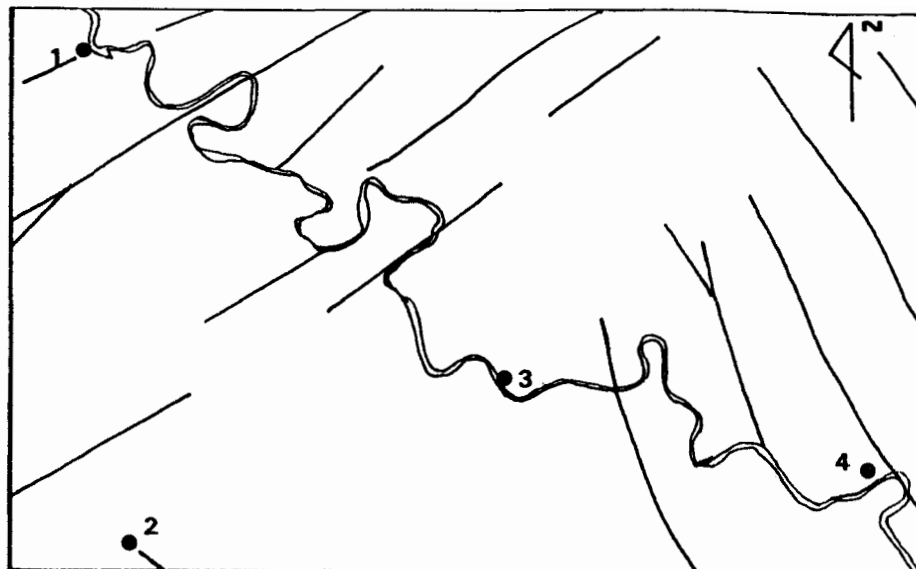
L'influence des phases tectoniques antérieures sur les directions de karstification est déterminante. Il paraît donc possible de dégager pour chaque phase les directions de karstification statistiquement les plus représentées. Inversement, l'analyse des directions d'un réseau devrait permettre une datation des différents phénomènes de karstification. Ce travail a été entrepris par R. GUERIN (1973) sur le plateau des Gras. Des compléments ont d'autre part été apportés.

3 - 3.1. Les travaux de GUERIN

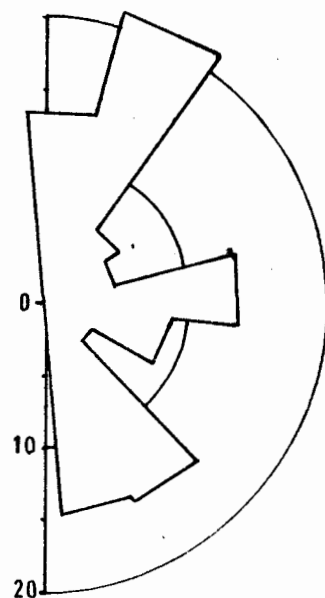
Cet auteur a réalisé des histogrammes de directions de galeries karstiques en pourcentage de la longueur cumulée qui sont ainsi comparables aux histogrammes similaires de fracturation. Les réseaux doivent être suffisamment développés pour que la représentativité statistique des directions obtenues soit assurée. Seuls les grands réseaux fossiles (Aven d'Orgnac) ou partiellement recoupés par une activité (réseaux de Midroï-Rochas, de St-Marcel et de Foussoubie) ont donc pu être retenus. Une analyse des fractures karstifiées en surface a permis d'autre part, l'étude des directions d'écoulements du karst actuel. Des données spéléologiques locales peuvent confirmer ces résultats. Les directions d'écoulements obtenus pour les karsts fossiles et actuels devront être comparées dans leur contexte structural. Nous différencierons donc les données issues de la zone faillée de St-Remèze de celles de la zone orientale.

fig. 46 : Histogrammes de directions
karstiques de réseaux fossiles (d'après
Guérin;73)

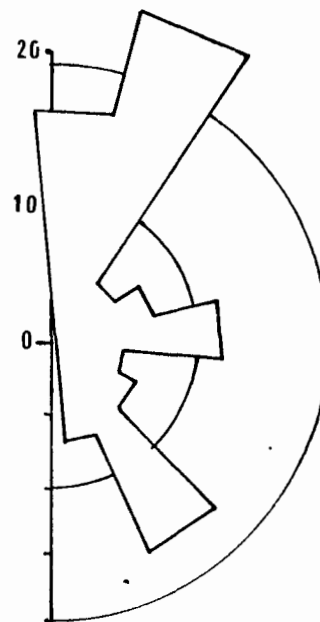
- | | | |
|---|-------------------------|--------|
| 1 | Goule de FOUSSOUBIE | 12 km |
| 2 | Aven d'Orgnac | 5 km |
| 3 | Réseau de MIDROI-ROCHAS | 1.5 km |
| 4 | Grotte de St-MARCEL | 14 km |



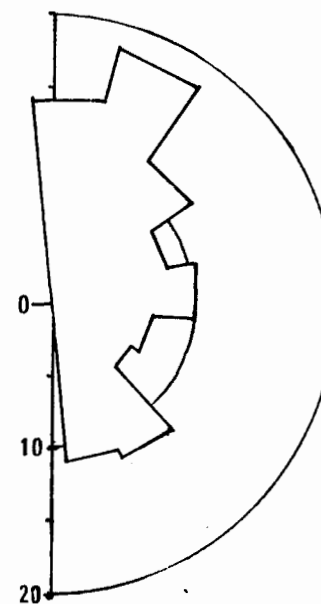
1



2



3



4

a) Le karst fossile (fig.46)

Le système de Foussoubie est le seul réseau à fort développement de la zone structurale de St-Remèze. Deux directions s'affirment nettement : N 35 - N 75, avec un maximum pour la direction N 55 - N 75, et N 135 - N 155. Les réseaux de l'Aven d'Orgnac, de Midroï-Rochas, de la grotte de St-Marcel appartiennent à la même zone structurale caractérisée par les grands accidents N 140. Ces cavités présentent des directions de karstifications similaires. Les directions N 175 - N 35, N 75 - N 95 et N 135 - N 155 constituent les maxima des trois histogrammes.

b) Le karst actuel (fig. 47)

L'étude des fractures karstifiées en surface permet de distinguer les directions actuelles d'écoulements entre la zone faillée de St-Remèze et la zone orientale. Ces directions sont respectivement N35 - N 95 avec un maximum N 75 - N 95 pour la première zone et N 95 - N 115 puis N 15 - N 35 pour la seconde.

La direction Est-Ouest faiblement représentée dans le karst fossile est largement dominante. Cette direction N 75 - N 95 dans la zone centrale s'infléchit N 95 - N 115 dans la zone orientale.

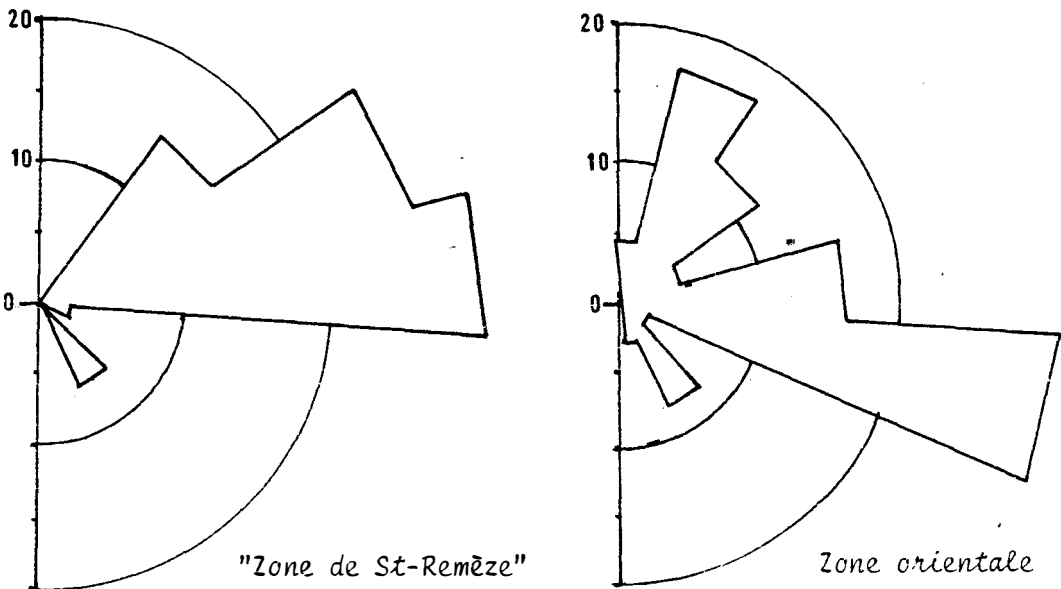


fig.47 : Histogrammes de direction des fractures karstifiées de surface (d'après Guérin, 1973).

Les topographies des réseaux actifs de Tourne et de l'Ecluse, tous deux orientés Est-Ouest, soulignent l'importance de cette direction pour le karst actif profond. La comparaison de ces résultats avec les histogrammes de directions de fracturation des zones considérées démontre la spécificité des fractures karstifiées : la direction E-W est en effet largement sous-représentée structuralement.

c) Conclusions

De nombreuses constatations découlent de l'étude de ces histogrammes.

- Certaines directions de karstification sont communes aux karsts récent et fossile. D'autres restent spécifiques quand elles sont dominantes comme la direction nord-sud pour le karst fossile postérieur à la phase pyrénéo-provençale (Eocène supérieur) ou la direction est-ouest pour le karst récent postérieur à la phase alpine (Miocène terminal).

- Un seul type de paramètre peut intégrer la variation des directions dominantes de galeries en fonction de l'âge du karst et de la zone structurale considérée. Il s'agit des axes de raccourcissement principal Z et d'allongement principal X de chaque phase tectonique. La direction horizontale perpendiculaire à l'axe d'allongement X est préférentiellement karstifiée. Il s'agit pour les phases de compression de l'axe de raccourcissement principal Z grossièrement est-ouest pour la phase alpine et nord-sud pour la phase pyrénéenne.

- Cette démarche permet à GUERIN de dater deux périodes de karstification principales. Le karst fossile dont les directions sont relativement indépendantes de la phase alpine est ainsi anté-Pliocène. Il résulte de la superposition des directions pyrénéennes N-S et des directions de fracturation issues de la phase distensive, paléogène, grossièrement NNE-SSW. Le karst récent aux directions alpines E-W est post-alpin et donc Plio-Quaternaire.

3 - 3.2. Nouvelles analyses

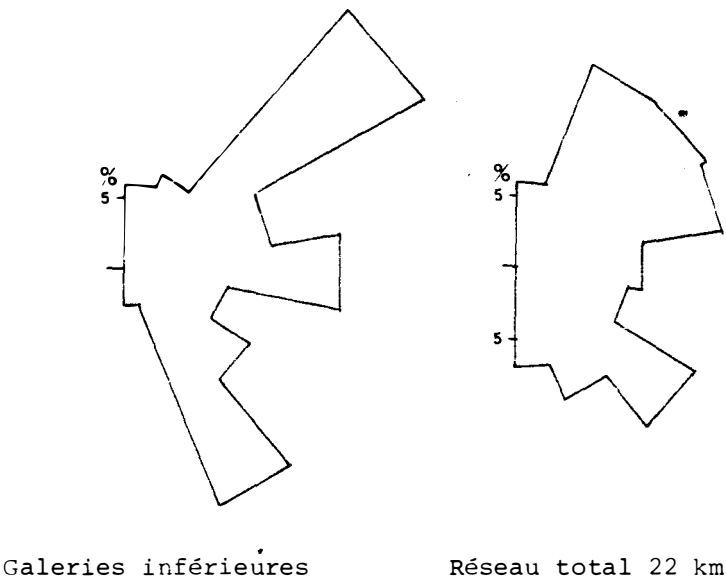
L'étude des directions de galeries karstiques confrontée à l'histoire tectonique du plateau des Gras semble pouvoir permettre d'établir une chronologie des différentes étapes de la karstification. Certaines directions constituent ainsi de véritables marqueurs temporels. Ces marqueurs restent toutefois peu spécifiques et n'offrent de valeur que s'ils sont retrouvés massivement et ordonnés chronologiquement. Dans cette optique, nous avons réexaminé les topographies des réseaux de St-Marcel et de Foussoubie, largement complétées par de nouvelles découvertes spéléologiques. Des portions de réseaux ont été isolées en fonction de leur cote par rapport à l'ensemble de la cavité. Différentes générations de galeries sont ainsi individualisées. Des histogrammes de ces différents épisodes vont permettre de décrire l'évolution de la karstification et d'affiner ou remettre en cause les résultats obtenus d'après un histogramme global.

Le réseau de Foussoubie (fig. 48)

Les histogrammes ont été dressés à partir d'un plan au 1/15000e (G.R.B. : groupe de recherches biospéléologiques, 1979) rassemblant 23 km de galeries. L'histogramme global laisse apparaître une direction NE-SW (N 20 à N 80) prédominante. Ce résultat est peu étonnant dans la mesure où les points de perte et de résurgence s'alignent sur une droite de direction N 35. La direction N 120 - N 140 s'individualise également. Les directions E-W et plus encore N-S restent mineures. Le réseau a été subdivisé en galeries inférieures et supérieures, étagées sur 20 à 40 m. Les galeries inférieures sont régulièrement actives sur toute leur longueur et représentent le stade de karstification le plus tardif. Les directions N 40 - N 60, E-W et N 140 - N 160 sont les plus affirmées.



GROTTE DE SAINT-MARCEL



RESEAU DE FOUSSOUBIE

fig.48 : Evolution des directions de karstification selon l'enfoncement des réseaux.

La rareté des galeries N-S tend à éliminer l'hypothèse d'un karst très ancien, paléogène. L'abondance des galeries NW-SE souligne la facile karstification des fractures de cette direction, ouvertes lors de la distension oligocène. L'apparition d'une direction E-W au cours de l'enfoncement du karst indique le passage à une époque plus récente post-alpine. Une ambiguïté reste posée quant aux galeries supérieures. Sont-elles anté-alpines (Miocène) comme le laisserait supposer la méthode telle que nous l'appliquons ou contemporaines du creusement des gorges ? L'étude du profil en long de la vallée sèche de Foussoubie a montré la relative jeunesse de ce réseau dont la mise en action a été provoquée par l'enfoncement de l'Ardèche. Il semblerait que ce réseau se soit installé sur des fractures karstifiées précédemment ébauchées et qu'il ait conservé ces directions héritées en dépit de la création d'un nouvel état de contrainte lié à la compression alpine. Au cours de son enfoncement, le réseau s'aligne sur les directions d'écoulements récentes.

Le réseau de Foussoubie prend donc un âge post-Miocène terminal en opposition avec les résultats de GUERIN.

La Grotte de St-Marcel

Les histogrammes ont été dressés à partir d'un plan au 1/10000e (R. BILLARD et G.S. FOREZ, 1977) recouvrant 22 km de galeries. Les réseaux 1 et 4 dont les cotes NGF oscillent régulièrement entre +170 et +180 m ont été regroupés en un réseau supérieur. Les réseaux 2 et 3, l'entrée de la grotte dont les cotes NGF moyennes avoisinent +100 à +120 m constituent le réseau inférieur.

Un histogramme global ainsi que des histogrammes pour chaque ensemble de galeries ont été réalisés (fig. 23). L'histogramme global présente des maxima pour les directions N 0 - N 40 (principalement N 0 - N 20) et N 80 - N 100. Ces directions sembleraient marquer deux phases de karstification successives. L'examen des histogrammes des galeries supérieures et inférieures ne met pas en évidence une telle évolution des directions de karstification. La direction nord-sud est pour sa part toujours prépondérante et atteste la présence d'une karstification précoce anté-alpine. La direction est-ouest, largement représentée dans les galeries supérieures doit également être considérée comme ancienne. Il semble pourtant difficile d'envisager une karstification trop ancienne pour les galeries inférieures au vu des données géomorphologiques qui impliquent un creusement avancé des gorges.

Il faut donc accorder à ces galeries un âge miocène supérieur, ce qui présume une conservation des directions héritées et une individualisation très progressive des nouvelles directions favorables. Une troisième génération de galeries de direction dominante N 100 à N 120 s'individualise au niveau de l'Ardèche (réseau Deloly-Ecluse). Elle caractérise bien une karstification post-alpine qui semble ici être quaternaire.

3 - 3.3. Conclusions

L'étude des directions statistiques de galeries karstiques peut permettre de différencier, en connaissance du contexte structural, des périodes de karstification. La subdivision du réseau étudié en générations successives de galeries précise l'évolution de cette genèse. Cette méthode est en effet beaucoup plus efficace quand elle est contrôlée par les exigences géomorphologiques.

Il s'avère ainsi que le réseau de Foussoubie s'est installé sur un karst ancien probablement miocène qui a guidé en partie les directions du creusement des galeries supérieures. Une karstification récente plio-quaternaire a façonné le réseau actuel. Seules les galeries inférieures sont cependant marquées par des directions post-alpines. Le réseau de St-Marcel voit un développement anté-alpin plus affirmé. Les galeries inférieures postérieures au creusement des gorges héritent en grande partie des directions anciennes. Les directions alpines ne sont affirmées que pour les réseaux actifs quaternaires.

Il apparaît donc une individualisation très progressive de nouvelles directions de karstification sur un réseau en place. Cette remarque constitue une limite de la méthode qui ne peut s'appliquer de manière trop systématique.

L'étude de la karstification présente un intérêt certain pour la compréhension de l'hydrogéologie actuelle. Les écoulements présents vont avoir une forte tendance à emprunter des directions E-W avec des maxima légèrement décalés selon la zone structurale considérée. Ce résultat est difficilement utilisable à l'échelle locale : la détermination de la zone préférentielle d'infiltration d'une source, par exemple, n'est guère extrapolable à partir de cette seule information. A l'échelle du massif, l'hydrogéologie s'articule autour des accidents plurikilométriques N 50 et N 140. Cette direction préférentielle d'écoulement est donc tout à fait compatible avec les unités hydrogéologiques définies par les mégaaccidents. Le schéma global de l'hydrogéologie du plateau des Gras que nous avons avancé s'en trouve renforcé.

3 - 4. MISE EN EVIDENCE D'UNE KARSTIFICATION PROFONDE

Quelques réseaux karstiques actifs, reconnus par plongée, atteignent des profondeurs importantes sous le niveau de l'Ardèche :
- 45 m à la source de Vanmalle, du Castor et - 60 m à la source de l'Ecluse. Ces réseaux posent le problème de leur karstogenèse. Comment cette karstification a-t-elle pu s'effectuer en l'absence d'un niveau de base correspondant à ces cotes inférieures ?

Nous avons tacitement admis jusqu'ici que la pré-Ardèche a creusé les gorges au cours d'un enfoncement progressif à l'air libre. Le karst actif a connu une évolution en parallèle, étroitement liée à la rivière. L'existence de nombreux seuils rocheux sur l'Ardèche exclut d'autre part tout profil antérieur plus profond. La première explication de cette karstification profonde va tenter d'intégrer l'ensemble de ces contraintes. Il est possible de faire intervenir des circulations souterraines en liaison directe avec la rivière pour expliquer le développement de conduits noyés à des cotes très inférieures à celles de l'Ardèche. L'Ardèche connaît un sous-écoulement notable sur son parcours des gorges comme l'attestent ses nombreuses pertes. L'importance de ces dernières a par ailleurs été mise en évidence par des jaugeages différentiels effectués en période d'étiage. Une telle disposition est commune sur la portion urgonienne des cours d'eau cévenols. Le Gard et la Cèze vont même jusqu'à totalement s'infiltrer en période d'étiage (G. FABRE, 1977). Les sous-écoulements peuvent se développer selon un profil en long plus régulier que celui du cours d'eau, ce qui leur permet de gagner de la profondeur principalement à l'amont des rapides. Les réseaux karstiques qui se raccordent à ce niveau de base souterrain connaissent un enfoncement comparable. Ce sont des pertes de l'Ardèche de ce type qui semblent responsables de la formation de l'arche du Pont d'Arc, réutilisée aujourd'hui par la rivière. Dans cette première hypothèse, le creusement des gorges est l'oeuvre de la rivière, ses sous-écoulements sont responsables d'une karstification profonde actuelle.

L'étude du système karstique de Tourne, en bordure de la vallée du Rhône, apporte de toutes autres informations sur la mise en place de cette karstification profonde. La zone noyée y a en effet été reconnue aux cotes respectives de - 125 m et - 115 m sous la surface (soit à des cotes NGF de - 65 m et - 55 m) au Goul de la Tannerie et au Grand Goul. Seule la réutilisation de formes héritées d'un creusement antérieur peut expliquer cet enfouissement des conduits noyés. Cette karstification ancienne a dû bénéficier d'un niveau de base exceptionnellement bas. La régression fini-miocène qui s'est accompagnée d'un fort surcreusement de la vallée du Rhône est le seul épisode compatible avec les cotes relevées.

Sans nier le rôle actuel des sous-écoulements de l'Ardèche, il semble qu'il faille étendre la notion de karstification profonde ancienne aux réseaux noyés des gorges précédemment cités. La régression fini-miocène paraît également l'épisode le plus favorable au développement de ces circulations. Le remblaiement de la vallée du Rhône a par la suite noyé ce karst et stoppé son évolution. L'Ardèche recoupe aujourd'hui le toit de ces réseaux.

La mise en place d'un karst profond sous l'Ardèche peut s'envisager selon plusieurs modalités :

1. Les écoulements souterrains ont pu s'installer avant que le creusement des gorges ne soit effectif (fig. 49). Il est aisé de concevoir une adaptation très limitée de l'Ardèche au fort surcreusement du Rhône. La dénivellation entre les deux cours d'eau favorise le développement de circulations profondes. Dans un second temps, la rivière entame le creusement des gorges. La reprise de l'activité érosive du cours d'eau ne peut être que la conséquence d'un nouvel événement marquant. Le début du remblaiement de la vallée du Rhône et la remontée du niveau de base régional semble le seul épisode capable de modifier l'évolution du massif des Gras qui s'était engagé vers des circulations souterraines. Le creusement des gorges prend alors une valeur pliocène. Les directions statistiques des galeries karstiques des gorges s'opposent à cette chronologie. Elles devraient en effet présenter un fort pourcentage de directions alpines est-ouest, ce qui n'est vérifié que par les galeries surplombant directement l'Ardèche. Le creusement est donc antérieur.

2. Il paraît plus cohérent de ne faire intervenir la mise en place de la circulation profonde que lors d'un épisode avancé du creusement des gorges. Une accélération dans le processus d'enfoncement du niveau du Rhône serait susceptible de justifier ce passage d'un écoulement aérien à un écoulement souterrain (fig. 50). Ces deux dernières hypothèses individualisent deux types d'écoulement (circulation de surface et circulation profonde) qui vont fonctionner successivement. Elles reposent sur des chronologies inverses.

3. Un troisième processus qui reprend l'idée d'un sous-écoulement peut être avancé. La rivière et son sous-écoulement entaillent progressivement les gorges. La cote du Rhône, à la fin du Miocène, autorise un enfoncement des circulations souterraines (fig. 51). Ce sont donc des pertes partielles de l'Ardèche qui seraient à l'origine de ces réseaux profonds. Un argument théorique s'oppose à cette hypothèse: le creusement aérien d'une gorge est plus rapide que l'élaboration d'un réseau souterrain et il paraît donc difficile d'envisager un creusement simultané.

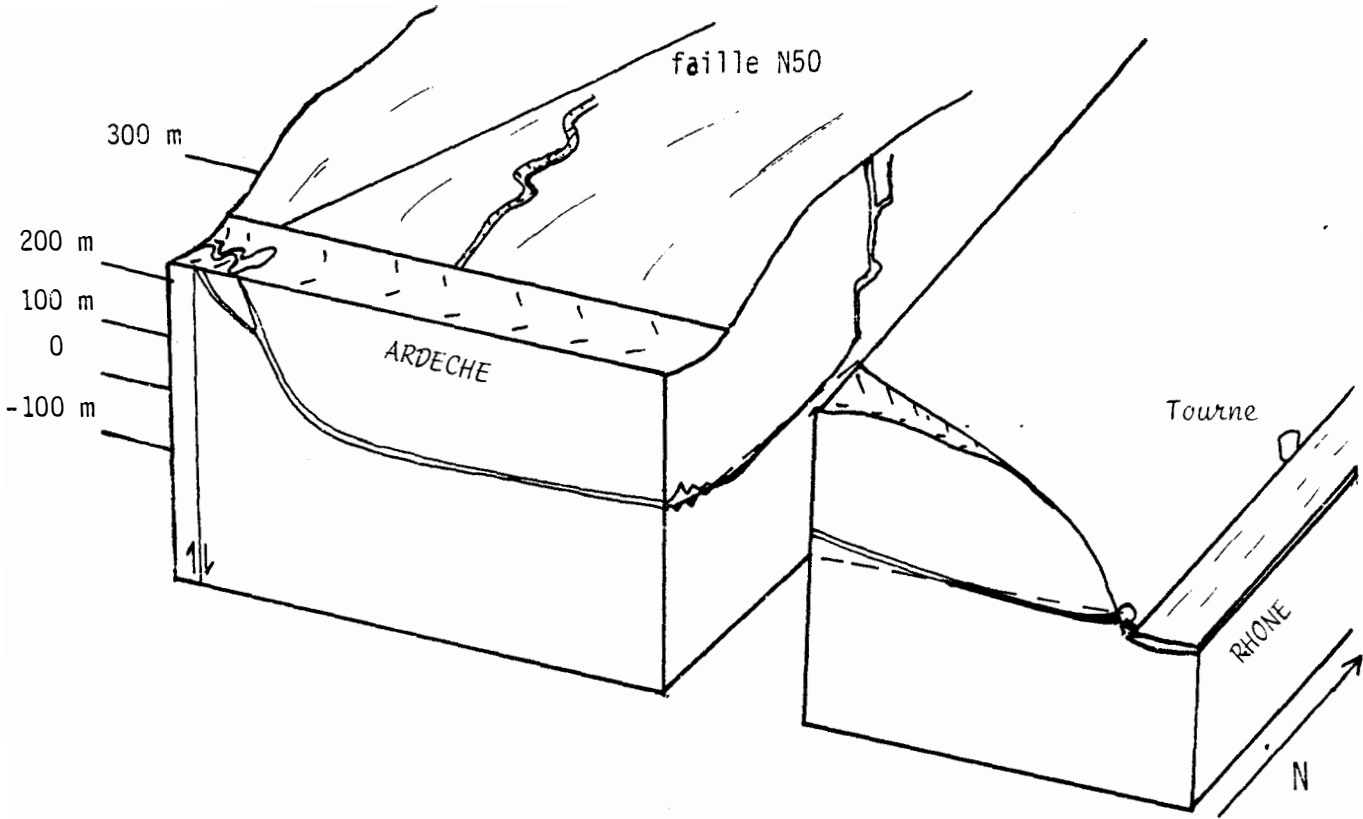


fig.49 : 1^{ère} hypothèse: mise en place d'une karstification profonde précoce.

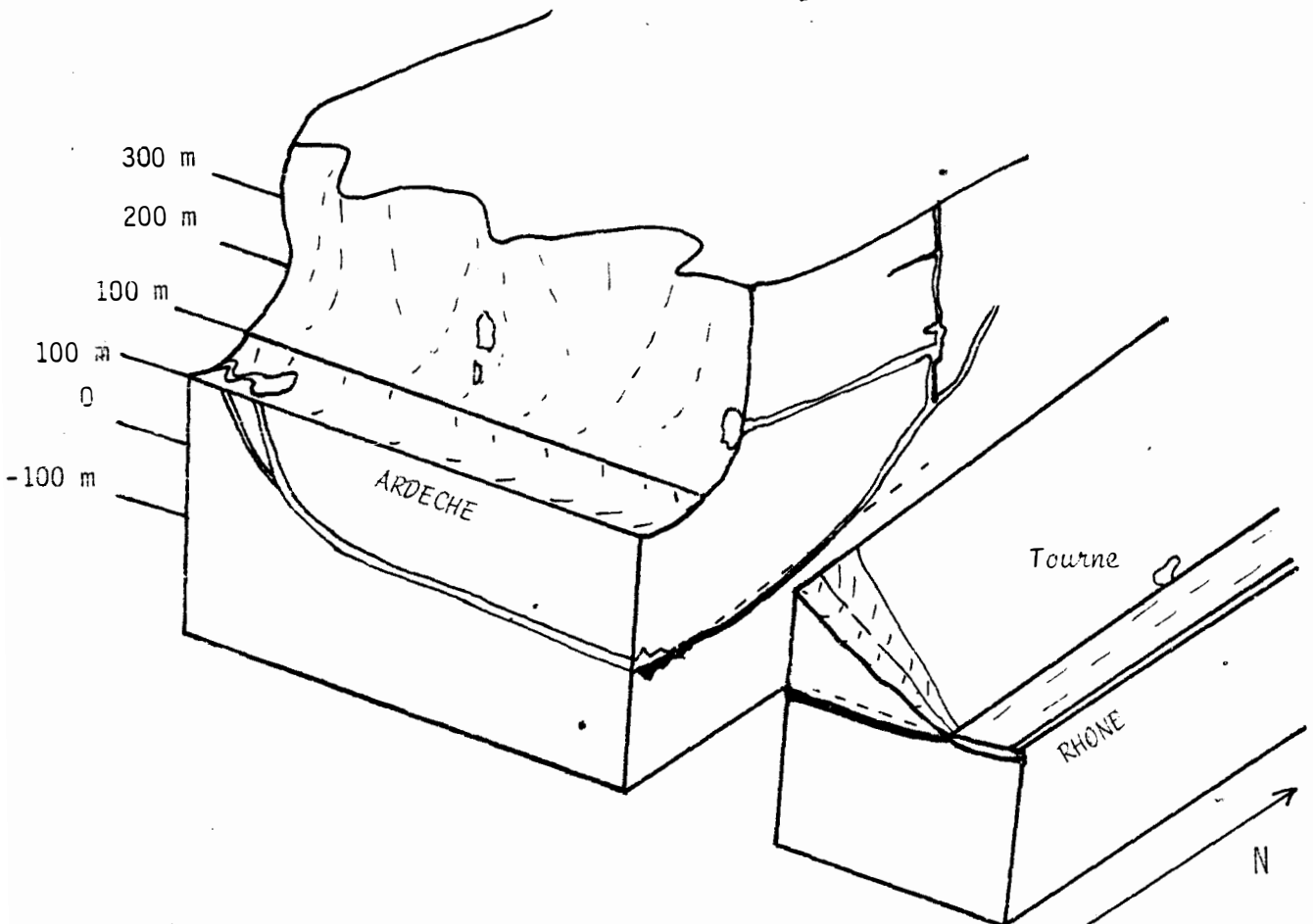


fig.50 : 2^e hypothèse: mise en place d'une karstification profonde lors d'un stade avancé du creusement des gorges.

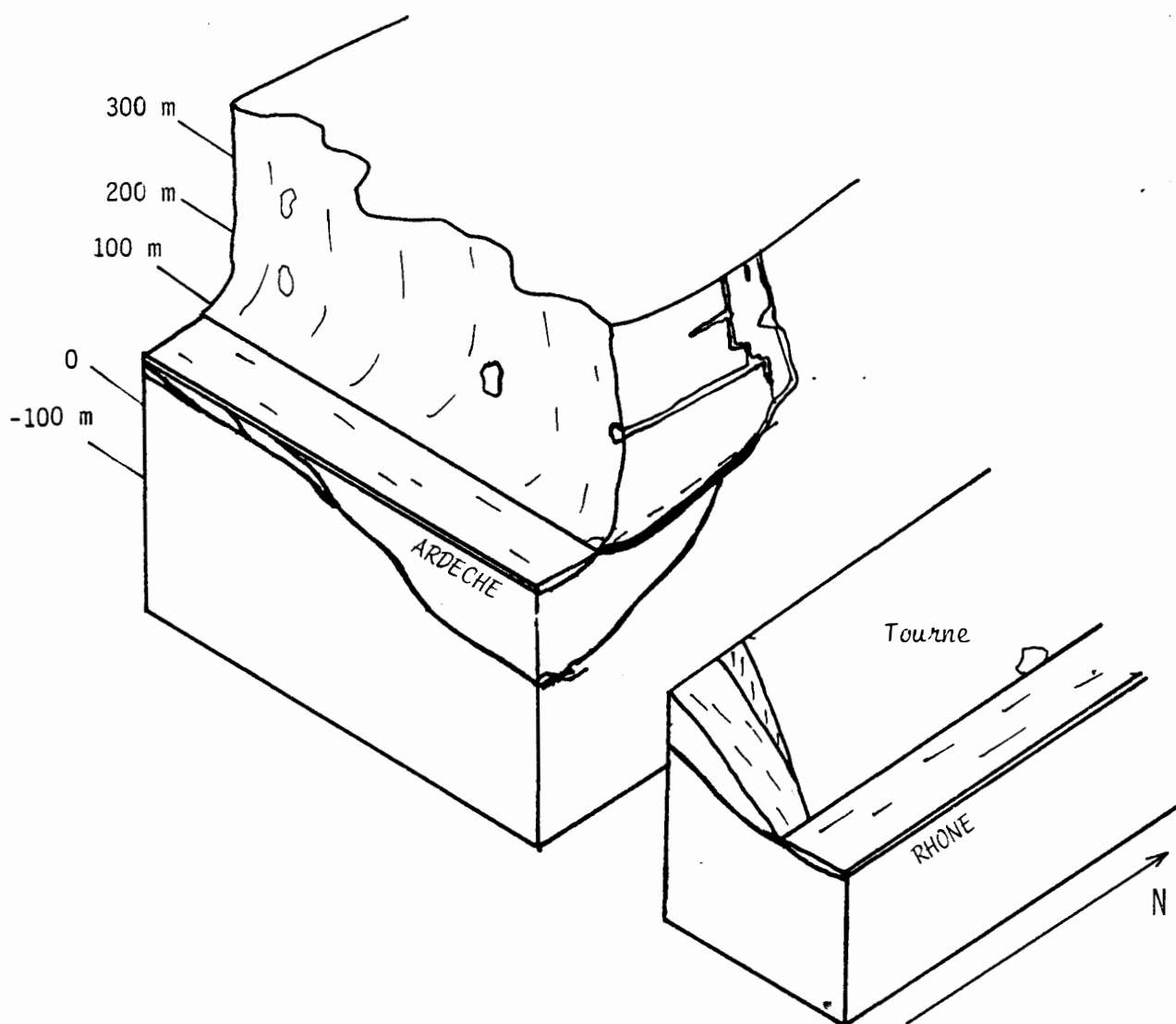


fig.51 : 3^e hypothèse: enfoncement simultané de l'Ardèche et de ses pertes , responsables de la karstification profonde.

L'ensemble des arguments présentés dans les trois premiers paragraphes de ce chapitre, s'ils permettent de préciser l'époque du creusement des gorges et de classer les formes karstiques associées ne tranchent pas sur la mise en place de la circulation profonde. C'est pour cette raison qu'ils ont été présentés indépendamment à cette discussion.

A l'issue de la confrontation de ces différentes hypothèses, il paraît possible de tirer plusieurs conclusions.

- D'importantes circulations karstiques ont alimenté la vallée du Rhône sur l'ensemble de la bordure orientale du plateau des Gras durant la fin du Miocène. Ces dernières ont été mises en évidence à la base des sources de Tourne et sous le cours de l'Ardèche. Dans ce dernier cas, les relations entre les circulations souterraines et la rivière restent imprécises. Deux questions sont posées : y a-t-il eu fonctionnement synchrone du cours d'eau superficiel et des circulations karstiques et si non les circulations sont-elles postérieures ou antérieures au creusement des gorges ?

L'hypothèse 2, qui envisage dans un premier temps le creusement aérien des gorges puis dans un second temps l'installation des seules circulations souterraines, paraît la plus probable.

- Il est difficile d'estimer la limite amont de ces réseaux profonds : ces écoulements ont-ils intéressé l'ensemble du plateau des Gras ou sa seule bordure orientale ? L'exploration de nombreux réseaux profonds, dans le dernier tiers des gorges, tendrait à confirmer la seconde hypothèse si le réseau de Vanmalle ne présentait également un fort enfouissement. Il apparaît donc que ces circulations souterraines ont intéressé des surfaces importantes. Les mégafractures N 50 de la partie centrale des gorges sont susceptibles de constituer la zone charnière qui a favorisé l'infiltration des écoulements.

- L'importante période de remblaiement pliocène a, en établissant un nouveau niveau de base pour les écoulements de surface, noyé l'ensemble de ces réseaux profonds. En dépit de l'imprécision de l'extension latérale de ce karst noyé, il semble qu'il puisse abriter des réserves notables.

3 - 5. CONCLUSIONS

Ce sous-chapitre a tenté de dégager les différentes phases de karstification qui ont affecté le plateau des Gras. Le processus de creusement des gorges tient dans cette optique une place déterminante puisqu'il va conditionner l'orientation et l'étagement du karst. Les apports de ce travail peuvent se résumer selon deux points forts :

- La confrontation des données géologiques, géomorphologiques et de l'étude des directions de galeries a permis une vision relativement complète de la karstogenèse du plateau des Gras. Une approche sectorielle de ces problèmes avait jusqu'ici conduit différents auteurs à des conclusions intéressantes mais trop souvent partielles. Ces éléments restent toutefois épars et leur collecte aléatoire. L'épisode du creusement des gorges que nous avons tenté de dater, l'existence de deux grands réseaux karstiques recoupant une large part de cette histoire, ont été des atouts qui n'ont pu être déterminants dans cet essai de reconstitution.

- L'existence de réseaux profonds noyés nous a conduit à la mise en évidence d'une phase de karstification ancienne liée à la régression fini-miocène. Les relations entre cette karstogenèse et la mise en place des gorges restent incertaines. Ces réseaux fossilisés par le remblaiement de la vallée du Rhône abritent une zone noyée susceptible de constituer un aquifère important.

Un des obstacles principaux à la compréhension des phénomènes karstiques en bordure du Rhône réside dans la méconnaissance de l'histoire des oscillations plio-quaternaires de cette vallée. L'absence de synthèse régionale précise faisant intervenir les différents mouvements eustatiques doublés des effets de la néotectonique est un lourd handicap pour toute reconstitution dynamique. A un niveau plus local, l'étude des terrasses de la rive droite du Rhône, au débouché de l'Ardèche, qui avait par ailleurs été programmée par le Conseil Scientifique des gorges devrait être riche en enseignements. Elle pourrait permettre de replacer les dernières phases de la karstification dans un canevas géologique plus rigoureux.

La karstogenèse telle que nous l'avons appréhendée, se résume ainsi :

La première phase de karstification a vraisemblablement débuté dès la fin du Crétacé supérieur. Elle a été mise en évidence à l'Eocène inférieur par des dépôts bariolés dans des cavités karstiques.

La karstification oligo-miocène a laissé beaucoup plus de traces sur le plateau des Gras : l'Aven d'Orgnac et les nombreux avens des environs de Bidon et d'Orgnac, certaines galeries de la grotte de St-Marcel. Ce karst fossile, omniprésent, a d'autre part largement conditionné l'évolution du karst qui lui a fait suite.

Le Miocène supérieur voit deux épisodes fondamentaux :

- Le creusement des gorges s'accompagne du développement de nombreux réseaux : réseau de Foussoubie, galeries inférieures de St-Marcel...

- Des circulations karstiques profondes s'installent. Elles rejoignent le niveau de base du Rhône à sa cote minimale. Ces réseaux sont reconnus aux sources de Tourne et sous le cours de l'Ardèche actuelle.

Les données paléoclimatiques issues de la confrontation des analyses de faune et de l'étude des spores et pollens (G. DEMARCO, 1984) n'autorisent pas l'existence de tels processus durant le Messinien supérieur aride. La karstogenèse a pu se développer durant le Tortonien et le Messinien inférieur qui ont connu un climat tempéré et humide.

Au cours du Plio-Quaternaire, l'Ardèche termine son encaissement. Le karst qui lui est associé, tend à utiliser ses propres directions héritées de la compression alpine. Les galeries inférieures de Foussoubie et les réseaux des gorges traduisent cet ultime stade. Le karst profond, qui avait été "fossilisé", est réutilisé par le karst actif lié à l'Ardèche. Pour des raisons paléoclimatiques, il semble que le Pliocène, généralement plus chaud et humide que le Quaternaire, ait été plus favorable au développement de la karstification.

4 - CONCLUSIONS : CONSÉQUENCES HYDROGÉOLOGIQUES DE LA COMPARAISON DES DONNÉES GÉOLOGIQUES, STRUCTURALES ET KARSTOLOGIQUES

L'utilisation conjointe des études géologiques, structurales et des données karstologiques a permis de retracer l'histoire des différentes phases de karstification qui ont affecté le massif des Gras. Le creusement des gorges que nous avons tenté de dater prend une valeur repère

dans cette succession d'évènements. L'étude des rapports entre karsts actif et fossile peut localement être déterminante pour l'appréhension des directions d'écoulement. Il s'avère ainsi impossible de comprendre les circulations actuelles du karst de St-Marcel à la lueur des seules données topographiques brutes de la cavité. L'histoire de la karstogenèse de cette grotte peut seule montrer l'individualisation progressive de nouvelles directions lors de l'enfoncement du réseau. Elle aboutit à une organisation totalement nouvelle des écoulements que nous aurons l'occasion de développer.

L'étude de la karstification a également permis de mettre en évidence l'existence de réseaux noyés karstiques sur la bordure orientale du plateau des Gras. Seuls des travaux de reconnaissance pourraient permettre d'évaluer l'importance de cet aquifère.

L'étude du comportement hydrogéologique du massif passe par la compréhension de la répartition et de la nature des émergences rencontrées. On peut ainsi différencier les émergences du pourtour du massif urgonien des émergences intra-urgoniennes du coeur des gorges. Les premières sont essentiellement contrôlées par des contacts lithologiques, des accidents structuraux pouvant accessoirement favoriser ces points d'émergence. Les exurgences des gorges de l'Ardèche représentent la plus grande partie des apports connus issus du karst urgonien. C'est ici, principalement, la composante structurale qui préside à l'émergence. Les accidents plurikilométriques N 50 et N 140 assurent un contrôle déterminant dans leur zone d'influence respective. Des exurgences de calcaires fissurés ou des conduits karstifiés sont associés à chacune de ces zones structurales. Le rôle de faille-écran de ces accidents est également affirmé par la topographie des systèmes karstiques. Un modèle d'écoulement semble pouvoir s'élaborer à partir de ces résultats. Les accidents plurikilométriques N 50 et N 140 délimitent des unités hydrogéologiques cohérentes. Cette hypothèse est en accord avec la direction privilégiée d'écoulement que nous avons estimée E-W. Ce cloisonnement des écoulements, reste à vérifier par des expériences de traçage. Il n'en demeure pas moins que l'utilisation rationnelle des données géologiques et structurales constituent une étape fondamentale dans la démarche hydrogéologique.

CHAPITRE IV

OPERATIONS DE TRACAGE ET DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS

- 1 - BUTS ET MÉTHODES
- 2 - LES LIMITES D'ÉCOULEMENT POTENTIELLES
- 3 - LES OPÉRATIONS DE TRAÇAGE
- 4 - LE PROBLÈME ORIENTAL : LE BASSIN VERSANT DU RHÔNE
- 5 - LE PROBLÈME MÉRIDIONAL : LIMITES DES BASSINS VERSANTS
DE L'ARDÈCHE ET DE LA CÈZE
- 6 - CONCLUSION : LA CARTE DES BASSINS VERSANTS GÉOLOGIQUES

OPERATIONS DE TRACAGE ET DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS

1 - BUTS ET METHODES

L'individualisation de bassins versants au sein du massif urgonien des Gras présente un double intérêt :

- Elle permet d'estimer pour chaque bassin versant géologique les potentialités aquifères de la formation urgonienne à partir des données météorologiques.

- A l'échelle plus réduite d'un sous-bassin versant alimentant une exsurgence ou un groupe d'exsurgences, ce découpage va faciliter la détermination de périmètres sensibles au sein de la zone d'infiltration.

Très peu de données ou même de présomptions sur le sens des écoulements avaient été avancées jusqu'ici. Seuls les résultats de la coloration de la Goule de Foussoubie, effectuée dès 1975 par le G.R.B., montraient sa relation avec l'Event de Foussoubie. La jonction réalisée antérieurement par des plongeurs en limitait d'ailleurs la portée. Les multiples tentatives des spéléologues d'atteindre l'Aven d'Orgnac ou un hypothétique grand collecteur depuis les événements des gorges traduisent bien la méconnaissance des sens d'écoulement. Il est vrai que le plateau urgonien, grossièrement monoclinale, ne présente guère de structures évidentes susceptibles de guider les circulations. Les études géologique et structurale vont toutefois permettre d'établir des limites potentielles.

La mise en place d'opérations de traçage va dans un second temps confirmer ou infirmer ces hypothèses et préciser les limites de bassins versants. Cette démarche va malheureusement se heurter à une importante caractéristique du plateau des Gras : la quasi absence d'écoulements. Les rares pertes sont en effet localisées sur le pourtour du massif et trois avens sur près d'une centaine répertoriés permettent d'accéder à un écoulement ou à la zone noyée.

Trois types d'injection ont été réalisées :

- injection dans une perte de ruisseau. Les ruisseaux du Rieussec, de Pissevieille auxquels s'ajoute le ruisseau de la Planche (Goule de Foussoubie) ont ainsi été colorés ;

- injection dans une cavité karstique. Les écoulements de l'aven de Vigne Close et de la grotte de Pascaloune ont été tracés. A la grotte de St-Marcel, le réseau Solvay donnant sur la zone noyée a également été coloré ;

- injection dans les fissures de surface.

Ce type de traçage dans les lapiaz du plateau nécessite l'apport de l'eau et son injection conjointe avec le colorant. Les manipulations ont pu se dérouler grâce à l'aide des sapeurs pompiers locaux. Ces traçages présentent un double avantage. Le premier est celui du choix du point d'injection, la seule contrainte étant celle de l'existence d'une zone lapiazée. Des zones charnières du point de vue du sens de l'écoulement et donc riches en enseignements peuvent être choisies. Le second avantage est de s'intéresser à des écoulements non organisés qui vont évoluer de manière similaire aux eaux de précipitations. Ils pourront alors avoir un cheminement dispersif vers plusieurs sous-bassins à l'inverse des écoulements déjà concentrés. Ce type de traçage présente cependant un haut risque. Nos trois tentatives se sont soldées par un échec. C'est pourtant cette méthode qui est la seule susceptible d'apporter de nouveaux résultats, la quasi totalité des points d'eau connus sur le plateau ayant fait l'objet d'un traçage.

2 - LES LIMITES D'ÉCOULEMENT POTENTIELLES

2 - 1. LES BASSINS VERSANTS GEOGRAPHIQUES

Les écoulements superficiels de la région se répartissent autour de 3 cours d'eau majeurs : l'Ardèche, le Rhône à l'Est et la Cèze au Sud. Le bassin versant des gorges de l'Ardèche sensu stricto occupe une surface relativement faible de 138 km² (fig.52). Il s'étend jusqu'à la dépression de Saint-Remèze en rive gauche sur 81 km². En rive droite, les vastes bassins versants des pertes du Rieussec et de Foussoubie font place à l'aval à une étroite bande de calcaires de moins de deux kilomètres de largeur. Les sous-bassins versants de l'Ibie et du valat d'Aiguèze qui drainent le plateau karstique aux extrémités des gorges dépendent également de l'Ardèche.

La Cèze possède sur sa rive gauche un important bassin versant en partie karstique. Le sous-bassin versant de la plaine de Barjac, essentiellement constituée de dépôts détritiques tertiaires, se rattache à ce cours d'eau. Le bassin versant du Rhône recoupe toute la bordure orientale du plateau des Gras. Le sous-bassin versant de la Conche qui assure le drainage septentrional du plateau des Gras appartient à cet ensemble.

2 - 2. ELEMENTS DE DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS GEOLOGIQUES

a) Les limites lithologiques

L'argument lithologique pour la délimitation des bassins versants géologiques ne va être déterminant que dans un seul secteur du plateau des Gras. En rive gauche de l'Ardèche, les marnocalcaires hauteriviennes et les calcaires argileux du Barrémien inférieur affleurent au niveau du bombement de Saint-Remèze. Ces formations peuvent être considérées comme des formations imperméables au moins dans le contexte géologique de l'étude. Les limites de bassins versants géologiques et géographiques vont donc se confondre dans ce secteur. Une limite entre le bassin versant de l'Ardèche et celui du ruisseau de Rimouren et donc du Rhône s'établit sur la plaine de Saint-Remèze jusqu'à l'alignement des reliefs du Serre-de-Barrès et de la Dent-de-Rez. Les pendages divergents des couches peu perméables tendraient à induire des écoulements également divergents.

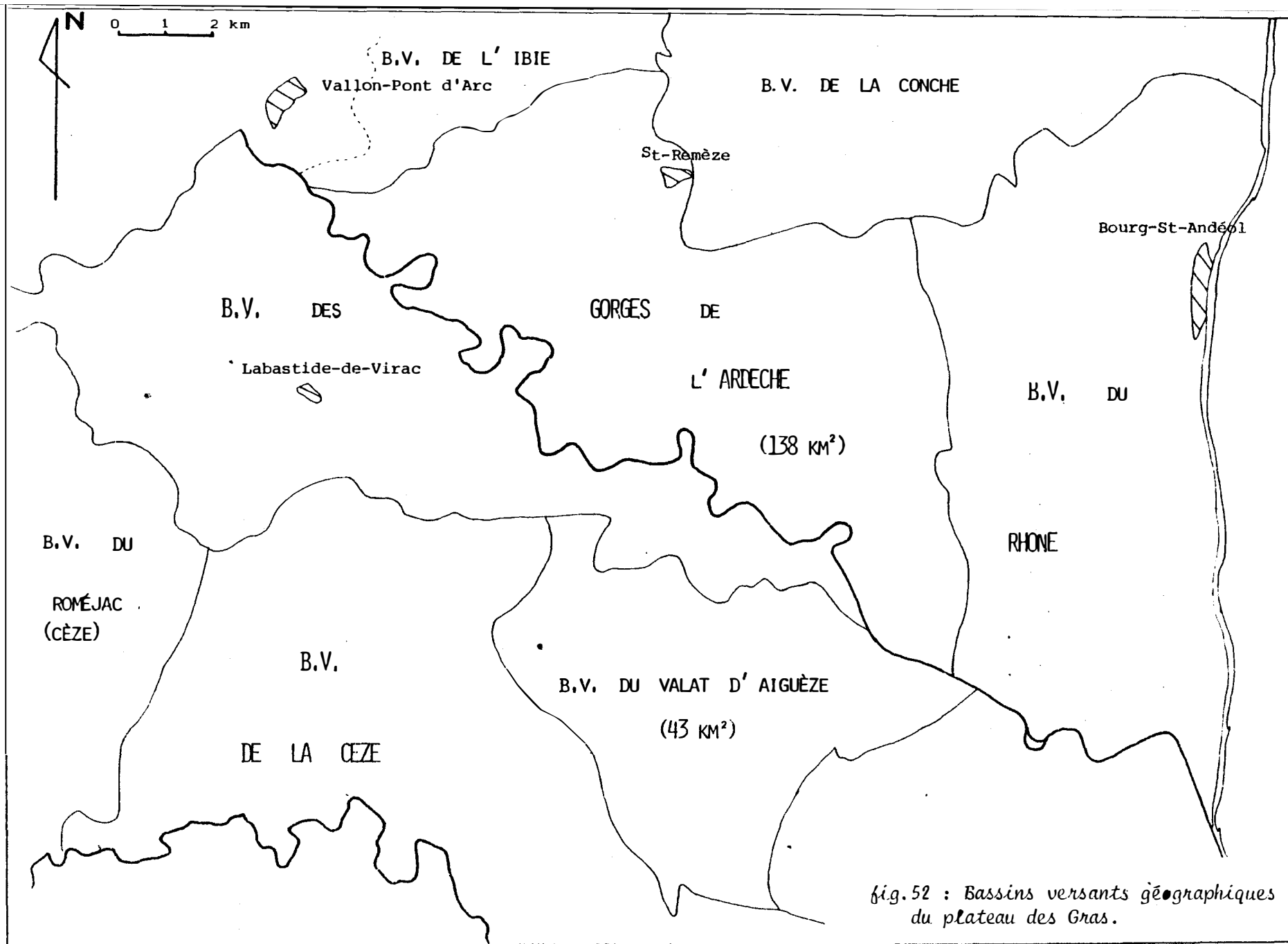


fig.52 : Bassins versants géographiques du plateau des Gras.

Le massif urgonien est limité sur son pourtour par des formations marneuses aptiennes ou éocènes au Sud. Ces horizons sus-jacents ne modifient pas forcément les écoulements au sein des calcaires urgoniens. Ils n'interdisent que les échanges entre les aquifères qu'ils séparent.

b) Les limites structurales

Le rôle hydrogéologique des méga-accidents a déjà été évoqué dans le cadre du chapitre précédent. Les opérations de traçage sont seules en mesure de confirmer ces hypothèses.

Une carte structurale (fig. 8) a mis en évidence sur la rive droite, dans les assises urgoniennes, des plis d'axe sensiblement E-W dont le rôle par rapport aux écoulements doit être précisé.

Les opérations de traçage prennent toute leur valeur devant les incertitudes qui demeurent.

3 - LES OPÉRATIONS DE TRAÇAGE

3 - 1. METHODOLOGIE

Les traçages ont été réalisés exclusivement à l'aide de traceurs fluorescents :

L'Uranine ou fluorescéine qui présente de faibles pertes par rétention et un seuil de détection peu élevé a principalement été utilisée. Elle s'avère être le traceur le plus performant en hydrogéologie karstique. Sa solubilité dans l'eau peut être améliorée par addition d'alcool méthylique.

La Rhodamine B a également été utilisée lors d'expériences de multitraçage. Bien que moins performante (son seuil de détection est plus élevé), elle demeure très appréciée. Sa solubilité dans l'eau très réduite nécessite l'addition d'alcool méthylique.

Les échantillons recueillis ont été analysés au Laboratoire de Chimie analytique de l'UER de Pharmacie de Grenoble. Nous avons effectué ces dosages sur un spectrofluorimètre Farrand Mark 2. Le principe de cet appareil repose sur la fluorescence : l'échantillon excité par un rayon lumineux de longueur d'onde donnée émet un spectre de radiations lumineuses caractéristique du traceur. L'intensité lumineuse maximale (correspondant à la longueur d'onde de fluorescence maximale) est grossièrement proportionnelle à la concentration en traceur pour des solutions peu concentrées.

Pour les eaux des exurgences des gorges de l'Ardèche relativement minéralisées ($C > 400 \mu S$), le seuil de détectabilité des traceurs s'est révélé être de l'ordre de 10^{-10} kg/l pour l'uranine et de 5.10^{-10} pour la Rhodamine B. Leurs longueurs d'onde d'absorption et de fluorescence maximales sont respectivement de 490 et 514 nm pour l'Uranine et de 554 et 576 nm pour la Rhodamine B.

Signalons l'intérêt de l'utilisation d'un spectrofluorimètre par rapport à un simple fluorimètre pour les concentrations légèrement supérieures au seuil de détectabilité. Le fluorimètre ne fournit

que l'intensité du rayonnement d'une longueur d'onde donnée supposée être celle de fluorescence maximale pour le traceur recherché. Il peut également s'agir d'une réponse secondaire d'une autre substance. Le spectrofluorimètre qui permet d'obtenir un spectre d'émission par la simple modification de la longueur d'onde d'émission lève ces ambiguïtés. Il s'est avéré ainsi que plusieurs concentrations faibles, mesurées sur des sources, étaient sans relation avec le traceur injecté et traduisaient un "bruit de fond" anormal.

3 - 2. LE TRACAGE DU VALLON DU TIOURRE

Caractéristiques du traçage (fig. 53)

Le ruisseau de Pissevieille en rive gauche de l'Ardèche draine toute la partie méridionale de la dépression de Saint-Remèze constituée de marnocalcaires hauteriviens et de calcaires argileux du Barrémien inférieur. Elle alimente une perte diffuse dans les alluvions du ruisseau à la cote de 280 m. En raison de l'existence de la source captée du Tiourre et des faibles distances de transit, une petite quantité de traceur a été utilisée. 220 grammes d'Uranine ont été injectés à l'amont de la perte le 17 mai 1983. De fortes précipitations accompagnaient cette injection expliquant le débit de 20 l/s du ruisseau.

Objectifs

Les buts de ce traçage étaient multiples :

- déterminer le rôle hydrogéologique de la faille N 50 du Pas du Mousse qui relie plus ou moins indirectement le point d'injection de la source de l'Aiguille en bordure de l'Ardèche. Ces deux points sont distants de 3 km pour une dénivellation de 200 m soit une pente de près de 7 % ;

- déterminer la vulnérabilité de la source du Tiourre captée par la ville de Vallon-Pont-d'Arc. Une pente moyenne de 5 % sépare ces deux points distants de 850 m ;

- étudier les rapports entre les différentes émergences du vallon du Tiourre. Le ruisseau temporaire du Tiourre naît à l'émergence de la source du même nom. Une succession de pertes et d'émergences jalonnent son parcours. Deux sources pérennes s'individualisent dans la partie hauterivienne du vallon : la source de la Minoterie à la moitié du tracé, la source du Bas-Moulin dans son tiers aval.

Résultats (fig. 54)

La source captée du Tiourre a été très rapidement contaminée par le traceur dont la vitesse d'arrivée est supérieure à 100 m/h. Cette vitesse est considérable étant donnée la faible dénivellation entre le point d'injection et la source. De fortes pluies, synchrones de l'injection, expliquent ce faible temps de transit. Le pluviomètre de la station météorologique de Vallon-Pont-d'Arc a en effet enregistré 28,1 mm de précipitations pour la journée du 17 mai.

La source du Tiourre, le ruisseau du Tiourre au tiers amont de son parcours et la source de la Minoterie connaissent une décroissance simultanée de la teneur en traceur. La source du Tiourre doit donc alimenter directement la source de la Minoterie par une perte de son émissaire.

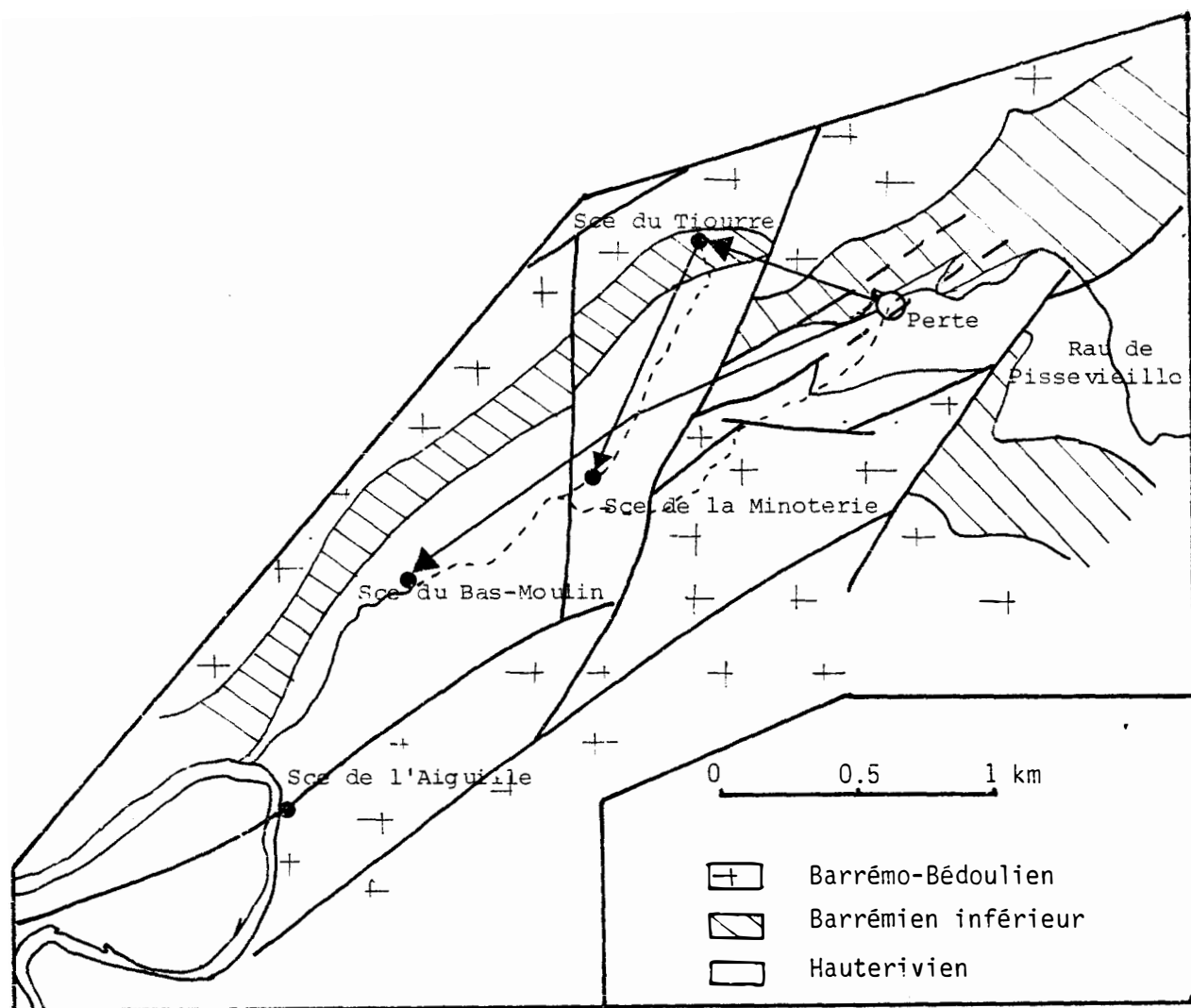


fig.53 : Contexte géologique et résultats du traçage du vallon du Tiourette.

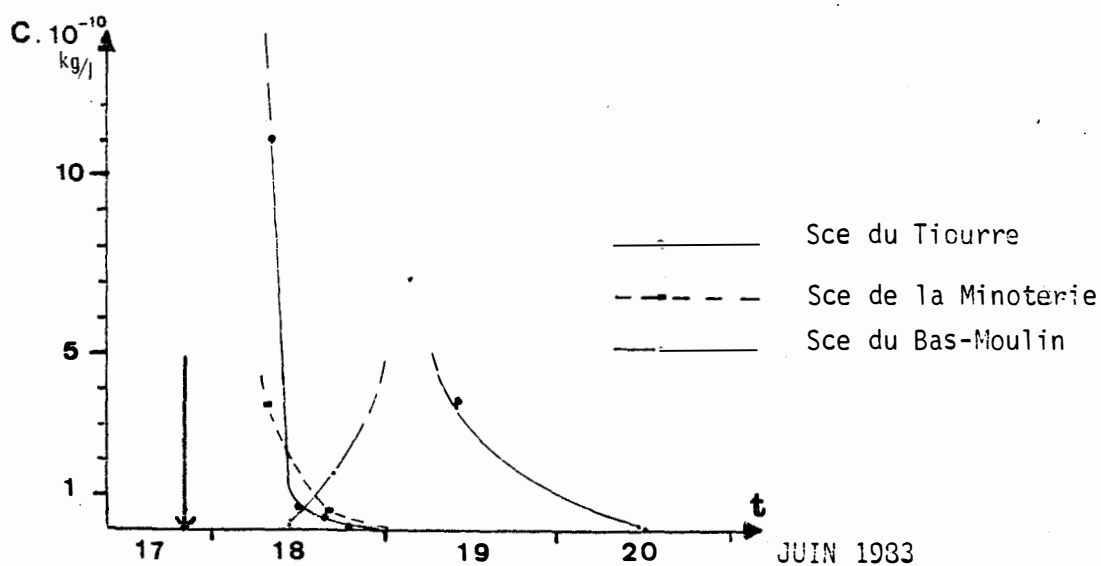


fig.54 : Traçage du vallon du Tiourette: courbe de restitution du traceur.

La source du Bas-Moulin qui émerge dans la partie aval du vallon s'individualise par rapport à ces écoulements. La vitesse du traceur, proche de 100 m/h, indique également un transit souterrain rapide. Son cheminement reste incertain puisqu'il peut s'agir d'eaux issues de la source du Tiourre et réinfiltrées ou d'une alimentation propre depuis le point de perte.

Il serait intéressant de reprendre cet essai de traçage au vu de ces premiers résultats. La quantité de traceur doit être majorée de manière à obtenir des valeurs significatives en début et fin de réponse. Les valeurs de transit obtenues permettront de réaliser cette manipulation dans de bonnes conditions et d'individualiser l'ensemble de la courbe de restitution du traceur.

La source de l'Aiguille n'a pas été affectée par le traceur malgré son alignement avec la perte sur des fractures N 50. Cette source n'intervient donc pas dans le drainage de la partie sud de la dépression de Saint-Remèze. Elle doit être alimentée par la partie élevée du plateau qui domine l'Ardèche, en arrière du Serre-de-Tourre.

3 - 3. LE TRACAGE DU RUISSEAU DU RIEUSSEC

Caractéristiques du traçage (fig. 53)

Ce traçage a été réalisé le 31.05.83 en rive droite de l'Ardèche sur la perte totale du Rieussec. Cette perte n'est pas réellement localisée : le ruisseau présente, dans sa partie terminale, une diminution progressive des débits jusqu'aux dernières vasques qui marquent la perte totale.

Trois sources des gorges de l'Ardèche ont été contrôlées :

- la source du Boeuf, distante de 1000 m, présente un dénivelé de 55 m avec le point d'injection, soit une pente moyenne de 5,5 ‰. Cette source est captée par le Syndicat des Eaux de Barjac ;
- la source de la Chaire connaît des caractéristiques similaires ;
- l'Event de Foussoubie, distant de 1100 m, montre un dénivelé légèrement supérieur à 50 m.

En raison de l'existence d'une source captée à l'aval, il n'a été injecté que 600 grammes de fluoréscéine . Cette coloration se déroule plus de dix jours après de fortes pluies, c'est-à-dire en dehors d'une période de crue. Cette époque correspond cependant à la fin de la recharge du karst. Au point d'injection, 200 m à l'amont de la perte totale, le débit du ruisseau est de 3,5 l/s.

Objectifs

Cette expérience de traçage était susceptible de lever de nombreuses ambiguïtés sur l'hydrogéologie de ce secteur amont de la rive droite de l'Ardèche. Il s'agissait en effet :

- de délimiter les bassins versants respectifs de deux unités karstiques proches et d'assez forte importance pour les gorges de l'Ardèche : les sources du Boeuf et de la Chaire d'une part, l'Event de Foussoubie d'autre part ;

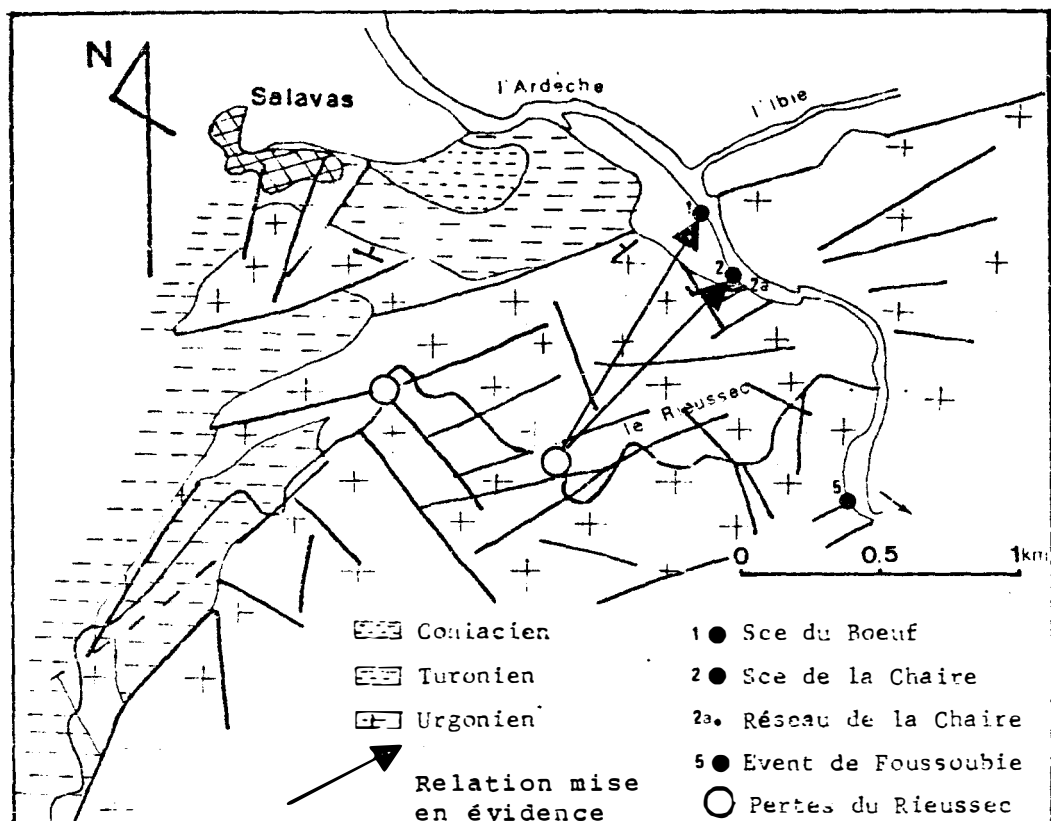


fig.55 : Contexte géologique et résultats du traçage du Rieussec.

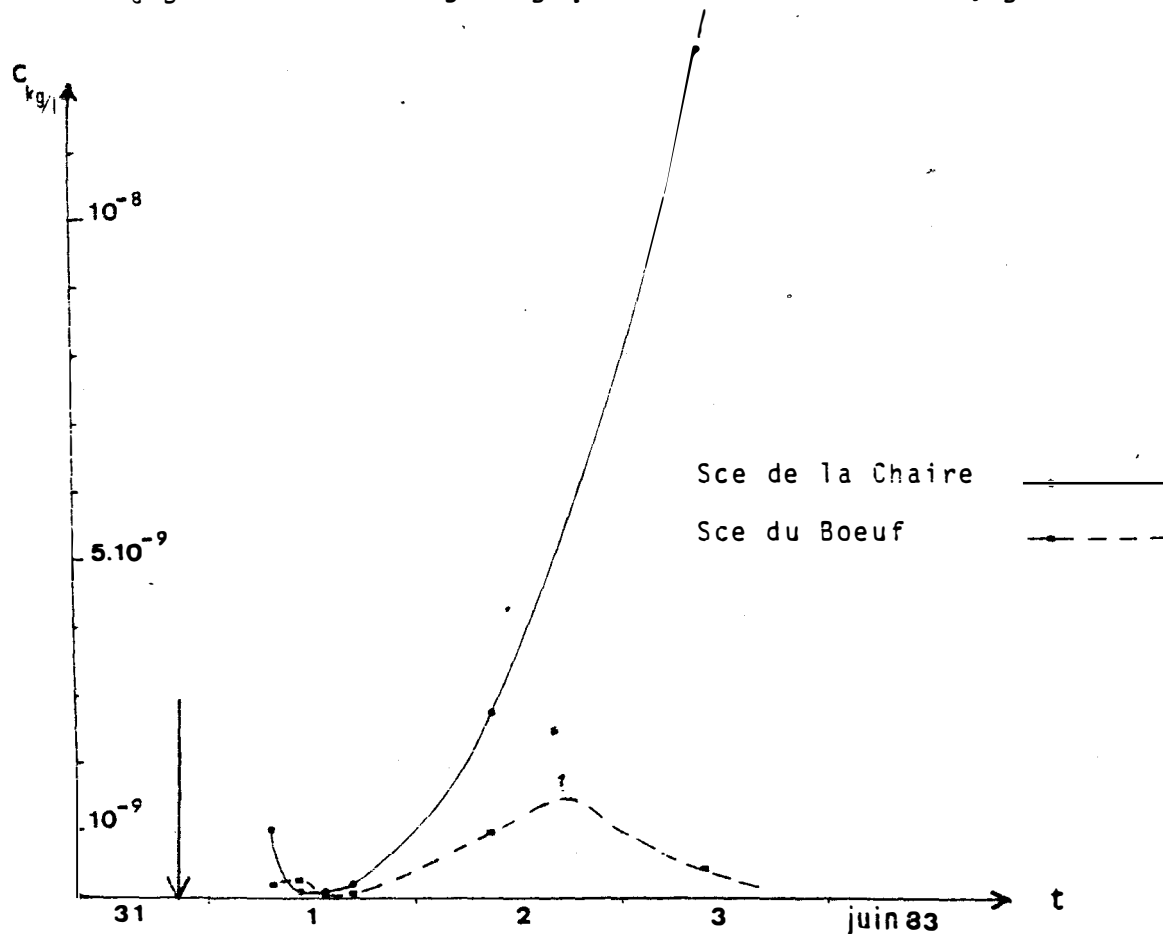


fig.56 : Traçage du Rieussec: courbe de restitution du traceur.

- de déterminer la vulnérabilité de la source captée du Boeuf et de préciser ses rapports éventuels avec la source de la Chaire;
- de comprendre le fonctionnement de cette partie du karst par une approche dynamique.

Résultats (fig. 56)

Le traceur n'a été décelé qu'aux émergences de la Chaire et du Boeuf. La vitesse d'arrivée du colorant est élevée et supérieure à 100 m/h. On observe une allure bimodale des deux courbes de restitution. La mise en eau d'un barrage agricole, à l'amont du point d'injection, au cours de la manipulation, a perturbé l'infiltration durant une demi-journée. Cet incident explique l'anomalie dans la forme des courbes de restitution.

Si le temps de réponse des deux émergences est quasi-simultané, la concentration en traceur est beaucoup plus forte à la source de la Chaire. Elle atteint une valeur de $1,25 \cdot 10^{-8}$ kg/l pour une concentration maximale de l'ordre de 1 à $2 \cdot 10^{-9}$ kg/l pour la source du Boeuf.

Il existe donc un axe de drainage direct entre la perte du ruisseau du Rieussec et les émergences de la Chaire et du Boeuf permettant d'évacuer rapidement ces eaux d'infiltration rapide. La disparité entre les concentrations des deux sources peut s'expliquer soit par la divergence des eaux de la perte vers deux systèmes karstiques différents et dans des proportions inégales soit par une organisation particulière du réseau Chaire-Boeuf. Nous inclinons davantage vers cette hypothèse : l'émergence de la Chaire joue le rôle d'évacuateur de crue principal, l'émergence du Boeuf est plus étroitement reliée au karst noyé. Les données hydrochimiques et hydrodynamiques fourniront des arguments complémentaires.

Le réseau de Foussoubie ne semble pas étendre sa zone d'alimentation vers le Nord-Ouest. L'accident N 50 sur lequel émerge l'évent pourrait constituer la limite occidentale de son bassin versant.

3 - 4. LE TRACAGE DE LA GOULE DE FOUSSOUBIE

Plusieurs colorations ont été effectuées sur la Goule de Foussoubie par le G.R.B. (Groupe de Recherches Biospéléologiques). Le but de ces manipulations n'était pas de mettre en évidence la relation entre la Goule et l'Event de Foussoubie puisque des plongeurs belges avaient réalisé la jonction dès 1967. Il s'agissait par contre de préciser les modalités d'écoulement dans le réseau lors d'épisodes hydrologiques différents.

Caractéristiques des traçages

La Goule et l'Event de Foussoubie sont distants de 3,4 km pour une dénivellation de 125m, soit une pente moyenne de près de 4 %. La source de Vanmalle, située à 1,5 km à l'aval de l'Event de Foussoubie, est distante de 3,5 km de la Goule pour une dénivellation identique. Ces deux exurgences ont été contrôlées.

Les mesures ont été effectuées grâce à tube U.V. de type TW6W Philipps et une gamme-étalon de fluorescéine. Nous ne connaissons pas la fiabilité de ce matériel. Le seuil de détectabilité est élevé, voisin de 10^{-9} kg/l. La précision des mesures n'est correcte que pour des concentrations excédant 10^{-8} kg/l.

Traçage de mars 1975 (fig. 57)

La coloration a été réalisée en période de décrue : le débit de la Goule passe de 80 l/s au moment de l'injection à 5 l/s après une semaine. 0,5 kg de fluorescéine ont été lâchés dans la Goule. La vitesse d'arrivée du traceur est de 69 m/h à l'Event, la source de Vanmalle n'a pas été contrôlée. Le pic de la crue n'a pas été perçu, il arrive rapidement et est suivi par une lente décroissance de la concentration.

Traçage d'avril 1976

Cette coloration a été réalisée avec des débits faibles à la Goule : de l'ordre de quelques litres par seconde. 3 kg de fluorescéine ont été injectés. Le colorant a progressé à 35 m/h. La source de Vanmalle n'a pas présenté de colorant. Le colorant est sorti massivement durant plusieurs jours à l'Event.

Traçage de novembre 1976

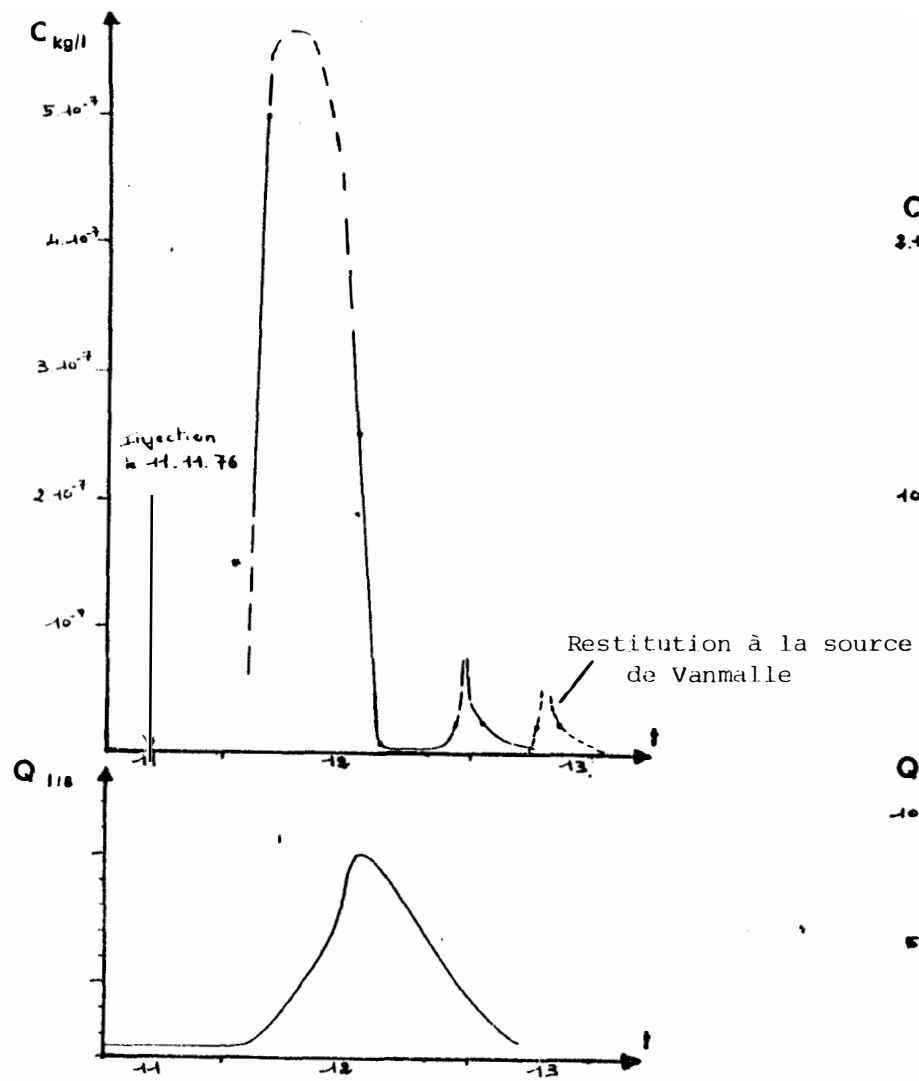
3 kg de colorant ont été injectés à 800 m à l'amont de la Goule. Le ruisseau déjà en crue (250 l/s lors de l'injection) a bénéficié de fortes précipitations (21,3 mm à Labastide-de-Virac) qui ont provoqué une crue de près d'un m³/s à la Goule. Les deux exurgences de l'Event de Foussoubie et de Vanmalle ont été atteintes par le traceur avec une vitesse minimale d'arrivée respectivement de 340 m/h et de 100m/h (fig. 58).

La courbe de restitution du traceur à l'Event est bimodale. Une forte crue s'est déclenchée à la goule après que le pic de concentration maximal ait été obtenu à l'Event. Cette poussée a remobilisé le colorant restant dans le réseau, ce qui se traduit par un second pic lors de la crue de l'Event. Notre analyse diffère de celle des auteurs de la coloration (P. SLAMA, 1976) qui concluaient à un double cheminement des eaux dans le réseau selon des vitesses différentes.

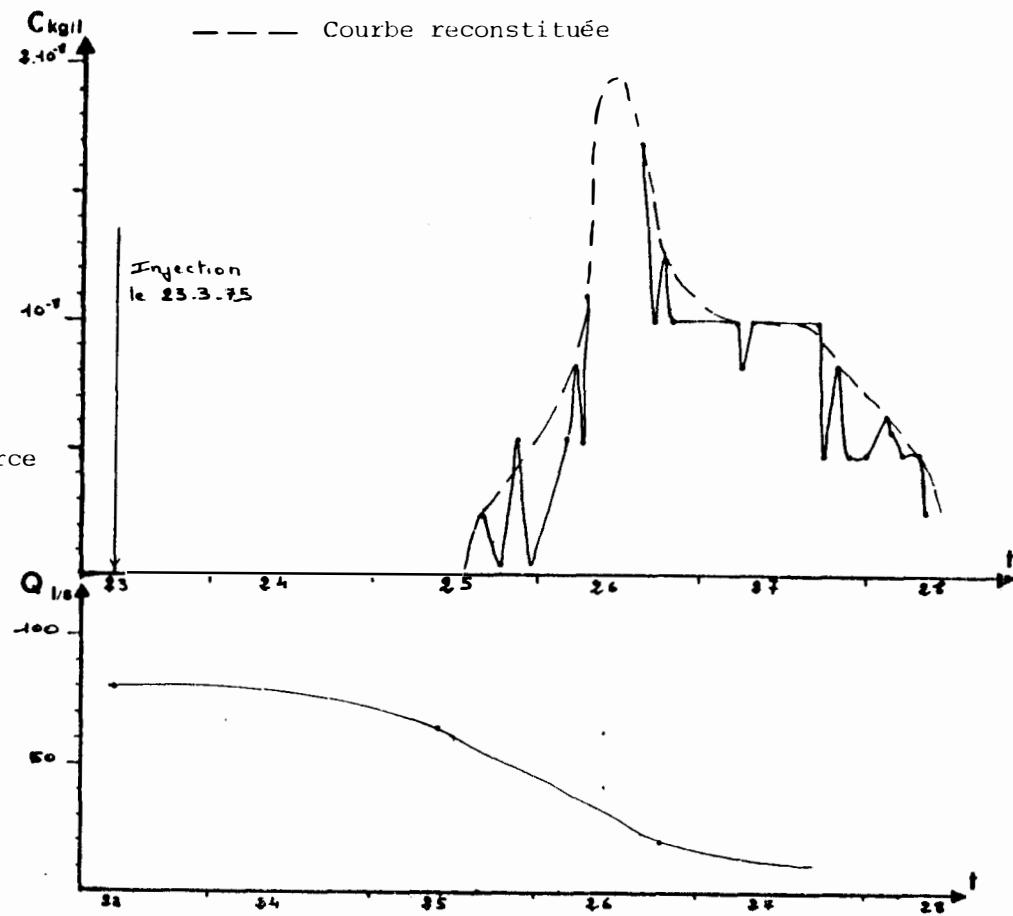
Conclusions

Ce triple traçage de la Goule de Foussoubie est riche en enseignements. Effectués dans des conditions hydrologiques différentes, crue exceptionnelle, faible crue et décrue, ces manipulations permettent de bien cerner ce réseau :

- Le réseau de Foussoubie est organisé autour d'un axe de drainage direct entre la Goule et l'Event. Ce réseau est en mesure d'évacuer de fortes crues en un temps minime, ce qui souligne un degré de karstification et de développement élevé.



a) Traçage de novembre 76



b) Traçage de mars 75

fig.57: Traçages de Foussoubie: courbes de restitution et hydrogrammes de la Goule

- La contamination de la source de Vanmalle lors du traçage en crue est particulièrement intéressante. Une incertitude demeure: le colorant n'a-t-il pas été détecté à cette émergence, lors des autres traçages, par un manque de précision des appareils de mesure ou par une absence réelle ? Dans le cas de cette seconde hypothèse, il apparaît donc un changement des limites entre les bassins versants des deux émergences selon le régime hydrologique considéré. Les deux bassins versants géologiques sont indépendants en régime normal. En crue, lors de la saturation du réseau de Foussoubie, les eaux atteignant les cotes les plus élevées basculent vers le bassin de Vanmalle. Ce phénomène se retrouve probablement sur l'ensemble du plateau des Gras. L'organisation hydrogéologique en réseaux parallèles orientés vers les gorges de l'Ardèche favorise une telle fluctuation latérale des limites de bassins versants.

- Le tableau récapitulatif suivant permet de comparer ces différents traçages. Outre les temps et les vitesses minimales d'arrivée, t_{min} et v_{min} , il comprend le temps modal t_{mod} et la vitesse modale v_{mod} des particules ayant la plus forte probabilité d'arrivée.

Date	Masse de traceur M (kg)	Débit d'injection Q_i (l/s)	t_{min} (h)	v_{min} (m/h)	t_{mod} (h)	v_{mod} (m/h)
Mars 75	0,5	80	50	68	76	45
Avril 76	3	1 à 5	98	35	160	21
Nov. 76	3	250	10	340	15	230

tableau2 : Caractéristiques des traçages de la goule de Foussoubie.

Il est intéressant de remarquer que le temps modal d'arrivée du colorant est identique à une fois et demi le temps minimal. Quelles que soient les conditions hydrodynamiques, les modalités de transit du colorant sont similaires. Les eaux issues de la goule de Foussoubie ne séjournent que très peu dans ce réseau à fort pouvoir évacuateur. Elles n'ont donc probablement qu'un rôle limité dans la karstogenèse actuelle de la cavité.

3 - 5. LE MULTITRACAGE DE LA RIVE DROITE DE L'ARDECHE

Deux traçages simultanés ont été réalisés à l'Est et au Sud-Est de Labastide-de-Virac, le 15 septembre 1983. Les deux injections ont été effectuées dans des zones lapiazées bien évoluées sans relation avec un écoulement d'eau. C'est donc grâce au camion-citerne des sapeurs-pompiers de Vallon-Pont-d'Arc que cette opération s'est déroulée.

Caractéristiques des traçages (fig. 58)

- 2 kg de Rhodamine B poussés par 800 l d'eau ont été injectés, à 800 m à l'Est de Labastide-de-Virac, sur les reliefs urgoniens bordant la partie orientale de la dépression de Vagnas-Labastide. La cavité retenue se situe à la cote de 280 m. Le point d'injection est distant de 3,6 km de l'Event de Foussoubie (et de 5,9 km en passant par la Goule), de 3,0 km de la source de Vanmalle, de 2,6 km de la source de la Fare et d'environ 3 km des sources de la Langue du Boeuf et de la Dragonnière.

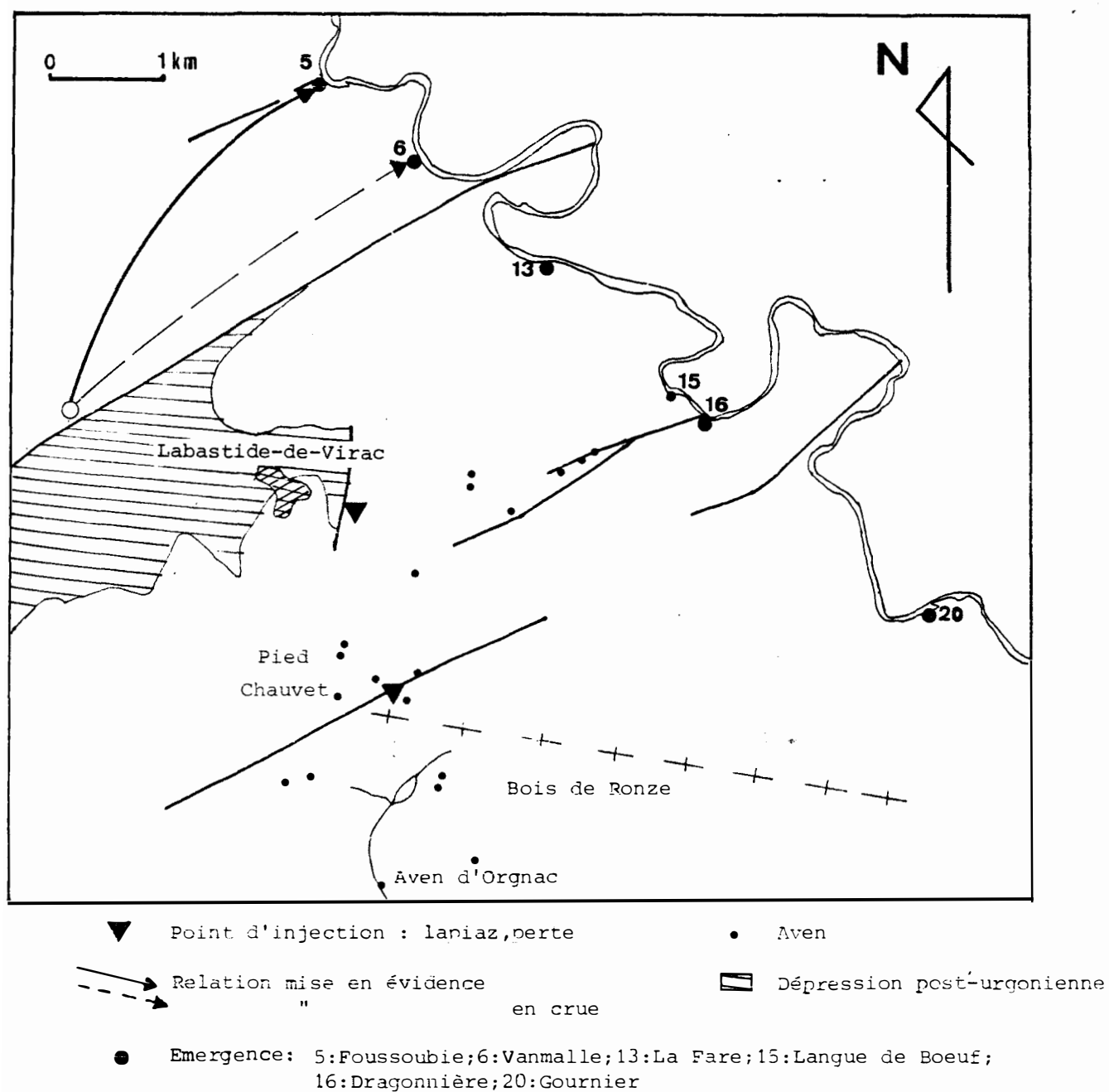


fig. 58: Contexte hydrogéologique des tracages de la rive droite de l'Ardèche

- 2 kg de fluorescéine poussés par 1200 l d'eau ont été injectés dans un profond lapiaz dans la zone du Pied Chauvet, c'est à dire dans la zone septentrionale du Bois de Ronze. Le point d'injection coté 330 m est distant de 3,5 à 4,5 km des exurgences des gorges: Vanmalle, Fare, Dragonnière, Gournier.

L'ensemble des émergences des gorges précédemment citées a été échantillonné. Au Sud, les premières émergences rencontrées sont celles de la rive gauche de la Cèze. Par mesure de précaution, la plus importante d'entre elles (la source de Monteils distante de 7,5 km du Pied Chauvet) a été équipée de fluocapteurs au charbon actif.

Objectifs

Les deux zones d'infiltration retenues semblent appartenir au bassin versant de l'Ardèche. Elles sont en mesure d'alimenter de nombreuses émergences des gorges et la mise en évidence d'une relation serait déterminante pour la compréhension des écoulements de la bordure de la rive droite.

Il serait également intéressant de préciser si le bassin de la Goule de Foussoubie draine des écoulements karstiques du bassin géographique de l'Ardèche. Le contrôle de la Goule permet d'envisager cette hypothèse.

Le Pied Chauvet est un secteur d'infiltration riche en lapiaz et comportant de nombreux avens. Il s'inscrit sur le tracé d'une faille N 50 plurikilométrique. La zone située à l'Est de Labastide est également voisine d'un accident parallèle qui aboutit à la source de la Dragonnière. Le problème du rôle hydrogéologique de ces accidents reste posé.

Résultats

Les contrôles de la fluorescence ont été effectués durant un mois et demi sans qu'aucune trace de colorant ne soit apparue. Contre toute attente, aucune précipitation sérieuse n'a été enregistrée durant le premier mois de mesures. C'est seulement au 13 et 14 octobre 1983 que 45 + 90 mm sont tombés à Vallon-Pont-d'Arc.

Ces conditions météorologiques défavorables n'ont pas permis le transfert du colorant. La période d'étiage a laissé une large tranche superficielle complètement asséchée. Cette dernière a dû constituer un véritable piège pour le traceur.

3 - 6. LE MULTITRACAGE DU PLATEAU DE SAINT-REMEZE

Un double traçage a été réalisé le 1er juin 1984 sur la rive gauche de l'Ardèche. La première injection s'est déroulée entre Bidon et Saint-Remèze à 800 m au NE de l'aven de Marzal. Quelques zones lapiazées apparaissent. Des lapiaz plus ouverts forment des cavités de faible diamètre s'enfonçant en pente douce vers le Sud. C'est dans l'une d'elle que 7,6 kg de Rhodamine B ont été injectés poussés par 3 m3 d'eau apportés par les sapeurs-pompiers de Bourg-Saint-Andéol.

Le second traçage a été effectué à la base de l'aven de Vigne Close : l'aven le plus profond du plateau des Gras. 3,5 kg de fluorescéine ont été lâchés dans le petit écoulement qui traverse le fond de cette cavité.

Caractéristiques des traçages (fig. 59)

Le point d'injection le plus septentrional, à proximité du lieu-dit de l'Arbre Rond et de l'aven du même nom, est situé sur la retombée méridionale des reliefs qui dominent la dépression de Saint-Remèze. La cavité colorée est cotée 370 m. Elle est respectivement distante de 5, 4,4, 3,3, 7,6 km des émergences de Richemale, de la Guigonne, du Cirque de la Madeleine et de l'Ecluse, soit pour une dénivellation de l'ordre de 320 m des pentes qui s'étalent entre 4 et 10 %.

L'aven de Vigne Close à composante essentiellement verticale s'ouvre à 305 m. L'écoulement le recoupe donc à la cote de 118 m. Distant de 1,3 km pour le Cirque de la Madeleine à 4,3 km pour les sources de l'Ecluse et du Passeron, ce point est séparé de ces émergences par une pente moyenne de 2 à 5 %.

Objectifs

Le point d'injection de l'Arbre Rond est situé sur le flanc sud de l'anticlinal de Saint-Remèze, sur des niveaux urgoniens pentés de 20° vers le Sud. La cavité injectée semble se développer le long du plan de stratification. Cette cavité appartient à une zone charnière entre la zone structurale des accidents N 50 et la zone orientale des accidents N 140. Cet affrontement se traduit par la prédominance de failles subméridiennes. Ce contexte rend la coloration très intéressante puisque cette zone va pouvoir être drainée vers les deux unités précédemment citées ou vers le secteur central et les émergences de Richemale et de la Guigonne.

C'est dans un contexte structural similaire que s'ouvre l'aven de Vigne Close. La plaine des grands puits est vide de tout élément hydrographique. La forte infiltration qui s'exerce sur ce secteur est susceptible d'alimenter des émergences très diverses.

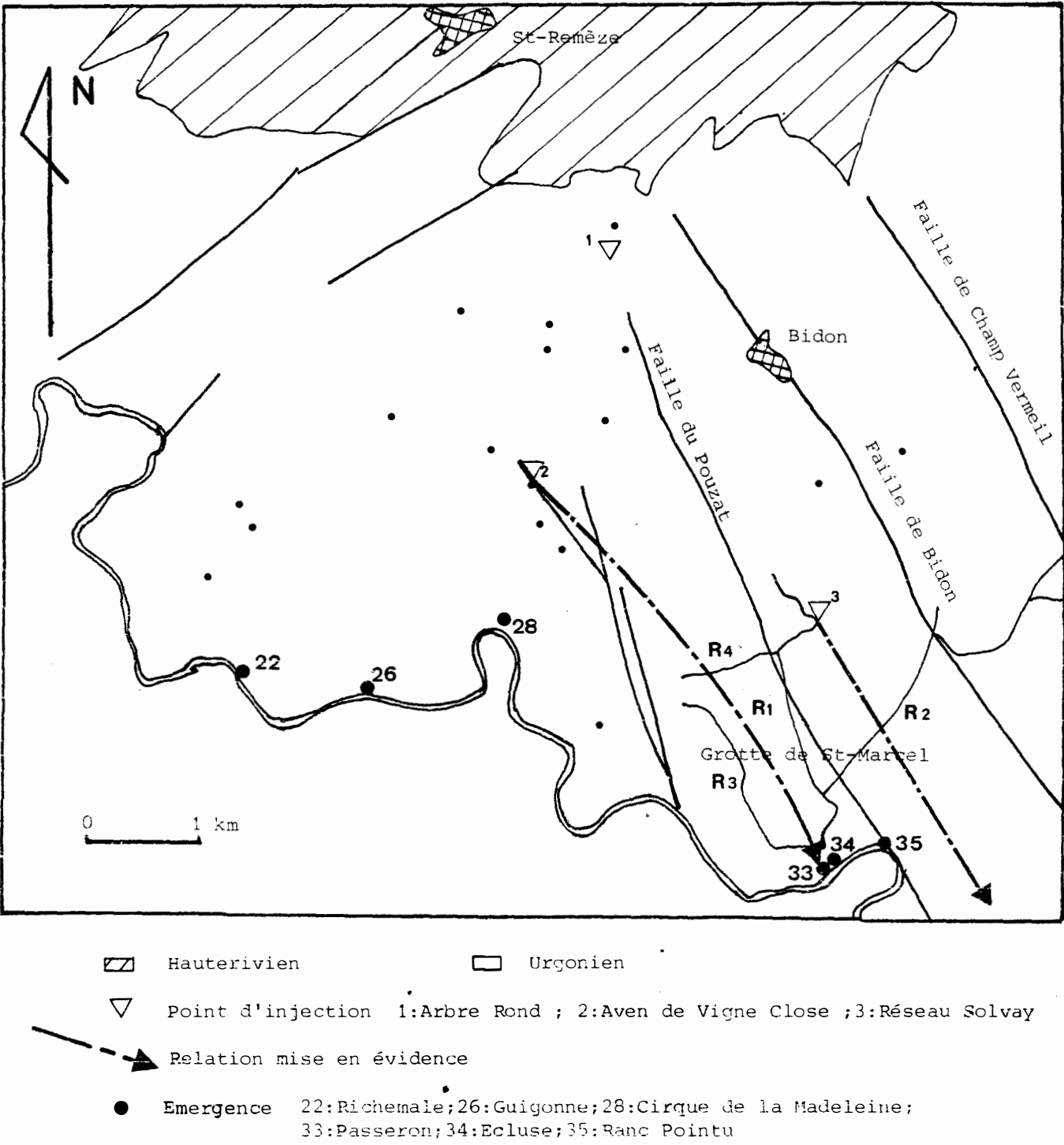
Résultats

Après un mois de mai très pluvieux marquant une recharge importante, cinq jours consécutifs de pluie vont s'installer dans la première semaine de juin (52,8 mm à Bourg-Saint-Andéol, 60,5 mm à Vallon-Pont-d'Arc) à la suite de l'injection. Les conditions hydrodynamiques ont donc été très favorables au déroulement du traçage.

Aucune trace de Rhodamine n'a toutefois été décelée durant un mois d'échantillonnage. Cette absence de résultats ne semble pas imputable comme lors du multitraçage de la rive droite aux conditions d'injection. Il est possible d'invoquer plusieurs raisons pour expliquer cet échec :

- des émergences immergées non reconnues ont pu drainer le colorant vers l'Ardèche ;
- l'écoulement s'est effectué vers l'amont des gorges (source du Flatane) selon un accident N 50. Cette éventualité paraît peu probable ;

fig.59: Contexte hydrogéologique des traçages des environs de Bidon



- le traceur a été piégé dans la zone noyée et probablement restitué durant l'étiage qui a suivi. Avec la fréquentation estivale, de nombreux fluocapteurs ont malheureusement disparus.

Durant le premier mois de contrôle, la fluorescéine n'a été détectée à aucune des émergences contrôlées. Des concentrations notables de traceur ont par contre été enregistrées à la source du Passeron deux mois à deux mois et demi après l'injection. Les concentrations ont varié durant cette période de 10^{-9} à 4.10^{-9} kg/l. Il ne semble pas que d'autres colorations aient pu interférer avec celle de l'aven de Vigne Close même si ces mesures ont été effectuées lors de la surveillance du traçage de la grotte de Pascaloune. Les résultats de cette coloration (§ 3.8) rendent cette hypothèse improbable. Le long temps de transit peut d'autre part être expliqué par le stockage d'importants volumes d'eau en période de recharge. Ces eaux sont progressivement restituées à l'exutoire lors de l'étiage.

L'examen du contexte structural du point d'injection peut permettre de justifier la direction d'écoulement des eaux. Un méga-accident N 140 naît à proximité de la plaine des puits. Si l'on envisage le rôle de faille-écran d'un tel accident, on s'aperçoit qu'un écoulement, qui se serait engagé au-delà de cette faille par rapport aux gorges est conduit à l'aval vers l'émergence du Passeron. Les eaux de l'exurgence de l'Ecluse, toute proche, sont fortement diluées par les eaux de l'Ardèche. Elles ne présentent que des traces difficilement interprétables.

3 - 7. LE TRACAGE DE LA GROTTÉ DE SAINT-MARCEL

La grotte de Saint-Marcel est un vaste système karstique fossile comprenant 22 km de galeries. Quatre réseaux principaux de générations différentes se développent selon la fracturation existante. Il est possible localement d'accéder à un karst actif depuis ces réseaux supérieurs. Le réseau actif du puits Solvay s'ouvre ainsi à l'extrémité du réseau 1 (fig. 59). Ce puits donne sur une zone noyée de grande étendue : les deux siphons qui le limitent ont été reconnus respectivement sur 1200 et 1300 m. Ce réseau a été coloré le 29 janvier 1984 grâce à l'aide des spéléologues locaux du CASC.

Caractéristiques du traçage

1 kg de fluorescéine a été injecté au sommet du puits Solvay parcouru par un petit écoulement qui gagne la zone noyée. Cette coloration s'est effectuée en période de crue puisque 92,1 mm sont tombés à Bourg-Saint-Andéol du 19 au 31 janvier dont 38,1 mm le 26. D'après la topographie utilisée (R. BILLARD et G.S. FOREZ, 1977), la cote du plan d'eau est de 99 m. Les émergences des gorges de l'Ardèche susceptibles d'être atteintes par le traceur sont les sources du Passeron, de l'Ecluse et de Ranc Pointu, distantes d'un peu plus de 2 km. Elles offrent une dénivellation de 53 m avec le point d'injection, soit une pente légèrement supérieure à 2 ‰. Aucune émergence de cote inférieure n'a été recensée sur le versant du Rhône.

Objectifs

Le but de ce traçage était la mise en évidence d'une relation entre cette fenêtre sur la zone noyée et une émergence des gorges.

Cette coloration devait d'autre part donner une idée de l'ampleur de la zone noyée grâce à l'étude de la courbe de restitution du traceur.

Résultats

Le traceur n'est réapparu dans aucune des émergences surveillées malgré des conditions hydrodynamiques très favorables. Nous ne retenons pas l'hypothèse de la fuite vers une émergence immergée non reconnue. Il est intéressant de remarquer que les réseaux 1, 3 et 4 se développent entre 2 accidents N 140 majeurs. Le réseau Solvay rattaché au réseau 1 n'appartient pas à cette unité. Dans le cas où ces accidents jouent un rôle de faille-écran, on voit que les écoulements de ce secteur ne vont pas recouper le cours de l'Ardèche, mais se dirigeront vers l'aval sur le bassin versant du Rhône. Ce résultat négatif trouve ici une justification plausible.

La partie active du réseau 3 serait par contre en relation avec les émergences des gorges. La partie active du réseau 2 (galeries N) alimenterait le bassin versant du Rhône.

3 - 8. LE TRACAGE DE LA GROTTA DE PASCALOUNE

Ce traçage s'est déroulé sur le versant Rhône du plateau des Gras. S'il n'intéresse pas directement notre zone d'étude, il affecte la même unité karstique et permettra donc d'étudier le comportement des écoulements dans la zone orientale.

Le but de cette coloration était en premier lieu de mettre en évidence une relation entre le point d'injection et les sources de Tourne. Le SIVOM de Bourg-Saint-Andéol qui envisage de nouveaux captages sur le Goul de la Tannerie a lancé un certain nombre d'études dont ce projet fait partie. Les spéléologues du CASC ont mené l'ensemble de la coloration, j'ai pour ma part réalisé les mesures de concentration en traceur.

L'injection s'est déroulée à la grotte de Pascaloune (fig. 60). Cette cavité s'ouvre en bordure du ruisseau de Rimouren qui draine la partie septentrionale de la dépression hauterivienne de Saint-Remèze. Ce ruisseau est affecté de nombreuses pertes et résurgences. C'est l'une de ces pertes qui alimente le siphon basal de la grotte de Pascaloune. C'est là que 3 kg de fluorescéine ont été injectés le 23 juin 1984. Le point d'eau situé à - 160 m sous l'entrée de la cavité est coté 105 m. Les sources de Tourne sont situées à 7,5 km de la cavité. Cotées à 60 m, elles présentent une dénivellation de 45 m avec le point d'injection, soit une pente de 0,6 %. D'autres émergences mineures apparaissant dans le bassin versant de la Conche (rivière dans laquelle se jette le ruisseau de Rimouren), du Rhône et de l'Ardèche ont été contrôlées.

Résultats

Cette coloration s'est tout d'abord déroulée durant une période de décrue après les fortes pluies de mai et du début juin. Le débit au Goul de la Tannerie était de 550 l/s le 21 juin. Un régime d'étiage peu puis aucunement influencé s'est ensuite installé pour aboutir à des débits de quelques litres par seconde fin juillet.

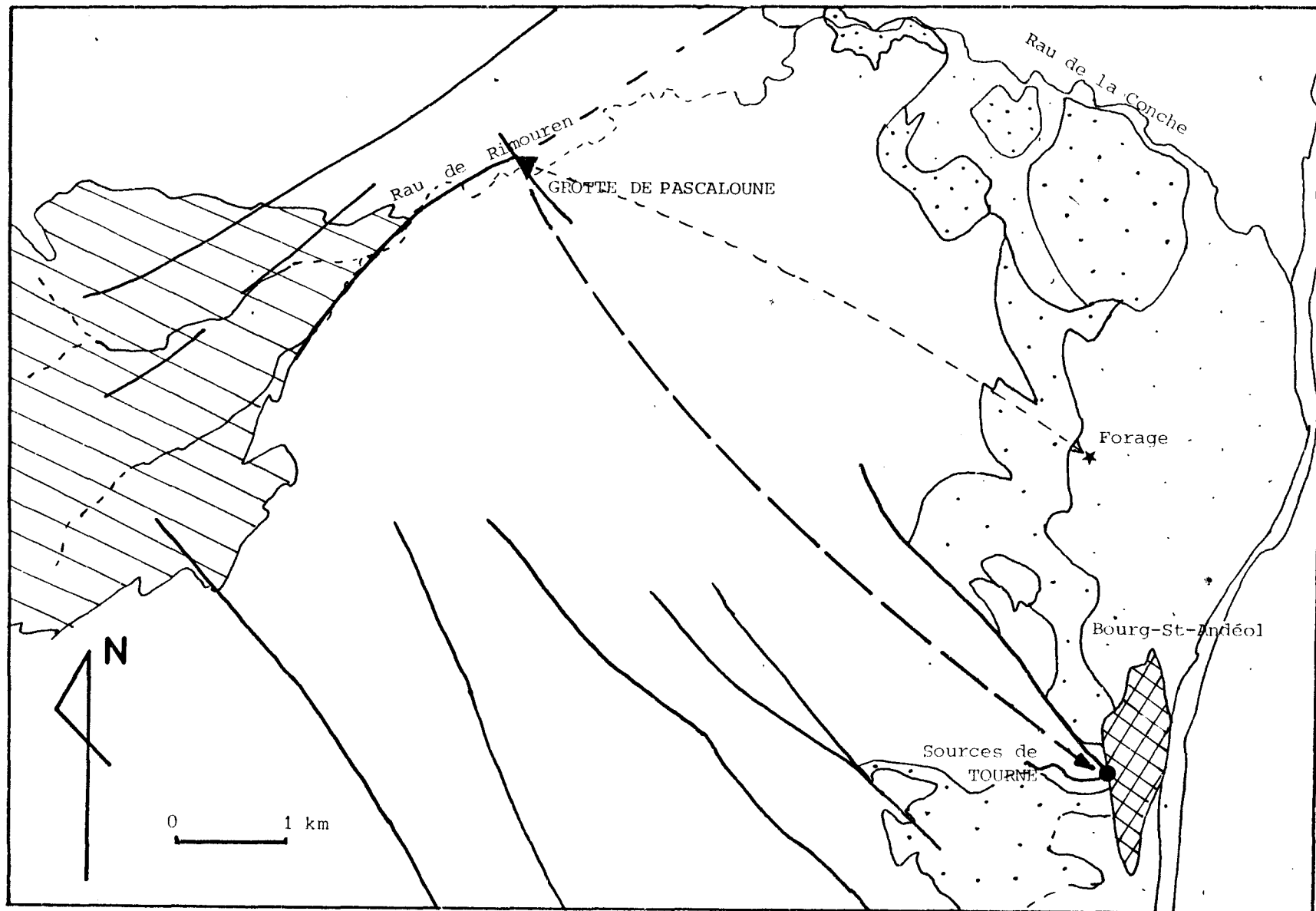


fig. 60: Contexte géologique et structural du tracé de la grotte de Pascaloune

Le premier signal a été détecté le 26^e jour de la coloration simultanément aux exurgences du Grand Goul et du Goul de la Tannerie. Le colorant est sorti alors visible à l'oeil nu durant près d'un mois et demi. La quasi-absence d'écoulement n'a pas permis son évacuation durant le mois d'août. Plusieurs constatations découlent de l'étude des courbes de restitution (fig. 61) :

- Les courbes des deux émergences de Tourne présentent une allure et des concentrations similaires, ce qui confirme l'existence d'un seul système karstique à deux exutoires. Seule différence notable, la croissance des concentrations est légèrement plus rapide au Grand Goul. Les deux courbes connaissent par la suite des variations similaires. Cette légère anomalie peut être expliquée par une dilution plus grande du traceur au Goul de la Tannerie due à des apports propres principalement marqués lors des périodes de hautes eaux. Les données hydrochimiques qui montrent de légères variations de teneurs entre les deux exutoires en hautes eaux nous font avancer cette hypothèse.

- La vitesse d'arrivée du colorant est de 12 m/h, ce qui est cohérent devant la faiblesse de la pente et l'installation du régime d'étiage. La vitesse modale est de 10 m/h. Le traceur a donc connu une faible dispersion, ce qui semble traduire un cheminement direct.

- Cette conclusion se trouve confirmée par le calcul de la masse de traceur restituée. Elle s'exprime de la manière suivante:

$M = \int_{t_0}^{\infty} C(t) \cdot Q(t) dt$ où t_0 est la date d'injection. Ce calcul a été effectué sur l'intervalle de temps correspondant à l'échantillonnage:

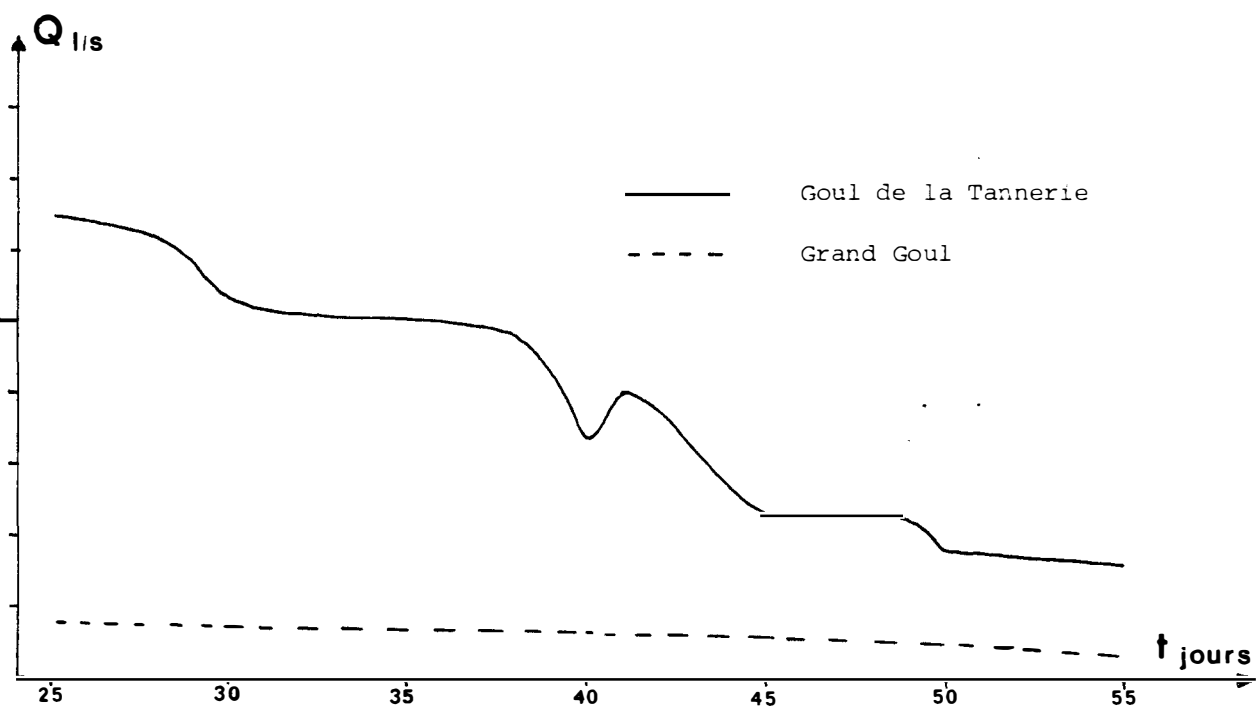
$M = \int_{27}^{55} C(t) \cdot Q(t) dt$. L'intégration de la courbe $C(t) \cdot Q(t)$ nous donne $M = 2,3$ kg au Goul de la Tannerie et $M = 0,450$ kg au Grand Goul, soit une masse totale $M = 2,750$ kg. Le taux de restitution s'exprime ainsi :

$$\tau = \frac{M}{M_0} = \frac{2,750}{3,5} = 79 \% \text{ où } M_0 \text{ est la masse injectée.}$$

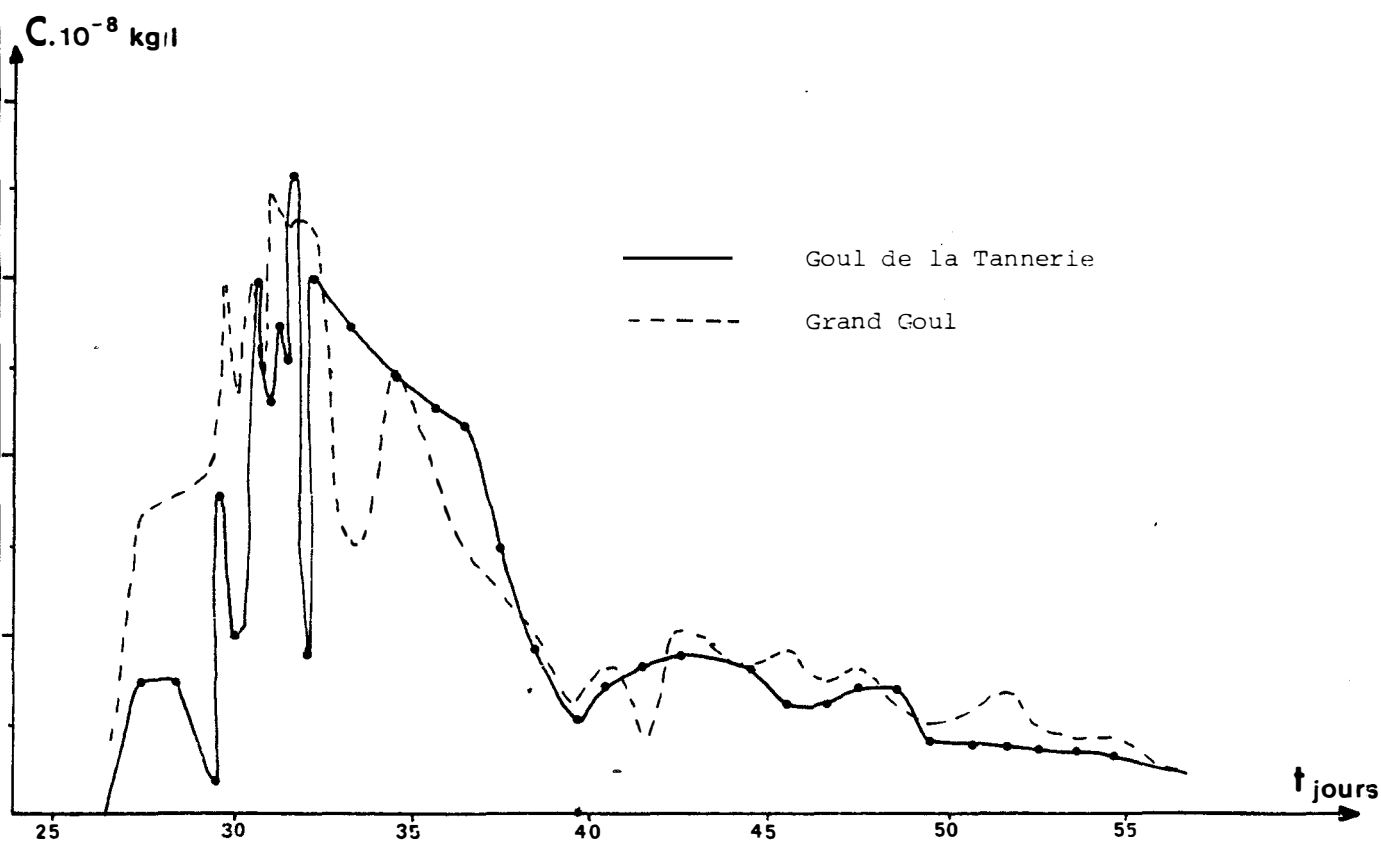
Ce taux de restitution de près de 80 % qui ne tient pas compte de la fin de la restitution, non échantillonnée, et des débits prélevés pour l'alimentation en eau potable, est très élevé. La bonne conservation du traceur et ce, malgré la distance parcourue, prouve l'existence d'un axe d'écoulement bien défini.

- Deux autres points ont été contaminés durant cette coloration. La source du Passeron sur les gorges de l'Ardèche a révélé la présence de traceur. Il paraît impossible au vu du taux de restitution qu'une partie du traceur ait pu emprunter un second axe de drainage aussi différent. Il s'agit donc vraisemblablement du colorant issu d'un traçage antérieur à l'aven de Vigne Close. Un forage situé à 3 km au Nord de Bourg-Saint-Andéol a présenté quelques indices de traceur. Il paraît difficile de concevoir une contamination de l'ensemble de la bordure urgonienne des environs de Bourg-Saint-Andéol devant les caractéristiques du traçage. Il pourrait donc s'agir d'un écoulement secondaire, individualisé à proximité du point d'injection.

- Il est une nouvelle fois intéressant de noter le rôle des mégafractures par rapport aux écoulements. La grotte de Pascaloune est située en bordure d'une mégafracture N 50 qui traverse de part en part le plateau des Gras. Les écoulements sont totalement indépendants



a) Hydrogramme des sources de Tourne



b) Courbes de restitution

fig. 61: Traçage de l'aven de Pascaloune: courbes de restitution et hydrogrammes des sources de Tourne

de cette structure. L'accident N 140 de Sardagne a vraisemblablement contenu les écoulements principaux sur son versant S-W avant de les guider au niveau du réseau de Tourne.

4 - LE PROBLÈME ORIENTAL : LE BASSIN VERSANT DU RHÔNE

La bordure orientale du plateau des Gras se présente comme une vaste surface monoclinale au pendage orienté légèrement vers l'Est. Cette partie du massif est découpée par de grands accidents N 140 prépondérants. La connaissance de leur rôle hydrogéologique paraît déterminante pour la compréhension des directions d'écoulement. Les trois traçages effectués dans cette zone structurale permettent de répondre à cette question. Depuis les trois points d'injection, les circulations ont connu une évolution identique. Elles se sont dirigées du NW au SE (ce résultat est obtenu par défaut pour la coloration de Saint-Marcel). Elles ont émergé sur une faille N 140 (injections de l'aven de Vigne Close et de la grotte de Pascaloune), n'ont pas traversé d'accidents N 140 et se sont donc cantonnées à une unité limitée par deux accidents de cette famille. Le cas de la faille de Sardagne sur laquelle émerge le réseau de Tourne paraît plus nuancé. Le rôle de limite de cette faille peut être contesté par deux arguments. Le traceur de la grotte de Pascaloune a été décelé sur les deux compartiments de l'accident, ce qui laisserait supposer l'existence d'une zone noyée unique. Ce traçage présente des indices de faible dispersion caractéristiques d'un axe drainant principal. C'est donc un écoulement secondaire qui serait à l'origine de la contamination du forage situé au Nord de Bourg-Saint-Andéol. En septembre 1984, un essai de pompage réalisé sur la galerie du Goul de la Tannerie à 700 m à l'amont de l'émergence, a provoqué un rabattement total de près de 3 m sur l'ensemble du réseau, émergences y compris. Des forages de reconnaissance situés au Nord de Bourg-Saint-Andéol ont connu un rabattement de 50 cm à 1 m. Il ne semble pourtant pas que les eaux du compartiment nord se soient mobilisées vers le point de pompage. Cette mise en action d'un volume d'eau répond plutôt à l'abaissement du niveau d'eau statique à l'exurgence. On peut donc considérer la zone noyée comme constituée de deux unités indépendantes, mis à part au niveau des galeries terminales.

L'aquifère peut donc se résumer dans une première approche à une succession de blocs indépendants limités par des failles N 140. La généralisation de ce premier raisonnement à l'ensemble de la bordure orientale permet de dresser les premières limites du bassin versant géologique du Rhône.

4 - 1. LIMITES HYDROGÉOLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS DU RHÔNE s.s. ET DE LA CONCHE (fig. 62)

Le bassin versant géographique de la Conche, affluent de la rive droite du Rhône, s'étend sur sa partie sud sur la quasi-totalité des terrains hauteriviens du bombement de Saint-Remèze et sur le Bois de Laoul. La coloration de la grotte de Pascaloune montre que les circulations souterraines sont davantage tournées vers le bassin du Rhône s.s. Le ruisseau de Rimouren qui forme le ruisseau de la Conche après sa confluence avec les ruisseaux d'Imbourg et de Valescuré comporte une succession de pertes et de résurgences avant ce point de confluence. Les pertes du cours amont (grotte de Pascaloune) sont orientées vers le bassin du Rhône. On admettra donc que les eaux issues du bassin versant géologique de cette perte (c'est-à-dire

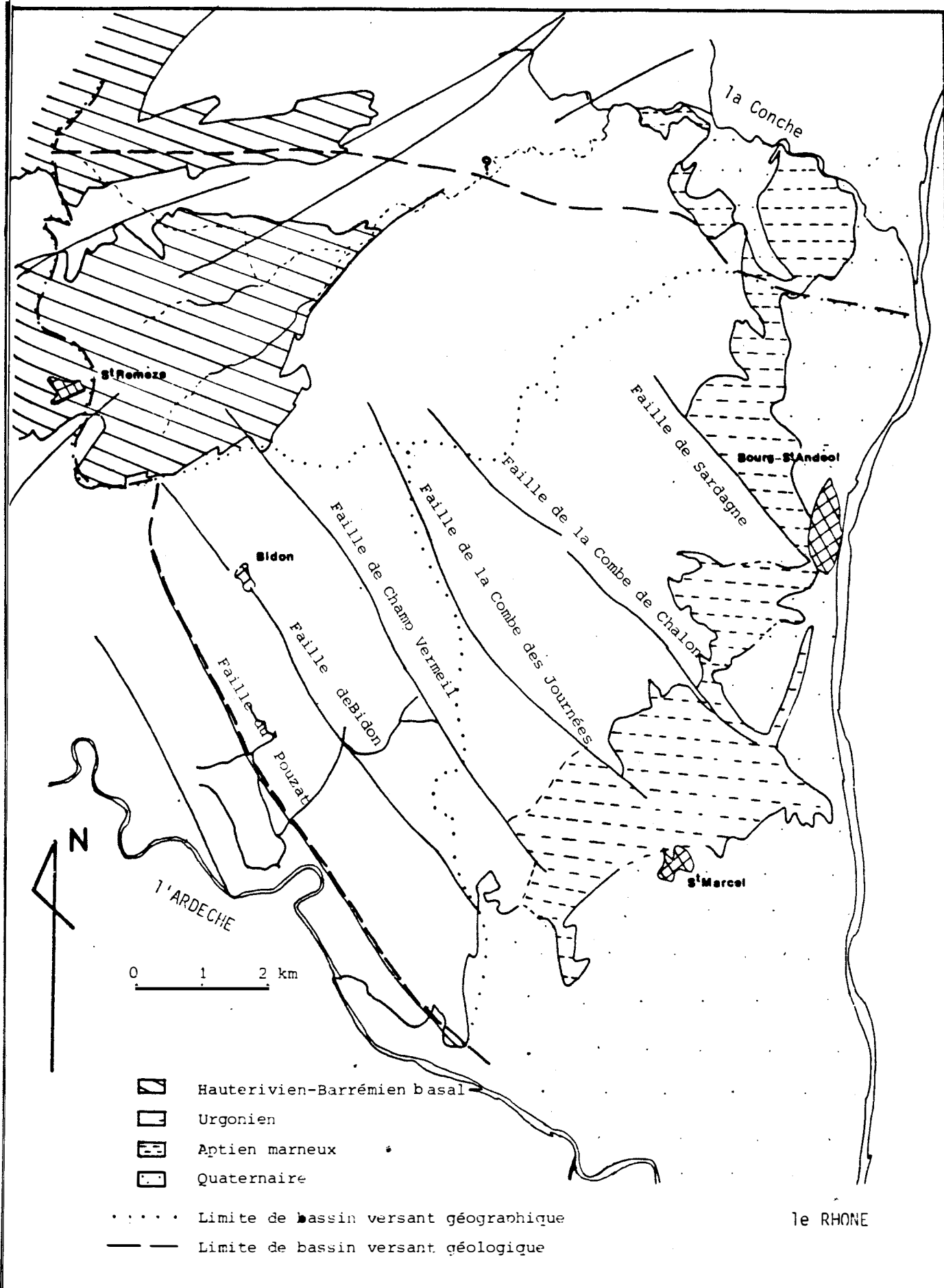


fig.62 : Tracé des limites des bassins versants géologiques de l'Ardèche et du Rhône.

les versants sud de l'anticlinal de Saint-Vincent et nord de l'anticlinal de Saint-Remèze) appartiennent au bassin versant du Rhône s.s. En l'absence de manipulations, il est plus difficile de juger les pertes situées plus à l'aval. Par mesure de prudence, nous n'intégrerons pas le bassin versant lié au cours aval du ruisseau de Rimouren au bassin versant du Rhône. Cette limite pourra d'autre part être fluctuante puisqu'en période de crue, le ruissellement superficiel du ruisseau de Rimouren aboutira en partie à la Conche. Il faut donc différencier une limite hautes eaux et basses eaux. Les eaux d'infiltration du Bois de Laoul, situé entre le ruisseau de Rimouren et le bassin versant du Rhône, s'orientent systématiquement vers ce dernier. Le bassin versant hydrogéologique du Rhône s'agrandit donc considérablement sur le versant géographique de la Conche, soit sur 38 km².

4 - 2. LIMITES HYDROGEOLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS DE L'ARDECHE ET DU RHONE s.s. (fig.62)

L'étude stratigraphique du secteur de Saint-Remèze, menée par D. LAFARGE (1978), montre que les accidents N 140 de la bordure orientale se prolongent à proximité des terrains hauteriviens. Si l'on admet leur rôle hydrogéologique de failles étanches, il convient de noter l'importance de la faille du Pouzat qui s'impose comme la limite entre les circulations souterraines s'orientant vers les gorges ou vers le Rhône. Ce découpage est renforcé par les directions de pendage qui pivotent au S-W de Saint-Remèze des directions S-E à l'Est à S-W à l'Ouest.

Une importante surface du bassin versant géographique de l'Ardèche, soit 23 km², est drainée en fait vers le bassin du Rhône.

4 - 3. CONSEQUENCES DE CETTE DELIMITATION

4 - 3.1. De fortes circulations non repérées

- Mis à part les sources de Tourne, seules quelques émergences mineures ont été répertoriées sur la bordure de la vallée du Rhône. D'importantes circulations au vu du bassin versant doivent toutefois parcourir cette partie du massif. Il faut donc envisager une alimentation des calcaires urgoniens vers les terrasses alluviales anciennes et actuelles du Rhône. La présence des terrains bédouliens et gargasiens qui comportent une composante marneuse ne semble pas constituer une limite infranchissable pour ces écoulements. Les failles N 140 peuvent d'ailleurs être à l'origine de ce changement d'aquifère. Les études menées sur les alluvions de la rive droite du Rhône dans le cadre des recherches pour l'alimentation en eau potable du SIVM de Bourg-Saint-Andéol sont restées jusqu'à maintenant infructueuses. Les seules réserves exploitables ont en effet présenté de fortes teneurs en manganèse (BUSNARDO, 1969). Au Sud, les alluvions du secteur de Saint-Marcel d'Ardèche et Saint-Just pourraient constituer des réservoirs mieux alimentés puisqu'aucune exurgence importante ne débouche en face des quatre unités hydrogéologiques déterminées par les failles allant de la faille du Pouzat à la faille de la combe de Châlon.

Ces circulations sont également susceptibles d'alimenter une zone noyée urgonienne, captive sous les dépôts marneux pliocènes. L'étude de la karstification a en effet montré que les calcaires urgoniens qui plongent sous les alluvions du Rhône ont été, au moins localement, le siège d'une karstification ancienne. Ces conditions

sont favorables à l'existence d'une zone noyée. L'exutoire d'une telle nappe pourrait se situer dans la plaine alluviale de Pierrelatte, au niveau de la remontée du substratum crétacé ou vers l'aval en direction de Mondragon. Seules, une étude géophysique puis des reconnaissances par forage permettraient de déterminer la géométrie de ces écoulements.

4 - 3.2. Le bassin d'alimentation des sources de Tourne

Les sources de Tourne sont situées à l'aval du bloc hydrogéologique délimité par les accidents de la combe de Châlon et de Sardagne et de la zone qui s'étend au N-E de cette faille jusqu'aux limites du bassin versant géographique. A l'amont, ce système draine la majeure partie du Bois de Laoul. En dehors des périodes de crue, il semble que les écoulements issus du drainage des terrains hauteriviens du versant N-E de la dépression de Saint-Remèze alimentent également ce réseau. Ces sources, qui constituent le plus grand réseau du massif des Gras (du point de vue des débits), possèdent un bassin d'alimentation estimé à près de 60 km².

4 - 3.3. Les systèmes actifs de la grotte de Saint-Marcel

Le vaste réseau de Saint-Marcel se trouve aujourd'hui recoupé par plusieurs accidents N 140. Le réseau fossile semble avoir été guidé dans son édification par de telles fractures : des réseaux entiers (réseaux 3 et 4) ou des parties homogènes de réseau sont limitées par elles. Au cours de l'enfoncement du système karstique qui s'est accompagné d'une adaptation du système actif aux changements de contrainte, ces accidents ont tendu à jouer un rôle de limites. Les différentes parties noyées reconnues sont donc indépendantes. Les galeries actives situées à l'Ouest de la faille du Pouzat sont limitées aux galeries inférieures du réseau 3. Ces dernières doivent être en relation avec les émergences des gorges et en particulier avec le réseau Déloly-Ecluse.

Le réseau noyé Solvay, à l'extrémité du réseau 1, appartient au bloc délimité par les failles du Pouzat et de Bidon. Il est en relation probable avec quelques siphons connus dans le réseau 2. Ces écoulements débouchent à l'aval dans le secteur de Saint-Just. Les galeries extrêmes du réseau 2 dont la reconnaissance s'arrête sur la faille de Champ-Vermeil constituent une nouvelle unité indépendante. Une campagne de colorations au sein de la cavité, menée par une équipe de spéléologues, pourrait vérifier le bien-fondé de cette argumentation.

5 - LE PROBLÈME MÉRIDIONAL : LIMITES DES BASSINS VERSANTS DE L'ARDÈCHE ET DE LA CÈZE

Les différentes expériences de traçage réalisées au voisinage de mégafractures N 50 (goule de Foussoubie, perte de Pissevieille) ont souligné le rôle de limite hydrogéologique de ces accidents. Ce comportement des écoulements sur le plateau confirme les observations effectuées au niveau des émergences des gorges. Deux accidents N 50 principaux affectent la rive droite de l'Ardèche la faille

de Vagnas-Pas du Mousse et la faille de Barjac (fig. 58 et 63). Elles limitent trois compartiments indépendants du point de vue des circulations souterraines. Les deux zones occidentales mettent en contact les calcaires urgoniens avec des formations détritiques du Crétacé supérieur et du Ludien sur lesquelles passent les lignes de partage des eaux. Ces limites seront conservées pour le tracé des limites de bassins versants géologiques. Les écoulements superficiels du Rieussec et de la Planche orientent en effet l'hydrogéologie du secteur vers les gorges de l'Ardèche. L'indépendance des circulations souterraines de part et d'autre de la mégafracture du Pas du Mousse ne concerne pas les écoulements superficiels. Le bassin d'alimentation de la Goule de Foussoubie provient largement du compartiment sud-oriental de cette faille. L'Event de Foussoubie situé au-delà de l'accident voit donc son bassin versant géologique s'étendre sur les deux compartiments.

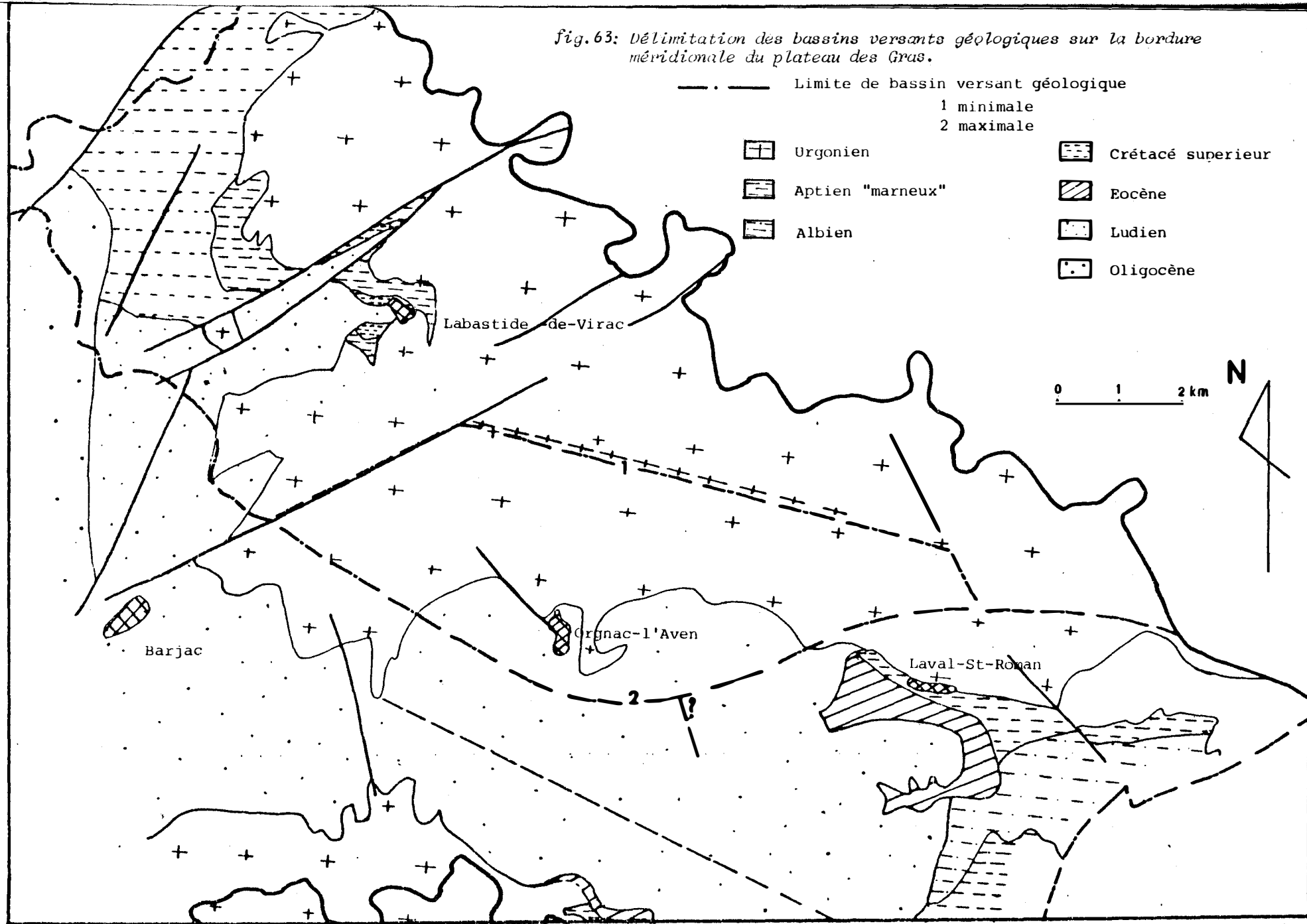
La limite méridionale du bassin versant des gorges semble particulièrement délicate à établir :

- au Sud-Est de la dernière mégafracture N 50 (faille de Barjac), peu de failles apparaissent de nature à contrôler les écoulements;
- des plis grossièrement N 110 : l'anticlinal du Bois de Ronze (N 105) et le synclinal d'Issirac-Barjac (N 115) reprennent les assises urgoniennes. La voute de l'anticlinal du Bois de Ronze laisse apparaître en surface la partie sommitale de la formation urgonienne. Il est donc difficile, devant les possibilités de karstification, d'affirmer que cette structure joue un rôle dans le partage des écoulements. Le rôle hydrogéologique du synclinal d'Issirac est également mal perçu. Les formations aptiennes et surtout éocènes constituent, là où elles sont présentes, une limite étanche entre les calcaires urgoniens et les calcaires ludiens.

Les calcaires ludiens ne comportent que peu d'exutoires connus au regard de leur superficie. Les eaux d'infiltration collectées par cette formation possèdent trois issues potentielles. Sur le versant nord du synclinal, de Barjac au Garn, les calcaires ludiens sont directement discordants sur la formation urgonienne. Une alimentation vers cette dernière et en direction des gorges de l'Ardèche est donc envisageable. La limite des bassins versants géologiques correspondrait alors à la limite nord des marnes éocènes. La méconnaissance stratigraphique de la formation ludienne ne permet pas de déceler l'axe de plongement du synclinal N 115. En première approximation, on admettra que les écoulements souterrains se partagent entre la plaine de Barjac et l'affluent de la Cèze : le ruisseau de Roméjac d'une part et d'autre part vers un exutoire oriental situé entre Rhône et Basse-Cèze.

J'établirai donc deux limites méridionales du bassin versant géologique des gorges de l'Ardèche. Une limite minorée passe par l'axe de l'anticlinal urgonien du Bois de Ronze. Une limite majorée recoupe la formation ludienne à l'aplomb de la limite nord des affleurements marneux éocènes. Cette limite extrême demeure imprécise mais située en deçà de l'axe du synclinal d'Issirac. Deux conséquences découlent de ce découpage. L'étendue de la zone hypothétique d'alimentation est importante, soit de l'ordre de 27 km². Cette incertitude va lourdement peser dans le bilan hydrogéologique des gorges de l'Ardèche. Cette zone ne comporte pas d'accès à la zone noyée. Un traçage de surface devrait donc, en fonction des expériences déjà réalisées, bénéficier d'un volume d'eau d'injection de plusieurs dizaines de mètres cubes. Il est intéressant d'autre part, de noter que le réseau d'Orgnac ainsi que la majorité des grands avens appartiennent à cette

fig.63: Délimitation des bassins versants géologiques sur la bordure méridionale du plateau des Gras.



zone intermédiaire. L'importance de la karstification fossile sur les gorges de l'Ardèche pourrait laisser supposer l'appartenance de ces grands réseaux à ce bassin lors d'épisodes antérieurs. La question reste posée en ce qui concerne les circulations actuelles.

6 - CONCLUSION : LA CARTE DES BASSINS VERSANTS GÉOLOGIQUES

La carte des expériences de traçage (fig. 54) illustre le rôle hydrogéologique des mégafractures. Une généralisation à l'ensemble du massif du comportement des écoulements par rapport à ces accidents a facilité l'établissement des limites de bassins versants géologiques.

Les circulations se partagent en trois bassins : l'Ardèche, la Cèze et le Rhône (fig. 65). Le but de ce travail était principalement de délimiter le bassin versant géologique des gorges de l'Ardèche. Cette tâche s'avère difficile aux extrémités des gorges. C'est pour cette raison que le sous-bassin versant de l'Ibie, qui s'étend largement au-delà de notre domaine d'étude, n'a pas été pris en considération. De la même manière, le sous-bassin versant du valat d'Aiguèze à l'aval et en rive droite des gorges n'a pas été intégré à cette unité. Ses limites sont, en effet, très mal définies en bordure du synclinal d'Issirac, son exutoire est d'autre part situé à l'aval de Saint-Martin d'Ardèche et de la station limnigraphique de Sauze. Le bassin versant géologique des gorges, ainsi délimité, occupe une surface de 126 à 153 km² selon la limite méridionale utilisée.

Le bassin versant géologique du Rhône gagne de fortes surfaces au-delà de ses lignes de crêtes, soit 32 km² sur le bassin de la Conche et 23 km² sur les gorges. Le bassin versant géologique des gorges s.s. déborde vraisemblablement en rive droite sur le bassin versant géographique de la Cèze. Des limites de sous-bassins versants ont également été ébauchées. Elles regroupent le plus souvent plusieurs émergences en une même unité. Peu d'émergences connaissent un vaste bassin d'alimentation, ce qui s'explique facilement devant la multiplicité des sources dans les gorges. Seul le réseau de Tourne, sur le bassin du Rhône, draine une surface de près de 60 km².

Le problème de la délimitation des bassins versants a donc largement été abordé. En l'absence de nouvelles découvertes spéléologiques, seules de grosses manipulations, mettant en jeu d'importants volumes d'eau apportés sur place, paraissent susceptibles de préciser ces limites.

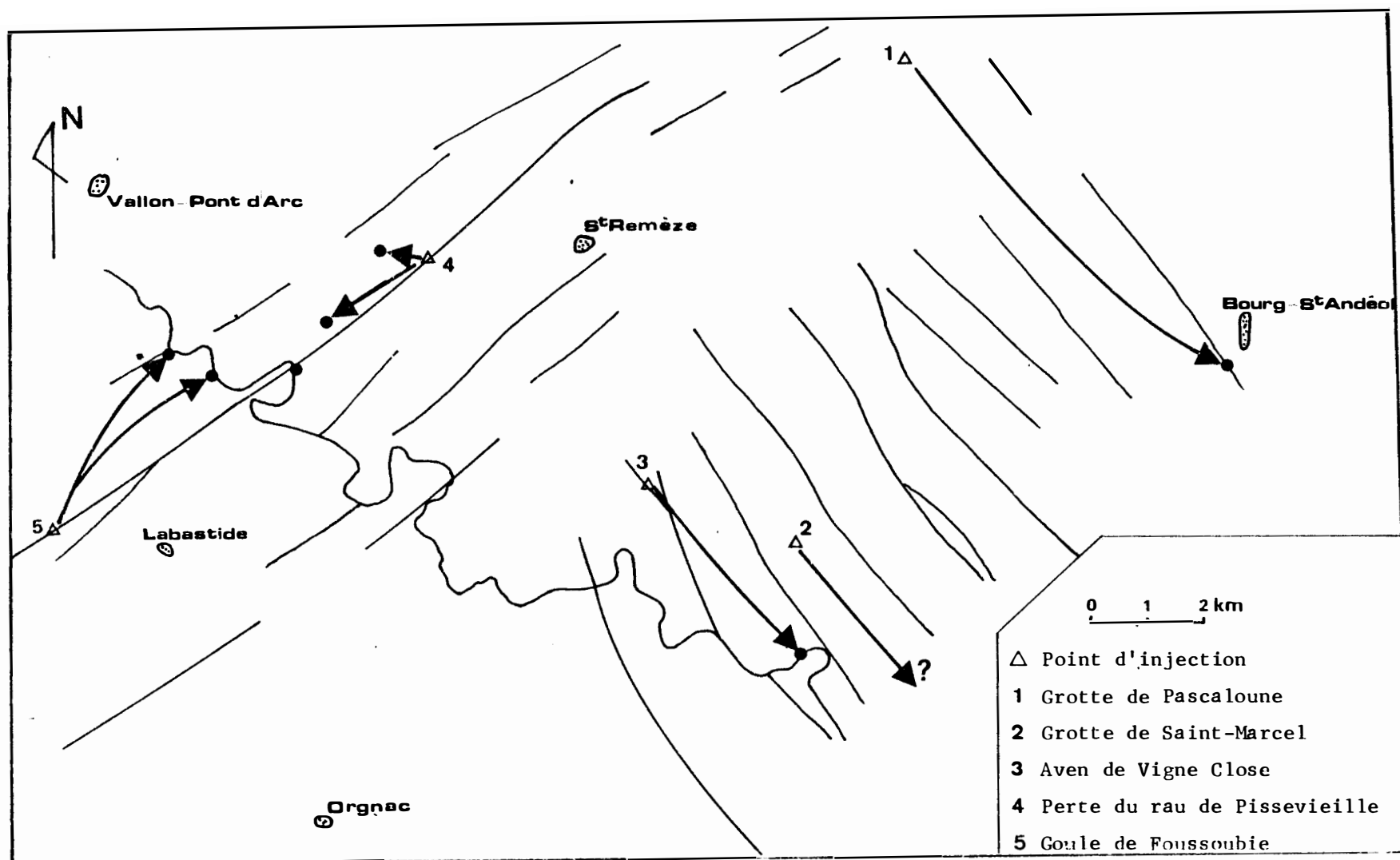


fig. 64: Carte des opérations de traçage

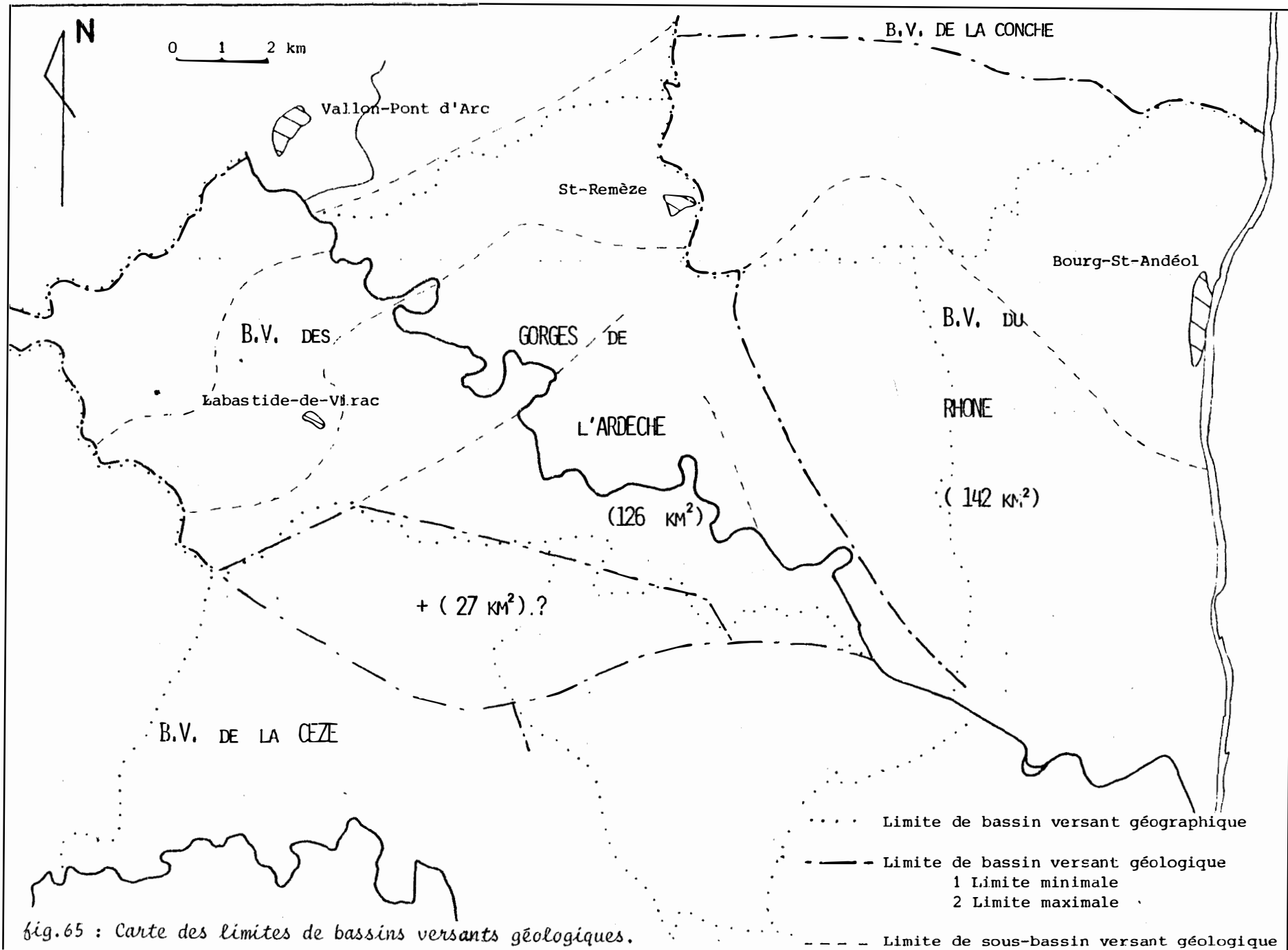


fig.65 : Carte des limites de bassins versants géologiques.

CHAPITRE V

ETUDE QUANTITATIVE DU KARST

- 1 - ÉTUDE HYDROCLIMATIQUE
- 2 - BILAN DES APPORTS DU KARST
- 3 - HYDROLOGIE DE L'ARDÈCHE
- 4 - LES JAUGEAGES DIFFÉRENTIELS À L'ÉTIAGE
- 5 - CONCLUSION

1 - ÉTUDE HYDROCLIMATIQUE

1 - 1. LE RESEAU METEOROLOGIQUE (fig. 66)

Les données de divers postes météorologiques de la Météorologie Nationale ont été consultées pour mener cette étude hydroclimatique. Seuls, les postes de Vallon-Pont d'Arc situé à 94 m d'altitude et de Bourg-Saint-Andéol (74 m) disposent à la fois d'un pluviomètre et d'un thermographe. Les autres postes ne sont équipés que d'un seul pluviomètre à relevé journalier. Il s'agit des stations de Saint-Montan (90 m), de Bessas (250 m) à l'extrémité SW du département de l'Ardèche et de Montclus (100 m) dans le Gard. Tous ces postes sont situés à la périphérie du massif des Gras à des altitudes faibles, mis à part la station de Bessas. En fonction de cette répartition, il a été installé à Saint-Remèze, soit à une altitude de 350 m, un pluviographe enregistreur à augets basculants. La personne à qui avait été confié le fonctionnement de cette station n'ayant effectué que des relevés épisodiques, cette dernière, ne conservera qu'une valeur indicative sur la répartition spatiale des précipitations.

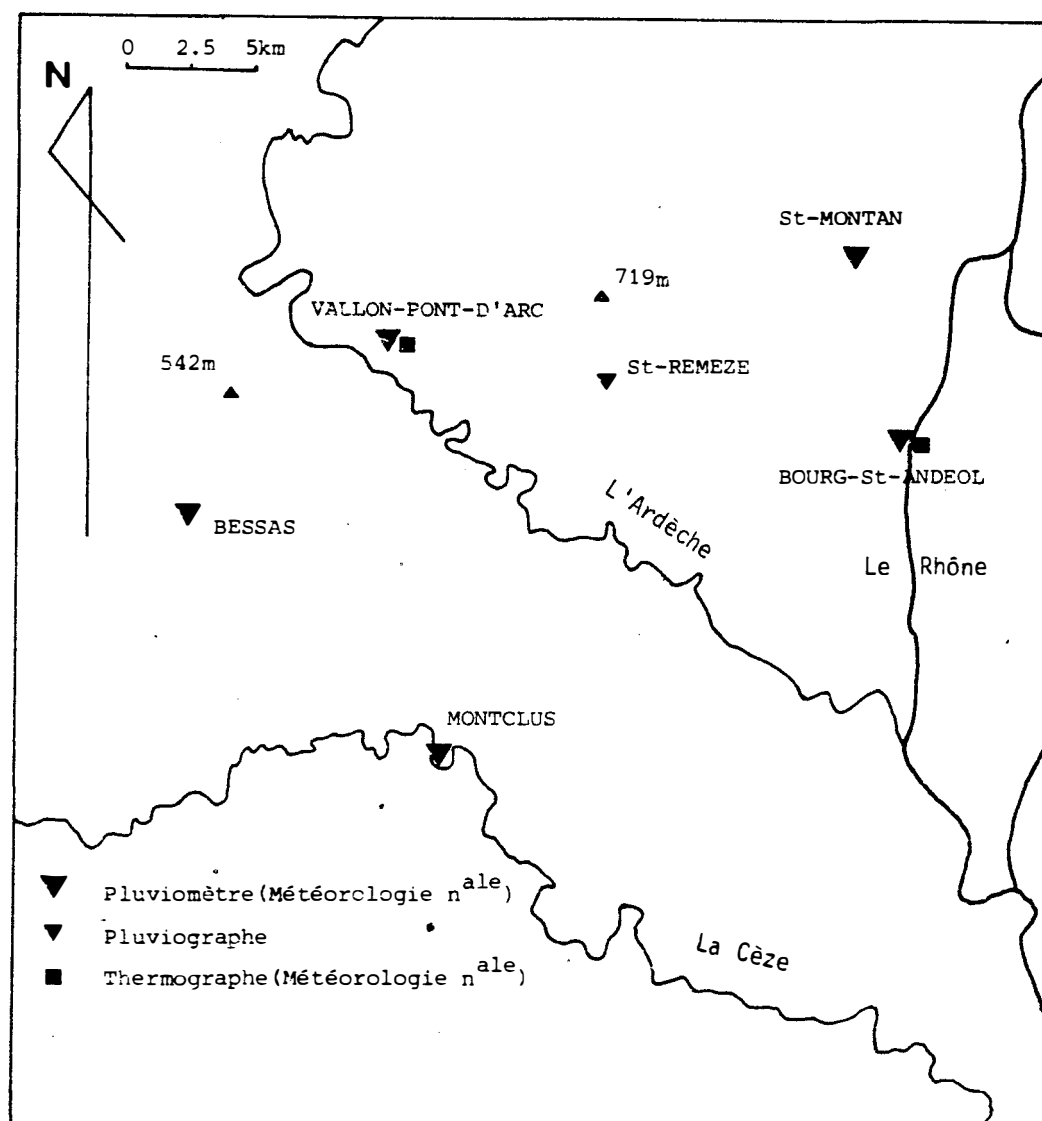


fig. 66: Localisation du réseau météorologique.

1 - 2. LES PRECIPITATIONS

L'analyse des séries pluviométriques disponibles sera suivie par une étude des données des années 1983 et 1984.

1 - 2.1. Les données antérieures à 1982

Les années d'observations s'étalent de 1951 à 1982 pour Vallon-Pont d'Arc et Bourg-Saint-Andéol et de 1961 à 1982 pour les autres postes.

1 - 2.1.1. Les données annuelles

a) Les histogrammes des précipitations annuelles

Les histogrammes des précipitations annuelles (fig. 67), établis sur 22 ou 32 années selon les stations, ne présentent pas de formes caractéristiques. Une dissymétrie est toutefois visible. La répartition des années extrêmes diffère selon que l'on considère les années pluvieuses ou sèches. 15 % des années pluvieuses recouvrent 4 à 5 classes de 100 mm à Bourg-Saint-Andéol, Vallon-Pont d'Arc et Saint-Montan. Une à deux classes représentent 15 % des années sèches. Les risques d'épisodes extrêmes de sécheresse semblent donc nuancés.

b) Caractéristiques des séries pluviométriques

Le tableau suivant fournit les moyennes $\bar{x}$ et écart-types σ des séries pluviométriques.

	$\bar{x}$ 51-82	σ 51-82	$\bar{x}$ 61-82	σ 61-82
VALLON-PONT D'ARC	968	231	953	224
BOURG-St-ANDEOL	865	193	848	205
BESSAS			927	209
St-MONTAN			869.5	196
MONTCLUS			926	202

tableau 3 : Moyennes et écart-types des données pluviométriques annuelles.

Ces valeurs montrent une décroissance d'Ouest en Est des totaux pluviométriques annuels. Environ 100 mm séparent les bordures orientale et occidentale du Plateau des Gras. Les écart-types sont relativement forts (entre le quart et le cinquième de la moyenne) et soulignent une variation interannuelle de la pluviométrie marquée.

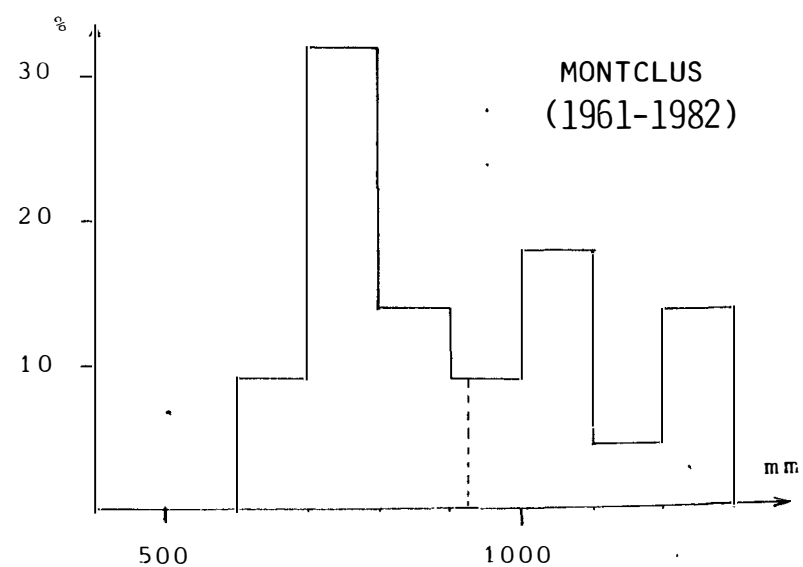
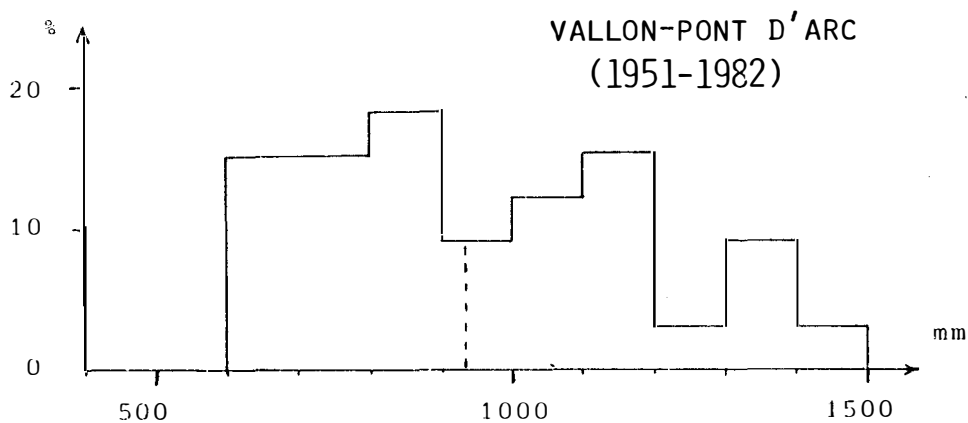
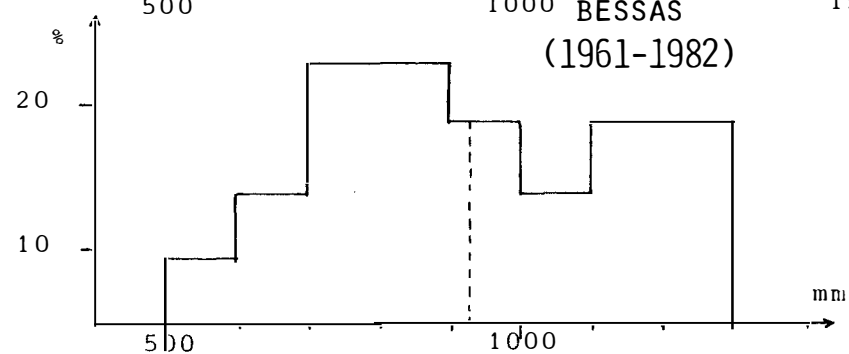
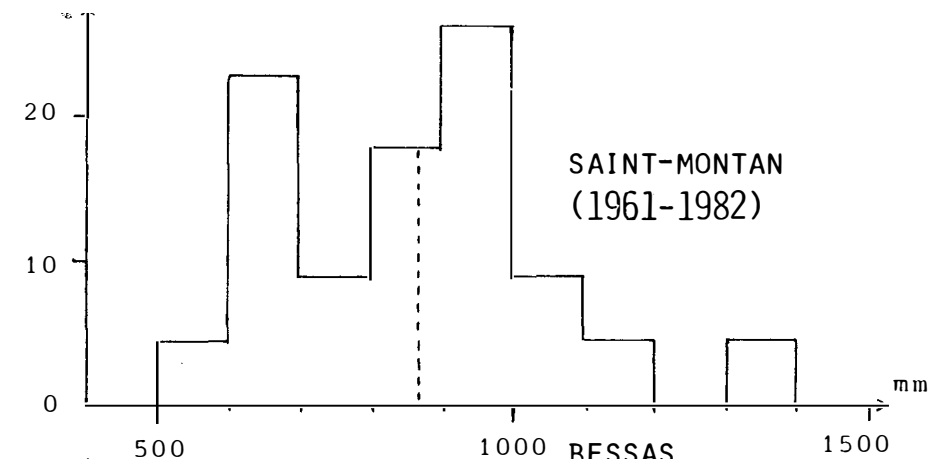
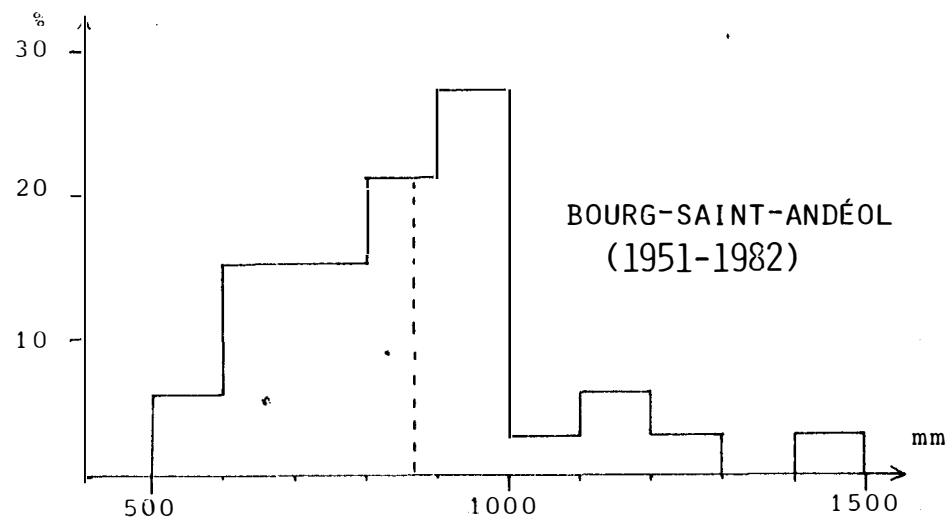


fig. 67 : Histogrammes de répartition des précipitations annuelles.

c) Ajustement à une loi de probabilité

Il est intéressant de contrôler si ces données annuelles peuvent s'ajuster à une loi de probabilité usuelle de type loi de Gauss, loi lognormale ou loi gamma incomplète. Le report des années classées sur papier de Gauss montre un alignement des points plus ou moins bon de Montclus à Vallon-Pont d'Arc. Ces différentes stations suivent donc sensiblement une loi normale $N(\bar{x}, \sigma)$. Pour un rapport $\frac{\bar{x}}{\sigma}$ voisin de 5, on peut noter une certaine convergence des trois lois précédemment citées (D. DUBAND, 1978). L'utilisation plus simple de la loi normale justifie son emploi.

Le tableau suivant va fournir les seuils de pluviométrie dépassés dans 10 % et 90 % des cas, soit :

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad \text{tel que } P(Z \leq z_1) = 10 \% \text{ et } P(Z \leq z_2) = 90 \%$$

	VALLON-PONT D'ARC	BOURG-St-ANDEOL	BESSAS	St-MONTAN	MONTCLUS
z_1	672	618	659	619	667
z_2	1264	1112	1195	1120	1185

tableau 4 : Seuils pluviométriques ayant une probabilité de 10% et 90% d'être atteints

Les remarques faites sur les histogrammes laissent supposer une légère majoration des seuils inférieurs et une minoration des valeurs supérieures par rapport à la réalité.

d) Le problème de l'homogénéité de la série de Vallon-Pont d'Arc

Le poste de Vallon-Pont d'Arc dispose de deux séries de mesures complémentaires à la suite du déplacement du lieu d'observation. La série Ozil recouvre la période 1950 à 1977, la série Coopérative 1972 à 1984. La période commune d'observation est trop réduite pour espérer utiliser une corrélation entre ces deux stations et établir une série unique. L'examen de cette période commune montre une similitude des valeurs pour des totaux annuels inférieurs à 1000 mm. Pour de fortes pluviométries annuelles, l'écart s'accroît de manière aléatoire. La série Ozil va être utilisée de 1950 à 1971 et la série Coopérative de 1972 à 1982. Deux méthodes vont permettre de tester l'homogénéité de cette série ainsi reconstituée. La station de Bourg-Saint-Andéol a été choisie comme station de référence.

La méthode des doubles cumuls

La station à tester (Vallon-Pont d'Arc) prend $n = 32$, valeurs X_i représentant le total annuel de l'année i . La station de référence Bourg-Saint-Andéol prend n valeurs Y_i . L'homogénéité de la série est vérifiée pour un bon alignement des points de coordonnées $x_i = \sum_{j=1}^i X_j$, $y_i = \sum_{j=1}^i Y_j$. Aucune anomalie n'est ainsi décelée dans la série. L'alignement semble même meilleur durant la période d'observation commune pour la nouvelle station. Cette méthode n'a toutefois qu'un pouvoir de résolution faible qui ne permet la mise en évidence que de fortes anomalies.

La méthode du cumul des résidus (P. BOIS)

La régression linéaire établie à partir des variables X et Y permet d'obtenir le résidu : $\varepsilon = X - r \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} (y_i - \bar{Y}) - \bar{X}$.

La variable S va représenter le cumul des résidus $S_j = \sum_{i=1}^j \varepsilon_i$

Les deux variables X et Y, suivant une loi sensiblement normale, la loi de probabilité de S_j suit une loi normale :

$$N(0, \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{j(n-j)}{n-1}}) \quad \text{avec} \quad \sigma_\varepsilon = \sigma_Y \sqrt{1-r^2}$$

Sur un diagramme cumul des résidus S_j en fonction de j, il est alors possible de construire une ellipse critique du cumul qui ne serait franchie par S_j que pour un seuil de probabilité inférieure à 1 % (fig. 68). Cette ellipse a pour coordonnées :

$$x = j, \quad y = \bar{S}_j \pm 2.34 \sigma_{S_j} \quad \text{soit} \quad y = \pm 2.34 \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{j(n-j)}{n-1}}$$

La courbe $S_j = f(j)$ permet de détecter une anomalie passagère dans la série ou une erreur systématique. L'homogénéité de la série est ici vérifiée.

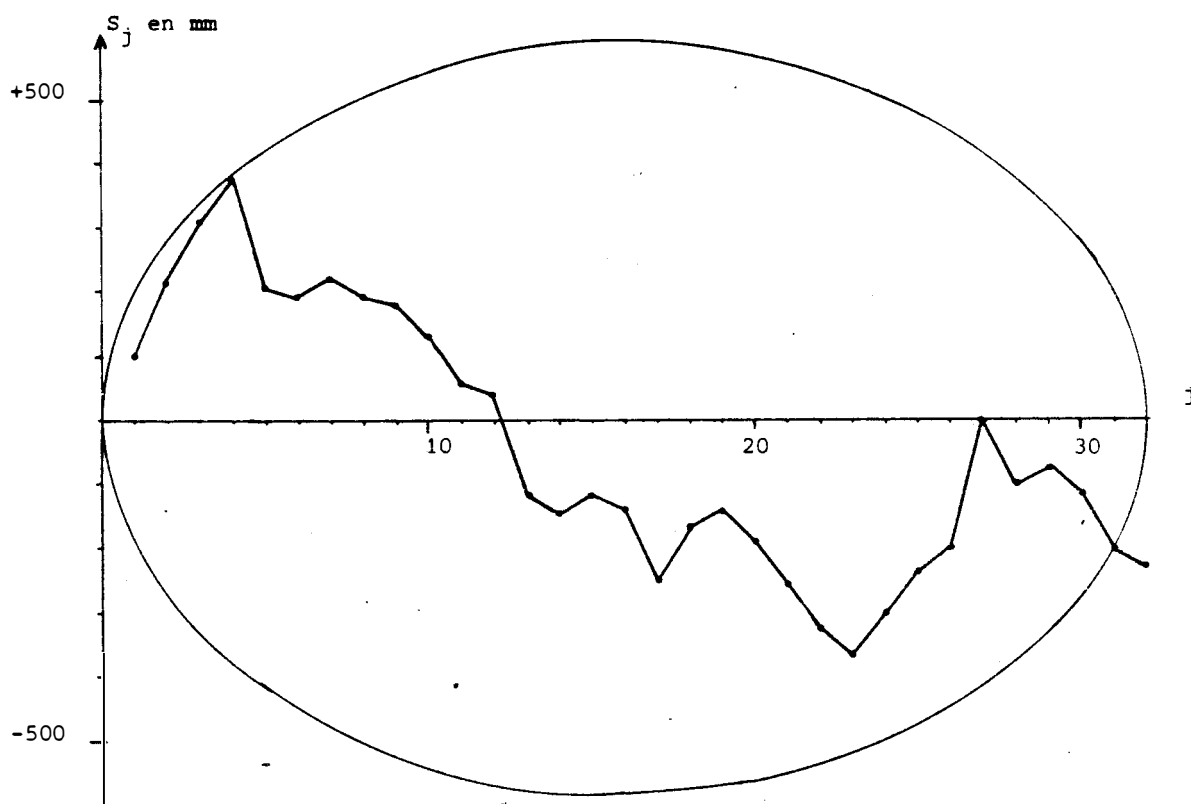


fig.68 : Vérification de l'homogénéité de la série pluviométrique de VALLON-PONT D'ARC par la méthode du cumul des résidus.

Toutes les données de la station de Vallon-Pont d'Arc utilisées dans ce chapitre prennent donc comme référence la station Coopérative à partir de 1972.

e) Corrélations inter-stations

Il ne s'agit pas comme précédemment de faire appel aux corrélations inter-stations pour reconstituer des séries incomplètes ou homogénéiser une série. L'intérêt principal est d'analyser si le plateau des Gras est un espace corrélable du point de vue des précipitations.

Le tableau suivant fournit pour les couples de stations: le coefficient de corrélation r et les paramètres de la droite de régression a et b :

	VALLON-BOURG (51-82)	St-MONTAN-BOURG (61-82)	BESSAS-VALLON (61-82)	MONTCLUS-BESSAS (61-82)
r	0.89	0.96	0.94	0.93
a	0.74	1.00	1.00	0.96
b	160	-23	24	36

tableau 5 : Paramètres des corrélations pluviométriques inter-stations.

Les stations sont très bien corrélées deux à deux. L'interpolation de valeurs entre deux stations paraît donc cohérente.

f) Isohyètes moyennes annuelles

Une carte des isohyètes moyennes annuelles a été dressée à partir des données communes de la période 1961-1982 (fig. 69).

Il a été tenu compte dans ce tracé: -des stations météorologiques n'appartenant pas à la zone d'étude;

- des tendances observées sur les données fragmentaires de St-Remèze en 1983 et 1984 : la pluviométrie est intermédiaire entre celle mesurée à Bourg-Saint-Andéol et Vallon-Pont d'Arc ;
- de l'influence probable des plus forts reliefs.

Cette carte permettra d'apprécier la lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin versant des gorges.

En s'appuyant sur des valeurs moyennes, elle n'offre par contre aucune valeur explicative au phénomène des précipitations.

1 - 2.1.2. Les données mensuelles

Des histogrammes de précipitations moyennes mensuelles ont été construits (fig. 70). Outre la moyenne mensuelle, ils comportent pour Vallon-Pont d'Arc et Bourg-Saint-Andéol les valeurs mensuelles de rang 3 et 30 sur une population de 32 années de mesure. Pour Bessas, Montclus et Saint-Montan, les valeurs mensuelles de rang 3 et 20 sur 22 années de mesure ont été retenues. Elles constituent des valeurs moins extrêmes que celles utilisées pour les deux premières stations.

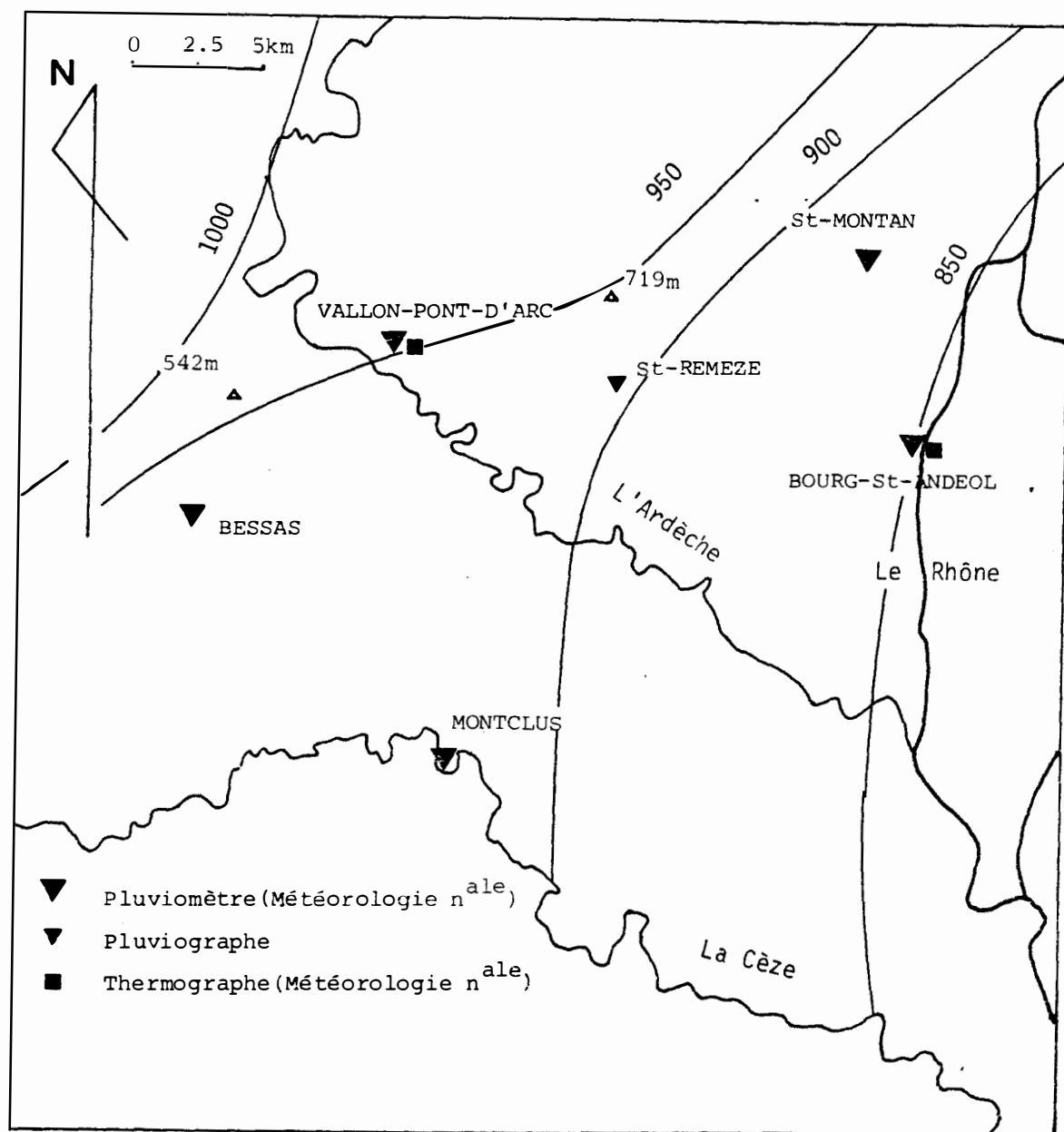


fig.69 : Carte des isohyètes moyennes annuelles (1961-1982).

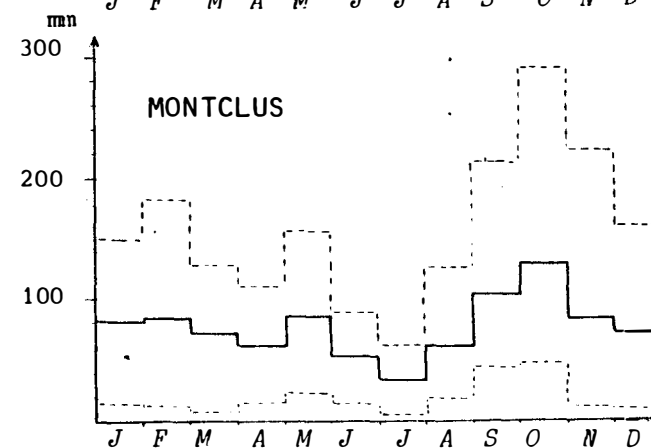
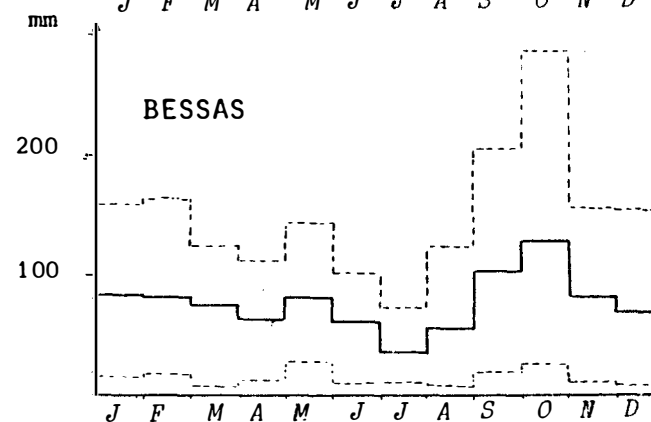
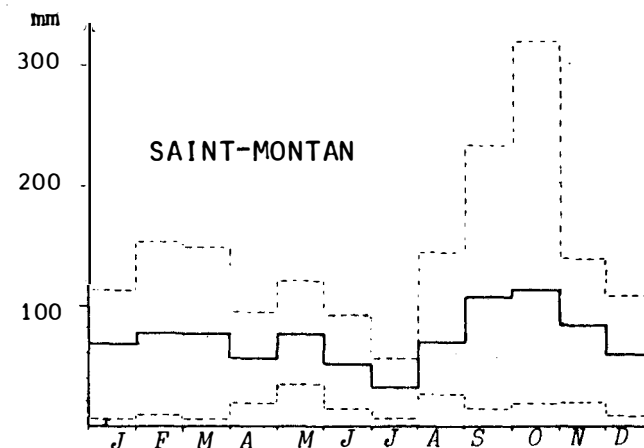
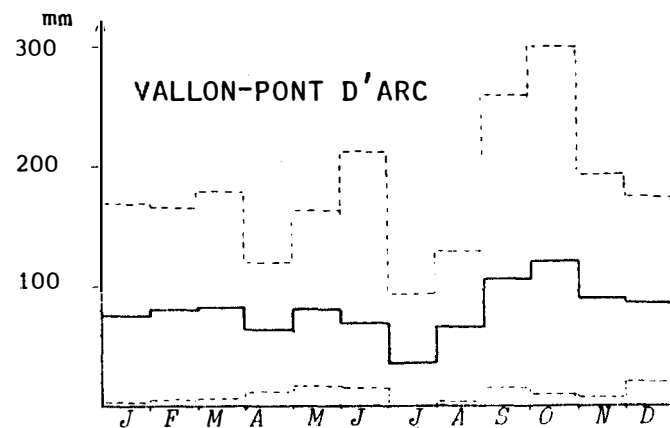
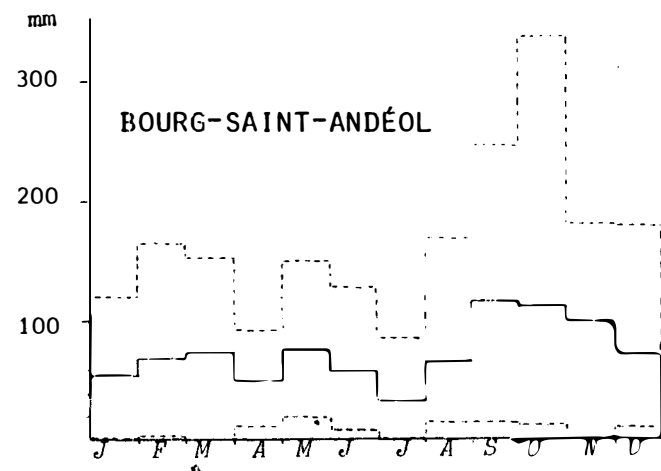


fig. 70 : Histogrammes des précipitations moyennes mensuelles.

- rang 3 et 30 sur 32 années pour Bourg-Saint-Andéol et Vallon-Pont d'Arc.
- rang 3 et 20 sur 22 années pour Saint-Montan, Bessas et Montclus.

Le choix de cet intervalle autour de la moyenne paraît plus représentatif des variations interannuelles que les données maximales et minimales.

Les mois d'automne (septembre, octobre, novembre) constituent un maximum principal, soit 33 % du total annuel moyen à Vallon-Pont d'Arc et 38 % à Bourg-Saint-Andéol. L'été (particulièrement juillet) et le mois d'avril appartiennent aux périodes les plus sèches.

Le caractère le plus marquant de ces données mensuelles est leur très grande variabilité interannuelle. Elle est illustrée par le coefficient de variation $C = \frac{\sigma}{\bar{x}}$ qui varie de 65 à 95 % à Vallon-Pont d'Arc :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{x}$ mm	74.8	80.0	82.4	63.5	82.8	70.0	37.3	66.3	105.7	121.1	90.9	84.6
σ mm	58	66	54	43	56	66	33	46.5	83	103	66	62
C %	77	82	65	67	67	95	89	70	79	85	73	73
$\bar{x}$ mm	54.4	67.8	73.6	50.3	76.1	58.3	34.8	66.8	115.4	112.9	99.4	72
σ mm	39.5	58	49	33	47	42	29	57	91	97	89	52.5
C %	73	86	67	65	62	72	84	85	79	86	90	73

tableau 6 : Moyennes, écart-types et coefficients de variation des pluviométries mensuelles.

1 - 2.2. Les données de 1983 et 1984

L'analyse de ces données va être effectuée pour différents pas de temps.

1 - 2.2.1. Les données annuelles

	VALLON-P.D'A.	BOURG-St-A.	St-MONTAN	MONTCLUS	BESSAS
1983	784.7	693.3	741.5	844.7	814.3
1984	1153.1	989.8	932.7	1019.6	1076.2

tableau 7 : Pluviométrie annuelle en 1983 et 1984.

Il est intéressant de replacer ces années au sein des séries pluviométriques. On peut ainsi donner le rang de l'année : pour Vallon-Pont d'Arc, 1983 prend le 6ème rang sur 34 années, 1984 le 28ème rang.

Pour les stations qui suivent une loi de probabilité normale, il est possible d'estimer la probabilité qu'un total soit inférieur au total mesuré : $P(Z \leq z)$ où Z est la variable centrée réduite $\frac{X - \bar{X}}{\sigma}$.

	VALLON-P.D'A.	BOURG-St-A.	St-MONTAN	MONTCLUS	BESSAS
1983	21,5%	18%	25%	34%	30%
1984	79%	74%	68%	68%	76%

tableau 8 : Probabilité de non dépassement du total pluviométrique de 1983 et 1984.

1983 s'avère donc l'année quinquennale sèche pour Bourg-Saint-Andéol et Vallon-Pont d'Arc et une année relativement sèche pour les autres stations. 1984 est au moins l'année quadriennale humide pour Vallon-Pont d'Arc, Bourg-Saint-Andéol et Saint-Montan et l'année triennale humide pour Montclus et Bessas.

Les relevés discontinus recueillis au pluviographe de Saint-Remèze montrent une pluviométrie relativement faible, se rapprochant davantage des stations de la bordure de la vallée du Rhône que des stations occidentales et ce, en dépit d'une altitude très supérieure. Deux cartes isohyètes ont été établies pour ces deux périodes (fig.71). Elles présentent une répartition spatiale des précipitations différentes bien que le gradient est-ouest soit conservé.

1 - 2.2.2. Les données mensuelles

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
VALLON-PONT D'ARC	0	90.3	48.9	118.6	69.2	48.9	0	114.8	28.0	172.4	14.8	78.8
BOURG-St-ANDEOL	0	66.2	62.0	56.7	69.9	69.0	0	86.5	38.4	182.3	8.2	54.1
BESSAS	0.1	118.9	40.4	109.7	78.4	40.9	0	140.1	41.4	159.3	15.8	69.3
SAINT-MONTAN	0	91.7	82.3	49.4	73.8	69.6	0	75.3	93.9	207.9	5.6	46.0
MONTCLUS	0	109.3	52.4	81.4	51.5	108.6	0	63.5	40.5	241.8	41.5	80.2
VALLON-PONT D'ARC	73.4	50.5	75.6	6.9	234.2	123.2	10.3	84.1	63.9	131.3	198.2	101.4
BOURG-St-ANDEOL	92.1	48.7	81.0	9.3	130.9	67.0	3.0	84.7	46.0	143.7	195.9	87.5
BESSAS	63.3	39.7	88.4	2.9	212.9	74.2	13.4	91.0	55.4	113.8	227.2	94.0
SAINT-MONTAN	73.4	72.2	72.1	5.7	143.2	64.6	2.4	116.0	39.7	116.6	150.9	76.2
MONTCLUS	79.8	48.0	78.6	4.0	180.3	69.5	12.0	103.4	51.5	116.6	194.3	88.0

tableau 9 : Pluviométrie mensuelle en 1983 et 1984.

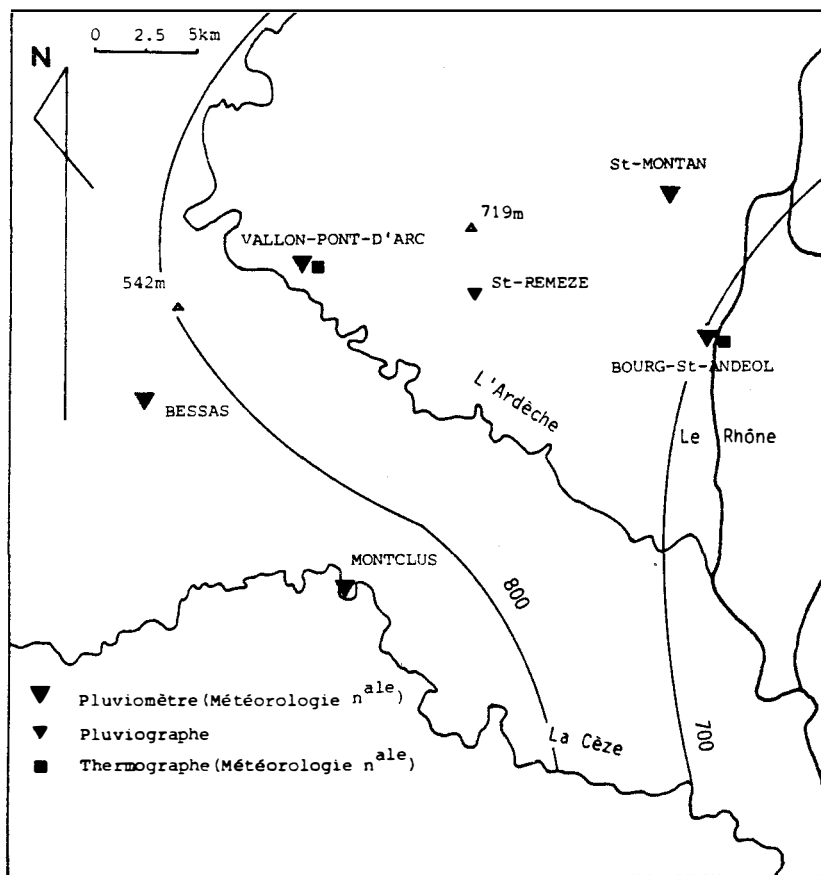


fig.71a: Carte des isohyètes annuelles de l'année 1983.

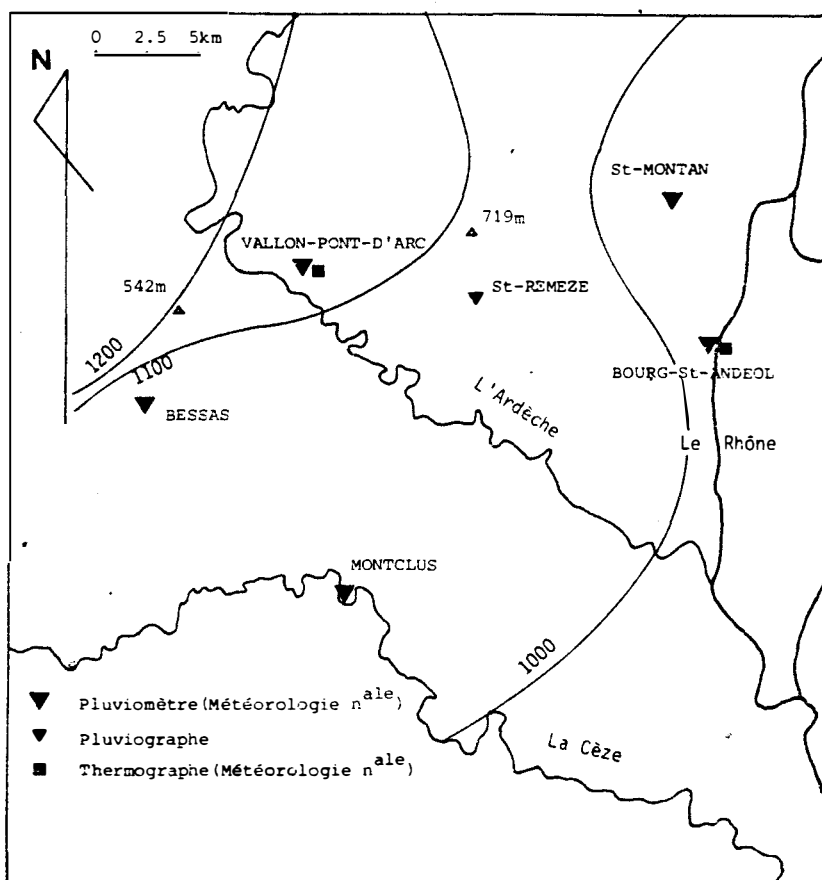


fig.71b: Carte des isohyètes annuelles pour l'année 1984.

La principale remarque sur l'analyse des histogrammes mensuels de précipitation (fig. 72) est la répartition du caractère excédentaire ou déficitaire de l'année sur l'ensemble de l'année. Ainsi, en 1983, la quasi-absence de précipitations a été observée en janvier, juillet et novembre. Les effets d'une telle sécheresse sont sans comparaison avec ceux d'une période où l'absence de précipitations est continue. De même en 1984, deux pôles de précipitations principaux se dégagent en mai et à l'automne. La station de Vallon-Pont d'Arc présente d'autre part des écarts avec les moyennes mensuelles plus marqués que les autres stations.

1 - 2.2.3. Données journalières

a) Nombre de jours de précipitations

	BESSAS	VALLON P.A.	St-MONTAN	BOURG-St-A.
1984	104	99	83	79
1983	78	74	65	46

tableau 10 : Nombre de jours de précipitation en 1983 et 1984

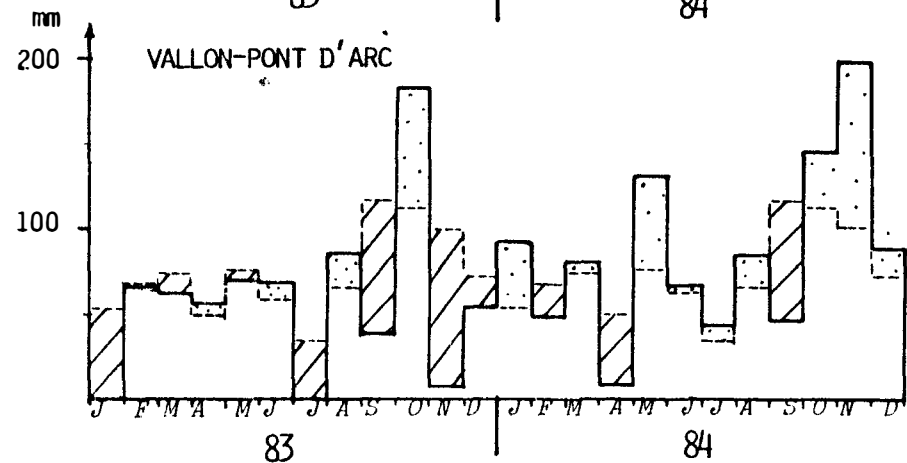
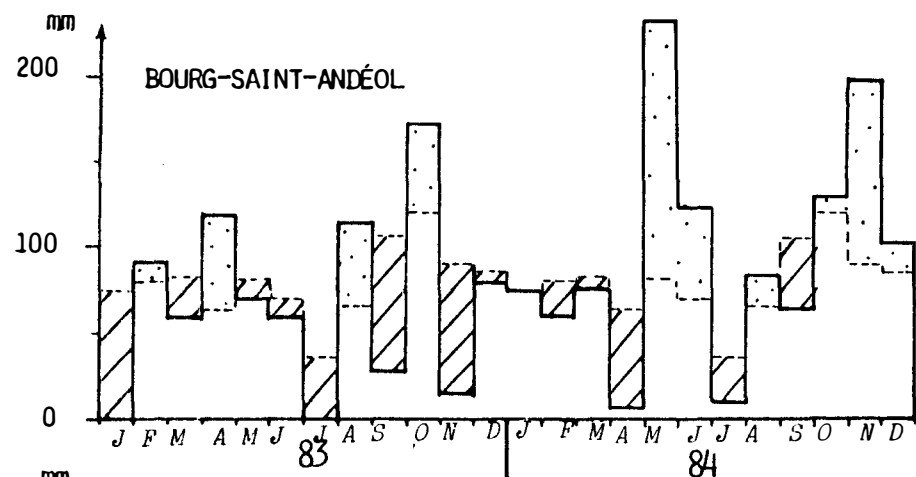
Ce tableau souligne la baisse du nombre de jours de précipitations de l'Ouest vers l'Est. Ces différences s'atténuent quand les seules pluies supérieures à 10 mm sont prises en compte.

b) Hauteur maximale de précipitations en 24 H

La violence des précipitations de la bordure cévenole apparaît comme une curiosité météorologique qui intéresse également le plateau des Gras. Ces maxima s'étalent sur l'année mais les mois de mai et d'août à novembre y sont particulièrement favorables. Le tableau suivant fournit les plus fortes précipitations journalières enregistrées en 1983 et 1984 ainsi que celles des événements exceptionnels de l'automne 1982.

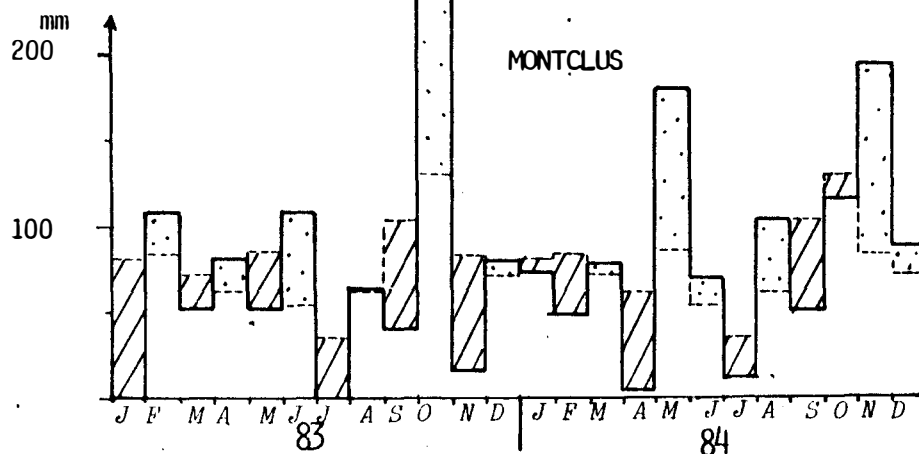
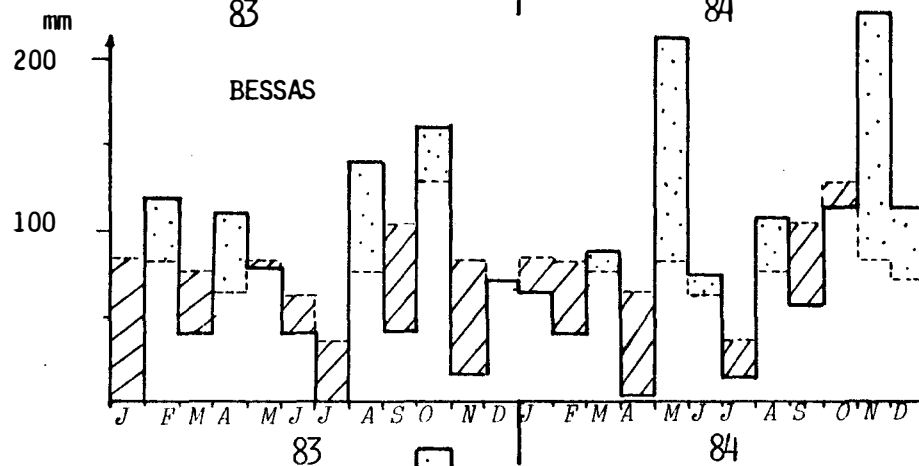
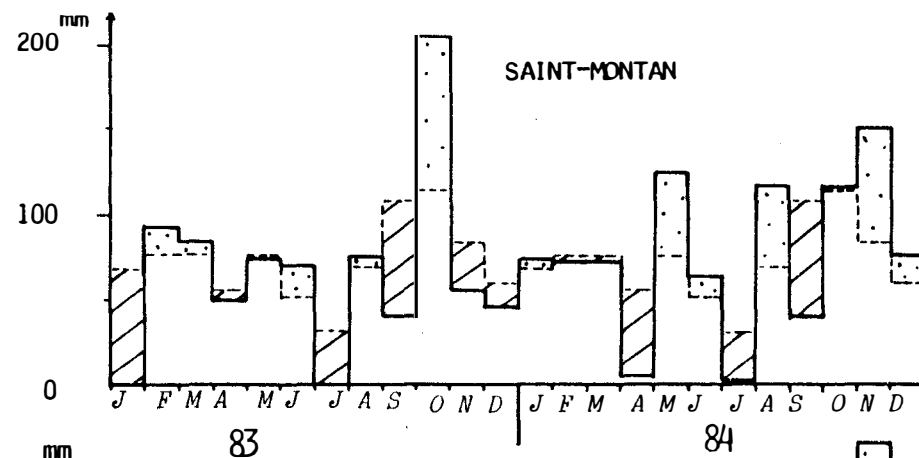
	BESSAS	VALLON-P.A.	St-MONTAN	BOURG-St-A.
23/08/84	69.1	74.0	149.2	77.3
14/10/83	66.5	90.0	108.0	92.3
20/09/82	149.2	261.0	33.3	13.0
26/11/82	86.7	90.5	141.0	110.5

tableau 11 : Hauteurs des précipitations maximales en 24 heures de 1982 à 1984.



Mois déficitaire
 Mois excédentaire

fig. 72 : Histogrammes des précipitations mensuelles en 1983 et 1984.



Les deux épisodes les plus violents en 1983 et 1984 présentent un gradient descendant du NE au SW. A ce titre de comparaison, l'important épisode pluviométrique du 5 septembre 1982, centré sur Vallon-Pont d'Arc, a été signalé. Les précipitations sont très normales en bordure du Rhône, alors que 261 mm tombent à l'épicentre de la dépression.

1 - 3. LES TEMPERATURES

Deux seuls postes météorologiques enregistrent les températures: Bourg-Saint-Andéol qui dispose d'une série de données allant de 1963 à 1984 et Vallon-Pont d'Arc aux données plus réduites allant de 1973 à 1984.

1 - 3.1. Les données antérieures à 1982

Le tableau suivant dégage les caractéristiques des séries de température pour les années de mesure existantes. t est la moyenne annuelle des températures établie à partir de la moyenne de la demi-somme des températures minimales et maximales quotidiennes, t_{min} la moyenne des températures minimales et t_{max} celle des températures maximales.

	T	Tmin	Tmax
BOURG-SAINT-ANDEOL (1963-1982)	13.5	8.4	18.5
VALLON-PONT D'ARC (1972-1982)	12.4	6.8	18.1

tableau 12 : Températures moyennes annuelles.

Ces différences de moyennes illustrent un phénomène plus régional qui voit l'augmentation de la température du NW au SE. L'étude des données mensuelles (fig. 73) consignées dans le tableau suivant affine cette analyse.

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BOURG-St-A.	T	3.1	6.7	9.2	12.5	16.5	20.3	23.0	22.1	18.8	14.1	8.7	5.1
	Tmin	1.5	2.7	4.2	7.0	10.5	14.2	16.5	15.7	13.1	9.4	4.7	1.8
	Tmax	8.6	10.7	14.1	18.0	22.6	26.3	29.5	28.5	24.5	18.9	12.7	8.4
VALLON P.A.	T	4.5	5.8	8.4	10.8	14.8	18.9	22.5	21.2	17.9	12.3	7.8	5.0
	Tmin	0.5	1.2	3.0	5.0	8.4	12.1	14.3	13.8	11.4	6.9	3.3	1.1
	Tmax	8.5	10.4	13.9	16.5	21.2	25.6	28.8	28.4	24.4	17.8	12.3	8.9

tableau 13 : Températures moyennes mensuelles.

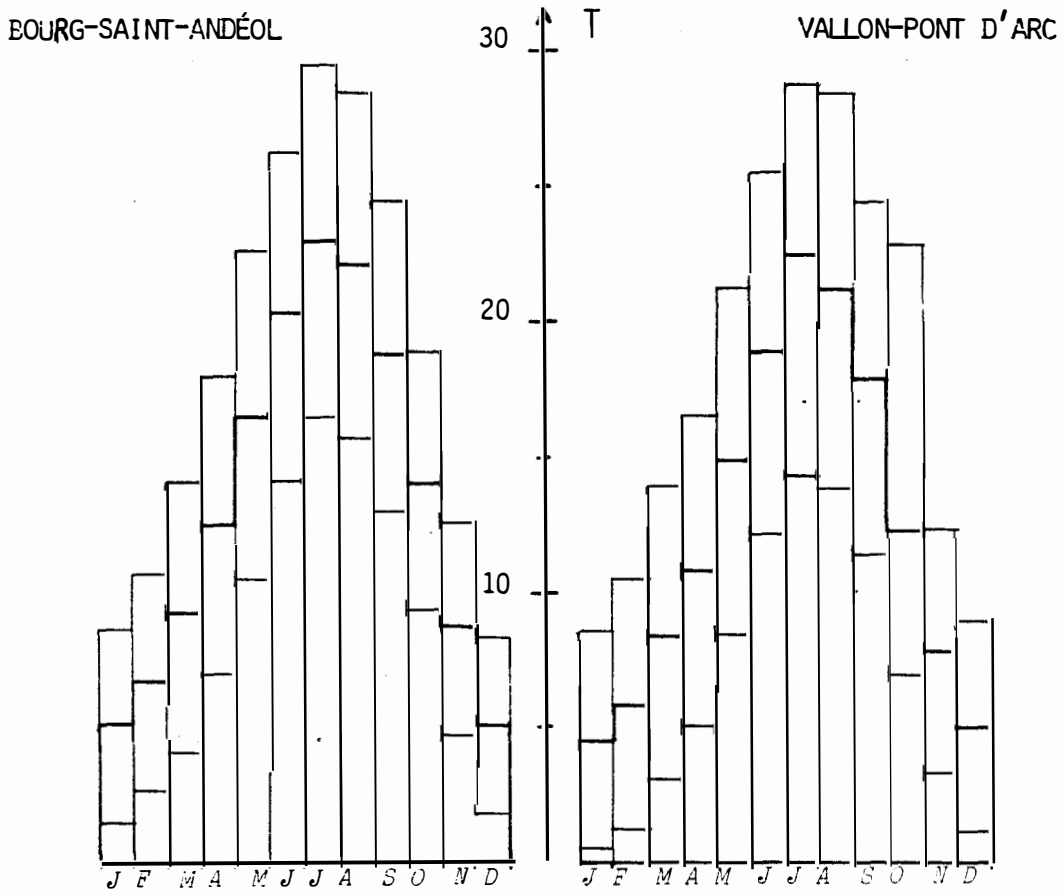


fig.73 : Histogrammes des températures mensuelles moyennes, minimales et maximales.

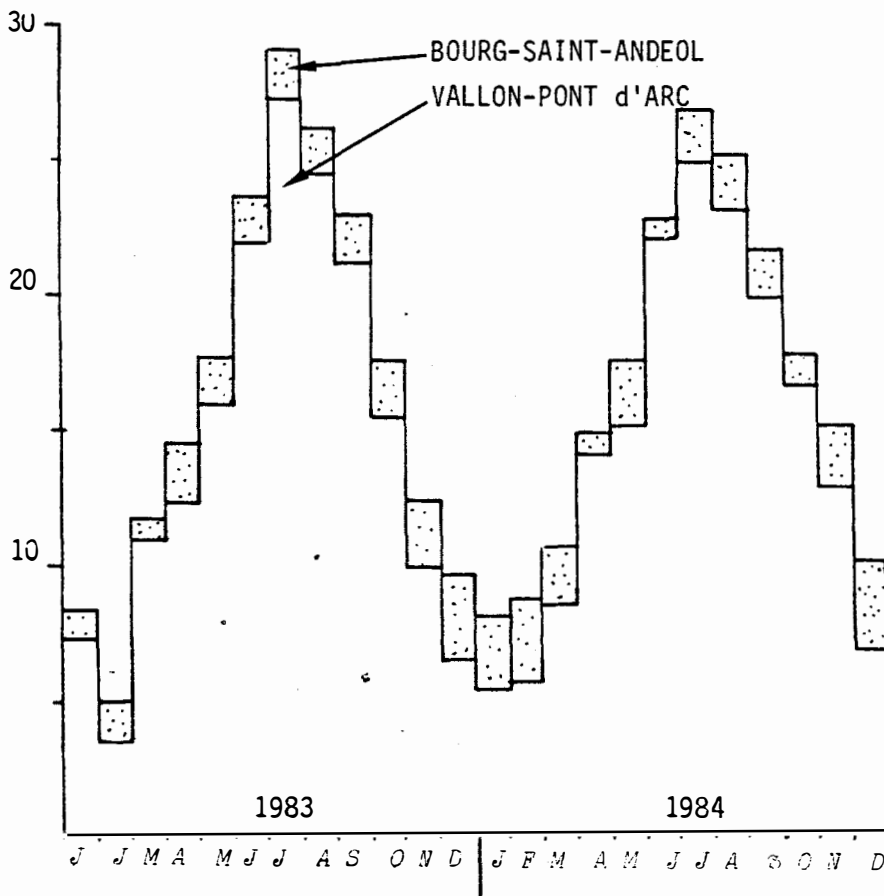


fig.74 : Histogrammes des températures moyennes mensuelles en 1983 et 1984.

Il apparaît que l'écart entre les deux stations est minime (inférieur à 1°) lors des périodes de températures extrêmes : été et hiver. C'est durant la demi-saison (avril, mai, juin, octobre) que ces écarts sont les plus conséquents et voisins de 1°5. Ils sont surtout dus aux grandes différences entre les températures minimales qui soulignent la plus grande douceur du climat de Bourg-Saint-Andéol.

1 - 3.2. Les années 1983 et 1984 (fig. 74)

Ces deux années prennent une place exceptionnelle dans les données thermométriques. Elles font suite à l'année 1982 qui constitue l'année la plus chaude pour la région d'après les séries existantes. L'année 1983 est également une année très chaude pour la région, particulièrement durant les mois de juillet et août.

Ce caractère est encore plus affirmé pour Bourg-Saint-Andéol où l'on enregistre la moyenne annuelle maximale. 1984 qui semble une année relativement normale pour les postes limitrophes, voit encore de fortes anomalies positives sur ces deux stations. Le tableau suivant résume ces données :

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
BOURG-St-A.	1983	8.4	5.0	11.7	14.5	17.7	23.6	29.0	26.1	22.9	17.5	12.4	9.6	16.6
	1984	8.1	8.7	10.6	14.8	16.5	22.7	26.7	25.1	21.6	17.7	15.1	10.1	16.5
VALLON P.A.	1983	7.3	3.5	10.9	12.3	15.9	21.9	27.2	24.4	21.1	15.4	9.9	6.5	14.8
	1984	5.4	5.7	8.5	14.0	15.1	22.0	24.8	23.0	19.8	16.5	12.8	6.8	14.6

tableau 14 : Températures moyennes mensuelles en 1983 et 1984.

S'il faut bien admettre l'existence d'écarts chauds par rapport aux normales pour le plateau des Gras durant ces deux dernières années, il apparaît que les moyennes de Bourg-Saint-Andéol sont spécialement fortes. Un changement de l'abri météo durant l'année 1982 a pu accentuer le phénomène d'augmentation de la température.

1 - 4. L'EVAPOTRANSPIRATION

1 - 4.1. Rappels théoriques

L'évapotranspiration est l'un des termes fondamentaux du bilan hydrologique. Elle correspond aux pertes d'eau sous forme de vapeur d'eau, par évaporation des eaux de surface et du sous-sol et par transpiration des végétaux. Deux types de méthode permettent d'accéder au calcul de l'évapotranspiration réelle : ETR.

1. Des formules empiriques (de TURC, COUTAGNE, ...), établies sur de nombreux bassins versants, tentent d'évaluer le déficit d'écoulement annuel, assimilable à l'ETR annuelle en l'absence de variations des réserves. Pour de longues chroniques de données, ces variations s'annulent et tendent vers zéro. Ces formules s'énoncent ainsi :

. Formule de TURC :
$$ETR_{mm} = \frac{P}{0,9 + P^2/L^2}$$

avec $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$, où P est la pluviométrie annuelle en mm et T la température moyenne annuelle.

. Formule de COUTAGNE : $D = P - \lambda p^2$ avec $\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T}$ où

D le déficit d'écoulement s'exprime en fonction de P la pluviométrie annuelle en mm et T la température annuelle moyenne. Cette formule doit répondre à l'inégalité $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$

2. Le calcul de l'ETR peut s'obtenir à partir du calcul intermédiaire de l'évapotranspiration potentielle : ETP, qui correspond à l'évapotranspiration pour un sol toujours saturé. Celle-ci peut être obtenue par la formule empirique de THORNTHWAITE qui raisonne sur un pas de temps mensuel.

$$ETP(mm) = 16 \left(10 \frac{t}{T} \right)^a \times K$$

avec $I = \sum_{i=1}^{12} i$; $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$; $a = f(I)$.

où t est la température moyenne mensuelle et K un facteur correctif fonction de la durée d'ensoleillement, c'est à dire du mois considéré et de la latitude du lieu.

La méthode du bilan de THORNTHWAITE permet d'accéder à la valeur de l'ETR. La saturation du sol est estimée atteinte pour une réserve de 100 mm. Un bilan mensuel effectué entre les précipitations, l'ETP et la réserve du sol fournit la valeur mensuelle de l'ETR.

1 - 4.2. Résultats obtenus

1 - 4.2.1. Les années 1982, 1983, 1984

Le tableau suivant regroupe les valeurs de l'ETR calculées à Vallon-Pont d'Arc et Bourg-Saint-Andéol selon les méthodes de TURC, COUTAGNE et THORNTHWAITE.

Les trois méthodes donnent des résultats homogènes pour chacune des stations, ce qui semble prouver la validité de leur emploi. L'écart entre les valeurs reste en deça de 10 %. Une valeur moyenne sera utilisée dans les développements ultérieurs.

		PRECIPITATIONS	ETR		
			TURC	COUTAGNE	THORNTHWAITE
VALLON P.A.	1984	1153	680	686	698
	1983	785	587	570	565
	1982	1137	685	689	622
BOURG-St-A.	1984	990	697	675	637
	1983	693	578	539	585
	1982	974	650	646	645

tableau 15 : Valeurs annuelles de l'évapotranspiration réelle .

La concentration des précipitations sur un nombre réduit de jours dans l'année, rend plus crédible l'utilisation d'une méthode à pas de temps mensuel de type Thornthwaite. Le problème de la détermination de la réserve nécessaire à la saturation du sol qui a été ici estimée à 100 mm, reste posé. Il constitue actuellement et particulièrement en terrain karstique une limite de la méthode. Les valeurs obtenues correspondant aux trois années les plus chaudes des deux dernières décennies, ne sont pas représentatives d'une année moyenne dont les caractéristiques vont être maintenant étudiées.

1 - 4.2.2. L'ETR interannuelle moyenne

La formule de TURC qui a essentiellement une valeur statistique et qui doit être utilisée sur une longue série de mesures, va être employée pour estimer l'ETR moyenne.

A Vallon-Pont d'Arc pour la période 1972-1982 : ETR moyenne = 576 mm
(σ = 62 mm).

A Bourg-Saint-Andéol pour la période 1963-1982 : ETR moyenne = 576 mm
(σ = 57 mm).

Malgré une pluviométrie et des températures différentes, ces deux stations connaissent une ETR moyenne semblable. Les influences de ces deux facteurs s'annulent. La valeur obtenue sera donc utilisée sur l'ensemble du massif.

1 - 4.2.3. Critiques des résultats

Si l'emploi de ces méthodes paraît cohérent au niveau des stations étudiées, l'extension des valeurs de l'ETR à l'ensemble du massif appelle plusieurs remarques :

- Le massif des Gras ne comporte que peu ou pas de sol sur la quasi-totalité de son étendue. La roche est soit à nu au niveau des zones lapiazées, soit recouverte d'un sol réduit sur lequel s'installe une végétation arbustive. Ces conditions sont très éloignées de celles obtenues dans les cases lysimétriques, au sol épais recouvert de gazon. Les méthodes tirées de l'étude sur lysimètre sont donc difficilement transportables à l'échelle d'un massif karstique. En ce qui concerne la méthode de THORNTHWAITE, cette difficulté s'additionne à celle de l'estimation de la réserve utile qu'il est hasardeux de fixer tant les propriétés de la roche calcaires saine ou altérée sont mal connues dans ce domaine.

- De la même manière, les formules de déficit d'écoulement, établies à partir de l'étude statistique de nombreux bassins, n'intègrent pas les particularités d'un massif karstique.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle s'avère donc relativement imprécis du fait de la nature du sous-sol qui n'a jamais été pris en référence dans les différentes méthodes utilisées. La convergence des méthodes suppose toutefois une bonne approche de ce terme du bilan.

2 - BILAN DES APPORTS DU KARST

2 - 1. PRESENTATION DES TERMES DU BILAN

Le bilan hydrologique se traduit communément par l'expression: $P = E + R + I + W$, chaque terme représentant successivement les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement, l'infiltration et les variations de réserves. dans le cas du karst des Gras, tous les termes de ce bilan ne sont pas connus. Il ne s'agira donc pas de vérifier si l'égalité est bien réalisée, mais d'estimer le terme infiltration I qui s'apparente aux apports du karst. Le terme ruissellement R correspond aux débits évacués par les combes et ruisseaux affluents de l'Ardèche durant de violents épisodes pluvieux. Selon les années, le nombre de jours de ruissellement peut varier de 0 à quelques jours. Pour un cycle hydrologique comportant de violents épisodes pluvieux (du type de ceux de l'automne 1982), ce ruissellement annuel semble pouvoir être évalué au maximum à 5 % des précipitations annuelles. Ce terme sera donc négligé pour une année commune. Les variations de réserves W tendent vers zéro lors de la recherche d'une valeur moyenne de l'infiltration sur une longue série de données. Leurs variations ne sont par contre pas négligeables d'une année sur l'autre, même si les capacités de stockage de l'aquifère sont faibles. Elles introduisent donc une imprécision dans le calcul. La détermination de l'infiltration va donc se résumer avec une précision plus ou moins grande au calcul des pluies efficaces : $P - E$.

2 - 2. DETERMINATION DES LAMES D'EAU PRECIPITEE ET INFILTREE

Le calcul de la lame d'eau précipitée peut s'effectuer selon deux méthodes. La méthode des polygones de THIESSEN affecte la pluviométrie recueillie à un poste météorologique à l'ensemble du polygone regroupant les points les plus proches de ce poste. Cette méthode s'applique bien au massif des Gras qui comporte peu de reliefs marqués. La méthode des isohyètes peut s'avérer plus réaliste du fait de la grande souplesse introduite dans leur tracé. La connaissance d'éléments de la pluviométrie à Saint-Remèze, l'existence du relief de la Dent de Rez sont alors pris en compte. La faible répartition des postes météorologiques n'autorise

pas le tracé de plus de 2 courbes isohyètes (de 50 mm d'écart) sur l'ensemble du massif. L'imprécision qui en découle dans certaines figures interdit son utilisation systématique. Selon la position d'une zone par rapport aux postes météorologiques de Vallon-Pont d'Arc et de Bourg-Saint-Andéol, il lui sera affecté une valeur de l'évapotranspiration identique à l'un d'eux ou moyenne.

2 - 2.1. Apports moyens du karst sûr la période 1961-1982

a) La méthode de THIESSEN (fig. 75 a)

Le tableau suivant fournit la lame d'eau infiltrée P - E, le volume infiltré V, le débit moyen Q, ainsi que le débit spécifique q. La zone hypothétique d'alimentation du karst des gorges appartient en quasi-totalité au polygone de Montclus dont elle prendra les caractéristiques.

Postes météorologiques	P _{mm}	E _{mm}	P-E _{mm}	S _{km²}	V.10 ⁶ _{m³}	Q _{m³/s}	q _{l/s/km²}
VALLON P.A.	953	576	377	78	29.4	0.93	12.8
BOURG-St-A.	848	576	272	14	3.8	0.12	8.6
MONTCLUS	926	576	350	16	5.6	0.18	11.2
Zone Sud	926	576	350	26	9.1	0.29	11.2
BESSAS	927	576	351	18	6.3	0.20	11.1
Bassin Versant des Gorges				152	45.1 54.2 ^ā	1.43 1.52 ^ā	11.3

tableau 16 : Evaluation des apports annuels moyens du karst (Volume, débit moyen, débit spécifique) à partir du calcul des pluies efficaces, affectées aux polygones de Thiessen.

b) La méthode des isohyètes (fig. 75 b)

	P _{mm}	E _{mm}	P-E _{mm}	S _{km²}	V.10 ⁶ _{m³}	Q _{m³/s}	q _{l/s/km²}
900 < P < 950	925	576	349	122	42.6	1.35	10.9
P < 900	890	576	314	30	9.4	0.30	10.0
Bassin Versant des Gorges				152	52.0	1.65	10.9

tableau 17 : Evaluation des apports annuels moyens du karst à partir de la méthode des isohyètes.

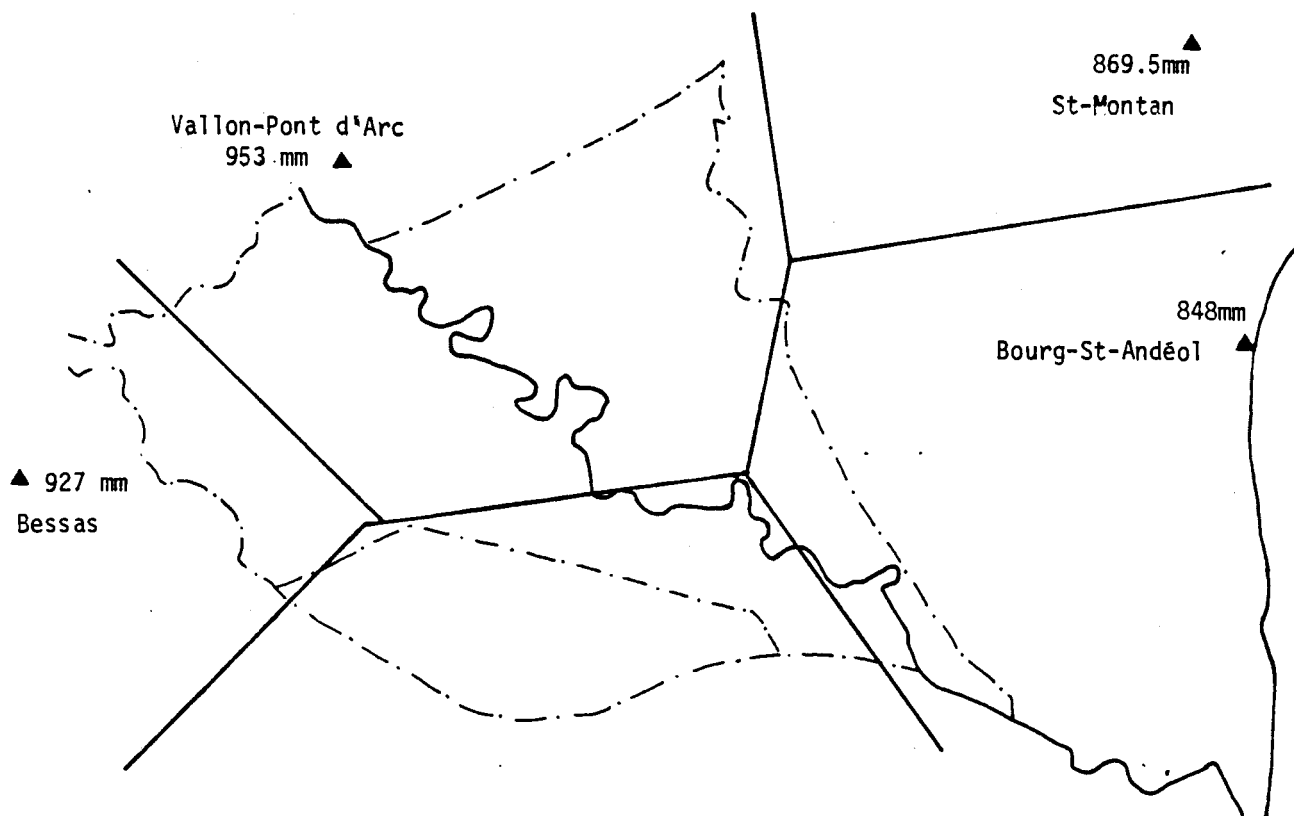


fig.75a: Méthode des polygones de Thiessen.

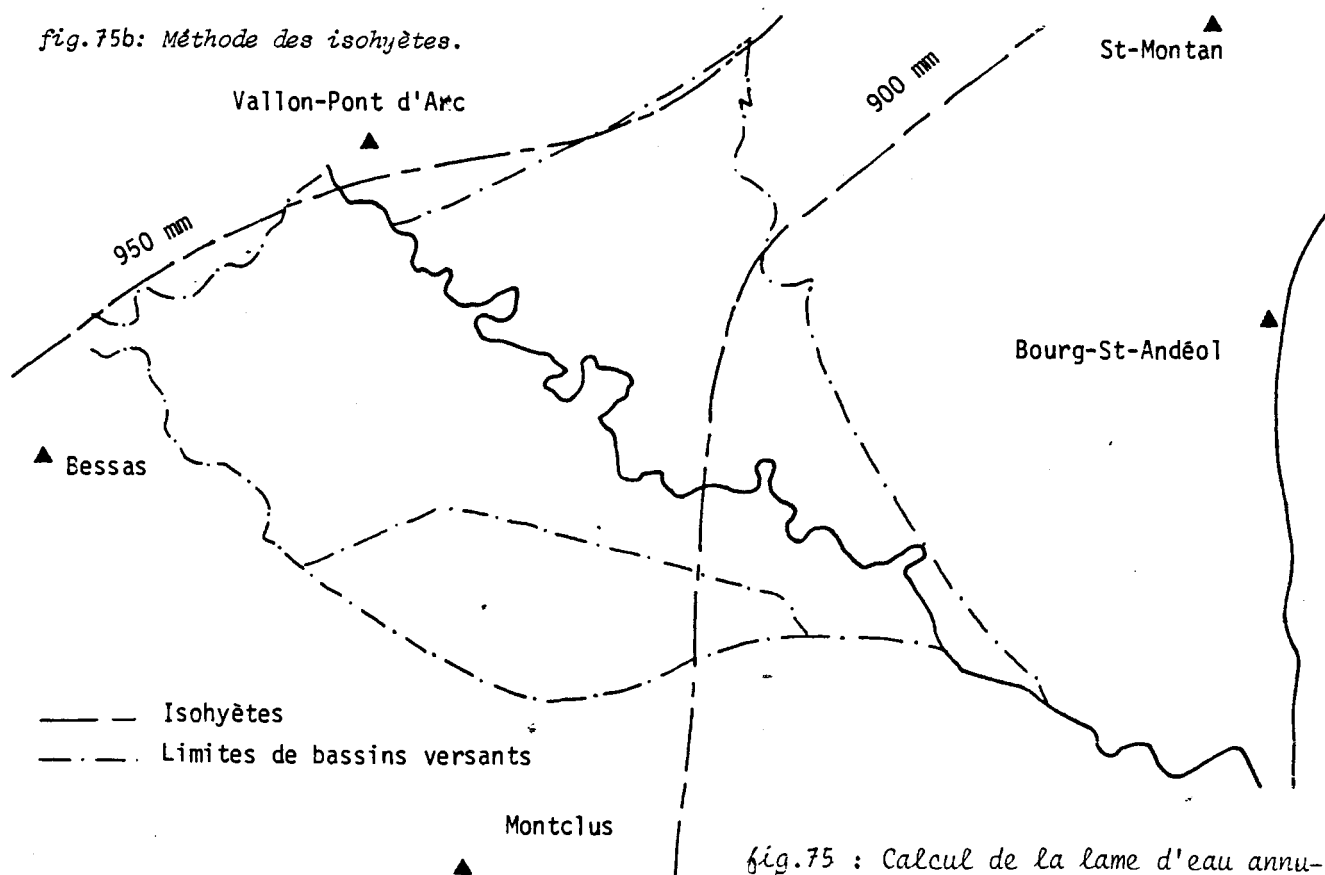


fig.75 : Calcul de la lame d'eau annuelle précipitée: moyenne 1961-1982.

Les deux méthodes fournissent des résultats similaires. Pour une année moyenne, les apports du karst des gorges correspondent à un débit moyen estimé de 1,4 à 1,7 m³/s selon les limites de bassin versant retenues. Le débit spécifique est de 11 l/s/km².

2 - 2.2. Apports du karst en 1983

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant après utilisation de la seule méthode de THIESSEN.

Postes météorologiques	P _{mm}	E _{mm}	P-E _{mm}	S	V.10 ⁶	$\bar{Q}$ m ³ /s	q l/s/km ²
VALLON P.A.	785	574	211	78	16.5	0.52	6.7
BOURG-St-A.	693	567	126	14	1.8	0.06	4.3
MONTCLUS	845	570	275	16	4.4	0.14	8.7
Zone Sud	845	570	275	26	7.2	0.23	8.8
BESSAS	814	574	240	18	4.3	0.14	7.8
Bassin Versant des Gorges				152	27.0 à 34.2	0.86 à 1.09	7.2

tableau 18 : Evaluation des apports du karst pour l'année 1983 d'après la méthode des polygones de Thiessen.

Les conditions météorologiques de l'année 1983 considérées comme très sévères ont limité les apports du karst à un débit moyen voisin de 1 m³/s soit un débit spécifique de 7 l/s/km².

2 - 2.3. Apports du karst en 1984

Postes météorologiques	P _{mm}	E _{mm}	P-E _{mm}	S	V.10 ⁶	Q _m ³ /s	q l/s/km ²
VALLON P.A.	1153	688	465	78	36.3	1.15	14.7
BOURG-St-A.	990	670	320	14	4.5	0.14	10.0
BESSAS	1076	688	388	18	7.0	0.22	12.2
MONTCLUS	1020	679	341	16	5.5	0.17	10.6
Zone Sud	1020	679	341	26	8.9	0.28	10.8
Bassin Versant des Gorges				152	53.3 à 62.2	1.68 à 1.96	12.9

tableau 19 : Evaluation des apports du karst pour l'année 1984 d'après la méthode des polygones de Thiessen.

Les apports sont beaucoup plus élevés en 1984 puisque de l'ordre de 1,7 à 2,0 m³/s pour un débit spécifique de 13 l/s/km².

2 - 3. CONCLUSIONS

En dépit de l'impossibilité d'obtenir par une mesure directe les débits issus du karst des gorges de l'Ardèche, ces apports ont pu être quantifiés par la détermination des pluies efficaces et par la délimitation du bassin versant des gorges. Une démarche similaire avait conduit C. DROGUE et al. (1984) à une estimation des ressources renouvelables des différents aquifères de la région pyrénéo-provençale dont l'aquifère urgonien des Gras. La précision de cette évaluation était en rapport avec l'étendue du travail. Une étude fine de ce massif permet d'annoncer pour le seul bassin versant des gorges tel qu'il a été défini, un débit moyen annuel de 1,4 à 1,7 m³/s correspondant à un débit spécifique de 11 l/s/km². Les années 1983 et 1984 offrent deux exemples des variations interannuelles enregistrées.

3 - HYDROLOGIE DE L'ARDECHE

L'étude du régime hydrologique de l'Ardèche va être abordée dans ce paragraphe. Bien que ce travail n'ait pas été orienté vers une quantification des débits et la définition d'une lame d'eau ruisselée, il paraît souhaitable d'en connaître les principales caractéristiques.

3 - 1. ANALYSE DU BASSIN VERSANT DE L'ARDECHE

L'Ardèche prend sa source dans le massif cristallin du Tannargue à près de 1400 m d'altitude. Après un parcours de 112 km, elle se jette dans le Rhône à la cote de 45 m. Cette rivière présente un profil torrentiel sur la partie amont de son cours. Elle connaît une pente moyenne de plus de 1,5 ‰ jusqu'à Vallon-Pont d'Arc puis s'adoucit selon une pente dix fois inférieure. La superficie totale de son bassin versant est de 2240 km² à Saint-Martin-d'Ardèche. De nombreux affluents provenant des Cévennes alimentent la rivière sur sa rive droite : la Ligne, la Baume, le Chassezac. Le réseau hydrographique de l'Ardèche se singularise par la confluence de ces différents affluents en quelques kilomètres. L'ensemble des écoulements est par la suite canalisé par les gorges de l'Ardèche. La violence des précipitations sur la bordure cévenole jointe à cette disposition, qualifiée de monstruosité hydrologique par M. PARDE (1958), explique le caractère exceptionnel des crues de l'Ardèche.

3 - 2. LE REGIME HYDROLOGIQUE DE L'ARDECHE

a) L'équipement.

L'Ardèche est particulièrement bien équipé sur l'ensemble de son bassin versant. La Basse-Ardèche comporte une échelle limnimétrique non tarée à Vallon-Pont d'Arc. Cette station bénéficie d'une très longue série de données, difficilement utilisable. Le limnigraphe de Sauze-Saint-Martin-d'Ardèche à l'aval des gorges ferme le bassin versant. La série d'enregistrements est continue de 1955 à 1983 (l'année 1974 exclue). C'est cette station qui va permettre d'analyser le régime du cours d'eau.

Les aménagements EDF de Montpezat sur la Haute-Ardèche et du Chassezac modifient le régime naturel de la rivière. Les données suivantes fournies par l'Agence de Bassin corrigent l'influence de ces ouvrages.

b) Moyennes mensuelles et annuelles

Les moyennes des débits Q en m^3/s et des débits spécifiques Q_s en $l/s/km^2$ ont été établies sur les 28 années de mesure.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
Q	99.5	97	90.5	69	69	34	12	15	32	91	89.5	76	64.5
Q_s	44	43	40	31	31	15	5	7	14	41	40	34	29

tableau 20 : Débits moyens de l'Ardèche à Sauze-Saint-Martin.

La répartition annuelle des débits ne suit pas celle des précipitations locales. Une période de hautes eaux d'octobre à mars fait suite à une période de basses eaux de juin à septembre. Le module annuel moyen de $64,5 m^3/s$ correspond à une lame d'eau ruisselée de 905 mm.

c) Débits pour l'année 1983

L'année 1983 est une année très déficitaire du point de vue des ruissellements $\frac{\bar{Q}_{83}}{Q} = \frac{46.4}{64.5} = 0,7$.

L'absence de crues en automne fait migrer les maxima annuels vers les mois d'avril et mai.
Deux périodes d'étiage prononcé apparaissent : de juillet à septembre et durant le mois de novembre.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
Q	24.4	36.3	44.6	147.0	157.0	26.5	10.8	4.7	13.2	34.4	8.7	48.7	46.4

tableau 21 : Débits moyens de l'Ardèche en 1983 à Sauze-Saint-Martin.

3 - 3. L'HYDROLOGIE DE CRUE

Les crues de l'Ardèche sont qualifiées de type cévenol au même titre que celles des cours d'eau de la bordure sud-orientale du Massif Central. Elles se caractérisent par une rare violence et sont responsables d'importants dégâts. La réponse des hydrologues à ce phénomène a été

double. Dans le sens de la prévision, il a tout d'abord été mis en place un service d'annonce de crues (dépendant de la D.D.E. de l'Ardèche). A partir des données amont, il reconstitue les débits probables à l'aval et prend les mesures nécessaires. Dans le sens de la prévention, des études tentent de déterminer les débits extrêmes de temps de retour donné. Les aménagements pourront alors être réalisés en tenant compte des risques de crue. L'étude effectuée par le CEDRAT dans le cadre du projet "Ardèche Claire" répond totalement à cette demande. Deux documents élaborés ont été tirés de cet ouvrage (fig. 76 et annexe). Il s'agit d'une part d'un catalogue des crues à Sauze, de 1970 à 1982 et de leurs principales caractéristiques, d'autre part, d'une estimation des crues de temps de retour donné en tout point de l'Ardèche.

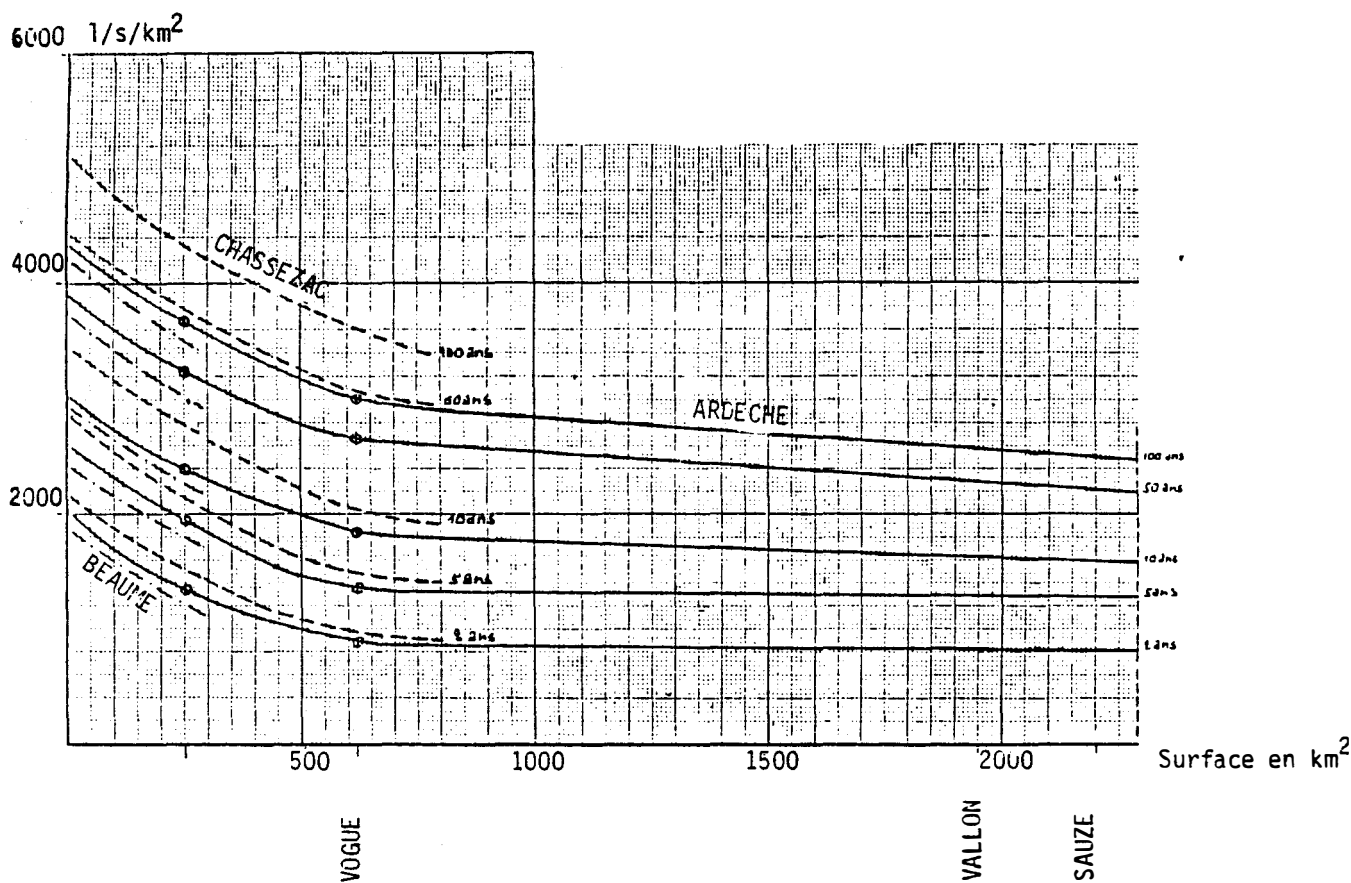


fig.76 : Variation des débits spécifiques de pointes de crues en fonction de la superficie du bassin. in CEDRAT-Opération Ardèche Claire (1984)

Il est intéressant de noter que la majorité des crues interviennent du 15 septembre au 15 novembre et ce d'autant plus que leur caractère exceptionnel est marqué. La comparaison des épisodes de crue les plus importants de l'histoire récente s'avère difficile. Les changements du zéro de l'échelle de Vallon-Pont d'Arc, qui fournit la série la plus ancienne, sont à l'origine de ces incertitudes. Les crues de fin septembre

1890, 1900 et 1958 apparaissent par ordre d'importance comme les plus violentes (M. PARDE et J. De BEAUREGARD, 1959) les deux premières avec des débits de pointes estimés à 5500 et 6000 m³/s sont de l'ordre de la crue centennale à Sauze dont le débit est égal à 5600 m³/s d'après la figure 76.

3 - 4. L'HYDROLOGIE D'ETIAGE

L'étude des débits d'étiage prend un intérêt considérable sur l'Ardèche, du fait de la vocation touristique de cette rivière. Les différentes servitudes qui s'exercent sur cette rivière : rejets d'eaux usées, prélèvements d'eau en vue de l'irrigation et de l'alimentation en eau potable, fonctionnement des barrages amont, peuvent s'opposer à des objectifs de maintien de la qualité des eaux et au bon déroulement d'activités touristiques (baignade, canoé-kayak, pêche). C'est durant l'étiage d'été que ces antagonismes sont les plus marqués. C'est pourquoi de nombreuses études se sont intéressées aux variations de débit durant cette période.

Plusieurs difficultés se posent pour l'analyse des données de débits d'étiage. Si les retenues de l'Ardèche supérieure et du Chassezac ne fonctionnent pas l'été, elles influent sur le module annuel du cours d'eau et modifient les débits d'étiage. Les prélèvements pour l'irrigation sont également mal connus. Du point de vue de l'acquisition des données, il semble que la station de Sauze - Saint-Martin-d'Ardèche ne dispose pas d'une courbe de tarage suffisamment précise pour des débits très faibles.

Les mois de juillet et d'août avec des débits moyens respectifs de 12 et 15 m³/s constituent les mois d'étiage les plus forts. L'analyse des débits caractéristiques est plus explicite. Le tableau suivant établi par le CNARBRN Nîmes fournit les débits caractéristiques minima : DC min, d'étiage : DCE, du 30^e jour classé : DC 11. Les années médianes, quinquennales sèches et humides sont distinguées pour une période de référence 1955-1974.

DC Ans	DC min	DCE	DC 11
4/5	2.7(6.0)	2.9(6.5)	4.0(9.0)
1/2	2.0(4.5)	2.2(4.9)	3.1(6.9)
1/5	1.5(3.4)	1.8(4.0)	2.4(5.4)

Qs (Q)
Qs : Débit spécifique
Q : Débit moyen journalier

tableau 23 : Débits caractéristiques d'étiage de l'Ardèche pour les années quinquennales humides et sèches et les années médianes.in CEDRAT(1984)

Pour une même année, les débits caractéristiques sont relativement proches, ce qui prouve un soutien de l'étiage et l'absence d'un risque d'effondrement des débits.

L'année 1983 s'inscrit comme une année exceptionnelle. Deux périodes d'étiage particulièrement sévères : juillet-août et novembre-mi-décembre en sont responsables.

DC	DC _{min}	DCE	DC 11
Qs	1.3	1.4	2.1
Q	2.82	3.18	4.78

tableau 24 : Débits caractéristiques d'étiage de l'Ardèche pour l'année 1983.

C'est dans ce contexte que seront examinés les jaugeages différentiels effectués sur l'Ardèche en août 1983.

4 - LES JAUGEAGES DIFFÉRENTIELS SUR L'ARDÈCHE

4 - 1. LES BUTS

L'étude quantitative des apports du karst a déjà été abordée par le biais du calcul des pluies efficaces et de la lame d'eau qui leur est associée. Une étude directe de ces apports aurait pu être réalisée par comparaison des débits de l'entrée et de la sortie des gorges de l'Ardèche. L'impossibilité d'équiper la partie amont des gorges d'un limnigraphe taré a empêché la réalisation d'une telle opération. Des mesures ponctuelles pouvaient permettre par contre, en dehors des périodes de très hautes eaux, de déterminer les débits en diverses sections du cours d'eau. Deux types de résultats pouvaient en découler : d'une part une localisation approximative des apports du karst et des pertes de la rivière, d'autre part une estimation globale de ces apports à un moment donné du cycle hydrologique. La méthode d'injection chimique à volume constant paraît la seule utilisable pour des débits faibles et moyens. Des prélèvements en différentes sections fournissent autant de débits intermédiaires. Cette manipulation relativement lourde s'est avérée irréalisable à l'intérieur d'une zone protégée et dans un climat riche en polémiques autour de la qualité des eaux de la rivière. Seuls des jaugeages au micromoulinet en différentes sections ont pu être réalisés en période d'étiage prononcé.

4 - 2. LA MANIPULATION

Les jaugeages différentiels au micromoulinet ont été réalisés les 9, 10, 11 août 1983 lors d'un étiage soutenu. Deux problèmes se sont posés pour la mise en place de cette manipulation :

- Le choix des sections utilisables est en fait très limité et seules les portions situées directement à l'amont de rapides sont favorables : la hauteur d'eau doit être inférieure à 1,20 m sur tout le profil, la section ne doit pas comporter de zones à très faibles vitesses ou trop irrégulières. Cinq sections ont ainsi été retenues sur l'ensemble du tracé.

- Les mesures qui ne peuvent être effectuées de manière synchrone doivent toutefois se dérouler dans des conditions identiques de débit. L'installation d'une échelle limnimétrique à Gaud, au tiers des gorges, a permis de surveiller la stabilité du niveau de l'Ardèche durant la manipulation. Les profils ont, d'autre part, été exécutés de l'amont à l'aval de manière à minimiser une évolution possible des débits. Les trois sections amont ont été étudiées le 1er jour, les trois sections aval qui comprennent donc un profil commun avec la première série de mesures, le deuxième jour. Enfin, une mesure amont puis aval a été réalisée le dernier jour, de manière à ce que l'estimation des apports globaux du karst ne soit entachée que d'un minimum d'erreurs. Le dépouillement des mesures a été effectué sur microordinateur grâce à un programme du Laboratoire d'Hydrogéologie.

4 - 3. LES RESULTATS

La figure 77 présente les différentes sections de mesure ainsi que les débits obtenus, corrigés des variations du niveau de l'Ardèche. Ces résultats appellent plusieurs remarques :

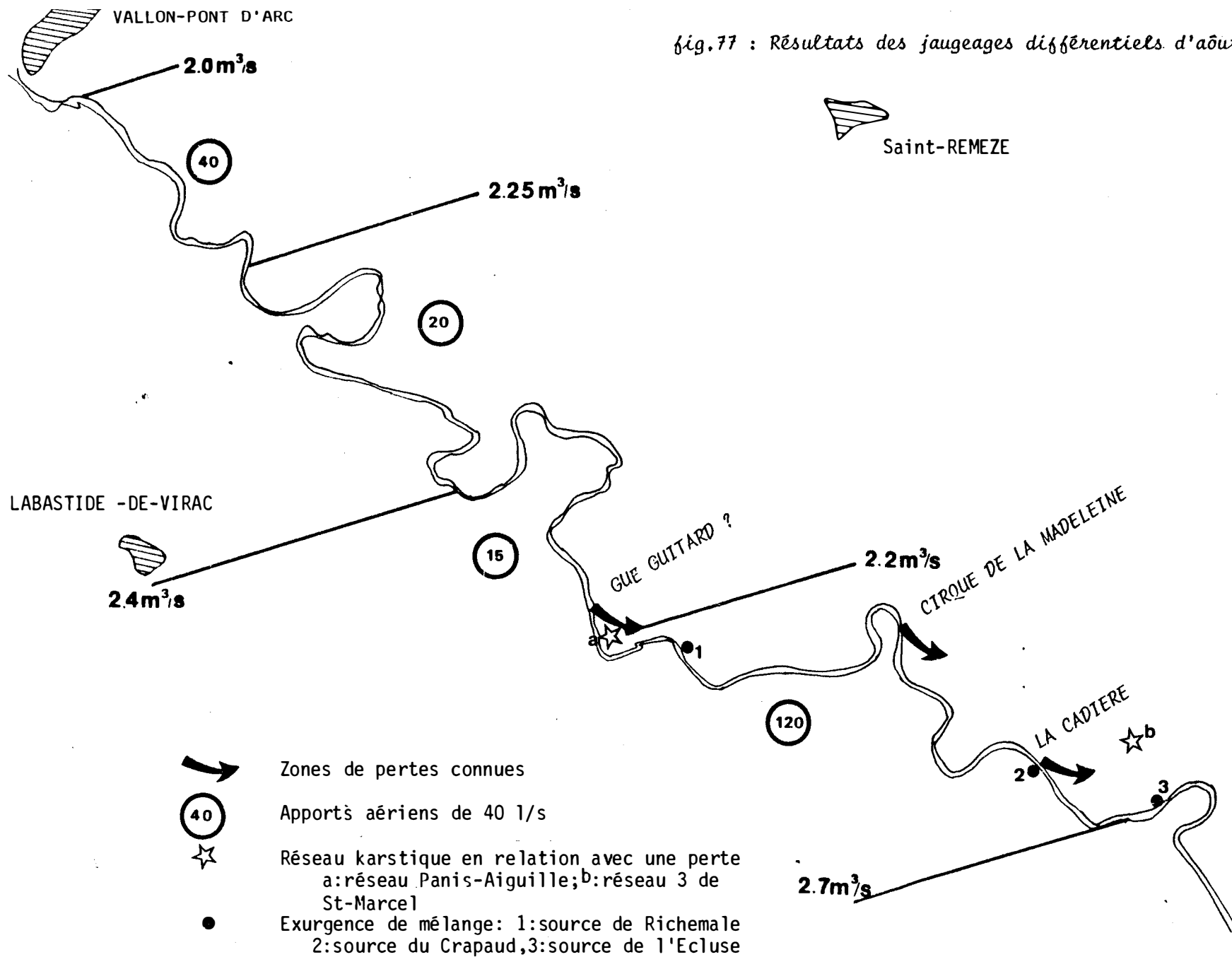
1. On observe globalement un apport du karst qui s'élève à 700 l/s entre Vallon-Pont d'Arc et Sauze.

2. Les zones d'apport se répartissent sur l'ensemble des gorges. Des zones de perte ont également pu être mises en évidence. Ainsi, en amont de Gournier, le débit de 2,20 m³/s montre une chute de plusieurs centaines de litres par seconde. Un court-circuit souterrain de la rivière existe à l'amont du point de mesure. Il pourrait s'agir du plan d'eau surélevé situé à l'amont du Gué Guitard. Il est susceptible d'alimenter le réseau souterrain de Panis-Aiguille en rive gauche de l'Ardèche. D'autres zones de pertes sont connues : cirque de la Madeleine, pertes de la Cadière qui ont été parcourues sur plusieurs centaines de mètres, galeries inférieures du réseau 3 de Saint-Marcel. Les plongeurs qui ont reconnu le réseau de la Cadière ont estimé les débits transitant à 200 l/s durant une période d'étiage. L'existence de branchages dans les galeries inférieures du réseau 3 indique également des débits pouvant être élevés. Les pertes les plus importantes correspondent donc à de véritables réseaux subparallèles à l'Ardèche. Il est difficile d'apprécier si ces pertes constituent des court-circuits locaux ou des réseaux plus développés. Les sources de mélange des eaux du karst et de l'Ardèche sont les points d'émergence partielle ou totale de ces écoulements lors d'un recoupement avec des apports karstiques. L'ensemble du court-circuit semble parfois pouvoir être reconstitué. C'est le cas pour deux réseaux : perte du Gué Guitard - réseau de Panis-Aiguille - source de Richemale et perte de la Cadière - réseau 3 de St-Marcel - source de l'Ecluse. La notion de sous-écoulement qui avait été avancée au cours de l'étude de la karstogenèse, est donc bien une réalité.

3. Les apports aériens fournissent 200 l/s, soit moins du tiers des apports totaux du karst. Cette disproportion semble vraisemblable en période d'étiage quand la surface de la zone noyée s'abaisse de plusieurs mètres.

4. Les débits obtenus par ces jaugeages ne se corrélaient pas exactement avec les valeurs enregistrées au limnigraphe de Sauze. Les sections qui entourent le limnigraphe sont en effet très larges et présentent donc peu de précision pour des variations de faible amplitude. Le problème du tarage de cet appareil pour de très faibles débits a, d'autre part,

fig.77 : Résultats des jaugeages différentiels d'août 1983



déjà été posé. On note toutefois une bonne convergence entre de débit instantané de $2,70 \text{ m}^3/\text{s}$ mesuré au camping de Saint-Marcel, à 2 km à l'amont du limnigraphe de Sauze et le débit moyen journalier de $2,82 \text{ m}^3/\text{s}$ obtenu à cette station le 11 août 1983.

5. Il est difficile d'estimer l'erreur à retenir sur ces mesures de débit. Il semble qu'un taux de 20 % recouvre la réalité. L'erreur se décompose plus ou moins également en erreurs systématiques et en erreurs sur la mesure. Les premières sont liées à l'appareillage : dérive dans le tarage de l'hélice, choix de l'hélice... et à l'opérateur : type de section choisie, pas de longueurs et de temps utilisés ... L'utilisation d'un même opérateur et d'un même matériel sur l'ensemble de la rivière ainsi qu'un raisonnement sur la comparaison entre les valeurs et non sur des valeurs absolues, minimisent ce type d'erreurs. Les erreurs sur la mesure, liées à la mesure du temps, au dessin de la section, aux variations du niveau de la rivière, sont de l'ordre de 10 % soit 20 % pour le calcul des apports intermédiaires.

Le débit des apports du karst est donc pour cette période de fort étiage de $700 + 140 \text{ l/s}$ soit de 560 à 840 l/s. Il semble plus réaliste d'opter pour la valeur inférieure de cette fourchette.

Ces valeurs seront réutilisées au cours de l'étude hydrodynamique pour un calcul simplifié des réserves dynamiques du karst des gorges de l'Ardèche.

5 - CONCLUSION

Une démarche hydrogéologique classique comportant successivement une étude géologique, des expériences de traçage, la délimitation des limites de bassins versants et une étude hydroclimatique, a permis d'obtenir un calcul des ressources renouvelables du karst des Gras. Pour l'année 1983, un débit moyen de $0,85$ à $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ a été enregistré.

Par ailleurs, des jaugeages différentiels effectués sur l'Ardèche en août 1983 ont mis en évidence des apports de $0,7 \pm 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, à un moment où l'étiage était particulièrement sévère. Il est difficile de concevoir des débits d'étiage aussi proche de la valeur moyenne annuelle. La disparité entre ces deux types de résultats tient davantage aux périodes de référence considérées qu'à des erreurs sur les valeurs obtenues. Le calcul des pluies efficaces a été réalisé sur l'année civile 1983 alors que les réserves qui alimentent le karst en août 1983 dépendent des événements hydrologiques survenus durant le cycle hydrologique de septembre 1982 à août 1983. Un recoupement des deux méthodes nécessite le calcul préalable du débit moyen annuel sur le cycle 82-83.

Les violents épisodes pluviométriques de l'automne 1982 ne permettent pas de négliger le ruissellement qui sera pris égal à 5 % des précipitations. D'un étiage à l'autre, les variations de réserves seront considérées comme nulles. Ce calcul aboutit aux résultats suivants selon les limites de bassins versants choisies :

S_{km^2}	$V.10^6 m^3$	$Q_{m^3/s}$	$q \text{ l/s/km}^2$
126	52.4	1.67	11
à	à	à	
152	57.6	1.83	11

tableau 25 : Evaluation des apports du karst pour le cycle hydrologique septembre 1982-Août 1983.

Les débits tiennent compte de l'importante recharge de l'automne 1982 et sont cohérents avec les débits obtenus à l'étiage de l'été 1983. Pour l'ensemble du tarissement, un calcul approximatif explicité dans l'étude hydrodynamique (chapitre 6, § 2) a permis d'avancer un volume des réserves dynamiques de $(15 \pm 10).10^6 m^3$ qui semble compatible avec le volume annuel des réserves renouvelables estimé à plus de $50.10^6 m^3$ par la méthode des pluies efficaces.

Différentes approches de la quantification des réserves renouvelables du karst ont été tentées. Les résultats obtenus sont cohérents entre eux et prouvent l'existence d'un potentiel en eau potable important et peu exploité.

CHAPITRE VI

ETUDE QUALITATIVE DU KARST : STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES KARSTIQUES

- 1 - CONCEPTIONS RÉCENTES SUR LE FONCTIONNEMENT DU KARST
- 2 - ÉTUDE HYDROCHIMIQUE
- 3 - ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE
- 4 - LES AUTRES TECHNIQUES D'INVESTIGATION DU KARST
- 5 - LES PROBLÈMES DE VULNÉRABILITÉ
- 6 - CONCLUSIONS

ETUDE QUALITATIVE DU KARST : STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES KARSTIQUES

Une approche globale et quantitative du karst a été effectuée dans un premier temps. Une étude sur les caractéristiques et le fonctionnement des systèmes karstiques va maintenant être entreprise à partir des données obtenues à l'exutoire de différentes émergences. Plusieurs points d'eau répartis sur l'ensemble des gorges et du plateau ont fait l'objet d'observations indirectes : analyses physico-chimiques, mesures de débit, restitution de traceur, voire par ailleurs prélèvements biologiques et analyses bactériologiques. Ces mesures vont permettre d'affiner la connaissance du karst des Gras dont une seule composante paraît évidente : la multiplicité des systèmes. Avant d'entreprendre l'analyse de ces données, un rapide rappel des principaux travaux récents effectués sur le karst ainsi que des modèles de fonctionnement karstique qu'ils proposent, va être réalisé.

1 - CONCEPTIONS RÉCENTES SUR LE FONCTIONNEMENT DU KARST

L'étude du karst qui avait longtemps été le fait des seuls spéléologues et géomorphologues, n'a été que depuis peu réellement abordée par les hydrogéologues. L'hétérogénéité de ce milieu ne permet pas, en effet, l'extension des connaissances acquises dans les autres domaines : les milieux poreux et fissurés, et en particulier l'utilisation des lois classiques de l'écoulement.

Parmi la littérature maintenant abondante sur l'hydrogéologie karstique (BAKALOWICZ, 1984), deux ouvrages complémentaires imposent une vue globale du système karstique et proposent un modèle d'écoulement : MANGIN (1975) et M. BAKALOWICZ (1979). Ces deux auteurs ont à partir d'une étude intensive sur des karsts pyrénéens, dégagé deux méthodologies d'étude du karst s'appuyant respectivement sur l'hydrodynamique et l'hydrochimie.

Le karst peut être différencié en une zone non saturée ou d'infiltration et une zone saturée ou karst noyé. L'infiltration peut s'effectuer selon deux modalités : infiltration directe vers la zone noyée ou infiltration différée vers un épikarst : véritable nappe perchée dans la zone superficielle d'altération des calcaires. Ces percolations verticales pourront être rapides pour des écoulements s'engageant dans de grandes fissures et gagnant la zone noyée ou lentes pour un écoulement diffus en petites fissures. Cette zone d'infiltration constitue un formidable réservoir d'eaux non immédiatement mobilisables. A la base du système, l'hétérogénéité du karst est encore plus marquée. Un ruissellement concentré alimente la zone noyée dans laquelle un véritable drainage s'est installé. Cet axe à faible pouvoir capacitif et écoulement rapide est relayé latéralement par des réservoirs à fort pouvoir capacitif dont les pertes de charge sont plus ou moins grandes par rapport au collecteur : ce sont les systèmes annexes de MANGIN ou les sous-systèmes de DROGUE (1974). Alimentés en hautes eaux, ils restituent les eaux de recharge à l'étiage par des chenaux

puis des fissures (C. DROGUE, 1967) selon la charge du réseau et la position du système annexe par rapport au drain principal et à l'exutoire (MANGIN, 1975).

Le système karstique ainsi structuré (fig. 78) va, en fonction de l'évolution du cycle hydrologique et donc de la charge en divers points de l'aquifère, libérer successivement à l'exutoire des masses d'eaux d'origine et de caractéristiques différentes.

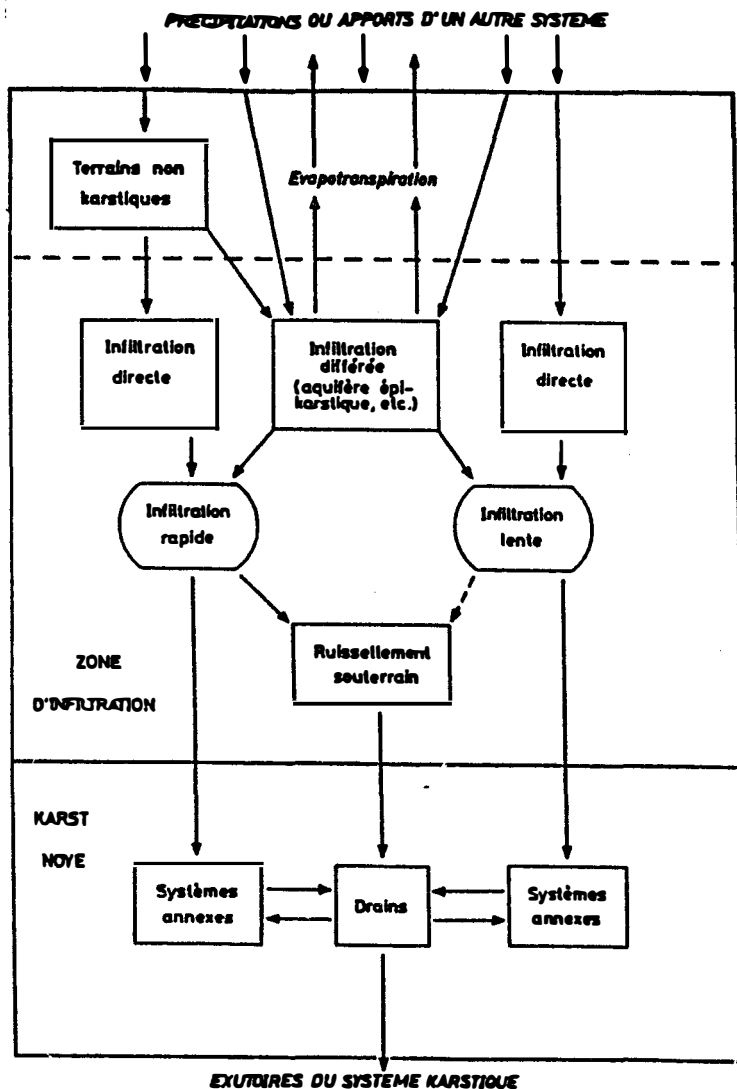


fig.78 : Schéma fonctionnel de l'aquifère karstique. in Bakalowicz, 1979.

Outre l'exemple pyrénéen, de rares travaux ont utilisé ces deux méthodologies pour réaliser une étude intensive d'un aquifère karstique (M. LEPILLER, 1980). Devant la multiplicité des émergences des gorges et l'absence d'un système karstique majeur, il n'a pas été réalisé d'étude intensive de ce karst qui aurait comporté une mesure en continu des débits et de certains paramètres géochimiques ainsi que des prélèvements d'eaux au moins hebdomadaires en vue d'analyses chimiques. L'ensemble des connaissances acquises sur le karst va permettre d'interpréter des mesures, obtenues à partir d'une surveillance plus lâche.

2 - ÉTUDE HYDROCHIMIQUE

Les données hydrochimiques recueillies aux exutoires permettent d'obtenir de nombreuses indications sur l'aquifère. Les paramètres physico-chimiques dépendent en effet de la nature des roches traversées, du temps de séjour des eaux, des conditions d'émergence, ... Une bonne connaissance des réactions et des équilibres chimiques est un préalable à l'interprétation de ces données. L'aquifère karstique, hétérogène et hiérarchisé peut laisser se succéder à l'exutoire des eaux provenant de différentes parties du système et présentant des caractéristiques physico-chimiques propres. L'information hydrochimique sera donc en mesure, une fois l'origine de ces eaux précisée, d'indiquer les modalités de circulations (type d'alimentation, possibilité de stockage, vitesse d'écoulement, ...).

L'utilisation des données hydrochimiques va s'effectuer selon deux approches :

- Une étude spatiale va dans un premier temps permettre la classification des émergences selon plusieurs familles de faciès. L'utilisation des ions les plus discriminants va faciliter cette analyse.

- Une étude à caractère temporel va dans un second temps offrir une vision plus dynamique du karst. L'évolution annuelle des paramètres physico-chimiques va permettre d'appréhender la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques étudiés.

2 - 1. LES DIFFERENTS FACIES GEOCHIMIQUES

2 - 1.1. Analyse des paramètres physico-chimiques

a) La température

Un massif rocheux est soumis à un champ thermique, résultant du flux solaire (à cycle journalier et annuel) et du flux géothermique. Plusieurs zones thermiques peuvent être différenciées verticalement: ce sont les zones d'hétérothermie, neutre (hétérothermie annuelle) et d'homéothermie de H. SCHOELLER (1962). Les eaux vont le plus souvent se mettre en équilibre avec la roche qu'elles traversent. Elles prendront alors une température saisonnière pour un parcours superficiel, proche de la température moyenne annuelle de l'air pour un parcours plus profond, voire plus élevée pour une grande profondeur. Les travaux de C. ANDRIEUX (1976) sur le karst expérimental du Baget ont montré les particularités d'un aquifère karstique vis-à-vis des problèmes thermiques :

- L'existence d'une infiltration rapide peut amener à l'exutoire des eaux qui n'ont pas atteint l'équilibre thermique avec la roche. Il peut d'autre part se succéder à l'exutoire des eaux provenant de parties différentes du système karstique, ne présentant pas des températures identiques.

- En période d'étiage, il peut s'établir un gradient thermique à proximité de l'exutoire du fait des faibles vitesses d'écoulement. Les mesures obtenues ne correspondent alors pas à la température d'équilibre des réserves de la zone noyée.

Les températures moyennes annuelles de l'air qui vont constituer des températures de référence, sont respectivement de 12°4 et 13°5 à Vallon-Pont d'Arc et Bourg-Saint-Andéol pour les séries existantes. L'année 1982, ainsi que ses suivantes, montre un fort réchauffement avec une température moyenne annuelle de 14°9, commune aux deux stations. Ce paramètre très sélectif va permettre, par sa valeur moyenne et par les variations qu'il présente, de distinguer plusieurs familles :

- Les sources à température moyenne plus élevée que celle de l'air. Elles connaissent de très faibles variations de température. La source de la Fare est la plus chaude avec une valeur minimale supérieure à 15°. Les sources de Vanmalle, de la Dragonnière et de l'Aiguille se caractérisent également par des températures élevées. Ces sources du fond des gorges, disposées à près de 300 m sous la surface du plateau, ont profité du réchauffement lié au gradient géothermique. Elles sont peu ou pas influencées par l'infiltration directe et par la rupture du champ thermique à proximité de l'exutoire.

- Les sources comprises entre 13 et 14°, présentant de faibles variations de température. Cette température un peu plus faible correspond soit à des écoulements moins profonds (sources du Tiourre et du Bas-Moulin), soit à des systèmes karstiques plus développés à proximité de l'exutoire, où les échanges thermiques sont facilités (sources de Tourne).

- Les sources plus froides ou à grande variabilité annuelle. Elles sont liées à des alimentations rapides par pertes (sources du Boeuf, de la Chaire, de Foussoubie et de la Minoterie).

b) La conductivité et la minéralisation

La conductivité, étroitement liée à la minéralisation totale d'une eau, est un paramètre physique intéressant à étudier. Cette mesure représentative d'une eau est facile à réaliser et d'une très bonne précision.

Les eaux du karst urgonien des Gras sont très conductrices, comprises entre 400 et 600 μ S. Parmi les eaux les plus conductrices, dépassant toujours 500 μ S, on peut distinguer :

- des eaux dont la minéralisation est essentiellement liée aux ions de l'équilibre des carbonates (HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}) : ce sont les sources de Vanmalle, la Dragonnière, les évents de Gournier et de la Guigonne et principalement la source de la Fare ;

- des eaux dont la "fraction carbonatée" est moins prépondérante comme pour les sources de Tourne et du Passeron.

A un degré moindre de minéralisation, on peut également distinguer :

- des eaux essentiellement bicarbonatées calciques : sources de l'Aiguille, du Tiourre, du Bas-Moulin ;

- des eaux à la minéralisation plus équilibrée : sources du Boeuf et de la Chaire.

L'évent de Foussoubie présente des teneurs fluctuantes du fait de ses différentes sources d'alimentation et prend une place intermédiaire dans cette classification.

Un diagramme conductivité-teneur en bicarbonates a été réalisé pour les émergences des gorges (fig. 79). Il s'appuie sur des analyses réalisées en 1983. Les champs des différentes émergences se superposent. Des variations apparaissent cependant selon la minéralisation carbonatée de la source et le pourcentage de celle-ci par rapport à la minéralisation totale.

La conductivité permet d'autre part, aisément, de mettre en évidence les sources issues d'un mélange des eaux du karst et des eaux de l'Ardèche. Les eaux de la rivière, comprises entre 150 et 200 μ S, alimentent plusieurs émergences par des pertes souterraines. Les sources à alimentation mixte comme les sources de Richemale, du Crapaud, de l'Ecluse, connaissent alors des conductivités intermédiaires proches de 300 μ S.

Quelques analyses ont également été réalisées sur des émergences provenant d'autres formations géologiques : Hauterivien et Ludien (source de Pierre Brune). Les mesures effectuées à l'étiage montrent des minéralisations plus faibles de l'ordre de 350 à 400 μ S. Un diagramme conductivité-teneur en bicarbonates replace ces différentes analyses autour du domaine des émergences urgoniennes (fig. 80). Les pertes de ruisseaux ont également été signalées. Elles constituent une famille d'eaux plus ou moins minéralisées de la perte du Rieussec à la Goule de Foussoubie. Ce domaine montre cependant une minéralisation plus équilibrée que celle des émergences urgoniennes.

c) Le pH et le gaz carbonique dissous

Ces deux paramètres interdépendants jouent un rôle déterminant dans l'équilibre des carbonates et donc dans l'acquisition de l'essentiel de la minéralisation des sources karstiques. La solubilité des carbonates ne peut être effective qu'en présence de gaz carbonique dissous dans l'eau. C'est au niveau du sol que les eaux d'infiltration se chargent en gaz carbonique. Les connaissances actuelles sur les modalités de cette acquisition sont présentées par les travaux de M. BAKALOWICZ (1979). Les réactions de l'équilibre qui font intervenir les trois phases sont résumées dans le schéma de ROQUES in BAKALOWICZ :

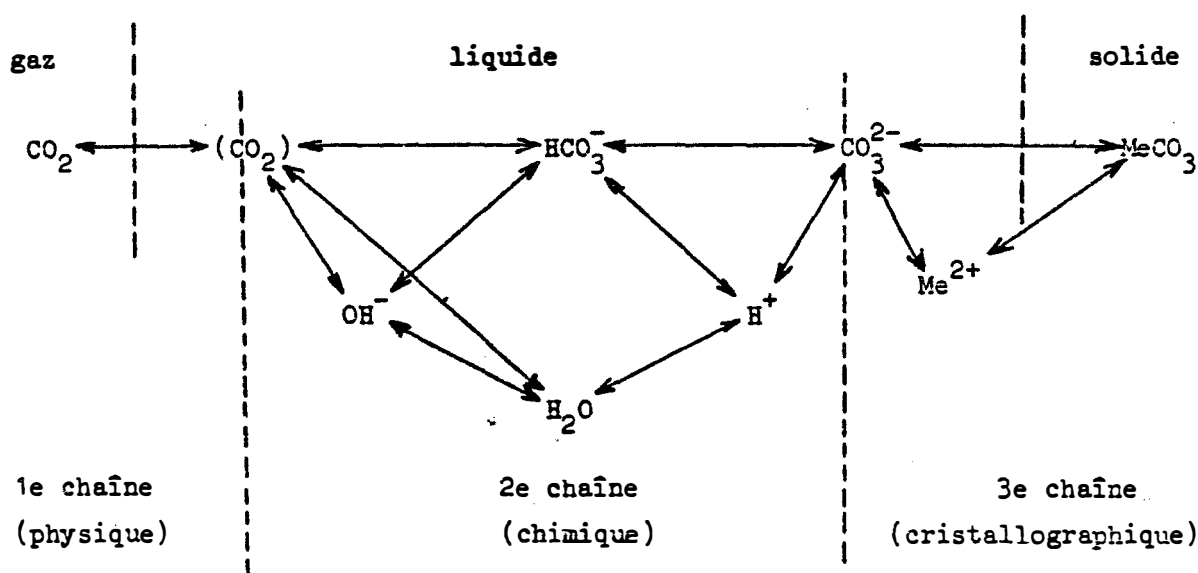


fig.79 : Diagramme conductivité-teneur en bicarbonates des émergences des gorges

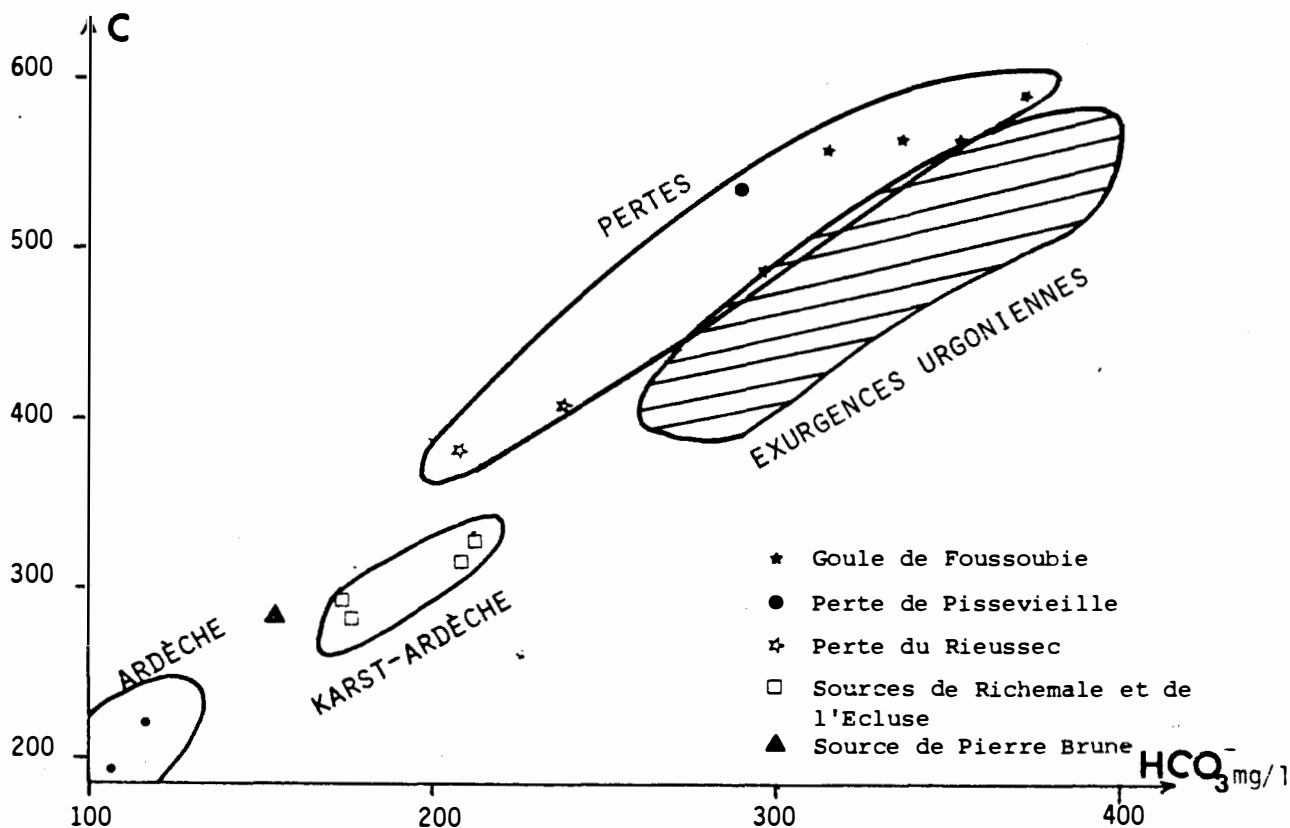
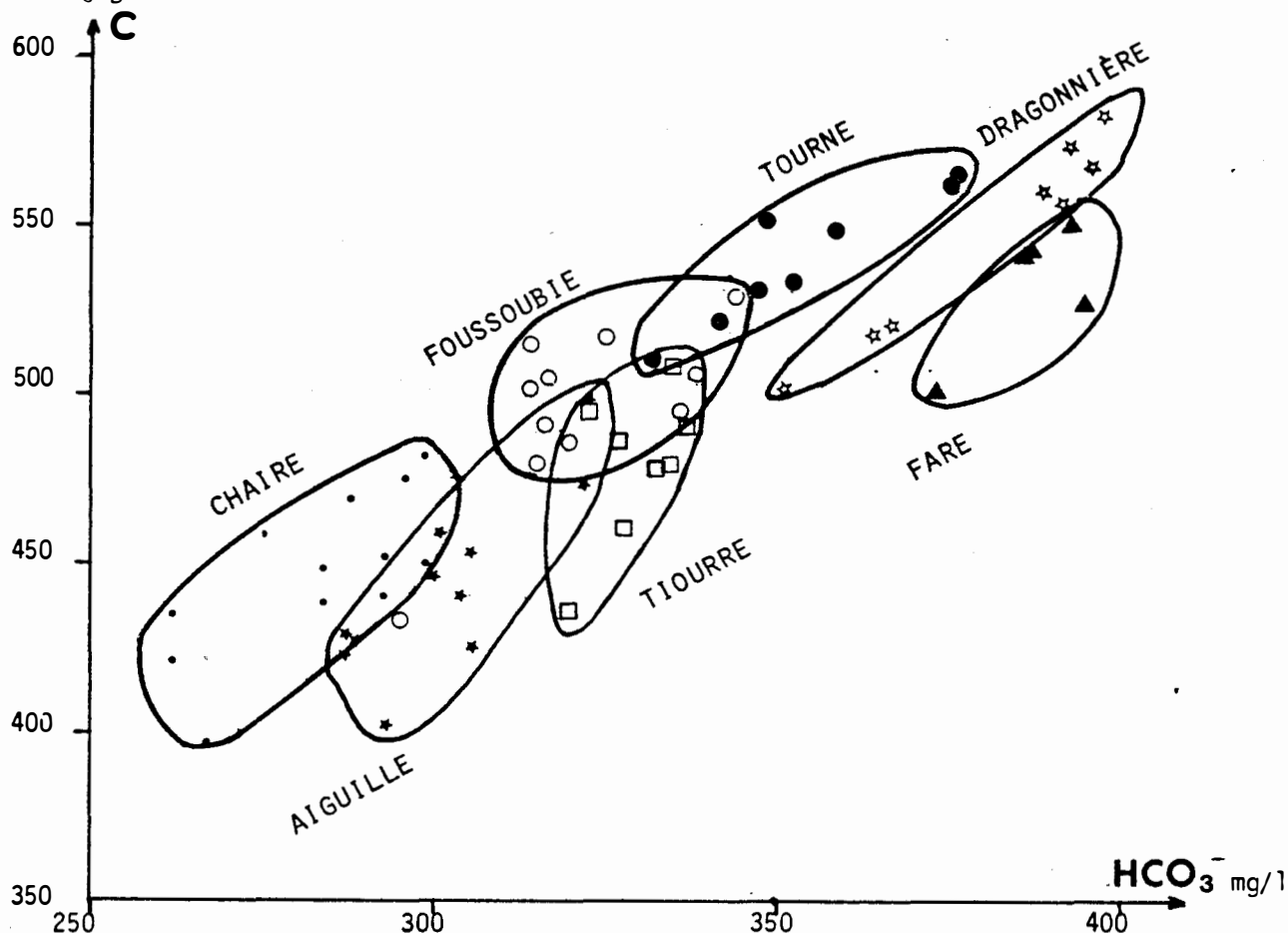


fig.80 : Diagramme conductivité-teneur en bicarbonates des émergences du massif des Gras.

La cinétique de ces réactions est dépendante de la réaction la plus lente qui est la mise en solution des carbonates. Elle est en moyenne au sein du karst de l'ordre de plusieurs jours. L'état d'une eau par rapport à cet équilibre peut être étudié par la mesure du pH ou celle de la pression en gaz carbonique : pCO_2 . Les caractéristiques d'une eau au transit rapide différeront de celles d'une eau ayant séjourné dans l'aquifère.

L'indice utilisé est le ΔpH :

$$\Delta pH = pH_m - pH_e = pH_m - pK_2 + pK_s = \log (Ca^{2+}) + \log (HCO_3^-) + \log (1 - K_5(SO_4^{2-})) + C$$

où pH_m est le pH mesuré et pH_e le pH d'équilibre ; K_2 , K_5 et K_s sont des constantes de dissociation et de solubilité.

Un ΔpH négatif va indiquer une eau sous-saturée marquant un aquifère sous-saturé, un ΔpH nul une eau à l'équilibre, un ΔpH positif une eau sursaturée qui ne reflète pas forcément l'état de l'aquifère. La réaction CO_2 dissous $\rightarrow CO_2$ gazeux étant rapide, cette libération peut en effet s'opérer à proximité de l'exutoire.

Il n'a pu être établi une série complète de mesures de pH et de ΔpH , mais des mesures de la pCO_2 ont alors été effectuées. La précision de cette méthode est cependant plus faible. La réalisation simultanée de ces deux mesures eut été plus enrichissante.

Date d'analyse	ΔpH			$pCO_2 \cdot 10^{-2} \text{ atm}$			
	23/01/83	1/03/83	22/03/83	20/04/83	20/05/83	27/07/83	01/09/83
CHAIRE	+0.15	+0.2	+0.1	1.2	1.4	1.5	1.9
FOUSSOUBIE	+0.3	+0.35	+0.25	1.8	/	/	1.5
AIGUILLE	+0.25	+0.25	+0.3	1.6	1.6	1.3	1.3
FARE	-0.05	/	+0.4	/	/	2.7	2.6
TIOURRE	-0.3	/	+0.4	1.6	2.2	/	2.0
TOURNE	/	/	+0.15	2.3	2.0	1.7	/

tableau 26 : Mesures de terrain de l'indice de saturation ΔpH et de la pression en gaz carbonique dissous pCO_2

Ces valeurs très ponctuelles ne traduisent pas les variations rapides que peuvent connaître les systèmes karstiques. Elles reflètent cependant la tendance des émergences. Les analyses hivernales montrent un état de sursaturation pour la majorité des émergences, dû probablement

à la faible production biologique en surface. Les teneurs en gaz carbonique dissous, exprimées par leur pression en gaz équilibrante, sont élevées par rapport à celles connues dans la littérature. La température de l'air, relativement élevée, favorise la production de CO_2 dans le sol et corrélativement sa forte pression dans l'aquifère. Une exagération systématique de la mesure est également possible. L'étude de ces teneurs permet de distinguer des émergences riches en CO_2 dissous comme les sources de la Fare, de Tourne, de Vanmalle, de la Dragonnière et à un degré moindre, du Tiourre. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce caractère :

- Les autres émergences des gorges connaissent un dégazage plus poussé au voisinage de l'exutoire, responsable de la sursaturation de l'eau.

- Un transit rapide amène à l'exutoire des eaux n'ayant pas atteint l'équilibre avec les carbonates. Ce processus peut se réaliser en dehors des périodes d'étiage et d'autant plus facilement que le système est karstifié (c'est le cas du réseau de Tourne).

- La source de la Fare, du fait de sa structure, ne semble pas en mesure d'évacuer un tel type d'eau. Elle présente les plus fortes teneurs du massif en CO_2 dissous, ainsi que la température la plus élevée. Une partie du CO_2 dissous pourrait être d'origine profonde. Le gaz aurait atteint la surface après une remontée le long des mégafailles N 50.

Aucune arrivée gazeuse de gaz carbonique n'a été repérée au niveau des émergences des gorges. De très fortes anomalies ont par contre été enregistrées dans les mesures en gaz carbonique atmosphérique des avens du plateau des Gras (P. RENAULT, 1968). Pour cet auteur, ces teneurs ont une origine superficielle, liée à la faible ventilation des cavités. A un niveau plus régional, les travaux de J.C. GRILLOT et al. (1983), qui aboutissent à la superposition d'une carte de l'hydrothermalisme carbogazeux du Languedoc-Roussillon et d'une carte sismotectonique, présentent la portion méridionale de la faille des Cévennes comme une faille sans activité sismique et non affectée par l'hydrothermalisme. Seules, des mesures isotopiques pourraient cependant permettre de trancher sur l'origine du gaz carbonique dissous.

Le phénomène de dégazage à l'exutoire est particulièrement important en période d'étiage où les vitesses d'écoulement sont faibles. La source de l'Aiguille voit ainsi sa pCO_2 diminuer durant le tarissement. L'eau incrustante est alors responsable de la formation de tufs.

d) Les sulfates

Les ions sulfates peuvent provenir de diverses origines :

- de la dissolution de l'anhydrite Ca SO_4 ;
- de pluies acides après oxydation du soufre atmosphérique, lui-même résidu de combustions ;
- de l'oxydation du soufre de la pyrite.

Il s'agit là de l'origine la plus fréquente des sulfates dans les roches carbonatées. La mise en solution de ces ions résulte d'une succession de réactions lentes. Ils marquent donc des eaux à long temps de séjour.

Les teneurs en sulfates différencient les émergences des gorges. Les plus fortes teneurs rencontrées (supérieures à 50 mg/l) ont été mesurées sur les différentes pertes du plateau : Goule de Foussoubie, pertes de Pissevieille et du Rieussec. Les émergences alimentées par ces écoulements présentent des concentrations en sulfates élevées en rapport avec l'importance de ces circulations : sources de Foussoubie, de la Chaire et du Boeuf. Les sulfates ne proviennent pas alors de la masse carbonatée mais des niveaux marneux du plateau (Aptien marneux, Crétacé supérieur, Hauterivien). Les sources de la bordure orientale : sources du Passeron et de Tourne sont également riches en sulfates. Leur origine semble également superficielle, liée à la percolation dans les niveaux plus marneux du Bédoulien supérieur. Les émergences du centre des gorges possèdent des teneurs faibles et moins fluctuantes : sources de l'Aiguille, du Tiourre, de la Dragonnière, de Vanmalle et même très faibles : source de la Fare.

e) Chlorures, sodium et potassium

Ces ions sont, dans le contexte étudié, presque exclusivement d'origine météorique, ce qui explique leurs faibles teneurs. L'évent de Foussoubie et les sources orientales de Tourne et du Passeron sont les plus chlorurées. L'origine de ces légères anomalies n'est pas expliquée. Le rapport sodium-potassium ne présente pas de variations significatives entre les émergences. La teneur en potassium de l'Ardèche augmente lors de certaines périodes. Ces anomalies sont restituées au niveau des sources issues d'un mélange entre les eaux de la rivière et du karst : sources de Richemale, de l'Ecluse, ...

2 - P.2. Définition de faciès géochimiques

Plusieurs types de représentation de la composition chimique moyenne des eaux ont été utilisés. Il a été fait appel aux paramètres les plus discriminants de manière à bien individualiser les différents faciès existants.

a) Les diagrammes de SCHOELLER-BERKALOFF simplifiés

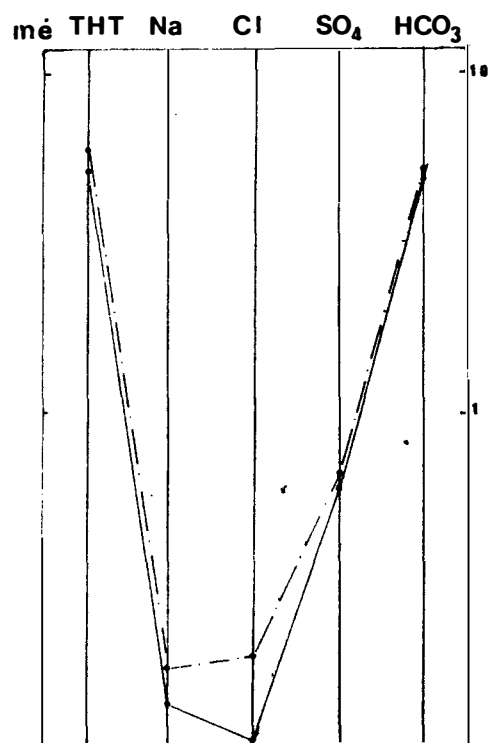
Ces diagrammes (fig. 81) qui permettent une vue d'ensemble de la composition chimique d'une eau ont été regroupés selon des faciès voisins. On distingue :

- des eaux très bicarbonatées, sulfatées et chlorurées : sources de Tourne et du Passeron ;
- des eaux très bicarbonatées, peu sulfatées et chlorurées : sources de la Dragonnière et de la Fare ;
- des eaux bicarbonatées, sulfatées : sources de la Chaire et de Foussoubie ;
- des eaux bicarbonatées, peu sulfatées et chlorurées : sources de l'Aiguille et du Tiourre.

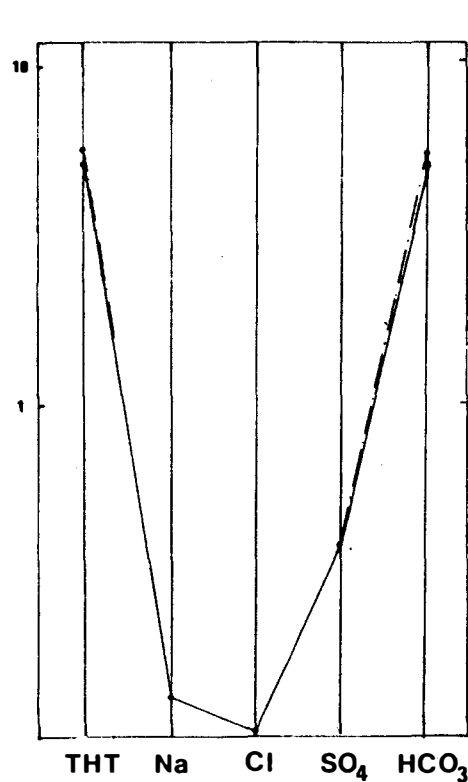
L'essentiel de cette première classification se résume à la part respective des ions bicarbonates et sulfates qu'il convient donc d'analyser.

b) Etude du rapport $\frac{r \text{ HCO}_3^-}{r \text{ SO}_4^{2-}}$

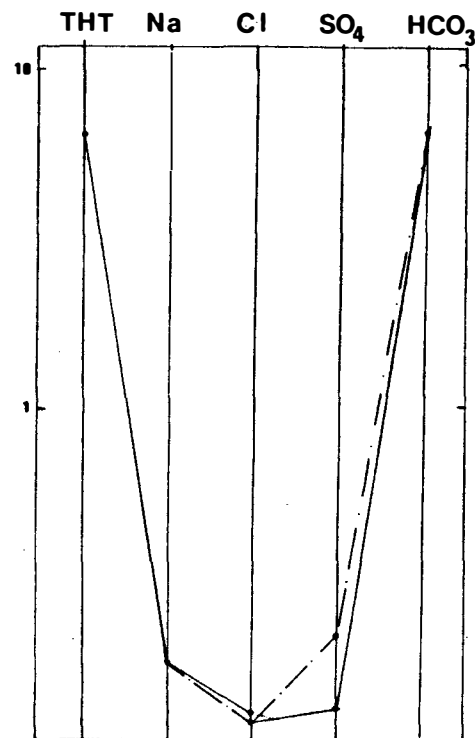
L'étude graphique de la conductivité, c'est à dire de la minéralisation totale en fonction de la teneur en bicarbonates a permis de différencier plusieurs familles d'émergences (§ 2.1.1.b). Il apparaît dans ce diagramme que le rapport entre la "fraction carbonatée" (HCO_3^- ou HCO_3^- et Ca^{2+})



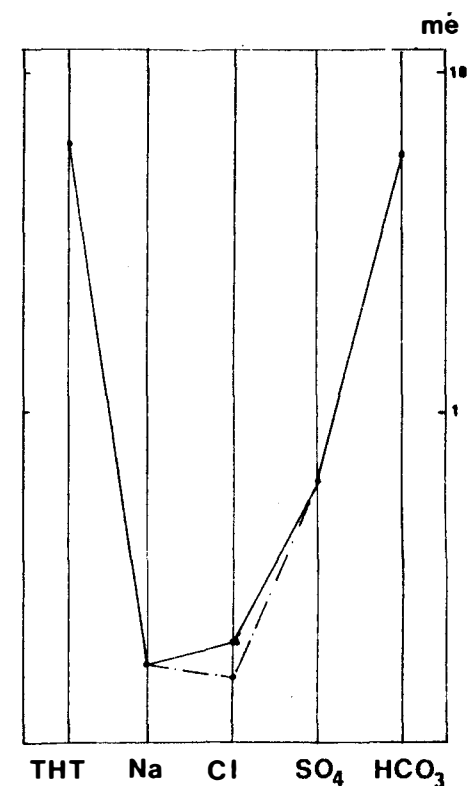
—— CHAIRE
 - - - FOUSSOUBIE



—— AIGUILLE
 - - - TIOURRE



—— FARE
 - - - DRAGONNIERE



—— PASSERON
 - - - TOURNE

fig.81 : Diagrammes simplifiés de SCHÖELLER-BERKALÖFF.

et la minéralisation totale est déterminant. L'ion sulfate étant l'ion le plus représenté après les ions du système $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CaCO}_3$, sa comparaison avec l'ion bicarbonate affine cette première classification. L'étude du rapport $r \text{HCO}_3^- / r \text{SO}_4^{2-}$ permet d'individualiser 3 familles d'émergences selon que ce rapport est inférieur à 10, compris entre 10 et 20 ou supérieur à 30.

Emergences	CHAIRE	FOUSSOUBIE	TOURNE	PASSERON	AIGUILLE
$r \text{HCO}_3^- / r \text{SO}_4^{2-}$	7.9	8.1	9.2	9.2	12.6
Emergences	TIOURRE	BAS-MOULIN	VANMALLE	DRAGONNIERE	FARE
$r \text{HCO}_3^- / r \text{SO}_4^{2-}$	13.8	13.5	30.0	31.0	51.8

tableau 27 : Valeurs du rapport caractéristique moyen $r \text{HCO}_3^- / r \text{SO}_4^{2-}$ pour différentes émergences des gorges.

Ce rapport semble évoluer selon la nature géologique du bassin versant de l'émergence, d'un pôle possédant une composante marneuse vers un pôle exclusivement carbonaté. La source de l'Aiguille montre une affinité marquée avec les sources du Tiourre et du Bas-Moulin, alimentées en partie par des terrains hauteriviens. Cette similitude tendrait à prouver une alimentation de cette émergence par les terrains hauteriviens de la dépression de Saint-Remèze, ce qui n'avait pas été confirmé par les expériences de traçage. L'adjonction du paramètre température que l'on a vu très sélectif, paraît intéressante. Il évolue en effet globalement de la même manière que le rapport étudié. Quatre familles peuvent être distinguées sur le diagramme $r \text{HCO}_3^- / r \text{SO}_4^{2-} = f(T)$ (fig. 82) :

1. Les résurgences de la rive droite des gorges. Les sources de la Chaire, du Boeuf et de Foussoubie sont alimentées en partie par les pertes des ruisseaux qui drainent les terrains du Ludien et du Crétacé supérieur. Ces sont des réseaux bien développés.

2. Les sources orientales. Les sources de Tourne et du Passeron possèdent une minéralisation plus diversifiée, probablement liée à la nature plus marneuse des couches aptiennes affleurant sur le plateau, ainsi qu'à la perte alimentant la source de Tourne. Ces émergences sont en relation avec des aquifères très karstifiés.

3. Les sources de la zone de transition Urgonien-Hauterivien. Les émergences de l'Aiguille, du Bas-Moulin et du Tiourre sont issues d'aquifères peu karstifiés présentant des teneurs moyennes stables dans les différents éléments.

4. Les sources de la partie centrale des gorges. Ces émergences situées sous une épaisse série de calcaires urgoniens sont directement alimentées par les précipitations. Elles sont relativement chaudes, très bicarbonatées et peu sulfatées, et possèdent une forte teneur en gaz carbonique dissous. Les sources de Vanmalle, de la Fare, de la Dragonnière sont les plus caractéristiques.

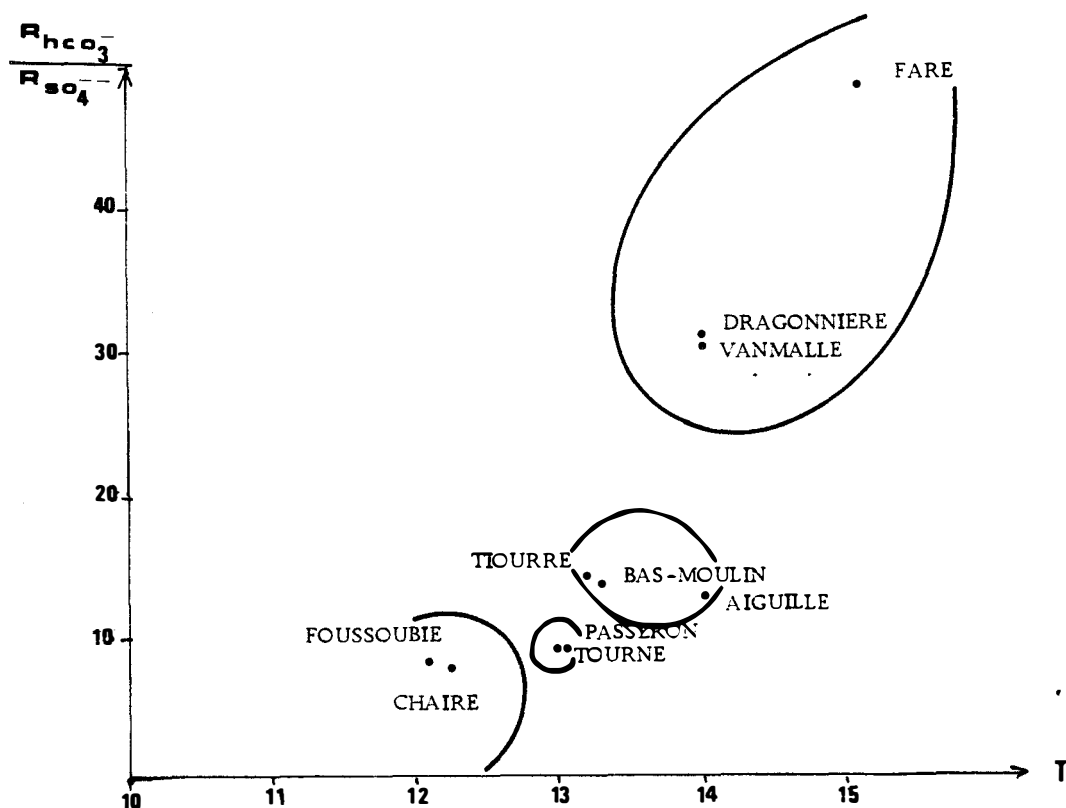


fig.82 : Diagramme température moyenne-rapport caractéristique $r\text{HCO}_3^- / r\text{SO}_4^{2-}$.

L'émergence de la Fare prend toutefois une place remarquable dans le diagramme utilisé. Cet aquifère peu karstifié doit être très faiblement alimenté par des eaux d'infiltration rapide. Il est possible qu'il soit atteint par des venues de gaz carbonique profond.

Deux types d'émergences restent difficilement classables du point de vue de leurs propriétés hydrochimiques.

- Les émergences immergées de Gournier, de la Guigonne et du Castor, qui figurent parmi les plus importants réseaux des gorges, ne peuvent être régulièrement contrôlées. Les prélèvements en "siphon", c'est à dire au toit de la zone noyée, sont peu représentatifs car les paramètres physico-chimiques sont modifiés par les échanges avec l'air. Les mesures ponctuelles en crue tendraient à rattacher ces exurgences au dernier groupe.

- Les analyses des eaux issues du mélange des eaux du karst et de l'Ardèche ne peuvent permettre de caractériser les apports propres du karst. C'est le cas des sources de Richemale, du Crapaud et de l'Ecluse.

2 - 2. EVOLUTION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

2 - 2.1. Sources de la Chaire et du Boeuf (fig. 83)

a) La température

Les variations de température de la source de la Chaire présentent une forte amplitude intraannuelle : 3°5 C. Ces variations sont beaucoup plus liées aux précipitations et au régime des débits qu'à la seule évolution de la température de l'air. Après une longue remontée durant l'été d'été permettant d'atteindre le maximum absolu de 13°5 C, les premières pluies abaissent progressivement la température. L'été d'hiver est marqué par une remontée des températures : 12° en janvier 1983, 12°3 en janvier 1984. Les crues qui suivent ces tarissements abaissent considérablement les températures jusqu'aux minimas absolus proches de 10°0.

Deux types d'alimentation rythment l'évolution des températures:

- une alimentation due à l'infiltration directe, liée en partie à la perte du Rieussec (cette relation a été prouvée par traçage). Celle-ci provoque des abaissements par à-coups de la température;
- une alimentation par des réserves stockées en profondeur, proches de l'équilibre thermique avec la roche et responsables des maxima d'été.

L'amplitude des variations à la source du Boeuf est plus faible: 1°7. Elle traduit une influence moindre de l'alimentation par la perte et une karstification moins organisée à l'amont de l'émergence. Les maxima s'observent en fin de saison chaude : 13°7 ; les minimas à l'été de saison froide : 12° en janvier 1983, 12°3 en janvier 1984.

Ces dernières valeurs sont identiques à celles de la Chaire et concernent des eaux aux caractéristiques chimiques rigoureusement identiques. Ce sont donc des réserves communes aux deux sources qui sont mises à contribution lors d'étés prononcés. Elles présentent des températures inférieures à celles de la source du Boeuf en moyennes et hautes eaux. On doit donc raisonner pour cette source sur trois types d'alimentation:

- une alimentation par infiltration directe par l'intermédiaire de la perte du Rieussec. Celle-ci a été mise en évidence par traçage, la réponse est toutefois plus lente que pour la source de la Chaire;
- une alimentation propre de la source, constituée d'eaux plus chaudes, aux réserves limitées situées près de l'exutoire. Des circulations plus lentes ou une profondeur légèrement supérieure compatible avec la structure (flanc ouest d'un anticlinal) peuvent expliquer cette différence;
- des réserves communes aux deux sources de température peu élevée et donc liées à la source de la Chaire correspondent à des systèmes annexes rechargés en périodes de hautes eaux (fig. 84).

b) La conductivité

La conductivité augmente fortement pendant les crues en liaison avec les infiltrations rapides de la perte du Rieussec. Ce phénomène est beaucoup plus accentué pour la source de la Chaire. L'été d'été est également marqué par une remontée des concentrations, due à une augmentation du temps de séjour des eaux dans la zone noyée. Les étés d'hiver qui correspondent à une période de faible production biologique et donc de gaz carbonique, voient une diminution de la teneur en bicarbonates et une baisse de la conductivité.

CHAIRE - BOEUF

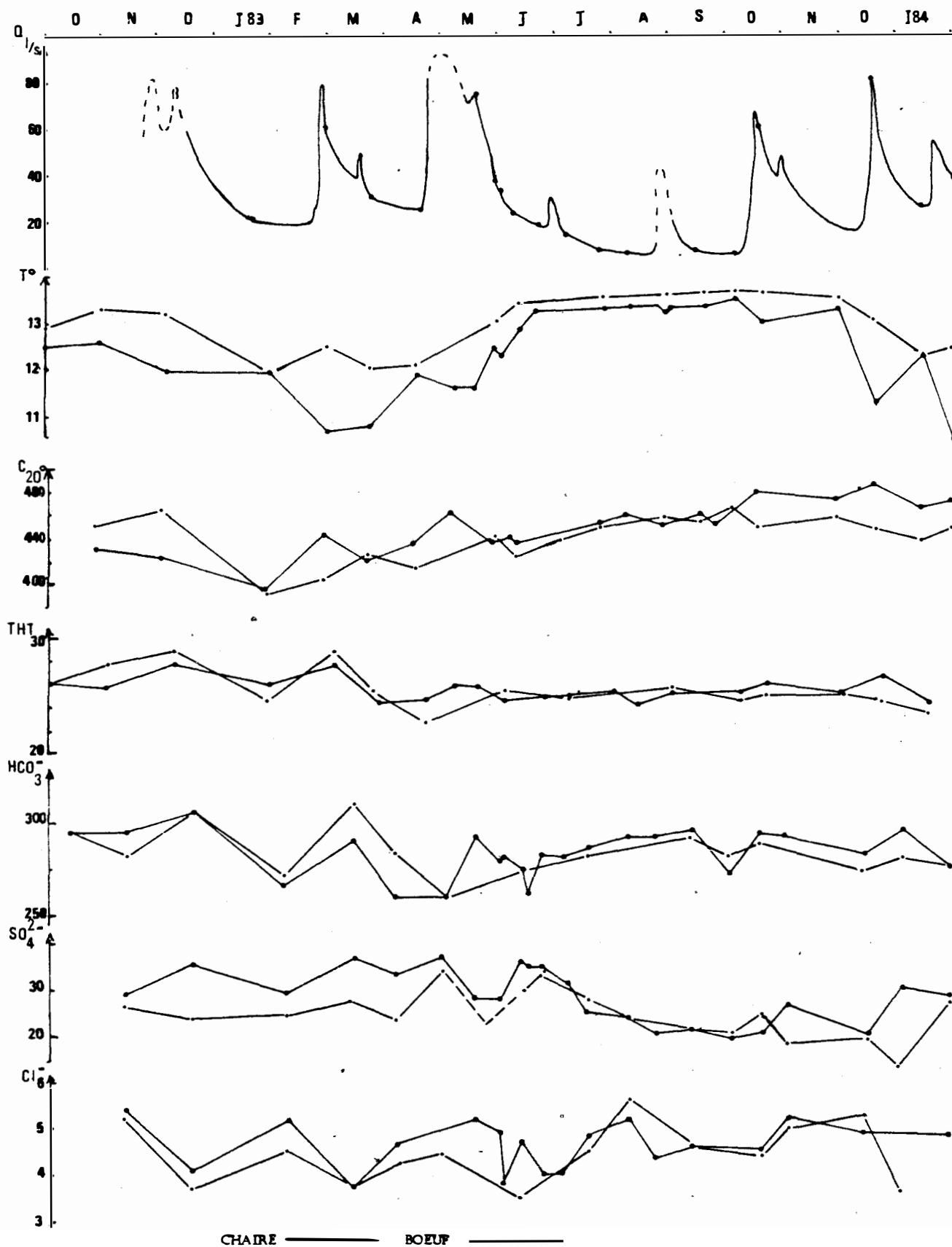


fig. 83 : Evolution des paramètres géochimiques des sources de la Chaire et du Boeuf.

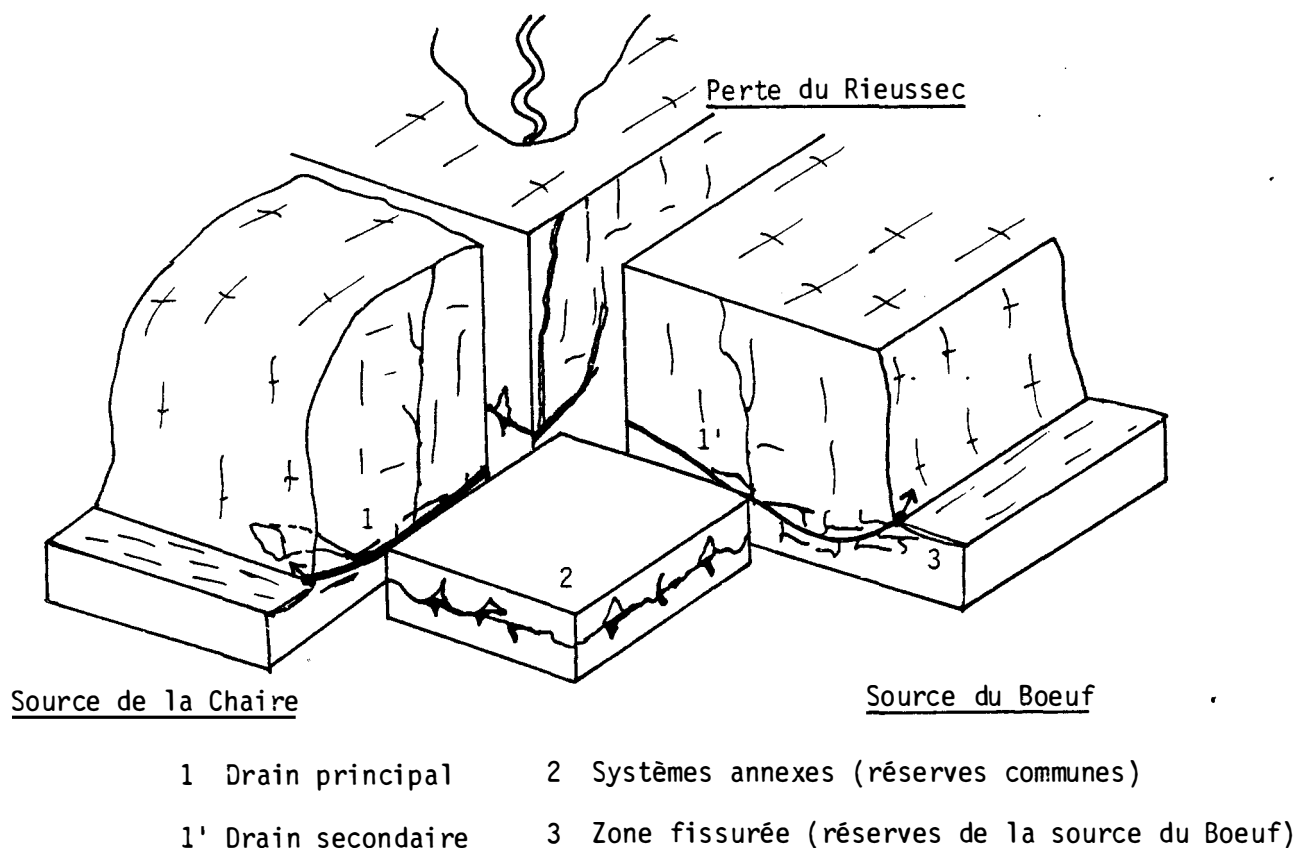


fig. 84 : Structure du système karstique des sources de la Chaire et du Boeuf.

L'existence des trois types de masses d'eaux se trouve vérifiée par les variations de ce paramètre à chacun des exutoires lors des différents événements hydrologiques.

c) Les sulfates

Les teneurs en sulfates présentent des valeurs relativement élevées pour le massif des Gras : de 22 à 42 mg/l. Les fortes teneurs correspondent aux périodes de crue et à l'infiltration directe du ruisseau du Rieussec (58 mg/l en avril 1983). Durant l'étiage d'été, la concentration diminue jusqu'à un palier de 20 mg/l, caractéristique de la zone noyée. La source du Boeuf est moins sulfatée en période de crue du fait de l'influence plus modérée de l'alimentation par la perte.

d) Chlorures, sodium, potassium

Les oscillations intra-annuelles de ces différents ions demeurent peu significatives.

2 - 2.2. L'évent de Foussoubie (fig. 85)

a) La température

Elle présente de fortes variations d'amplitude liées à l'alimentation par une perte : 9°8, 10°1 durant les crues qui ont suivi les étiages d'hiver de janvier 1983 et 1984 ; 12°1 en étiage d'hiver, 12°3 en été.

FOUSSOUBIE.

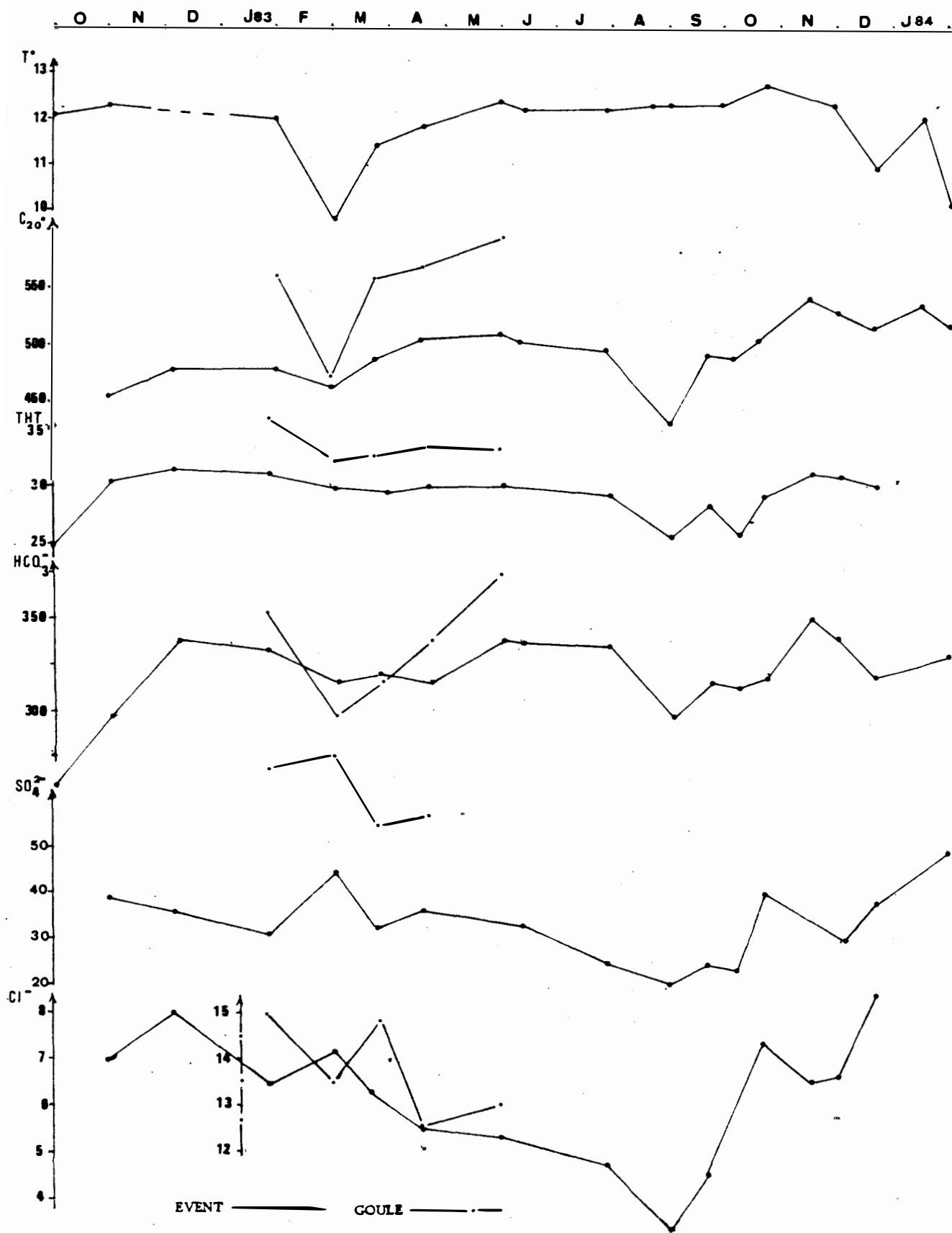


fig.85 : Evolution des paramètres géochimiques de l'évent de Fousoubie.

Ces températures d'étiage sont relativement faibles, elles traduisent une karstification importante et la mise en contact de la zone noyée avec un grand volume de vides. Les pluies de la saison chaude créent une augmentation des températures par la mise en circulation de volumes d'eaux ayant longuement séjournés dans la zone non saturée.

b) La conductivité et la minéralisation carbonatée

Les variations de la conductivité sont régies par les conditions hydrodynamiques, c'est à dire par la part relative entre l'alimentation par infiltration directe (par la perte de la goule de Foussoubie) et les eaux provenant de la zone noyée. Cette dernière fournit des eaux très minéralisées, essentiellement bicarbonatées, prédominantes en étiage. En régime normal, la goule introduit des eaux également très conductrices mais à la minéralisation plus équilibrée. En crue, ces eaux très pauvres en bicarbonates constituent la quasi-totalité de l'écoulement de l'évent où la conductivité chute. Ceci est particulièrement net durant les pluies de fin d'étiage quand la zone noyée est réduite.

c) Les sulfates et les chlorures

Les eaux de la goule sont fortement sulfatées et chlorurées. La teneur en ces ions à l'évent dépendra donc directement du régime des débits. Les teneurs fortes durant la recharge diminuent pendant le tarissement. Les premières pluies de fin de saison chaude augmentent ces concentrations, particulièrement au niveau des chlorures reconcentrés dans les premiers mètres du sous-sol.

2 - 2.3. La source de l'Aiguille (fig. 86)

a) La température

L'amplitude des variations est infime : 0,45°C. Les températures maximales sont atteintes en période d'étiage : 14°1 en janvier 1983, 14°15 en saison chaude. Cette température correspond à la température d'équilibre entre la roche et l'eau de la zone noyée.

En période de crue, l'influence des eaux d'infiltration est minime: le plus grand écart est de -0,3°C en décembre 1983. Il n'existe donc pas d'évacuation rapide de ces eaux qui rejoignent une nappe jouant le rôle de tampon.

b) La conductivité

Elle est essentiellement liée aux ions de l'équilibre des carbonates: HCO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} . On observe une augmentation systématique de la conductivité en crue, traduisant l'expulsion d'eaux ayant séjourné dans l'aquifère: nous n'avons jamais détecté d'eaux moins minéralisées dues à une infiltration rapide ou légèrement retardée. C'est un nouvel argument pour une nappe de fissures. Ces eaux sont généralement sursaturées, donc à long temps de séjour mis à part à la fin du printemps où le renouvellement est plus rapide.

Les faibles vitesses d'écoulement expliquent la diminution de la minéralisation en étiage prolongé de saison chaude. Un départ de gaz carbonique s'effectue. Il s'accompagne d'un dépôt de calcite, attesté par l'abondance de tufs. Corrélativement, la teneur en bicarbonates s'abaisse.

AIGUILLE

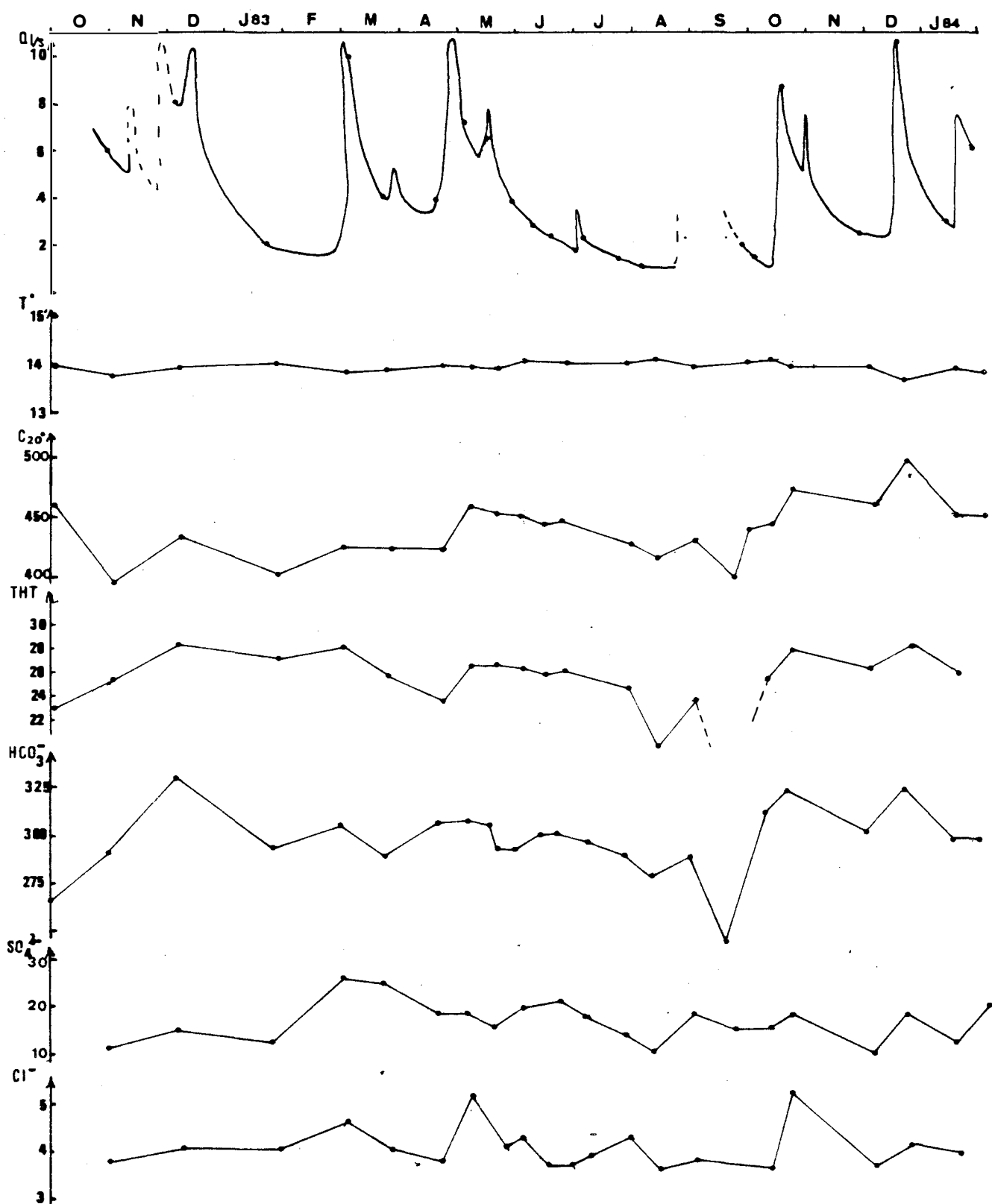


fig.86 : Evolution des paramètres géochimiques de la source de l'Aiguille.

c) Les sulfates et les chlorures

Les pics de ces anions correspondent aux périodes de crues, mais les oscillations demeurent de faible amplitude.

2 - 2.4. Les sources du Tiourre et du Bas-Moulin (fig. 87)

Ces deux sources présentent des variations similaires à la source de l'Aiguille et de faible amplitude (moins de 1°C pour les températures). Ce sont là, des caractères de sources de calcaires fissurés, ce qui est en accord avec leur position stratigraphique : dans l'Hauterivien pour la source du Bas-Moulin, le Barrémien inférieur pour la source du Tiourre.

D'un point de vue chimique, la relation mise en évidence par traçage entre la perte du ruisseau de Pissevieille et ces deux sources n'est pas confirmée. Il n'a pas été décelé de masses d'eaux chimiquement différentes, caractéristiques d'une infiltration rapide, lors des prélèvements de crue. Le pas de temps d'observation trop large est probablement responsable de cette imprécision. Seules les fortes recharges doivent toutefois être marquées.

2 - 2.5. La source de la Fare (fig. 88)

a) La température

L'amplitude des variations de température est faible : inférieure à 0,45°C. Les températures maximales les plus élevées de la région sont de 15-45°C en étiage d'hiver et d'été : c'est la température d'équilibre avec la roche.

b) La conductivité et la minéralisation carbonatée

Ces valeurs relativement constantes peuvent chuter en fin d'étiage du fait de la libération du gaz carbonique dissous. Notons que ces eaux sont relativement riches en gaz toute l'année, ce qui pourrait laisser supposer des apports profonds le long de l'accident de Saint-Remèze.

La teneur en sulfates est particulièrement faible et ce, principalement durant l'étiage.

Les faibles variations de température et de teneurs en ions attestent l'existence d'un aquifère fissuré.

2 - 2.6. La source de la Dragonnière (fig. 89)

a) La température

L'amplitude des variations est faible : inférieure à 1°C, d'autant plus que les fortes températures d'été sont liées aux circulations très lentes à proximité de l'exutoire. A l'étiage de janvier 1984, elle atteint 14-15°C, ce qui correspond à la température d'équilibre eau-roche. En période de crue, elle s'abaisse jusqu'à 13-7°C : valeur relativement élevée qui ne semble pas indiquer une grande facilité d'évacuation de l'infiltration rapide.

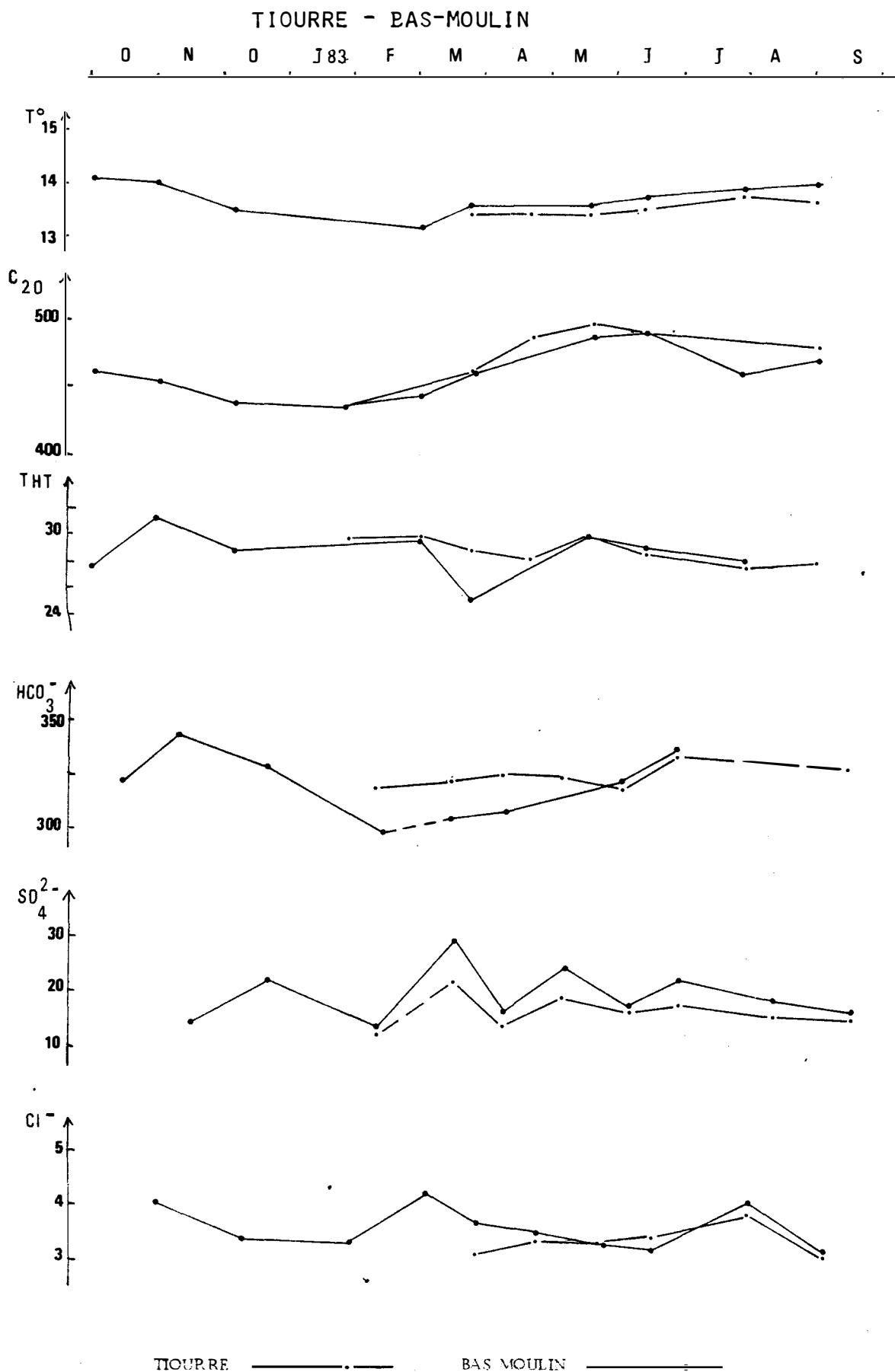


fig.87 : Evolution des paramètres géochimiques des sources du Tiourre et du Bas-Moulin.

FARE - VANMALLE

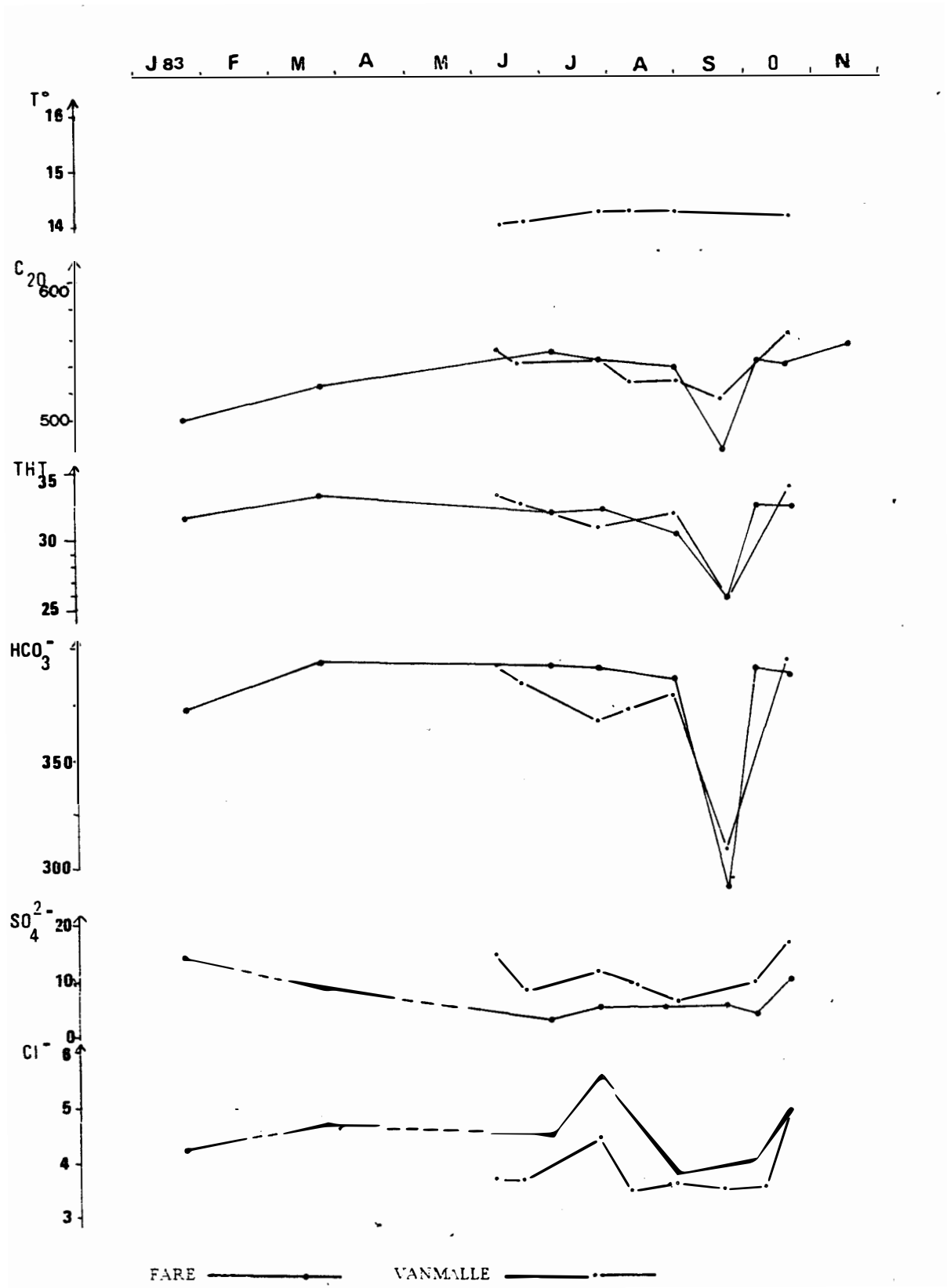


fig.88 : Evolution des paramètres géochimiques des sources de la Fare et de Vanmalle.

DRAGONNIERE

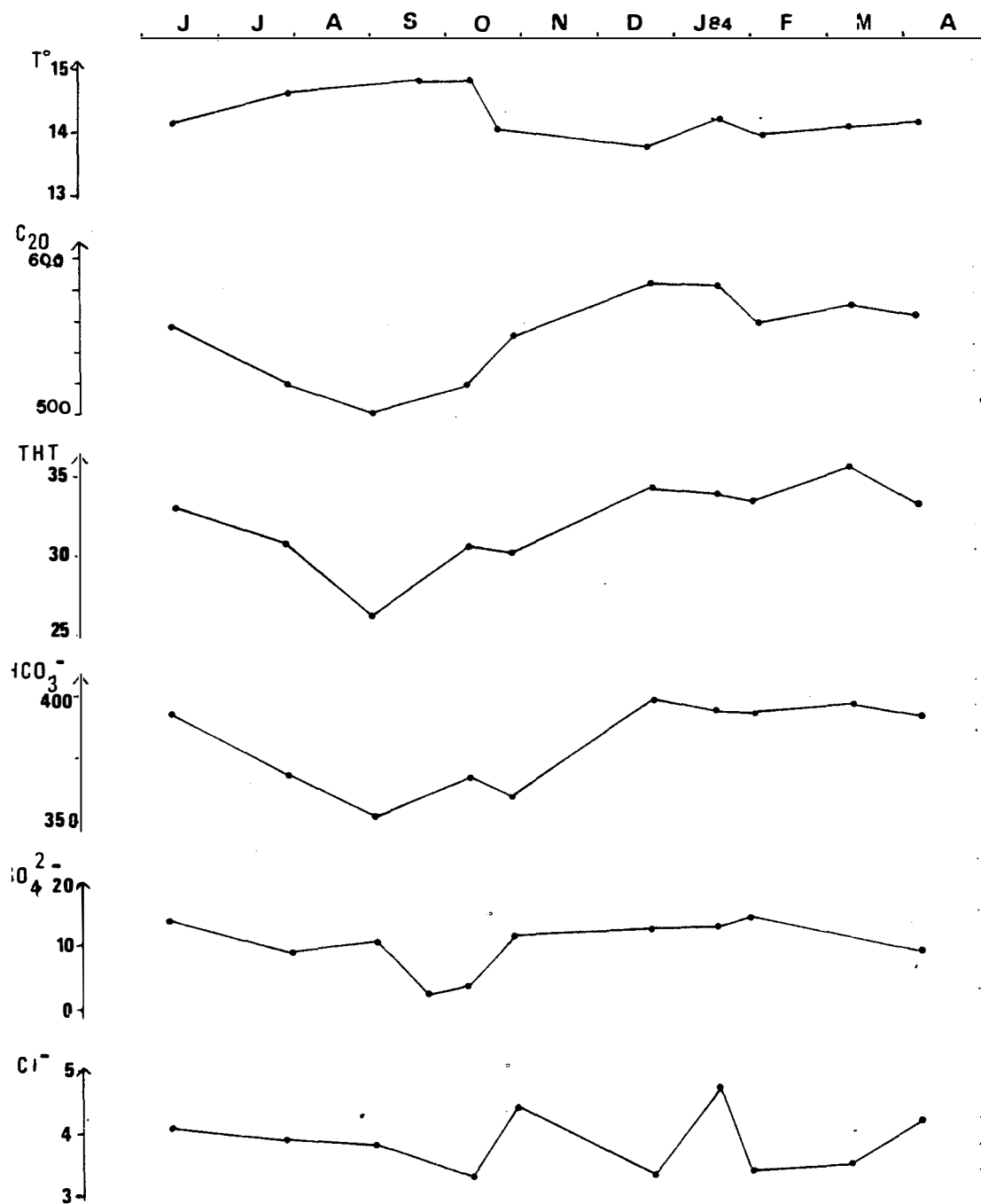


fig.89 : Evolution des paramètres géochimiques de la source de la Dragonnière.

b) La conductivité et la minéralisation carbonatée

La conductivité des eaux diminue durant l'étiage d'été du fait des faibles débits et du dégazage corrélatif du gaz carbonique. Les pluies de fin d'étiage (août, octobre 1983) abaissent les teneurs en bicarbonates: l'infiltration rapide gagne l'exutoire sans que la zone noyée, d'extension réduite après le tarissement, ne fasse barrière comme en hautes eaux. La minéralisation augmente par la suite lors de la recharge.

c) Les sulfates et les chlorures

Ces valeurs sont faibles et leur variabilité étroite. Atteignant le minimum en fin d'étiage d'été, elles augmentent lors de la première crue.

Ces faibles teneurs en chlorures et sulfates semblent prouver que la zone d'alimentation de cette source est exclusivement urgonienne.

Ce système, s'il ne semble pas réellement hiérarchisé, présente toutefois une karstification à l'amont de l'exutoire, donnant naissance à une zone noyée limitée.

2 - 2.7. La source de Tourne

A titre de comparaison, il est intéressant de noter les caractéristiques de la plus grande émergence du massif.

La température présente des variations d'amplitude légèrement supérieures à 1° C. Les températures minimales s'observent au printemps durant la période de recharge, les températures maximales en fin d'étiage et lors des crues de fin de saison chaude qui chassent les eaux de la zone noyée en équilibre avec la température de la roche. La minéralisation qui atteint sa valeur minimale durant la recharge augmente régulièrement durant le tarissement avec le temps de séjour de l'eau. Les teneurs en sulfates, plutôt élevées durant l'étiage, semblent marquer, contrairement aux émergences précédentes, des eaux de la zone noyée. Ils proviendraient des couches urgoniennes profondes saturées et non des formations non urgoniennes de surface.

2 - 3. COURBES DE DISTRIBUTION DES BICARBONATES ET EVALUATION DU DEGRE DE KARSTIFICATION

2 - 3.1. Principe de la méthode

Les travaux de M. BAKALOWICZ (1979) ont mis en évidence l'intérêt des courbes de distribution de la minéralisation ou d'un paramètre géochimique représentatif des variations saisonnières. La courbe des variations de la minéralisation peut être considérée comme une fonction aléatoire dont la courbe de distribution constitue une loi de probabilité. Cette distribution est en effet statistiquement représentative des différentes familles d'eaux qui gagnent l'exutoire au cours d'un cycle hydrologique. Son étude est donc en mesure de révéler des informations sur la structure et le fonctionnement du karst. L'analyse mathématique de ces courbes (susceptible de déboucher sur une quantification du degré de karstification),

s'avérant complexe, leur étude s'effectuera à partir d'une comparaison avec un catalogue de courbes (fig. 90). Deux caractères peuvent être retenus : l'étalement et la forme de la courbe. Un aquifère fissuré est caractérisé par une courbe unimodale à faible étalement. Une homogénéisation des masses d'eaux s'effectue en arrière de l'exutoire du fait de son faible espoir évacuateur. La courbe va gagner en complexité avec le développement de la karstification et l'aptitude du système karstique à libérer des eaux d'origines différentes.

Le paramètre géochimique utilisé a été la teneur en bicarbonates (fig. 91), étroitement liée à la minéralisation. De nombreux points de mesure sont nécessaires pour que les différents régimes hydrodynamique soient représentés. Pour les systèmes ne comportant que peu de données (n (15), seul l'étalement des valeurs sera représentatif.

2 - 3.2. La source de l'Aiguille

La courbe de distribution présente un aspect unimodal caractéristique qui confirme la notion d'aquifère de calcaires fissurés relativement homogène. L'étalement des valeurs traduit toutefois des conditions hydrodynamiques variables durant le cycle.

2 - 3.3. Les sources du Tiourre et de la Fare

Peu de valeurs sont disponibles pour ces deux émergences. L'aspect unimodal semble se dégager et caractériser des sources de calcaires fissurés.

2 - 3.4. L'évent de Foussoubie

La courbe de distribution plurimodale traduit l'existence d'un système karstique hiérarchisé. Le pic correspondant aux fortes teneurs en bicarbonates regroupe les eaux d'étiage ayant longuement séjournées dans l'aquifère. Les faibles concentrations sont à l'origine d'un mini-pic qui représente les eaux de l'infiltration directe au transit rapide. Le pic principal recoupe à la fois les eaux de mélange et les eaux provenant de l'infiltration lente.

2 - 3.5. La source de la Chaire

La courbe de distribution relativement étalée présente une allure bimodale. Le pic principal des eaux les plus bicarbonatées correspond aux périodes de crues et de décrues. Ce sont alors soit des eaux provenant de l'infiltration lente, soit des eaux de la zone noyée, expulsées. Le pic mineur regroupe des eaux de tarissement de la saison froide. L'échantillon de prélèvements semble insuffisant pour cette émergence pour dégager les grands traits de son fonctionnement.

2 - 3.6. La source de la Dragonnière

Cette courbe présente un aspect bimodal. Des eaux très bicarbonatées liées à l'infiltration lente en période de hautes et moyennes eaux constituent le pic principal. Le second pic individualise les eaux de la zone noyée en période d'étiage. L'exportation carbonatée semble davantage liée aux écoulements de la zone non saturée qu'à ceux de la zone noyée. C'est là un critère d'un stade de développement karstique jeune.

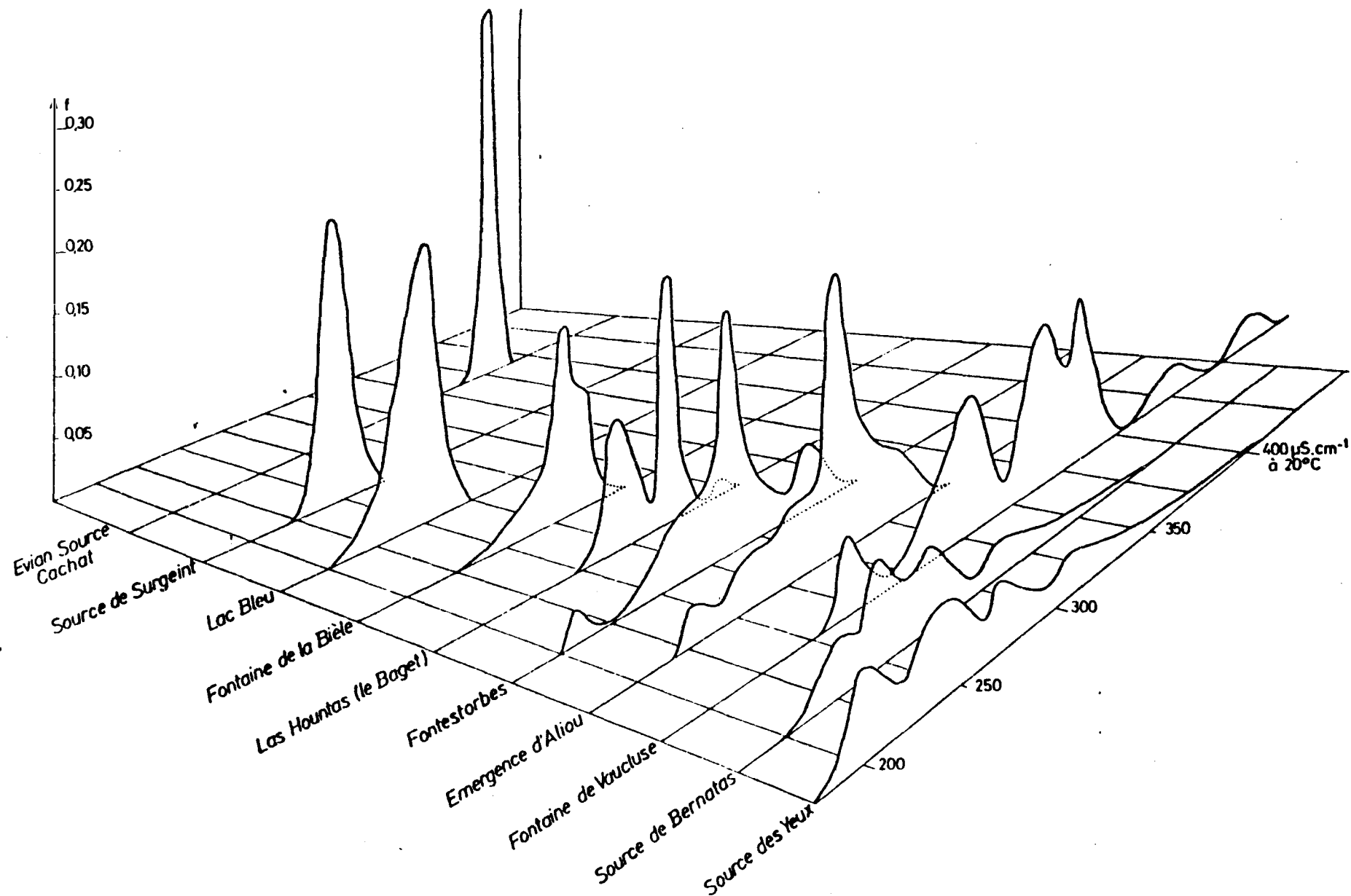


fig. 90 : Catalogue de distribution de fréquence des valeurs de la conductivité des eaux de sources d'aquifères carbonatés poreux (Evian-Cachat), fissurés (Surgeint, Lac Bleu) ou plus ou moins karstifiés. in Bakalowicz (1979)

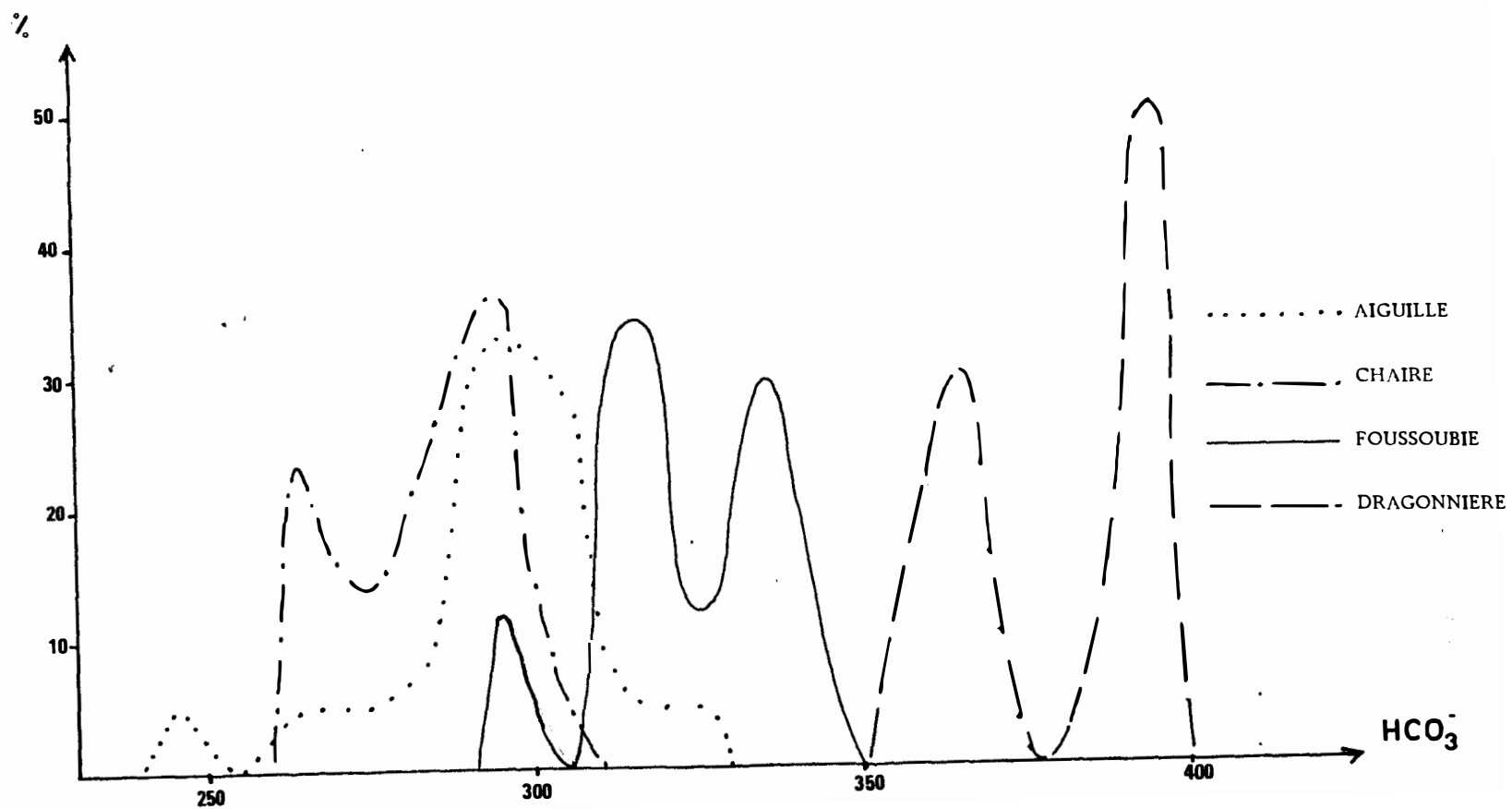


fig.91 : Courbes de distribution des bicarbonates.

2 - 3.7. Conclusion

Cette méthode a permis de mettre en évidence la faible structuration des systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche. Les types d'alimentation sont simples, la zone noyée limitée et le pouvoir évacuateur faible. L'étalement restreint et les formes simples des courbes de distribution le confirment. On peut toutefois distinguer des systèmes peu karstifiés comme ceux de l'Aiguille, de la Fare, du Tiourre, de systèmes de plus en plus hiérarchisés comme ceux de la Dragonnière, de la Chaire, puis de Foussoubie. Ce système paraît le plus évolué et différents types d'eaux se succèdent à son exutoire.

3 - ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE

L'étude des variations de débits des sources peut apporter des renseignements importants sur le système karstique considéré quant à son fonctionnement, sa structure et l'état de ses réserves. L'étude de la décrue et du tarissement paraît à ce titre la plus riche en informations.

3 - 1. RAPPELS THEORIQUES

Plusieurs auteurs ont tenté de donner une expression mathématique à cette courbe de récession des débits dans le cas de régimes non influencés: c'est à dire en l'absence de précipitations susceptibles de modifier leur évolution. Nous citerons MAILLET et MANGIN.

- Méthode de MAILLET

Par analogie avec les écoulements à travers une paroi poreuse sous leur propre charge, MAILLET propose une décroissance exponentielle $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$ où Q_0 est le débit initial, α le coefficient de tarissement traduit la plus ou moins grande aptitude du système à se vidanger.

Décrue et tarissement peuvent se décomposer en plusieurs portions de courbe ayant leur propre coefficient de tarissement. Elles correspondent à une vidange successive de gros conduits ou chenaux, de grandes puis petites fissures.

- Méthode de MANGIN

MANGIN distingue deux sous-systèmes au sein du karst :

- une zone noyée qui fournit un débit Q_r ;
- une zone non saturée où s'effectue une infiltration q .

La courbe de récession se divise en deux parties :

- la décrue où $Q = Q_r + q$;
- le tarissement où $q = 0$ et $Q = Q_r$, ce qui correspond à l'écoulement de base des cours d'eau superficiels.

Pour la zone noyée, la décroissance est exponentielle depuis la pointe de la crue où $Q_r = Q_{r0}$: $Q_r = Q_{r0} e^{-\alpha t}$.

L'infiltration est une fonction homographique $q = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$ qui s'obtient point par point en retranchant les valeurs de la courbe exponentielle de tarissement à celles de la courbe des débits obtenue.

$\eta = \frac{1}{t_i}$ est inversement proportionnel à la durée de la décrue t_i .

ϵ dépend de la concavité de la courbe d'infiltration.

calcul des réserves du karst noyé peut être effectué à partir de l'établissement du tarissement (soit au temps t_i où le débit est Q'_0). Il s'agit d'un volume dynamique responsable du débit à l'exutoire et non des réserves totales de la zone noyée.

$$V_D = \int_0^{\infty} Q_r dt = \int_0^{\infty} Q'_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{Q'_0}{\alpha}$$

Une précision doit être apportée sur la signification de ce volume de réserves. En milieu poreux et fissuré, le volume dynamique correspond aux réserves situées géométriquement au-dessus de l'exutoire. En milieu karstique, du fait de la répartition hétérogène des charges, ce volume ne peut être défini dans l'espace. C'est pourquoi sa signification est rattachée aux débits qu'il peut engendrer à l'exutoire.

3 - 2. ETUDE DES COURBES DE RECESSION DE L'ETE 1983

3 - 2.1. Conditions générales

L'étiage estival de l'année 1983 s'est révélé très favorable à une étude du tarissement. Il a fait suite à une recharge importante au cours du printemps : 118 mm de pluies à Vallon-Pont d'Arc en avril, 69mm en mai.

La décrue s'est amorcée le 19 mai, le tarissement qui lui a fait suite n'a alors été influencé que par deux épisodes pluvieux : le premier du 25 au 26 juin, le second du 23 août au 10 septembre. C'est au cours de cette dernière période et après une récession de 96 jours que l'étude s'est arrêtée sur la plupart des sources. Le tarissement s'est alors prolongé jusqu'au 15 octobre, soit au total sur 149 jours.

Les problèmes de mesures se sont posés sur de nombreuses émergences possédant des sorties en partie ou en totalité sous l'Ardèche et n'ont pu être réglés.

Les sources de la Chaire, de l'Aiguille, du Vallon, du Tiourre et plus succinctement de Vanmalle ont été suivies. La source de Tourne inférieure ou Goul de la Tannerie à Bourg-Saint-Andéol a également été contrôlée. Elle constitue en effet la plus grosse émergence régionale et, bien que située dans le bassin versant du Rhône, elle demeure un point de comparaison intéressant.

3 - 2.2. Source de l'Aiguille (fig. 92)

L'observation des hydrogrammes appelle plusieurs remarques :

- La décrue est de courte durée : $t_i = 7$ jours, la décroissance exponentielle s'installe alors avec un coefficient de tarissement $\alpha = 0,022$ qui reste constant en période non influencée.

- Après les deux grands épisodes pluvieux de l'été, le tarissement reprend immédiatement avec un coefficient quasiment identique au précédent. Ainsi, fin mai et début septembre, le tarissement se déroule de manière

AIGUILLE

Pluviométrie à vallon pont d'arc

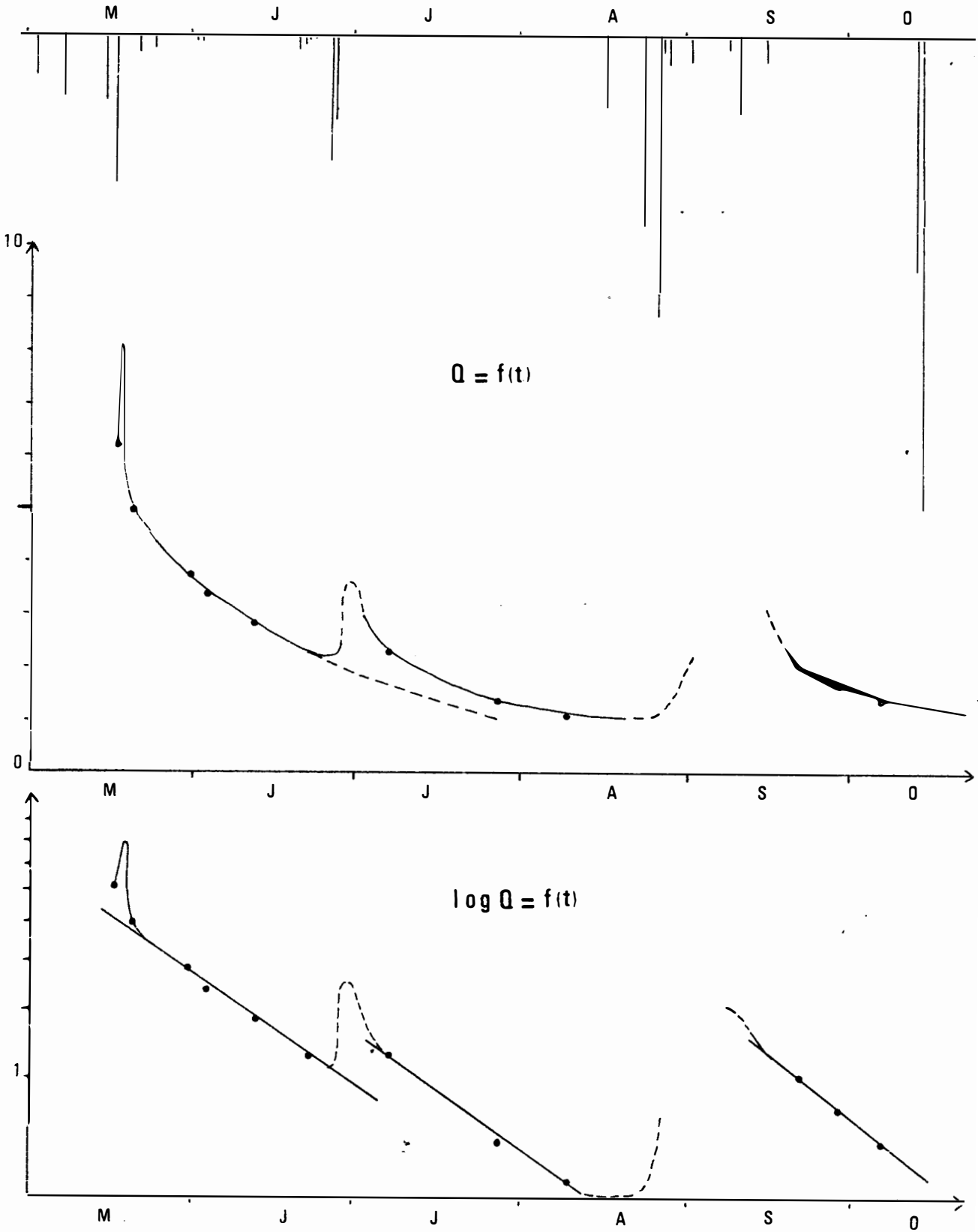


fig.92 : Etude du tarissement de la source d'Aiguille.

semblable alors que l'état des réserves est très différent : important en mai, déficitaire d'un tiers en septembre :

- en mai : $\alpha = 0,022$; $V_D = 17000 \text{ m}^3$,
- en septembre : $\alpha = 0,022$; $V_D = 11000 \text{ m}^3$.

- Cette reconstitution des réserves aux deux tiers est également remarquable, celles-ci étant au plus faibles fin août : $V_D \ll 3000 \text{ m}^3$.

Cet ensemble de résultats qualitatifs prouve qu'il existe, au niveau de la structure de l'aquifère, une certaine homogénéité. On ne peut donc raisonner dans la partie aval sur un grand collecteur se vidant préférentiellement puis drainant des zones de fissures. Le coefficient de tarissement étant toutefois assez élevé, le schéma le plus probable est celui d'une "nappe de grandes fissures" présentant une bonne perméabilité mais jouant un rôle de tampon notable. Ainsi, en cas de crue importante, c'est l'onde de crue qui augmente le débit à l'exutoire pour rapidement s'amortir.

Ces hypothèses s'accordent totalement avec les conditions géologiques puisque les calcaires aquifères urgoniens (ne présentant d'ailleurs pas de cavité à ce niveau) sont mis en contact avec les calcaires argileux hauteriviens par une faille-écran permettant donc une accumulation à l'amont de l'exutoire. Les observations physico-chimiques ont par ailleurs étayé ce raisonnement.

3 - 2.3. Vallon du Tiourre (fig. 93)

La courbe de récession concerne l'ensemble du vallon à la base duquel ont été effectués des jaugeages au micromoulinet. A ces valeurs s'ajoutent celles des prélèvements pour l'alimentation en eau potable de Vallon-Pont d'Arc, communiquées par la Compagnie Générale des Eaux.

La courbe de récession du Tiourre présente des analogies avec celle de l'Aiguille. La décrue est de courte durée : 10 jours, le coefficient de tarissement proche de celui de l'Aiguille. La courbe d'infiltration est toutefois mieux individualisée, ce qui pourrait traduire une hiérarchisation plus poussée du système. La mise en évidence par traçage de la relation perte du ruisseau de Pissevieille - source captée le confirme.

Ce système reste malgré cela un système de fissures ouvertes, relativement homogène où l'effet de crue transite plus facilement qu'à l'Aiguille. Ces réserves sont importantes : $V_D = 110000 \text{ m}^3$.

3 - 2.4. La source de la Chaire (fig. 94)

Les mesures ont été réalisées par jaugeage au micromoulinet, une échelle tarée ayant permis les relevés intermédiaires. Les forts débits de crue sont difficiles à mesurer du fait de la mise en marche de plusieurs griffons et souvent de la montée simultanée de l'Ardèche.

La courbe de récession présente nettement deux portions :

- Le tarissement prend effet au bout de 24 jours avec un coefficient de 0,020 assez fort mais néanmoins le plus faible observé lors de notre étude.

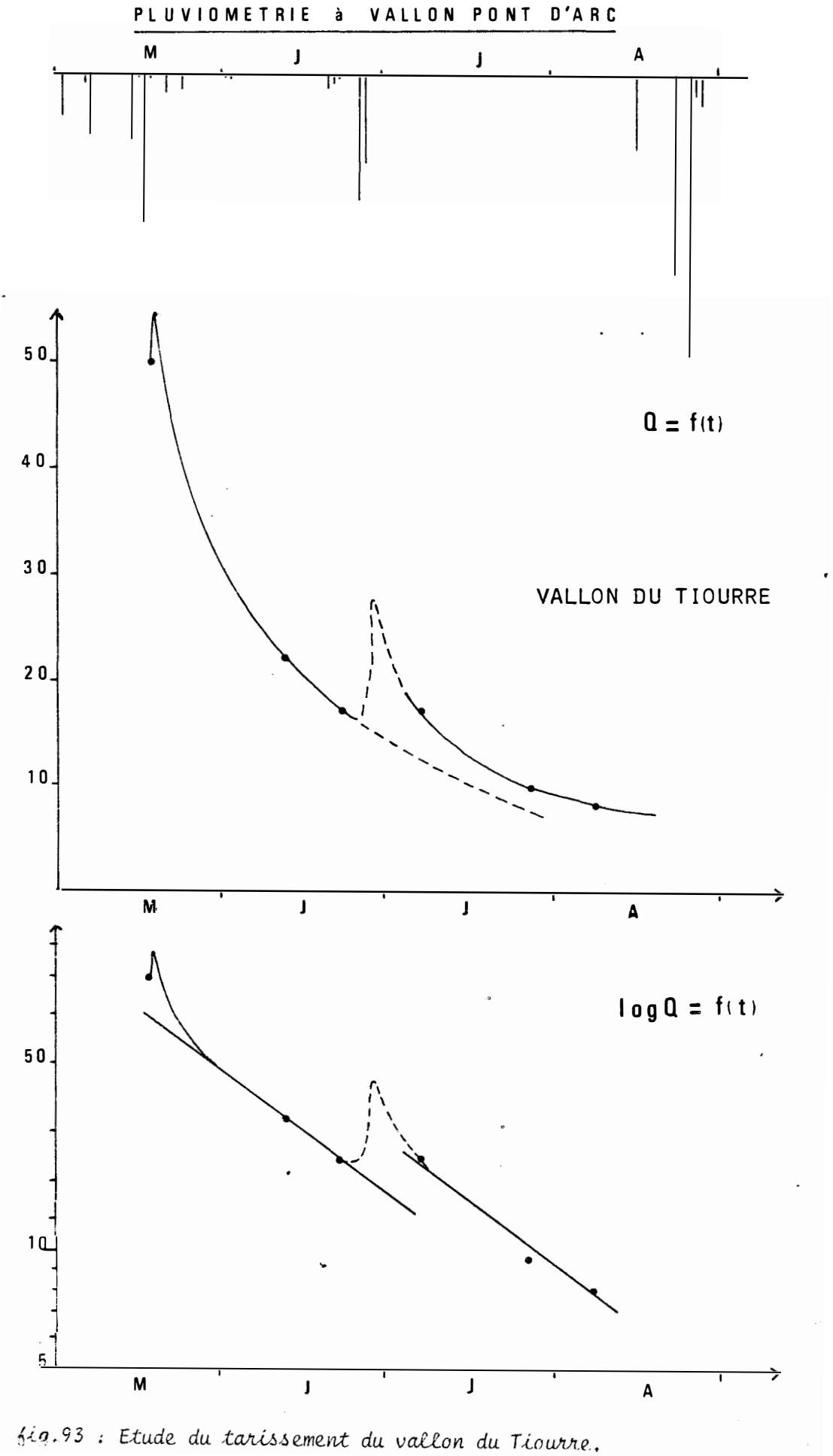


fig.93 : Etude du tarissement du vallon du Tiourre.

CHAIRE

Pluviométrie à vallon Pont d'arc

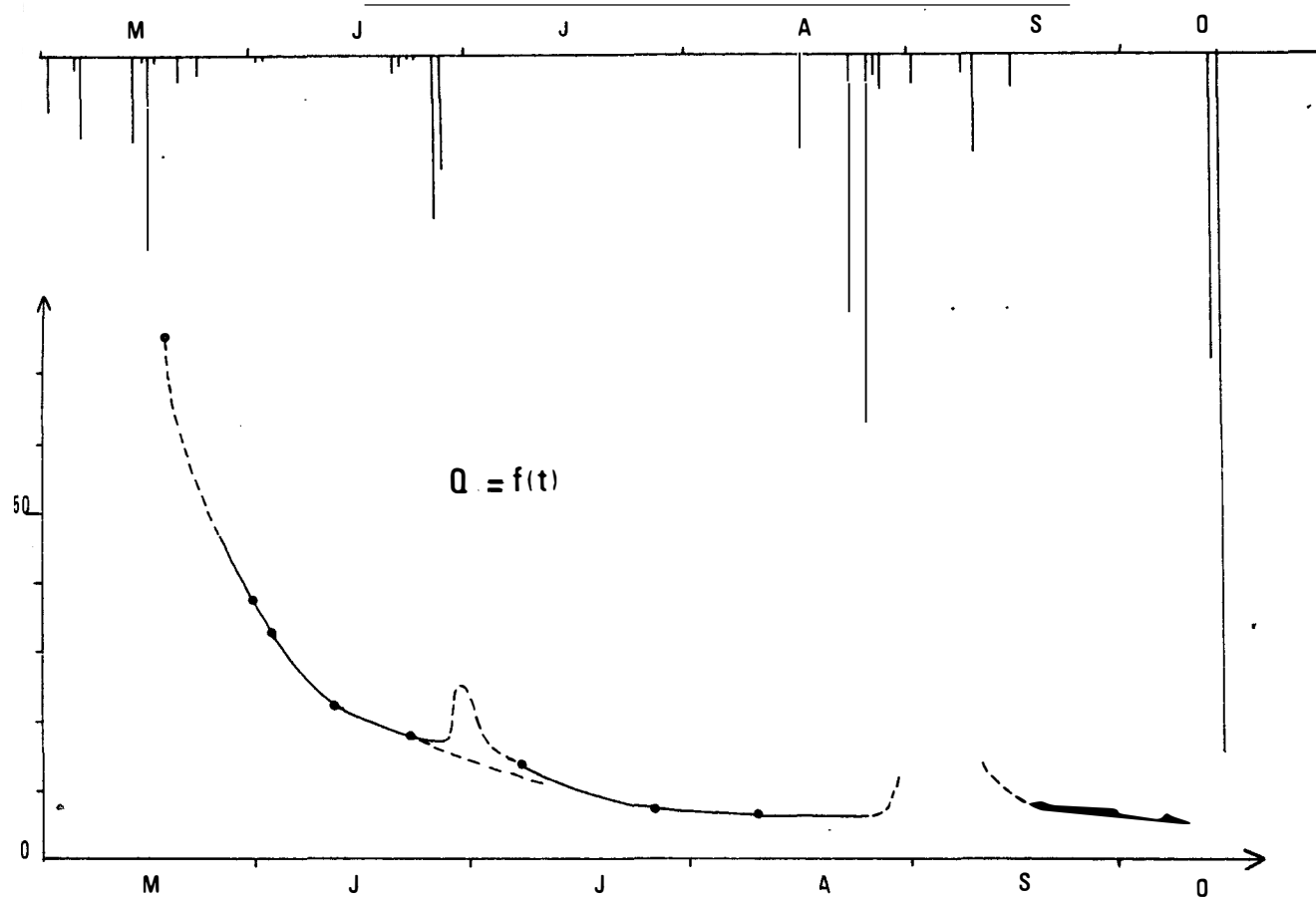
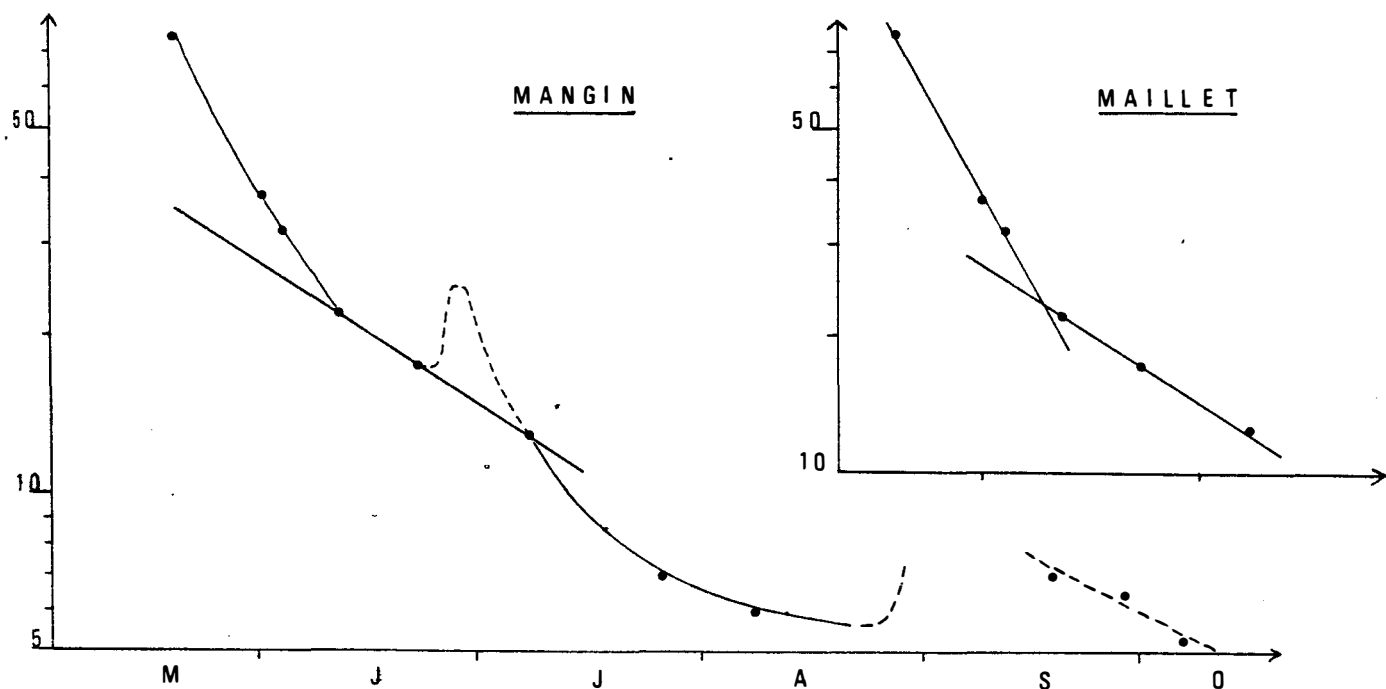
 $\log Q = f(t)$ 

fig. 94: Etude du tarissement de la source de la Chaire.

Le volume des réserves noyées est de 93000 m³.

- La décrue bien individualisée peut être représentée par deux fonctions selon la méthode utilisée :

$$\text{. selon MANGIN : } Q = Q_r + q = 35 e^{-0,02 t} + 40 \frac{1 - \frac{1}{24}}{1 + \varepsilon t}$$

La décrue étant insuffisamment connue, les paramètres de la fonction infiltration sont difficiles à déterminer. qui traduit la vitesse de décrue est inférieur à 1.

$$\text{. selon MAILLET : } Q = 75 e^{-0,058 t}$$

En décrue, la partie essentielle du débit à l'exutoire est fournie par l'infiltration à travers la zone non saturée, qu'il s'agisse d'une infiltration diffuse ou concentrée par l'intermédiaire d'une perte de ruisseau (Rieussec). Ces eaux traversent rapidement la zone noyée par des drains préférentiels de grand diamètre.

Le tarissement de la zone noyée s'installe alors, intéressant les zones latérales à plus faible perméabilité qui restituent plus lentement leurs réserves.

On observe d'autre part à partir du début juillet une décroissance des débits plus forte que la loi exponentielle. Ce résultat est à rapprocher des données physico-chimiques et des données de traçage qui montrent le comportement commun des sources de la Chaire et du Boeuf. On peut interpréter cette chute comme étant due à l'influence des pompages de la source du Boeuf (soit 25 l/s) qui se ferait sentir sur la source de la Chaire en cas d'étiage prolongé.

On peut remarquer un comportement très différent lors de la récession de septembre. L'infiltration a rapidement été évacuée à travers le drain principal, le tarissement reprend alors sans que les réserves de la zone noyée aient été reconstituées.

Le système de la Chaire est donc hiérarchisé : des réserves s'accumulent latéralement lors de recharges importantes et prolongées, l'essentiel du débit en hautes eaux transite à travers la zone non saturée vers un drain principal. La source du Boeuf fait partie du système en constituant peut-être l'exutoire d'un drain secondaire.

3 - 2.5. Le Goul de la Tannerie (fig. 95)

Les mesures de débit ont été obtenues par lecture d'une échelle tarée par le SRAE Drôme-Ardèche. Deux portions de courbes s'individualisent en début de récession :

- La décrue s'étale sur 14 jours. Deux fonctions peuvent approcher sa réalité :

$$\text{. selon MANGIN : } Q = 430 e^{-0,036 t} + 470 \frac{1 - 1/14 t}{1 + \varepsilon t}$$

La décrue étant insuffisamment connue, , inférieur à 1, n'est pas déterminé.

$$\text{. selon MAILLET : } Q = 825 e^{-0,089 t}$$

PLUVIOMETRIE à BOURG S^t ANDEOL

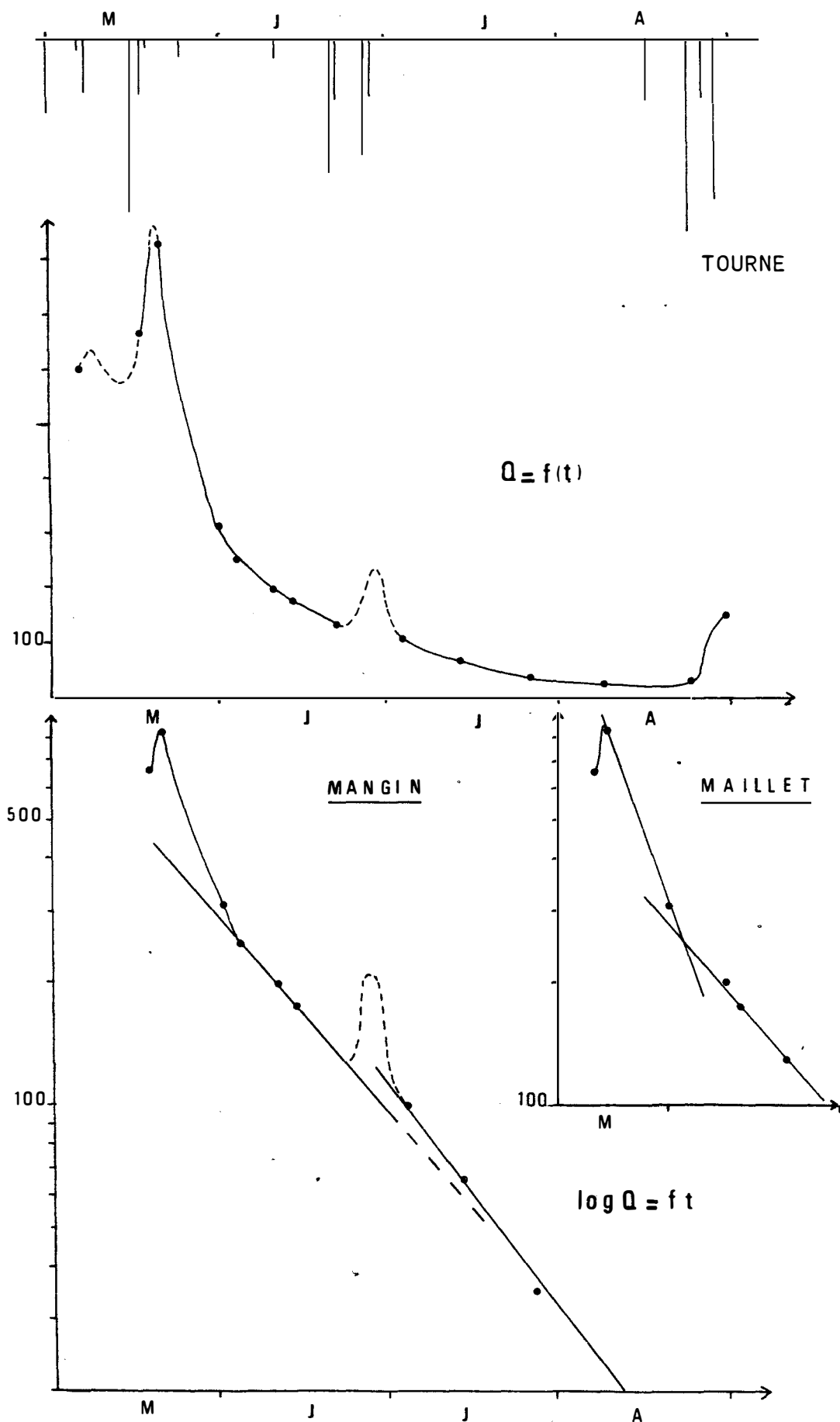


fig.95 : Etude du tarissement du goul de la Tannerie.

C'est une décrue relativement rapide, intéressant un volume très important (560000m³ selon MAILLET), soit près de la moitié du volume total exporté lors de la récession.

- La vidange durant le tarissement s'effectue plus rapidement que dans les sources précédentes. Le coefficient de tarissement est de 0,036.

Le volume des réserves est
$$V_D = \frac{250.10^{-3}}{0,036} \times 86400 = 600000 \text{ m}^3.$$

On note un accroissement léger de la pente du tarissement durant les mois de juillet et août qu'il semble possible d'interpréter comme un soutirage. Des pompages alimentant la ville de Bourg-Saint-Andéol exploitent une sortie d'eau disposée à une cinquantaine de mètres en aval de l'émergence. En étiage prolongé et en période de forte consommation, les pompages semblent créer un déficit à l'exutoire principal.

Ce système présente une forte aptitude à l'évacuation des eaux à l'exutoire comme l'indiquent les pentes des hydrogrammes de décrue et de tarissement. C'est donc un système très karstifié dans sa partie aval. La galerie principale a d'ailleurs été reconnue en plongée sur plus de mille mètres. Ces caractéristiques impliquent que la reconstitution des réserves ne peut se faire qu'en périodes prolongées de hautes eaux.

3 - 2.6. Source de Vanmalle

Ne possédant que de trop rares mesures, nous ne pouvons qu'estimer $\alpha = 0,027$ et $Q_{r0} = 19 \text{ l/s}$ d'où $Q = 19 e^{-0,027 \cdot t}$.

3 - 2.7. Conclusions

a) Tableau récapitulatif

	DECRUE							TARISSEMENT		
	MANGIN					MAILLET		Q%	α	$V_D \text{ m}^3$
	Q_0	t_i	Q_{r0}	q_0	$q_0 \frac{1 - nt}{1 + \epsilon t}$	$Q_1 \cdot e^{-\alpha t}$	V_1			
AIGUILLE	8.0	4	5.0	3.0	/	/	/	4.3	0.022	17000
TIOURRE	60	10	37.5	22.5	/	/	/	30	0.023	110000
VANMALLE	/	/	19	/	/	/	/	/	0.027	/
CHAIRE	75	24	35	40	$40 \frac{1 - 0.042t}{1 + \epsilon t}$	$75e^{-0.058t}$	79000	21.5	0.020	93000
TOURNE	900	14	430	470	$470 \frac{1 - 0.071t}{1 + \epsilon t}$	$470e^{-0.089t}$	560000	250	0.036	600000

tableau.28 : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques émergences des gorges.

b) Caractéristiques hydrodynamiques et structure du karst

L'étude d'une seule récession par système constitue un handicap pour une généralisation des résultats. Ils n'en conservent pas moins une valeur indicative analysable.

Des caractères généraux du karst se dessinent :

- Ce sont de petits systèmes quant aux débits qui transitent. L'existence du niveau de base continu que constitue l'Ardèche a multiplié les systèmes et en a donc réduit la taille.

- Ces systèmes possèdent des coefficients de tarissement assez élevés qui traduisent une forte aptitude à la vidange des réserves et par là-même une karstification à l'aval bien ébauchée.

- L'effet de l'infiltration est de courte durée : une quinzaine de jours suffit pour que la quasi totalité des apports de la zone non saturée ait gagnée la zone noyée. Seule, la source de la Chaire présente un retard de l'infiltration plus grand, mais une partie de son bassin versant recoupe des terrains non karstiques ayant une plus forte inertie.

La karstification semble donc également développée à l'amont du système, c'est-à-dire au niveau de la tranche supérieure où s'effectue l'infiltration.

Malgré ces conclusions toutes relatives, il faut considérer les systèmes karstiques des gorges comme des réseaux jeunes et mal hiérarchisés.

- Les volumes de réserve sont modestes, mais à la taille de ces systèmes karstiques. Leur pouvoir régulateur annuel assez important pour les sources de calcaires à tendance fissurée tend à diminuer pour les systèmes plus évolués. La zone noyée, limitée au dessus de l'exutoire, peut par contre abriter des réserves importantes sous le niveau de l'Ardèche comme le laisse supposer la karstogenèse.

3 - 3. EVALUATION DES RESERVES DU KARST

Cette évaluation grossière des réserves dynamiques va être tentée à partir de deux types de résultats :

- les courbes et paramètres hydrodynamiques ;
- les jaugeages différentiels effectués sur l'Ardèche le 11 août 1983.

A partir des systèmes étudiés, il est possible de définir un coefficient de tarissement moyen $\alpha = 0,027 \pm 0,004$. Ce coefficient va être appliqué au karst des gorges pris globalement comme un seul système karstique. Celui-ci fournit le 11 août 1983, soit 83 jours après la pointe de crue, 700 l/s. Le début du tarissement a été estimé à 12 jours $\pm$ 3 après la pointe de crue. Il est possible de calculer d'une part le débit du début du tarissement Q_0 , d'autre part le volume dynamique des réserves V_D .

$$Q'_0 = Q_0 e^{\alpha t} = 0,7 e^{0,027 \times 71} = 4,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_D = \frac{Q'_0}{\alpha} = \frac{4,76}{0,027} \approx 15.10^6 \text{ m}^3.$$

Un calcul d'erreur s'avère indispensable pour donner une signification à cette valeur.

$$\text{Log } V_D = \text{Log } Q + \alpha t - \text{Log } \alpha$$

$$\frac{\Delta V_D}{V_D} = \frac{\Delta Q}{Q} + \alpha \Delta t + t \Delta \alpha + \frac{\Delta \alpha}{\alpha}$$

$$\frac{\Delta V_D}{V_D} = 0,20 + 0,027 \times 3 + 71 \times 0,004 + \frac{0,004}{0,027} = 71 \%$$

$$\text{d'où } \Delta V_D = 11.10^6 \text{ m}^3 \quad \text{et} \quad 4.10^6 < V_D < 26.10^6 \text{ m}^3.$$

Ce volume dynamique malgré toutes les imprécisions qui l'entourent permet d'évaluer les potentialités renouvelables du karst. Au regard de la surface du bassin versant comprise entre 125 et 150 km², ces réserves apparaissent limitées. Le karst des gorges possède en effet un pouvoir régulateur faible: l'essentiel de la lame d'eau écoulée est évacuée en période de crue et décrue. La multiplication des systèmes karstiques qui ne favorise pas le processus de stockage d'eau en est en grande partie responsable. L'absence de pièges structuraux importants facilite également l'écoulement des eaux.

4 - LES AUTRES TECHNIQUES D'INVESTIGATION DU KARST

D'autres méthodes d'étude dont l'impact est souvent plus local, ont permis l'examen du karst du massif des Gras.

4 - 1. LES OPERATIONS DE TRACAGE

Ces manipulations décrites dans le chapitre 4 sont susceptibles d'apporter plusieurs informations sur la structure et le fonctionnement du karst. Les traçages des pertes permettent à la fois d'estimer les vitesses d'arrivée des eaux d'infiltration directe rapide et leur part dans les écoulements à l'exutoire pour un régime hydrodynamique donné. Des vitesses de transit de plus de 100 m/h ont été mesurées lors des traçages des ruisseaux du Rieussec, de la Planche et de Pissevieille. L'évacuation des eaux de l'axe principal de drainage est donc bien assurée en période de hautes eaux. Cette constatation est particulièrement intéressante pour le réseau du Tiourre qui avait par ailleurs été classé dans les aquifères de calcaires fissurés. Une circulation typiquement karstique s'installe en période de crue, ce qui indique un début de hiérarchisation du karst. Ces exemples de traçage ainsi que la coloration de Tourne n'ont pas permis de mettre en évidence de zone noyée importante. La courbe de restitution du traceur présente un faible étalement et la forme caractéristique d'un écoulement préférentiel selon un drain. Aucun exemple de diffusion n'a été enregistré.

Ces différents résultats sont en accord avec les premières conclusions dégagées des autres méthodes.

4 - 2. LES ESSAIS DE POMPAGE

Les essais de pompage constituent un moyen d'investigation des systèmes karstiques, très utilisé. Ils permettent de déterminer les potentialités en eau en un point donné de l'aquifère. L'utilisation des méthodes classiques de détermination des caractéristiques de l'aquifère paraissent souvent abusives en milieu karstique (A. MANGIN, 1975). Du fait des relations souvent non linéaires entre charge et débit, leurs hypothèses d'application ne sont pas vérifiées. Cet auteur préconise l'utilisation de pompages par paliers pour décrire la relation entre charge et débit.

Dans le massif des Gras, deux études récentes se sont appuyées sur des essais de pompage en vue d'optimiser l'exploitation de captages existants. Un nouveau forage a été réalisé à proximité de la source du Boeuf (B. LEMAIRE et H. PALOC, 1984). Différents essais très brefs effectués à des paliers de 32 à 116 m³/h se sont succédés. Ils ont révélé une transmissivité de l'ordre de $1,3 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Le niveau piézométrique a connu un rabattement de plus de 3 m en quelques heures. La pose d'une crépine consécutivement à des venues de matériaux a abaissé la productivité de l'ouvrage. Ce pompage de très courte durée, s'il a pu permettre d'estimer grossièrement les débits exploitables, n'apporte que peu d'informations sur le système karstique de Chaire-Boeuf. Les réserves du réseau n'ont en effet guère été mobilisées par le pompage.

Un pompage de longue durée a été réalisé à 800 m à l'amont de l'exutoire de Tourne, sur la galerie principale (SECMAPP, 1984). 9 jours de pompage consécutifs ont induit un rabattement de près de 3 m au niveau du puits et des exutoires. L'interprétation par la méthode de JACOB :

$$D = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{x^2 S} \quad \text{a permis d'estimer la transmissivité}$$

$$T = 4.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Les différents paliers de débit exécutés montrent une relation grossièrement linéaire entre charge et débit et justifient l'emploi de la méthode. L'abaissement du niveau piézométrique du forage ou des émergences a d'autre part engendré un rayon d'action minimum de 3 km. Ce pompage réalisé en fin d'étiage a confirmé l'importante karstification de la zone entourant la galerie principale du Goul de la Tannerie. Il a également mis en évidence l'existence d'une zone noyée étendue en relation avec cet axe drainant.

5 - LES PROBLÈMES DE VULNÉRABILITÉ

Le problème de la vulnérabilité des eaux karstiques et de la nécessité de leur protection est aujourd'hui bien reconnu. La connaissance des caractéristiques du karst et du fonctionnement des systèmes karstiques peut permettre d'envisager les risques de pollution et les mesures préventives nécessaires à la mise en valeur de cet aquifère.

L'exploitation des réserves karstiques est développée à la périphérie du massif des Gras. Les agglomérations de Bourg-Saint-Andéol, de Vallon-Pont d'Arc et l'ensemble des communes de la rive droite de l'Ardèche sont dans une large part alimentées par une émergence karstique. Toutes ces émergences ont présenté des indices de contamination bactériologique.

Les expériences de traçage effectuées au cours de cette étude ont permis de mettre en évidence une alimentation des trois sources captées par une perte de ruisseau. un transit direct, du moins en période de crue, caractérise ces écoulements. Il s'accompagne d'un stockage d'eau dans l'ensemble de l'aquifère, ainsi contaminé. Ces trois ruisseaux sont en effet susceptibles d'être pollués par des habitations, voire des communes dans le cas de Saint-Remèze. Une amélioration de la qualité sanitaire de ces émergences paraît techniquement envisageable par l'installation de systèmes épurateurs individuels ou collectifs. Ces ressources qui ont jusqu'à maintenant été incomplètement utilisées peuvent répondre à l'augmentation de la consommation. Les études menées sur le réseau de Tourne et sur la source du Boeuf vont permettre l'augmentation des prélèvements. Le réseau de Tiourre semble en mesure de fournir les débits supplémentaires recherchés, une fois le problème de la qualité des eaux réglé.

Une demande en eau potable, faible, mais dispersée sur l'ensemble des gorges existe. Elle intéresse des zones touristiques saisonnières. Les gorges de l'Ardèche offrent de nombreux points d'eaux dont certains peuvent être de bonne qualité comme les sources de calcaires fissurées de l'Aiguille, de la Fare, ... D'autres réservoirs sont susceptibles de fournir des eaux saines qui sont épisodiquement contaminées par les crues de l'Ardèche. Des petits ouvrages installés à quelques dizaines de mètres à l'amont de l'émergence élimineraient cet inconvénient : c'est le cas des sources de la Dragonnière et de la Guigonne. Les émergences court-circuitées par les eaux de l'Ardèche semblent par contre à proscrire. D'une manière générale, les sources des gorges alimentées directement par les précipitations qui s'infiltrant sur un plateau peu équipé, fournissent des eaux de meilleure qualité que celles des sources du pourtour du massif.

6 - CONCLUSIONS

Il a été tenté, au cours de ce chapitre, à partir de l'étude de quelques émergences, de cerner la structure et le fonctionnement du karst des Gras. Différentes approches ont été réalisées ; elles ont toutes contribué à définir le type de karst rencontré et les mécanismes qui le régissent.

L'étude hydrochimique a présenté, dans un premier temps, une répartition des sources en fonction des valeurs prises par les différents paramètres géochimiques. L'analyse de l'évolution de ces paramètres dans le temps a par la suite facilité la compréhension du fonctionnement du karst. L'étude hydrodynamique apporte des indications complémentaires au contenu souvent plus quantitatif. Les expériences de traçage, les pompages d'essai, bien que n'englobant pas la totalité du système karstique comme les deux précédents types d'étude, apparaissent indispensables à la connaissance du karst. Une étude hydrobiologique dont les premiers résultats sont apparus in P. VERVIER (1984) est actuellement en cours, elle apportera également des éléments à une vision d'ensemble du karst des gorges de l'Ardèche.

Le karst actif des gorges est représenté par de nombreux systèmes karstiques juxtaposés le long de la rivière. Cet aquifère possède les caractères d'un karst jeune, peu hiérarchisé, aux faibles possibilités de stockage au-dessus de l'exutoire. L'analyse par émergence montre cependant de grandes différences entre les aquifères fissurés très peu karstifiés de l'Aiguille, de la Fare et du Tiourre et des aquifères de plus en plus

organisés comme ceux de la Chaire, de Foussoubie et de Tourne sur le versant Rhône. Certains systèmes restent mal définis du fait de l'impossibilité d'accéder aux écoulements pérennes immergés : c'est le cas des systèmes karstiques de Gournier, de la Guigonne, du Castor. Ces réseaux, qui présentent un large collecteur développé, s'apparentent aux systèmes les plus évolués.

La définition du karst des Gras a permis d'aborder les problèmes des potentialités et de la vulnérabilité de l'aquifère. Le volume des réserves renouvelables, estimé en 1983 à $15 \text{ Mm}^3 + 11$, est réparti sur l'ensemble des gorges et donc difficilement exploitable. La multiplicité des exurgences répond, par contre, à la demande locale du fait de l'implantation de structures d'accueil dispersées. Des réserves mieux exploitables apparaissent en bordure du massif des Gras et donc à proximité d'agglomérations. Des mesures sont nécessaires à la préservation de leur qualité sanitaire.

CONCLUSIONS GENERALES

La présente étude a permis d'appliquer les connaissances acquises dans les milieux fissurés et karstifiés à la compréhension de l'hydrogéologie d'un massif karstique périméditerranéen.

L'aquifère urgonien des Gras se singularise d'une part, par sa position par rapport à l'Ardèche qui le traverse entièrement au-dessus du niveau de base géologique, d'autre part, par son relief tabulaire et l'absence de structures majeures susceptibles de guider les écoulements. Il en résulte une multiplication des points d'émergence, souvent immergés, sur l'ensemble du tracé des gorges.

Plusieurs buts ont orienté cette recherche :

1) L'évaluation des réserves renouvelables du karst

La détermination des limites de bassins versants a pu être établie à partir d'une étude géologique, d'une étude de la fracturation, des opérations de traçage.

L'étude géologique s'est principalement intéressée à la formation urgonienne. Les faciès, les limites, les structures qui affectent ces calcaires massifs ont été décrits. Des coupes schématiques au niveau de l'Ardèche ont montré l'évolution de l'âge des calcaires entaillés par la rivière, de l'Hauterivien supérieur au Bédoulien.

L'étude de la fracturation a mis en évidence l'existence de deux zones structurales où les accidents plurikilométriques N 50 et N 140 sont respectivement prépondérants. La répartition et la nature des formes karstiques actives et fossiles sont étroitement liées à la zone structurale considérée.

Ces mégafailles ont connu plusieurs rejeux successifs : décrochants (phase pyrénéenne et alpine), normaux (distension oligocène) et parfois inverses durant les phases compressives. S'ils jouent un rôle important dans l'émergence des sources, ils ne guident pas les circulations à l'échelle du massif et semblent au contraire délimiter des compartiments indépendants. Certaines expériences de traçage confirment cette hypothèse. Les limites de bassins versants ont alors été ébauchées à partir du découpage du plateau par les méga-accidents et par les essais de traçage complémentaires. Le bassin versant des gorges s.s. occupe une superficie de 126 à 152 km² selon la limite sud retenue au niveau du Bois de Ronze.

L'étude hydroclimatique a révélé de fortes variations interannuelles des précipitations. Les totaux moyens s'échelonnent entre 870 mm à Bourg-Saint-Andéol et 970 mm à Vallon-Pont d'Arc avec un écart-type proche de 200 mm. L'évapotranspiration, assez élevée, est plus régulière puisque pour une moyenne de 580 mm, elle connaît un écart-type de 60 mm. Selon le lieu et l'année, les pluies efficaces vont représenter un total de 200 à 400 mm.

Le débit moyen est lui, estimé de 1,7 à 2,0 m³/s soit un débit spécifique de 11 l/s/km². Pour le cycle hydrologique 82-83, le débit moyen compris entre 1,65 et 1,8 m³/s semble en accord avec les résultats des jaugeages différentiels, effectués à l'étiage, qui permettent d'évaluer les apports du karst à 0,7 m³/s. Le volume des ressources renouvelables constitue donc un fort potentiel exploitable bien que très peu utilisé.

2) Le fonctionnement et la structure du karst

La modeste importance et la multiplicité des systèmes karstiques soulignent le faible degré d'évolution du karst actif. Ces caractères sont confirmés par l'étude hydrochimique. L'analyse de l'évolution des paramètres géochimiques, les courbes de distribution des bicarbonates montrent la présence de systèmes peu hiérarchisés allant des émergences de calcaires fissurés (sources de l'Aiguille, de la Fare, ...) à des systèmes peu karstifiés (sources de la Dragonnière, de Vanmalle, de la Chaire,...). Quelques réseaux évolués, alimentés en partie par des pertes, présentent une organisation plus élaborée (évent de Foussoubie, réseau de Tourne). L'étude hydrodynamique apporte des conclusions identiques. Elle permet d'évaluer le pouvoir régulateur de ces systèmes qui est faible : une grande partie des débits est évacuée durant le cycle crue-décru. Les volumes des réserves renouvelables restent modestes. D'autres moyens d'investigation du karst ont été utilisés. Les opérations de traçage ont permis de mettre en évidence la rapidité de transit des écoulements quand le point d'injection appartient à une zone d'infiltration directe : des vitesses de 100 à 400m/h ont été enregistrées. Des essais de pompage effectués à proximité de l'exutoire définissent les potentialités de systèmes karstiques. Ces deux types d'expériences locales prouvent le rôle déterminant de l'axe principal de drainage dans les circulations du karst et l'existence de rapports simples avec les réserves latérales.

A l'échelle du massif, il apparaît que la plus ou moins grande évolution d'un système karstique est liée à son appartenance à une zone structurale donnée. La zone de Saint-Remèze, intensément fracturée par les accidents N 50, abrite des systèmes fissurés ou peu karstifiés. La zone orientale, aux directions de fracturation mieux réparties, voit se développer des réseaux plus évolués.

3) La karstogenèse et le creusement des gorges

Plusieurs phases de karstification, attestées par la richesse des formes souterraines fossiles, se sont succédées de la fin du Crétacé supérieur à l'Actuel. La collecte des données géologiques, géomorphologiques et l'analyse des directions de karstification ont permis d'établir une chronologie des événements. L'existence des réseaux noyés profonds dans l'axe des gorges et à Tourne, a soulevé le problème de l'âge des karstifications et des liaisons avec le processus du creusement des gorges de l'Ardèche. Seule la régression fini-miocène a été susceptible de fournir à ces circulations un niveau de base géographique suffisamment bas. Plusieurs hypothèses faisant intervenir successivement ou simultanément les circulations souterraines et le creusement superficiel de la rivière ont été avancées. L'hypothèse retenue est celle d'un creusement superficiel de la pré-Ardèche dès la fin du Miocène, relayé par un creusement souterrain profond. Le remblaiement pliocène a fossilisé ces réseaux dont le toit est aujourd'hui recoupé par la rivière qui a repris le processus de creusement durant le Plio-Quaternaire.

Du point de vue des ressources exploitables, les différents volets de cette étude ont mis en évidence :

- des réserves profondes, liées à une karstification ancienne, localisées sur la bordure de la vallée du Rhône et dans l'axe du cours de l'Ardèche. La puissance de cette zone noyée est inconnue mais au moins supérieure à 50 m dans les gorges et 120 m à Tourne ;

- des réserves renouvelables réparties sur l'ensemble des gorges, provenant d'un aquifère fissuré ou peu karstifié, voire légèrement évolué. Ces réserves peu exploitées présentent des problèmes de vulnérabilité sur la périphérie du massif, là où des alimentations par pertes sont recon- nues. Trois colorations ont mis en évidence des relations entre des pertes et des sources captées pour l'alimentation en eau potable d'une agglomération et de communes. La réalisation d'un schéma d'assainissement à l'échelle du plateau serait en mesure d'améliorer la qualité des eaux de cet aquifère et d'en permettre une meilleure exploitation .

D'un point de vue plus général, cette étude confirme les observations effectuées par différents auteurs sur les modalités de circulation dans les calcaires fissurés et karstifiés. Le système karstique défini de l'impluvium à l'exutoire se caractérise par sa constante hétérogénéité, que ce soit au niveau de l'infiltration de surface : diffuse ou concentrée, de la percolation dans la zone d'infiltration : par chenaux verticaux et fissures, de la structure de la zone noyée : en drains principaux ou blocs capacitifs. Cet agencement n'autorise pas la généralisation à l'ensemble de l'unité karstique, de propriétés établies à partir de reconnaissances locales (spéléologie, pompages d'essai, ...). Une telle constatation a favorisé le développement théorique de méthodes considérant le karst globalement à partir des données de l'exutoire (hydrochimie, hydrodynamique). Leur application au massif étudié a confirmé la validité et la cohérence des modèles karstiques en vigueur qui supposent que l'hétérogénéité des structures conditionne celles des écoulements.

BIBLIOGRAPHIE

- ALABOUVETTE B. et CAVELIER C.** (1984). - Paléogène. Languedoc oriental. Synthèse géologique du Sud-Est de la France, mém. B.R.G.M. n°125, p. 434-438.
- ANDRIEUX C.** (1976). - Le système karstique du Baget. Géothermie des eaux à l'exutoire principal selon les cycles hydrologiques 1974 et 1975. Ann. sc. de l'Univ. de Besançon (2è coll. d'Hydrologie en pays calcaire), 3è sér., fasc. 25, p. 1-26.
- ARNAUD-VANNEAU A., ARNAUD H., CHAROLLAIS J., CONRAD M.A., COTILLON P., FERRY S., MASSE J.P., PEYBERNES B.** (1979). - Paléogéographie des calcaires urgoniens du Sud de la France. Géobios, Lyon, mém. spéc. n° 3, p. 363-383, 7 fig.
- ARTAUD F. et SEGURET M.** (1981). - Les structures pyrénéennes du Languedoc et du Golfe du Lion (Sud de la France). Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. 23, n° 1, p. 51-63, 5 fig.
- BALAZUC** (1956). - Spéléologie du département de l'Ardèche. Rassegna speleologica italiana e Societa speleologica italiana, 220 p., 111 fig.
- BALLESIO R.** (1972). - Etude stratigraphique du Pliocène rhodanien. Thèse Sc. et Docum. Lab. Géol. Univ. Lyon, n° 53, 333 p., 73 fig., 43 tabl., 4 pl.
- BAKALOWICZ M.** (1974). - Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. Relation entre minéralisation et conductivité. Ann. de Spéléologie, t. 29, 2, p. 167-173.
- BAKALOWICZ M.** (1979). - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doct. Sci. Nat., Paris 6, Géol. Dyn., 269 p.
- BAKALOWICZ M.** (1984). - Le karst en géologie et hydrogéologie. Bilan et essai de synthèse des thèses présentées en France entre 1977 et 1983. Hydrogéologie-Géologie de l'ingénieur, 3, 1984, p. 253-257.
- BELLEVILLE L.** (1984). - Influence d'un accident régional sur la karstification et l'hydrogéologie d'une zone calcaire : le plateau des Gras (gorges de l'Ardèche, Ardèche et Gard). Coll. de l'A.G.S.E. sur l'hydrogéologie karstique, communication orale, 6 p., 4 fig.
- BERGERAT F.** (1981). - Le couloir rhodanien au Paléogène : analyse de la fracturation et interprétation cinématique régionale. Rev. Géol. dyn. et Géogr. phys., vol. 23, n° 5, p. 329-343, 5 fig., 1 tabl.
- BILLARD R.** (1977). - La grotte de Saint-Marcel d'Ardèche. Scialet (Bull. C.D.S. Isère), p. 108-121.
- BLANC J.** (1976). - Recherches géologiques à la grotte de Saint-Marcel d'Ardèche. Géol. Méditerranéenne, t. 3, n° 4, p. 227-236, 2 fig.
- BOIS P.** (1979). - Hydrologie générale. Ecole Nat. Sup. d'Hydraulique de Grenoble, 175 p.
- BOISSIN J.P.** (1975). - Notice explicative de la carte hydrogéologique des Cévennes, Bas-Vivarais et vallée du Rhône. CERGA Montpellier, 54 p.

- X BOUSCHET B. (1979). - Inventaire des avens du plateau des Gras, Gorges de l'Ardèche. Ronéotypé.
- BOURSEAU J.P. et ELM I S. (1980). - Le passage des faciès de bordure (calcaires grumeleux) aux faciès de bassin dans l'Oxfordien de la bordure vivaro-cévenole du Massif Central, Bull. soc. Géol. Fr., (7), t. 22, n° 4, p. 607-611.
- BUSNARDO R. (1969). - Rapport géologique sur l'alimentation en eau potable du SIVM de Bourg-Saint-Andéol. Rapport DDA inédit.
- X CALLOT Y. (1978). - A propos des plateaux ardéchois : karst, rapport fond-surface et évolution des paysages calcaires ou en roche perméable cohérente. Essai sur les paramètres influant dans la formation des paysages calcaires ou en roche perméable. Thèse 3ème cycle, Reims, 384 p.
- CEDRAT (1984). - Opération Ardèche Claire, sous dossier b, Hydrologie. Rapport Préfecture Ardèche, inédit, 117 p.
- COTILLON P., FERRY S., BUSNARDO R., LAFARGE D., RENAUD B. (1979). - Synthèse stratigraphique et paléogéographique sur les faciès urgoniens du Sud de l'Ardèche et du Nord du Gard (France). Coll. sur l'Urgonien des pays méditerranéens. Géobios, Lyon, mém. spéc. n° 3, p. 121-139, 9 fig., 1 tabl.
- DEBELMAS J. (1974). - Géologie de la France. Paris, Doin, 546 p.
- DEMARCO G. (1970). - Etude stratigraphique du Miocène rhodanien. Thèse Sc. et Mém. B.R.G.M., n° 61, 257 p., 56 fig., 4 pl., 1 tabl.
- DEMARCO G. et al. (1984). - Néogène. Evolution paléoclimatique. Synthèse géologique du Sud-Est de la France, mém. B.R.G.M. n° 125, p. 509-510.
- DONZE P. et LAFARGE D. (1979). - Evolution bathymétrique différentielle dans le Barrémien inférieur de la région de Saint-Remèze. Colloque sur l'Urgonien des pays méditerranéens. Géobios, Lyon, mém. spéc. n° 3.
- DROGUE C. (1967). - Essai de détermination des composantes de l'écoulement des sources karstiques. Evaluation de la capacité de rétention par chenaux et fissures. Chronique d'Hydrogéologie, 10, p. 43-47.
- DROGUE C. (1974). - Structure de certains aquifères karstiques d'après les résultats des travaux de forage. C.R.A.S. 278, p. 2621-2624.
- DROGUE C., LATY A.M., PALOC H. (1983). - Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région pyrénéo-provençale (France méridionale). Hydrogéologie. Géologie de l'ingénieur, 4, 1983, p. 293-311, 6 fig.
- DUBAND D. (1978). - Hydrologie statistique approfondie. Ecole Nat. Sup. d'Hydraulique de Grenoble, 250 p.
- ELMI S. (1967). - Le Lias supérieur et le Jurassique moyen de l'Ardèche. Doc. Lab. Géol. Fac. Sc., Lyon, n° 19, fasc. 1-2, 507 p.
- X ELOUARD P. (1982). - La réserve naturelle des gorges de l'Ardèche. Aubenas, 40 p.

- FABRE G.** (1977). - Niveaux de base actuels dans les trois principaux canyons du Languedoc oriental : l'Ardèche, la Cèze, le Gard. Bull. Assoc. Géogr. Franç., Paris, n° 445-446, p. 237-245.
- GOURGAND B.** (1983). - Hydrogéologie des roches fissurées. Etude du massif cristallin du Rissiou et de sa couverture sédimentaire. Aménagement EDF de Grand Maison (Isère). Thèse 3ème cycle, Grenoble, 238 p.
- GRILLOT J.C.** (1979). - Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance. Thèse Doct. Sc. Montpellier, 227 p.
- GRILLOT J.C., BOUSQUET J.C., PHILIP H., DAZY J.** (1983). - Hydrothermalisme carbo-gazeux, radioactivité et sismotectonique : exemple du Languedoc-Roussillon (France). Hydrogéologie. Géologie de l'ingénieur, 4, 1983, p. 313-320, 1 tabl., 1 carte h.t.
- G.R.B.** - Groupe de Recherches Biospéléologiques (1972-1982). - G.R.B. Liaisons, Infos G.R.B.
- GUERIN R.** (1973). - Un exemple du rôle de la tectonique et de la microtectonique dans la géométrie des écoulements karstiques fossiles et actuels: le Bas-Vivarais calcaire. Thèse 3ème cycle, Montpellier, 105 p., 132 fig., 2 cartes h.t.
- JULIAN M. et NICOD J.** (1984). - Paléokarsts et paléo-géomorphologie néogènes des Alpes Occidentales et régions adjacentes. Karstologia, n° 4, p. 11-18, 2 fig., 7 pl.
- LAFARGE D.** (1978). - Etude géologique du plateau de Saint-Remèze (Ardèche). Stratigraphie. Cartographie. Sédimentologie. Tectonique. Thèse 3ème cycle, Lyon.
- LEMAIRE B. et PALOC H.** (1984). - Captage dans un karst sous recouvrement alluvial à l'entrée des gorges de l'Ardèche (Salavas, Ardèche, France). Hydrogeology of karstic terrains. Cases stories. International Contribution to Hydrogeology, ed. Heise, p. 136-138, 1 fig.
- LEPILLER M.** (1980). - Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires. Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France). Thèse 3ème cycle, Grenoble, 478 p.
- MANDIER P.** (1979). - Essai de corrélation des formations quaternaires de la moyenne vallée du Rhône du Lyonnais au Valentinois. Bull. Lab. Rhodanien de Géomorphologie, n° 6, p. 13-44, 9 fig., 3 tabl.
- MANGIN A.** (1975). - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Ann. Spéléologie, Fr., t. 29, n° 3, p. 283-332; n°4, p. 495-601 ; t. 30, n° 1, p. 21-124.
- MAZELLIER R.** (1971). - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des terrains crétacés du Bas-Vivarais. Thèse 3ème cycle, Montpellier.
- MICHEL R.** (1980). - Rapport géologique sur le projet de renforcement de l'A.E.P. du SIVM du canton de Bourg-Saint-Andéol (Ardèche). D.D.A., rapport inédit.
- PARDE M. et J., DE BEAUREGARD J.** (1959). - Quelques remarques sur les crues cévenoles de septembre et octobre 1958. La Houille Blanche, Grenoble, n° spécial A, p. 670-681, 2 fig., 2 tabl.

- PLATIER G.** (1977). - Spéléologie de la commune de Saint-Remèze. Inventaire des cavités. Bull. du CDS 07, n° 12, p. 4-64.
- RENAULT P.** (1968). - Spéléologie physique, sur la distinction de plusieurs régions karstiques en raison de la teneur en anhydride carbonique des atmosphères de grottes. C.R.Acad.Sc. Paris, t. 267, p. 2288-2290.
- ROMAN F.** (1950). - Le Bas-Vivarais. Ed. Hermann et Cie, Paris, 150 p.
- SCHOELLER H.** (1962). - Les eaux souterraines. Masson, Paris, 642 p.
- SECMAPP** (1984). - Etude hydrogéologique du réseau karstique des gouls de Tourne. A.E.P. du SIVOM de Bourg-Saint-Andéol. Rapport inédit, 21 p.
- SLAMA P., LEROUX P., CHEDHOMME J., CHEILLETZ E.** (1981). - Etat actuel des recherches dans la goule de Foussoubie et dans diverses autres cavités au confluent de l'Ardèche et de l'Ibie. Vallon-Pont d'Arc. Ardèche. Spélunca, n° 2, 1981, p. 28-31, 2 fig.
- SIGNOLLES C.** (1980). - Le Crétacé supérieur du département de l'Ardèche. Stratigraphie, sédimentologie, paléogéographie. Thèse 3ème cycle, Lyon.
- TREBUCHON J.C.** (1956). - Etude spéléologique de la Basse-Ardèche. Ann. de spéléologie, t. 11, fasc.1 et 2, p. 27-62.
- VERVIER P.** (1984). - Le milieu aquatique souterrain des gorges de l'Ardèche. Premiers résultats hydrologiques et faunistiques. DEA Lyon.
- Documents spéléologiques consultés :** Infos-plongée, G.R.B. Liaisons, Nouvelles du M.A.S.C., Bull. CDS 07, ...

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 - Situation géographique.....
- Fig. 2 - Cadre géologique.....
- Fig. 3 - Schéma structural régional.....
- Fig. 4 - Carte morphologique.....
- Fig. 5 - Carte géologique du plateau des Gras et de ses limites, au 1/250.000e.....
- Fig. 6 - Les divisions stratigraphiques des calcaires urgoniens.....
- Fig. 7 - Essai de corrélation stratigraphique des calcaires urgoniens au niveau de l'Ardèche.....
- Fig. 8 - Carte structurale du plateau des Gras.....
- Fig. 9 - Carte de localisation des coupes géologiques.....
- Fig. 10 - Coupe 1 : coupe géologique WNW-ESE de la bordure occidentale du plateau de Saint-Remèze.....
- Fig. 11 - Coupe 2 : coupe géologique méridienne du plateau d'Ornac.....
- Fig. 12 - Coupe 3 : coupe géologique NNE-SSW à l'Est du plateau d'Ornac.....
- Fig. 13 - Coupe 4 : coupe géologique schématisée de la bordure orientale du plateau de Saint-Remèze.....
- Fig. 14 - Importance des accidents N30-N50 dans le Sud-Est de la France.....
- Fig. 15 - Voies de coulissements senestres régionales et association des grands fossés oligocènes. In BERGERAT, 1981.....
- Fig. 16 - Carte photointerprétative de la fracturation du plateau des Gras.....
- Fig. 17 - Carte des histogrammes de direction de fractures en pourcentage de la longueur cumulée (d'après photointerprétation).....
- Fig. 18 - Carte des histogrammes de direction de fractures en pourcentage du nombre (d'après photointerprétation).....
- Fig. 19 - Carte des histogrammes de direction de fractures en pourcentage du nombre (d'après des mesures de terrain).....
- Fig. 20 - Fracturation induite par une zone de cisaillement senestre.....
- Fig. 21 - Schéma interprétatif de la fracturation induite par la phase pyrénéenne.....
- Fig. 22 - Schéma de la fracturation induite par la phase alpine.....
- Fig. 23 - Réseau hydrographique du plateau des Gras.....
- Fig. 24 - Répartition des avens du plateau des Gras.....
- Fig. 25 - Répartition des formes karstiques fossiles selon les zones structurales.....
- Fig. 26 - Inventaire des exurgences des gorges.....
- Fig. 27 - Schéma de l'exutoire d'un système karstique des gorges.....
- Fig. 28 - Contexte géologique et structural du bassin versant du Rieussec.....
- Fig. 29 - Conditions d'émergence du réseau de la Chaire (d'après topographie du G.R.8. Groupe de Recherches Biospéléologiques).....
- Fig. 30 - Environnement géologique et structural du réseau de Foussoubie.....
- Fig. 31 - Conditions d'émergence du réseau de la Dragonnière.....
- Fig. 32 - Conditions d'émergence de l'évent de Gournier.....
- Fig. 33 - Conditions d'émergence du système de Richemale -Midroï (topographie MJC la Voulte, 1973 et S.C. Aubenas, 1980).....
- Fig. 34 - Réseau de la Guigonne (topographie F. LE GUEN, 1978).....
- Fig. 35 - Extension et position structurale des réseaux de Saint-Marcel et de la grotte Deloly - source de l'Ecluse.....
- Fig. 36 - Répartition des exurgences des gorges selon les zones structurales.....
- Fig. 37 - Conditions d'émergence des exurgences du bassin versant du Rhône (d'après la carte géologique de HAZELLIER -1971- et GUERIN -1973-).....
- Fig. 38 - Conditions d'émergence des sources de Tourne (topographie B. LEGER, 1982).....
- Fig. 39 - Conditions d'émergence des exurgences de la bordure occidentale (d'après les données géologiques de C. SIGNOLLES, 1980).....
- Fig. 40 - Situation géographique des exurgences du plateau d'Ornac.....

- Fig. 41 - Mise en place du réseau hydrographique Ardèche-Rhône.....
- Fig. 42 - Géologie du bassin de Pierrelatte (d'après BALLELIO, 1972).....
- Fig. 43 - Répartition et cote des réseaux fossiles à composante horizontale principale.....
- Fig. 44 - Coupe développée de la grotte de Saint-Marcel : position relative des réseaux par rapport à l'Ardèche.....
- Fig. 45 - Mise en évidence de phases de karstification et de niveaux de base fossiles par l'étude des profils en long des ruisseaux du rieu sec et de foussoubie (inspiré de Y. CALLOT, 1979).....
- Fig. 46 - Histogrammes des directions karstiques des réseaux fossiles (d'après GUERIN, 1973).....
- Fig. 47 - Histogrammes des directions de fractures karstifiées de surface (d'après GUERIN, 1973).....
- Fig. 48 - Evolution des directions de karstification selon l'enfoncement des réseaux.....
- Fig. 49 - 1ère hypothèse : mise en place d'une karstification profonde précoce.....
- Fig. 50 - 2ème hypothèse : mise en place d'une karstification profonde lors d'un stade avancé du creusement des gorges.....
- Fig. 51 - 3ème hypothèse : enfoncement simultané de l'Ardèche et de ses pertes, responsables de la karstification profonde.....
- Fig. 52 - Bassins versants géographiques du plateau des Gras.....
- Fig. 53 - Contexte géologique et résultats du traçage du Tourre.....
- Fig. 54 - Traçage du Tourre : courbe de restitution du traceur.....
- Fig. 55 - Contexte géologique et résultats du traçage du Rieussec.....
- Fig. 56 - Traçage du Rieussec : courbe de restitution du traceur.....
- Fig. 57 - Traçages de Foussoubie : courbes de restitution et hydrogrammes de la goule.....
- Fig. 58 - Contexte hydrogéologique des traçages de la rive droite de l'Ardèche.....
- Fig. 59 - Contexte hydrogéologique des traçages des environs de Bidon.....
- Fig. 60 - Contexte géologique et structural du traçage de la grotte de Pascaloune.....
- Fig. 61 - Traçage de l'aven de Pascaloune : courbes de restitution et hydrogrammes des sources de Tourne.....
- Fig. 62 - Tracé des limites des bassins versants géologiques de l'Ardèche et du Rhône.....
- Fig. 63 - Délimitation des bassins versants géologiques sur la bordure méridionale du plateau des Gras.....
- Fig. 64 - Carte des opérations de traçage.....
- Fig. 65 - Carte des limites de bassins versants géologiques.....
- Fig. 66 - Localisation du réseau météorologique.....
- Fig. 67 - Histogrammes de répartition des précipitations annuelles.....
- Fig. 68 - Vérification de l'homogénéité de la série pluviométrique de Vallon-Pont d'Arc par la méthode du cumul des résidus.....
- Fig. 69 - Carte des isohyètes moyennes annuelles (1961-1982).....
- Fig. 70 - Histogrammes des précipitations moyennes mensuelles.....
- Fig. 71 - Cartes des isohyètes annuelles des années 1983 et 1984.....
- Fig. 72 - Histogrammes des précipitations mensuelles en 1983 et 1984.....
- Fig. 73 - Histogrammes des températures mensuelles moyennes, minimales et maximales.....
- Fig. 74 - Histogrammes des températures moyennes mensuelles en 1983 et 1984.....
- Fig. 75 - Calcul de la lame d'eau précipitée ; a. méthode des polygones de THIESSEN ; b. méthode des isohyètes.....
- Fig. 76 - Variation des débits spécifiques de pointes de crues en fonction de la superficie du bassin versant. In Opération Ardèche Claire (1984).....
- Fig. 77 - Résultats des jaugeages différentiels d'août 1983.....
- Fig. 78 - Schéma fonctionnel de l'aquifère karstique in BAKALOWICZ, 1979.....
- Fig. 79 - Diagramme conductivité - teneur en bicarbonates des exurgences des gorges.....
- Fig. 80 - Diagramme conductivité - teneur en bicarbonates des exurgences du massif des Gras.....
- Fig. 81 - Diagrammes de SCHOELLER-BERKALOFF.....
- Fig. 82 - Diagramme température moyenne - rapport caractéristique $r \text{ HCO}_3^- / r \text{ SO}_4^{2-}$
- Fig. 83 - Evolution des paramètres géochimiques des sources de la Chaire et du Boeuf.....

- Fig. 84 - Structure du système karstique des sources de la Chaire et du Boeuf.....
- Fig. 85 - L'évolution des paramètres géochimiques de l'évent de Foussoubie.....
- Fig. 86 - Evolution des paramètres géochimiques de la source de l'Aiguille.....
- Fig. 87 - Evolution des paramètres géochimiques des sources du Tiourre et du Bas-Moulin....
- Fig. 88 - Evolution des paramètres géochimiques des sources de la Fare et de Vanmalle.....
- Fig. 89 - Evolution des paramètres géochimiques de la source de la Dragonnière.....
- Fig. 90 - Catalogue de distribution de fréquence des valeurs de la conductivité des eaux
de sources d'aquifères carbonatés poreux (Evian-Cachat) , fissurés (Surgeint,
Lac Bleu) ou plus ou moins karstifiés. In BAKALOWICZ (1979).....
- Fig. 91 - Courbe de distribution des bicarbonates.....
- Fig. 92 - Etude du tarissement de la source d'Aiguille.....
- Fig. 93 - Etude du tarissement du Vallon du Tiourre.....
- Fig. 94 - Etude du tarissement de la source de la Chaire.....
- Fig. 95 - Etude du tarissement du Goul de la Tannerie.....

LISTE DES TABLEAUX

1. Reconstitution de l'histoire de la Basse-Ardèche.....
2. Caractéristiques des traçages de la goule de Foussoubie.....
3. Moyennes et écart-types des données pluviométriques annuelles.....
4. Seuils pluviométriques ayant une probabilité de 10 % et 90 % d'être atteints.....
5. Paramètres des corrélations pluviométriques inter-stations.....
6. Moyennes, écart-types et coefficients de variation des pluviométries mensuelles.....
7. Pluviométrie annuelle en 1983 et 1984.....
8. Probabilité de non dépassement du total pluviométrique de 1983 et 1984.....
9. Pluviométrie mensuelle en 1983 et 1984.....
10. Nombre de jours de précipitation en 1983 et 1984.....
11. Hauteurs maximales des précipitations en 24 H.....
12. Températures moyennes annuelles.....
13. Températures moyennes mensuelles.....
14. Températures moyennes mensuelles en 1983 et 1984.....
15. Valeurs annuelles de l'évapotranspiration réelle.....
16. Evaluation des apports annuels moyens du karst à partir du calcul des pluies efficaces, affectées aux polygones de THIESSEN.....
17. Evaluation des apports annuels moyens du karst à partir de la méthode des isohyètes.....
18. Evaluation des apports du karst pour l'année 1983 d'après la méthode des polygones de THIESSEN.....
19. Evaluation des apports du karst pour l'année 1984 d'après la méthode des polygones de THIESSEN.....
20. Débits moyens de l'Ardèche à Sauze-Saint-Martin.....
21. Débits moyens de l'Ardèche en 1983 à Sauze-Saint-Martin.....
23. Débits caractéristiques d'étiage de l'Ardèche pour les années quinquennales humides et sèches et les années médianes. In CEDRAT (1984).....
24. Débits caractéristiques d'étiage de l'Ardèche pour l'année 1983.....
25. Evaluation des apports du karst pour le cycle hydrologique. Septembre 1982 - Août 1983.....
26. Mesures de terrain de l'indice de saturation et de la pression en gaz carbonique dissous.....
27. Valeurs du rapport caractéristique moyen $r \text{ HCO}_3^- / r \text{ SO}_4^{2-}$ pour différentes émergences des gorges.....
28. Caractéristiques hydrodynamiques de quelques émergences des gorges..

ANNEXE 1

INVENTAIRE DES AVENS DU PLATEAU DES GRAS

1 Les avens du plateau de Saint-Remèze:

N° d'inventaire (fig.24)	Aven	Cote de l'entrée	Profondeur
1	Aven double	385	36
2	Devès de Reynaud	385	56
3	Aven des Costes Chaudes	300	36
4	Aven de la plaine d'Autridge	300	22
5	Aven du Faux-Marzal	350	186
6	Aven du Grand-Badingue	320	41
7	Aven de la Chenivresse	315	60
8	Puits de Plance	308	50
9	Aven Gauthier	310	25
10	Aven du Cadet	310	26
11	Aven de Courtinen	310	56
12	Aven de la Dent Rouge	260	25
13	Aven de la Rouveyrette	295	46
14	Aven de la Chèvre	320	25
15	Aven Rosa	310	25
16	Aven de Vigne Close	305	187
17	Aven du NW de Vigne Close	300	12
18	Aven Richard	325	29
19	Aven de Reynaud	345	93
20	Aven de Centura	345	82
21	Aven de Marzal	350	100
22	Aven de l'arbre rond	390	30
23	Aven des Bels 3	360	8
24	Aven des Bels 1	358	30
25	Aven de Varade	345	41
26	Aven Dumas	311	32
27	Aven de la Rouvière	260	45
28	Aven de Fontlongue	270	85
29	Aven de Fontanilles	235	17
30	Aven du Clos	410	
31	Aven du Grand Trou	375	62
32	Aven du Champ Vacher	370	
33	Aven des Aubes	320	17
34	Aven Vincent	360	26
35	Grotte Pascaloune	260	160
36	Aven du Mézelet	170	86
37	Aven de Massasse	180	26
38	Aven du Marteau	225	106
39	Aven de la plaine des Gras	250	66
40	Aven de la Grande Combe	230	85
41	Aven de la Faucille	225	25
42	Grotte des deux avens	145	20
43	Aven de Montingrand	172	35
44	Aven de la roche des fées n2	160	31
45	Aven de la roche des fées n1	160	55
46	Aven Chazot	230	51
47	Aven de la Grande Doline	235	10
48	Aven de Rochas	260	157

2 Les avens du plateau d'Orgnac:

50	Aven Cordier	190	5
51	Aven du Devès de Virac	255	40
52	Aven des Brugières	165	
53	Aven de Champagnac	198	
54	Aven des Basses Crottes	250	
55	"		
56	"		
57	L'Aven	265	
58	Trou de l'aven du Picvert	265	
59	Aven du Puits de Ronze	255	
60	Aven de Garel	270	
61	Aven de la Combe des eaux		
66	Aven de la Vipère	310	
63	Aven des 4 Chasseurs	310	49
64	Aven Bertrand(Bernard)	355	90
65	Aven du Pied Chauvet	350	
66	Aven des 2 Gorges	310	
67	Aven de la Vache	320	
68	Aven du Colombier	350	
69	Aven de la Forestière	330	
70	Trou des Fadas	360	
71	Aven des Faysses	384	10
72	Baume Simonet	235	25
73	Aven de la Baume Cartière	335	50
74	Aven du Rat	340	90
75	Aven d'Orgnac	305	168
76	Baume de Ronze	300	55
77	Trou Ferdinand	285	
78	Grotte flandin		
79	Aven du Serre Court	310	15
80	Aven de la plaine du bois d'Issirac	370	100
81	Aven Fargot	380	25
82	Aven de la Citerne	375	
83	Aven de la Sarelle	340	
84	Grand Aven	360	
85	Aven des Ingratinières	360	
86	Aven de la Terrasse	280	
87	Aven des neuf Gorges	335	

ANNEXE 2

Caractéristiques des crues à Sauze de 1970 à 1982 (in Opération Ardèche Claire)

code station	no crue	date debut	date fin	date pointe	hauteur pointe (m)	debit pointe (m3/s)	volum (hm3)	debit spf pointe (l/s/km2)	lame d'eau (mm)
c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10
SAUZE ST MARTIN		45 crues traitées							
506-40-988-7	305	10- 5-70	14- 5-70	10- 5-70 11h	3.13	512	78.0	229	35
506-40-988-7	310	7-10-70	13-10-70	8-10-70 3h	7.72	3220	370	1440	165
506-40-988-7	315	19- 1-71	23- 1-71	21- 1-71 21h	3.48	636	99.0	284	44
506-40-988-7	320	19- 3-71	24- 3-71	21- 3-71 3h	3.44	621	105	277	47
506-40-988-7	325	3- 4-71	10- 4-71	5- 4-71 13h	3.44	621	205	277	92
506-40-988-7	330	14- 6-71	17- 6-71	15- 6-71 3h	5.24	1520	115	690	51
506-40-988-7	340	10- 1-72	20- 1-72	14- 1-72 13h	3.46	628	295	281	131
506-40-988-7	345	2- 2-72	11- 2-72	4- 2-72 9h	5.40	1560	360	695	160
506-40-988-7	350	17- 2-72	22- 2-72	18- 2-72 9h	4.00	844	160	375	73
506-40-988-7	355	11-10-72	15-10-72	13-10-72 23h	3.25	553	99.0	247	44
506-40-988-7	360	27-10-72	30-10-72	28-10-72 3h	3.97	831	95.0	370	42
506-40-988-7	365	26-12-72	2- 1-73	28-12-72 23h	5.10	1380	240	620	106
506-40-988-7	370	14- 1-73	21- 1-73	18- 1-73 13h	3.37	596	190	266	66
506-40-988-7	375	5-11-73	8-11-73	6-11-73 7h	3.56	666	94.0	297	42
506-40-988-7	380	20-12-73	29-12-73	24-12-73 11h	6.83	2510	430	1120	192
506-40-988-7	385	4- 1-74	12- 1-74	6- 1-74 11h	3.70	720	215	320	95
506-40-988-7	390	29- 1-74	6- 2-74	2- 2-74 5h	3.82	769	225	345	100
506-40-988-7	395	17- 1-75	21- 1-75	18- 1-75 21h	3.58	674	130	300	59
506-40-988-7	400	11- 2-75	16- 2-75	12- 2-75 17h	4.25	955	195	425	86
506-40-988-7	405	3- 3-75	12- 3-75	4- 3-75 11h	3.90	802	205	340	92
506-40-988-7	410	4- 2-76	7- 2-76	6- 2-76 9h	2.24	276	62.0	124	27
506-40-988-7	415	19- 2-76	22- 2-76	20- 2-76 21h	2.81	419	70.0	167	31
506-40-988-7	420	29- 5-76	2- 6-76	28- 5-76 23h	6.90	2560	190	1140	84
506-40-988-7	425	12- 9-76	17- 9-76	12- 9-76 17h	7.80	2290	300	1470	125
506-40-988-7	430	26- 9-76	6-10-76	2-10-76 5h	4.20	932	265	415	122
506-40-988-7	435	11-10-76	14-10-76	13-10-76 19h	3.84	697	96.0	310	43
506-40-988-7	440	24-10-76	1-11-76	24-10-76 7h	5.66	1710	470	760	202
506-40-988-7	445	7-11-76	14-11-76	10-11-76 19h	7.78	3250	460	1450	214
506-40-988-7	455	31-12-76	4- 1-77	2- 1-77 5h	6.58	2370	215	1020	92
506-40-988-7	460	23- 1-77	30- 1-77	29- 1-77 15h	5.47	1850	340	740	173
506-40-988-7	475	27- 6-77	28- 6-77	27- 6-77 17h	3.40	760	47.0	340	21
506-40-988-7	485	21-10-77	30-10-77	23-10-77 19h	8.12	3140	590	1400	257
506-40-988-7	490	6-12-77	11-12-77	8-12-77 13h	6.69	2270	270	1020	119
506-40-988-7	500	24- 2-78	7- 3-78	26- 2-78 3h	3.84	927	350	415	157
506-40-988-7	505	26- 4-78	7- 5-78	1- 5-78 5h	4.07	1020	350	455	155
506-40-988-7	510	19- 1-79	28- 1-79	23- 1-79 9h	4.01	994	195	445	87
506-40-988-7	515	11- 2-79	14- 2-79	12- 2-79 3h	3.35	742	105	330	47
506-40-988-7	520	25- 3-79	29- 3-79	26- 3-79 9h	3.88	942	145	420	64
506-40-988-7	525	11-10-79	20-10-79	17-10-79 5h	4.37	1140	450	510	200
506-40-988-7	530	26-10-79	30-10-79	26-10-79 19h	5.10	1470	330	655	146
506-40-988-7	535	21- 9-80	28- 9-80	21- 9-80 19h	5.85	1840	150	820	66
506-40-988-7	545	26-12-81	4- 1-82	29-12-81 9h	4.05	1010	180	450	61
506-40-988-7	550	20- 9-82	23- 9-82	21- 9-82 9h	3.59	830	28.5	370	13
506-40-988-7	555	8-11-82	20-11-82	8-11-82 21h	7.92	3010	410	1340	164
506-40-988-7	560	24-11-82	5-12-82	27-11-82 16h	4.23	1090	250	485	112

ANNEXE 3

RÉSULTATS NUMÉRIQUES DES ANALYSES CHIMIQUES

Techniques d'analyses:

Les différentes méthodes de dosage des ions ont été les suivantes:

- THT , Ca^{2+} , Mg^{2+} : Dosage complexométrique;
- Na^+ , K^+ : Dosage par spectrométrie d'absorption (Na^+) et d'émission atomique (K^+);
- HCO_3^- : Dosage acidimétrique;
- Cl^- : Méthode au nitrate mercurique;
- SO_4^{2-} : Dosage par spectrophotométrie;

Tableaux numériques:

T est exprimé en °C ; C en μS ; Q en l/s ; THT en degrés français; les différents ions en mg/l.

Le numéro d'inventaire précède le nom de l'exurgence.

2: Source de la Chaire

[illegible]

I: Source du Boeuf

[illegible]

5: Event de Foussoubie

[illegible]

12: Source de la Fare

1983									
	23.01	22.03	4.07	27.07	1.09	21.09	6.10	21.10	14.11
T	15.45	15.0	15.3	15.3	15.4	15.4	15.45	15.2	/
C	500	526	549	543	539	480	543	542	554
THT	31.5	33.1	32.0	32.2	32.0	/	32.4	32.4	/
Ca ²⁺	102	123	125	105	124	/	125	124	/
Mg ²⁺	15	6	2	10	2	/	3	4	/
Na ⁺	4.9	5.2	3.5	3.6	3.8	3.8	3.6	4.4	4.7
K ⁺	1.2	1.8	1.7	1.0	1.1	1.1	1.2	1.4	1.7
SO ₄ ²⁻	14	9	2	4.5	4.5	4.5	3	9	6
HCO ₃ ⁻	373	395	393	392	386	289	390	387	387
Cl ⁻	4.3	4.7	4.5	/	3.7	/	4.0	4.9	3.6
pH	6.7	7.0							

16: Source de la Dragonnière

1983										1984			
	11.06	27.07	1.09	6.10	21.10	20.12	15.01	31.01	8.03	4.04			
T	14.45	14.6	/	14.8	/	13.7	14.1	13.9	14.0	14.1			
C	556	520	501	517	549	582	573	557	567	560			
THT	33.0	30.8	28.0	30.4	30.1	34.1	33.7	33.2	35.4	32.9			
Ca ²⁺	132	104	84	118	117	132	132	128	137	128			
Mg ²⁺	8	12	12	2	2	3	2	3	3	2			
Na ⁺	3.75	/	/	/	3.2	4.5	/	/	/	/			
K ⁺	0.8	/	/	/	1.5	1.0	/	/	/	/			
HCO ₃ ⁻	392	367	351	364	/	398	393	392	396	389			
SO ₄ ²⁻	14	10.5	9	3.5	11.5	13	12.5	14	/	9			
Cl ⁻	4.1	3.9	3.7	3.3	4.4	3.4	4.7	3.4	3.45	4.1			

33: Source du Passeron

1982					1983					1984				
	30.09	29.10	5.12	24.01	1.03	23.03	1.06	21.06	7.07	8.08	29.11	15.01	30.01	8.03
T	14.7	13.3	/	12.6	12.9	13.0	13.0	13.2	/	14.7	13.2	12.8	13.05	13.0
C	/	499	496	466	537	518	550	538	622	624	514	499	/	531
Q	0.05	0.40	1.00	0.12	1.10	0.85	0.30	0.12	/	0.05	0.25	0.15	2.50	1.0
THT	27.9	29.8	33.3	30.2	33.2	31.3	32.1	31.5	34.3	/	29.0	29.5	/	33.7
Ca ²⁺	103	103	126	88	117	118	117	121	130	/	116	113	/	130
Mg ²⁺	5	10	5	20	10	5	7	3.5	5	/	0	3	/	3
Na ⁺	2.3	2.2	2.4	3.8	2.7	5.2	4.5	5.5	9.4	11.2	3.7	/	/	/
K ⁺	1.1	0.7	1.0	0.8	0.6	0.6	0.8	1.2	1.9	1.7	0.3	/	/	/
HCO ₃ ⁻	319	317	365	321	354	351	357	344	353	362	332	340	/	355
SO ₄ ²⁻	/	/	49	30	39	35	27	29	33.5	27	17	22.5	/	29
Cl ⁻	/	7.4	8.4	6.5	6.8	7.0	7.0	7.5	13.1	/	5.0	5.2	/	6.0
pH	/	/	7.1	6.9	7.2	7.35								

Goul de la Tannerie(Tourne)

1983											
	23.03	20.04	5.05	17.05	31.05	11.06	21.06	7.07	26.07	1.09	20.12
T	12.75	13.1	12.9	13.1	13.1	13.2	13.25	13.4	14.0	13.6	13.6
C	492	541	511	521	533	540	548	560	565	562	530
Q	/	210	575	670	310	200	135	86	35	150	1000
THT	26.4	29.0	30.2	31.2	31.8	32.1	31.7	32.5	32.7	28.9	31.0
Ca ²⁺	86	115	104	106	116	129	125	123	107	107	/
Mg ²⁺	12	8	10	12	7	11	3	7	14	5	/
Na ⁺	2.8	3.1	2.6	1.4	3.0	4.3	4.3	4.2	4.3	4.3	4.7
K ⁺	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2
HCO ₃ ⁻	282	349	332	342	353	356	359	366	377	376	348
SO ₄ ²⁻	37	42	28	29	29	34	37.5	35.5	33	26	22
Cl ⁻	5.0	6.3	6.2	5.2	5.2	5.5	5.7	5.9	6.5	5.5	4.7
pH	7.1	6.8	6.8	6.7							

SOMMAIRE

<u>RESUME</u>	3
<u>INTRODUCTION</u>	5
1. Les motivations de l'étude.....	7
2. Cadre géographique et géologique.....	7
2.1. Cadre géographique.....	7
2.2. Cadre géologique.....	8
2.3. Cadre structural.....	8
3. Problèmes posés et méthodes d'étude.....	10
<u>CHAPITRE 1 - ETUDE GEOLOGIQUE</u>	11
1. Contexte général.....	13
2. Etude des formations.....	13
2.1. Le Crétacé inférieur.....	13
2.1.1. L'Hauterivien.....	13
2.1.2. Le Barrémien basal.....	14
2.1.3. Les faciès urgoniens barrémo-bédouliens (s.l.).....	14
2.1.4. L'Aptien.....	16
2.1.5. L'Albien.....	16
2.2. Le Crétacé supérieur.....	16
2.2.1. Le Cénomanién.....	16
2.2.2. Le Turonien.....	16
2.2.3. Le Sénonien.....	16
2.3. Le Tertiaire.....	17
2.3.1. L'Eocène.....	17
2.3.2. L'Oligocène.....	17
2.3.3. Le Miocène.....	18
2.3.4. Le Pliocène.....	18
2.4. Le Quaternaire.....	18
3. Etude des calcaires urgoniens sur le tracé de l'Ardèche.....	18
4. Les unités géologiques.....	20
<u>CHAPITRE 2 - TECTONIQUE ET FRACTURATION</u>	25
1. Contexte structural régional.....	27
2. Histoire tectonique.....	29
3. Etude de la fracturation du plateau des Gras.....	30
3.1. Les méthodes utilisées.....	31
3.2. L'étude photogéologique.....	31
3.2.1. La carte de fracturation.....	31
3.2.2. Les histogrammes de direction.....	32
3.3. Analyse de terrain.....	36
3.4. Conclusion.....	38
<u>CHAPITRE 3 - RELATIONS ENTRE GEOLOGIE, FRACTURATION ET ECOULEMENTS</u>	41
1. Géomorphologie karstique.....	43
1.1. Réseau hydrographique.....	43
1.2. Les formes karstiques.....	44
1.2.1. Le karst fossile.....	45
1.2.1. Le karst actuel.....	46

2. Nature et répartition des émergences.....	49
2.1. Les émergences des gorges.....	49
2.1.1. Caractères généraux.....	49
2.1.2. Nature et conditions d'émergence des sources.....	52
2.2. Les émergences de bordure du massif karstique.....	69
2.2.1. Les émergences de la vallée du Rhône.....	69
2.2.2. Les émergences de la bordure orientale.....	70
2.2.3. Les émergences du plateau d'Orgnac.....	72
2.3. Conclusion.....	74
3. Histoire de la karstification.....	74
3.1. Données géologiques.....	75
3.2. Données géomorphologiques.....	80
3.2.1. Position topographique des cavités fossiles.....	80
3.2.2. Profil en long des affluents de l'Ardèche.....	83
3.3. Analyse des directions d'écoulements karstiques.....	84
3.3.1. Les travaux de GUERIN.....	84
3.3.2. Nouvelles analyses.....	87
3.3.3. Conclusions.....	89
3.4. Mise en évidence d'une karstification profonde.....	90
3.5. Conclusions.....	94
4. Conclusions : conséquences hydrogéologiques de la comparaison des données géologiques, structurales et karstologiques.....	94 95
 <u>CHAPITRE 4 - OPERATIONS DE TRACAGE ET DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS.</u>	 97
1. Buts et méthodes.....	99
2. Les limites d'écoulement potentielles.....	100
2.1. Les bassins versants géographiques.....	100
2.2. Eléments de délimitation des bassins versants géologiques..	100
2.2.1. Les limites lithologiques.....	100
2.2.2. Les limites structurales.....	102
3. Les opérations de traçage.....	102
3.1. Méthodologie.....	102
3.2. Le traçage du vallon du Tiourre.....	103
3.3. Le traçage du ruisseau du Rieussec.....	105
3.4. Le traçage de la goule de Foussoubie.....	107
3.5. Le multitraçage de la rive droite de l'Ardèche.....	110
3.6. Le multitraçage du plateau de Saint-Remèze.....	112
3.7. Le traçage de la grotte de Saint-Marcel.....	115
3.8. Le traçage de la grotte de Pascaloune.....	116
4. Le problème oriental : le bassin versant du Rhône.....	120
4.1. Limites hydrogéologiques des bassins versants du Rhône s.s. et de la Conche.....	120 120
4.2. Limites hydrogéologiques des bassins versants de l'Ardè- che et du Rhône s.s.....	122 122
4.3. Conséquences de cette délimitation.....	122
4.3.1. De fortes circulations non repérées.....	122
4.3.2. Le bassin d'alimentation des sources de Tourne.....	123
4.3.3. Les systèmes actifs de la grotte de Saint-Marcel....	123
5. Le problème méridional : limites des bassins versants de l'Ardèche et de la Cèze.....	123 123
6. Conclusion : la carte des bassins versants géologiques.....	126

CHAPITRE 5 - ETUDE QUANTITATIVE DU KARST.....	129
1. Etude hydroclimatique.....	131
1.1. Le réseau météorologique.....	131
1.2. Les précipitations.....	132
1.2.1. Les données antérieures à 1982.....	132
1.2.1.1. Les données annuelles.....	132
a) Les histogrammes des précipitations annuelles....	132
b) Caractéristiques des séries pluviométriques.....	132
c) Ajustement à une loi de probabilité.....	134
d) Le problème de l'homogénéité de la série de Vallon-Pont d'Arc.....	134
e) Corrélations inter-stations.....	136
f) Isohyètes moyennes annuelles.....	136
1.2.1.2. Les données mensuelles.....	136
1.2.2. Les données de 1983 et 1984.....	139
1.2.2.1. Les données annuelles.....	139
1.2.2.2. Les données mensuelles.....	140
1.2.2.3. Les données journalières.....	142
a) Nombre de jours de précipitations.....	142
b) Hauteur maximale de précipitations en 24 H.....	142
1.3. Les températures.....	144
1.3.1. Les données antérieures à 1982.....	144
1.3.2. Les années 1983 et 1984.....	146
1.4. L'évapotranspiration.....	146
1.4.1. Rappels théoriques.....	147
1.4.2. Résultats obtenus.....	147
1.4.2.1. Les années 1982, 1983 et 1984.....	147
1.4.2.2. L'ETR interannuelle moyenne.....	148
1.4.2.3. Critiques des résultats.....	148
2. Bilan des apports du karst.....	149
2.1. Présentation des termes du bilan.....	149
2.2. Détermination des lames d'eau précipitée et infiltrée.....	149
2.2.1. Apports moyens du karst sur la période 1961-1982....	150
a) La méthode de THIESSEN.....	150
b) La méthode des isohyètes.....	150
2.2.2. Apports du karst en 1983.....	152
2.2.3. Apports du karst en 1984.....	152
2.3. Conclusions.....	153
3. Hydrologie de l'Ardèche.....	153
3.1. Analyse du bassin versant de l'Ardèche.....	153
3.2. Le régime hydrologique de l'Ardèche.....	153
a) L'équipement.....	153
b) Moyennes mensuelles et annuelles.....	154
c) Débits pour l'année 1983.....	154
3.3. L'hydrologie de crue.....	154
3.4. L'hydrologie d'étiage.....	156
4. Les jaugeages différentiels sur l'Ardèche.....	157
4.1. Les butts.....	157
4.2. La manipulation.....	157
4.3. Les résultats.....	158
5. Conclusion.....	160

CHAPITRE 6 - ETUDE QUALITATIVE DU KARST : STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES KARSTIQUES..... 163

1. Conceptions récentes sur le fonctionnement du karst.....	164
2. Etude hydrochimique.....	166
2.1. Les différents faciès géochimiques.....	166
2.1.1. Analyse des paramètres physico-chimiques.....	166
a) La température.....	166
b) La conductivité et la minéralisation.....	167
c) Le pH et le gaz carbonique dissous.....	168
d) Sulfates.....	169
e) Chlorures, sodium et potassium.....	172
2.1.2. Définition des faciès géochimiques.....	172
a) Les diagrammes de SCHOELLER-BERKALOFF simplifiés.....	172
b) Etude du rapport $r \text{ HCO}_3^- / r \text{ SO}_4^{2-}$	172
2.2. Evolution des paramètres physico-chimiques.....	173
2.2.1. Sources de la Chaire et du Boeuf.....	173
2.2.2. L'évent de Foussoubie.....	178
2.2.3. La source de l'Aiguille.....	180
2.2.4. Les sources du Tiourre et du Bas-Moulin.....	182
2.2.5. La source de la Fare.....	182
2.2.6. La source de la Dragonnière.....	182
2.2.7. La source de la Tourne.....	186
2.3. Courbes de distribution des bicarbonates et évaluation du degré de karstification.....	186
2.3.1. Principe de la méthode.....	186
2.3.2. La source de l'Aiguille.....	187
2.3.3. Les sources du Tiourre et de la Fare.....	187
2.3.4. L'Event de Foussoubie.....	187
2.3.5. La source de la Chaire.....	187
2.3.6. La source de la Dragonnière.....	187
2.3.7. Conclusion.....	190
3. Etude hydrodynamique.....	190
3.1. Rappels théoriques.....	190
3.2. Etude des courbes de récession de l'été 1983.....	191
3.2.1. Conditions générales.....	191
3.2.2. Sources de l'Aiguille.....	191
3.2.3. Vallon du Tiourre.....	193
3.2.4. Source de la Chaire.....	193
3.2.5. Goul de la Tannerie.....	196
3.2.6. Source de Vanmalle.....	198
3.2.7. Conclusions.....	198
3.3. Evaluation des réserves du karst.....	199
4. Les autres techniques d'investigation du karst.....	200
4.1. Les opérations de traçage.....	200
4.2. Les pompages d'essai.....	201
5. Les problèmes de vulnérabilité.....	201
6. Conclusions.....	202

<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	205
------------------------------------	-----

<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	209
----------------------------	-----

<u>LISTE DES FIGURES</u>	213
--------------------------------	-----

<u>ANNEXES</u>	217
----------------------	-----

<u>SOMMAIRE</u>	225
-----------------------	-----

DERNIERE PAGE D'UNE THESE

3È CYCLE, DOCTEUR INGÉNIEUR OU UNIVERSITÉ

Vu les dispositions de l'arrêté du 16 avril 1974,

Vu les rapports de M. .ELOUARD.P....Professeur.Université.Cl. Bernard Lyon

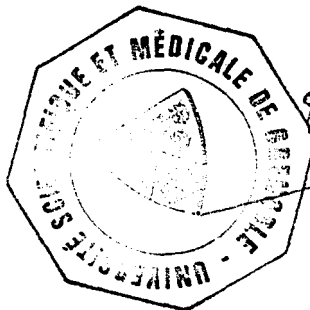
M. .FOURNEAUX.J.C....Maître-Assistant.U.S.M.G.

M. .BELLEVILLE Luc..... est autorisé
à présenter une thèse en vue de l'obtention du grade de DOCTEUR de l'Université..
.....Scientifique et Médicale de Grenoble.....

Grenoble, le 14 octobre 1985

Le Président de l'Université Scientifique
et Médicale

M. TANCHE



THESE de l'U S M G
mention : *Géologie appliquée*

Titre de l'ouvrage :

**HYDROGÉOLOGIE KARSTIQUE
GÉOMÉTRIE, FONCTIONNEMENT ET
KARSTOGENESE DES SYSTEMES KARSTIQUES
DES GORGES DE L'ARDECHE
(Ardèche, Gard)**

Nom de l'auteur : Luc BELLEVILLE

Établissement : Université Scientifique et Médicale de Grenoble

RÉSUMÉ

En bordure de la vallée du Rhône, le massif urgonien des Gras est profondément entaillé par les gorges de l'Ardèche au niveau desquelles aboutissent de nombreux systèmes karstiques.

Les caractéristiques lithologiques de l'aquifère urgonien et des formations adjacentes, la fracturation induite par la présence d'un accident majeur : la faille de Saint-Remèze, définissent la répartition et la nature des émergences du massif.

L'étude du comportement hydrogéologique des méga-accidents N 50 et N 140, les opérations de traçages systématiques, aboutissent à une délimitation des bassins versants de l'Ardèche, du Rhône et de la Cèze.

L'évaluation des volumes d'eau infiltrée, à partir des données hydroclimatiques, met en évidence l'importance des réserves renouvelables. Des jaugeages différentiels sur l'Ardèche confortent ces résultats en quantifiant les apports immergés durant une période d'étiage.

Les modalités de circulation des eaux sont appréhendées grâce aux études hydrochimiques, hydrodynamiques et à des expériences de traçage. Le karst actif se révèle peu évolué et varie de zones de calcaires fissurés à des réseaux à collecteur développé, mais à faibles réserves. La vulnérabilité de cet aquifère qui tend à augmenter avec la pression touristique sur le plateau, est principalement marquée au niveau des pertes de ruisseaux.

La collecte des données géomorphologiques prouve l'existence de plusieurs épisodes de karstification. Une phase de karstification profonde, localisée dans l'axe des gorges et en bordure de la vallée du Rhône, est mise en relation avec le creusement des gorges. Ces deux événements sont liés à la régression fini-miocène. Une puissante zone noyée occupe ces réseaux anciens dont le toit est recoupé par l'Ardèche et le karst actuel. De fortes potentialités aquifères inexploitées s'ajoutent aux réserves de surface.

MOTS-CLÉS

Hydrogéologie karstique ; Karstogenèse ; Limites de bassins versants ; Ressources en eau ; Vulnérabilité ; Basse-Ardèche.