

DYNAMIQUE KARSTIQUE D'UN HAUT MASSIF ALPIN : LA CHAÎNE DES ARAVIS METHODOLOGIE ET COMPARAISONS AVEC D'AUTRES MASSIFS MONTAGNEUX

par

François BOCQUET¹

(1 figure et 2 tableaux)

RESUME.— La Chaîne des Aravis (Bornes, Haute Savoie, France) possède un karst bien développé qui s'étage entre 500 et 2.752 m.

Deux méthodes permettent d'évaluer la dynamique karstique : l'analyse des caractères physicochimiques des eaux aux émergences permet d'estimer un taux d'ablation millénaire assez important (95 mm par millénaire); des expériences mesurant la perte de poids, par érosion, de plaquettes calcaires standard permettent une autre approche. Les premiers résultats sont comparés aux valeurs observées sur le Vercors et la Cordillère Bétique.

Par l'étude comparative des données et par un travail de réflexion méthodologique (F. Bocquet, J.J. Delannoy, G. Rovera), de nouvelles propositions permettent de compléter la méthode mise au point par la Commission "Karst Denudation" de l'U.I.S.

Mots-clés : Dynamique karstique, corrosion, méthodologie, analyse quantitative, Chaîne des Aravis, Vercors, Cordillère Bétique.

ABSTRACT.— Karst dynamics of an alpine massif : the "Chaîne des Aravis" (France). Methodology and comparison with other mountain masses.

A well developed karst extends between 500 and 2.752 m a.s.l. in the "Chaîne des Aravis" (at Bornes, Haute Savoie, France).

Two methods were used to estimate karst dynamics : the analysis of chemico-physical characters of the spring waters, which gives an estimate of about 95 mm/1000 years, quite a high rate, and experiments on weight loss of standardized limestone samples. The results are compared to the values obtained in Vercors (France) and in the Betic Mountains (Spain).

A comparative study of the data and a methodologic research (by F. Bocquet, J.J. Delannoy and G. Rovera) make it possible to complete the method of the I.U.S. Commission on Karst Denudation.

Key-words : Karst dynamics, corrosion, methodology, quantitative analysis, Chaîne des Aravis, Vercors, Betic Mountains.

INTRODUCTION

Dans le cadre d'une approche géomorphologique de la partie septentrionale des Aravis (Bornes, Haute-Savoie), nous nous sommes intéressés aux problèmes d'évaluation de la dynamique karstique actuelle (fig. 1).

La Chaîne des Aravis, orientée NNE-SSW est une barrière dont l'altitude reste, sur plus de 30 km, remarquablement élevée. En effet, la crête ne s'abaisse qu'exceptionnellement au-dessous de 2.300 m et culmine à 2.752 m (Pointe Percée). Seul le col des Aravis (1.450 m) marque une interruption dans cette continuité. Le domaine étudié constitue le crêt externe du synclinal de Thônes. Si la structure est simple au sud de la Pointe Percée (monoclinale), au nord elle devient plus complexe (chevauchements et charriages pré-alpins). Les calcaires urgoniens (200 à 250 m d'épaisseur) consti-

tuent l'armature du relief.

Le karst se développe principalement sur les calcaires urgoniens et les calcaires du Crétacé moyen et supérieur ainsi que localement sur les calcaires à nummulites de l'Eocène. La morphologie actuelle est héritée des périodes froides quaternaires. En effet, de nombreuses auges glaciaires (les "combes" des Aravis), perpendiculaires à la ligne de crête, s'inscrivent dans le versant occidental. Leur fond est accidenté de nombreuses dépressions glacio-karstiques. On observe partout un paysage de karst à banquettes structurales.

Cette chaîne constitue une barrière topoclimatique majeure puisqu'elle s'oppose aux flux dépressionnaires

¹ 10, rue A. France, 38400 St Martin d'Hères (France).

CROQUIS DE LOCALISATION

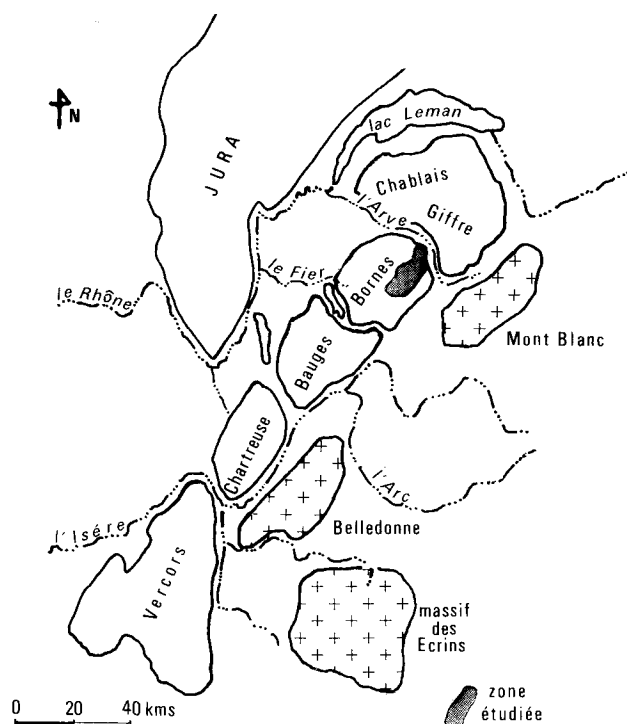


Figure 1

atlantiques. L'ascendance orographique des masses d'air humide est responsable d'un important gradient pluviométrique (85 mm pour 100 m). Si La Clusaz (1.100 m) reçoit 1.800 mm par an, il est probable que les sommets reçoivent 3.000-3.200 mm. Les précipitations médianes ont été évaluées à 2.700-2.800 mm. (absence de données climatiques en altitude). On observe donc un étagement bioclimatique particulièrement marqué.

Pour aborder le problème de la dynamique karstique actuelle, deux méthodes ont été utilisées. La première est basée sur l'étude des caractères physico-chimiques de l'eau aux émergences et la seconde repose sur l'évaluation de la perte de poids de plaquettes standard.

ETUDE DES CARACTERES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

Une seule émergence importante connue semble drainer ce terrain d'étude. Elle se situe dans la vallée de l'Arve à proximité du village de Magland (à 500 m d'altitude). C'est l'exutoire d'un système encapuchonné dans les alluvions fluvioglaciaires de l'Arve.

Les limites du bassin versant sont pour le moment peu connues. Sa surface est de toute façon supérieure à 15 km² car nous avons pu injecter un traceur chimique (solution de fluorescéine sodique) dans une petite perte située au pied des lapiaz de la Pointe Percée (1.900 m).

Le colorant est réapparu à Magland après 108 heures, effectuant un trajet de 9.500 m pour un dénivelé de 1.400 m. Sa vitesse modale de transit, proche de 100 m par heure, indique que le karst est bien drainé.

Des prélèvements d'eau ont pu être réalisés deux à quatre fois par mois pendant un an et demi. L'analyse physico-chimique sur chacun des échantillons comprend la température, le pH, la résistivité, le dosage titrimétrique des ions Ca²⁺ et Mg²⁺, le test au marbre pour évaluer l'agressivité.

L'observation des variations de quantité de matière dissoute, en fonction des saisons, montre, comme on s'y attend, que les teneurs décroissent lorsque les débits augmentent (80 mg/l de CaCO₃) lors des crues de fonte nivale, les teneurs augmentant pour leur part, lors des étiages (jusqu'à 120 mg/l de CaCO₃) en fin d'été ou en hiver. La valeur médiane, proche de 90 mg/l, est relativement faible.

Pour définir le taux d'ablation millénaire, la formule de Corbel s'adaptait à notre cas. Toutefois, certaines valeurs ont dû être estimées : d'abord, le volume d'eau percolant à travers le massif est estimé à partir de valeurs de précipitations et d'évapotranspirations peu précises pour le moment; ensuite la surface du bassin versant est aussi approximative (entre 15 et 20 km²).

Le taux d'ablation estimé est compris entre 90 et 100 millimètres par millénaire. Cette valeur est comparable à celles observées sur le San Grasso entre 1.500 et 2.000 m (J. Nicod, 1972) et sur le Désert de Platé (R. Maire, 1976), respectivement 101 et 92 mm/ 1.000 ans. Ce taux confirme que "l'abondance des précipitations compense la faiblesse des teneurs" (J. Nicod, 1972).

EXPERIMENTATION BASEE SUR L'UTILISATION DE PLAQUETTES CALCAIRES STANDARDISEES

Cette expérience a été mise au point par la commission "Karst Denudation" de l'Union Internationale de Spéléologie. Elle permet d'évaluer la perte de poids de plaquettes calcaires lors de leur exposition aux agents d'érosion.

Suite aux travaux de J.J. Delannoy (1981, 1982, 1983) sur le Vercors Septentrional et la Cordillère Bétique, nous avons envisagé d'utiliser cette méthode pour, d'une part, évaluer la dynamique karstique des Aravis et, d'autre part, comparer ces valeurs avec celles d'autres massifs montagneux.

Pour mener à bien ce travail, et en fonction d'une réflexion sur la problématique méthodologique des plaquettes calcaires (groupe de travail : F. Bocquet, J.J. Delannoy, G. Rovera), nous avons décidé de fabriquer ces plaquettes en respectant les caractéristiques préconisées par I. Gams.

Nous avons employé un calcaire pur (soluble à 99,5 ‰), peu poreux, et massif. Notre choix s'est porté sur le calcaire de faciès urgonien provenant du Vercors.

Sont rappelées ici les étapes de fabrication : extraction d'une carotte d'un bloc de calcaire urgonien (\varnothing de 39 mm \pm 0,5 mm); sciage à l'aide d'une scie diamantée de plaquettes de 4 mm d'épaisseur (\pm 1 mm); perçage de 1 ou 4 trous de fixation de 2 à 3 mm; abat-tage des angles afin d'éviter une attaque trop facile des angles vifs.

Les plaquettes sont enfin exposées aux agents d'érosion sur le terrain. Sur la Chaîne des Aravis, 6 stations ont été retenues en fonction de l'étagement (de 500 à 2.500 m).

Les plaquettes sont déposées : en atmosphère; sur sol; sous sol (plus ou moins évolué et/ou épais); sur roche (lapiés par exemple); dans les cours d'eau (pertes et émergences).

Dans le cadre de ce travail, aucune station souterraine n'a été équipée.

Les plaquettes ont été disposées sur le terrain pendant des périodes de 6 à 16 mois depuis l'automne 1982. Il est difficile de retrouver les plaquettes sur le terrain surtout si les saisons de pose et de retrait sont différentes. C'est pourquoi, il est nécessaire de baliser les stations (piquetage, fanions, peinture, etc. . .). Les plaquettes sont alors remplacées sur le terrain pour assurer une continuité de mesure puis ramenées au laboratoire.

Après un lavage à l'eau distillée, elles sont séchées suivant le même protocole. Le pesage au millième de gramme a montré que toutes les plaquettes avaient subi une perte exprimée en $g/m^2/mois$ (tab. 1). L'expression en g/m^2 permet d'obtenir des valeurs à une seule décimale. En ramenant cette perte en g/m^2 au mois, il est possible de comparer des valeurs issues de l'érosion à des saisons différentes (hiver-printemps opposé à été-automne) ou des périodes plus ou moins longues. De plus, cette unité évite de transformer les valeurs des pertes observées en taux d'ablation millénaire, opération qui semble imprudente dans l'état actuel de l'expérimentation.

Les pertes inférieures à deux milligrammes sont jugées non significatives. C'est en effet la marge d'erreur des pesées successives.

Certaines plaquettes proviennent de Yougoslavie (elles sont alors notées U.I.S.), d'autres ont été fabriquées par nos soins (annotation URGO).

Bien que possédant peu de données (18 valeurs en 16 mois), nous avons voulu les comparer à celles obtenues par J.J. Delannoy sur le Vercors Septentrional (75 valeurs en 3 ans) et sur la Serrania de Graza-lema dans la Cordillère Bétique (18 valeurs en 1 an).

Tableau 1. - Valeurs de pertes de poids de plaquettes sur la chaîne des Aravis

Lieu	Altitude	Site	Type	Perte en $g/m^2/mois$	Durée ou Saisons
Magland	500 m	émergence	UIS	- 0.3	16 mois
		"	URGO	- 0.9	16 mois
Torchére	2150 m	sur roche	URGO	- 5.4	E.A.H.
		" "	"	- 0.3	E.A.H.
		" "	"	- 0.4	H.P.E.
Balme	1900 m	sur sol	URGO	- 0.4	16 mois
		" "	idem	- 0.3	16 mois
Grand Crêt	1510 m	sur roche	UIS	- 0.5	A.H.P.
		" "	"	- 0.7	A.H.P.
Le Golet	1330 m	sur sol	UIS	- 2.0	A.H.P.
		" "	UIS	- 1.3	A.H.P.
		" "	URGO	- 0.9	E.A.H.P.
		" "	URGO	- 0.6	E.A.H.P.
		sous mousse	UIS	- 2.1	A.H.P.
		" "	UIS	- 3.1	A.H.P.
		" "	URGO	- 2.0	E.A.H.F.
		" "	URGO	- 2.2	E.A.H.P.

En effet, ces deux massifs de moyenne montagne reçoivent des précipitations de l'ordre de 1.800 mm. Elles sont toutefois bien différemment réparties. Si le Vercors reçoit ses précipitations durant toute l'année avec un coefficient de niviosité élevé, la Serrania de Graza-lema n'est arrosée que pendant 3 mois de l'année. De plus, l'évapotranspiration est beaucoup plus importante dans ce massif méditerranéen que dans les massifs préalpins.

Les résultats de J.J. Delannoy sur le Vercors ont révélé une grande variabilité des valeurs en un même site pour des périodes comparables. C'est pourquoi, il est nécessaire d'exploiter les résultats avec une certaine réserve due à toute méthode nouvelle dont les limites sont encore mal connues.

La valeur moyenne des pertes de poids des plaquettes placées en surface (atmosphère, sur sol, sur roche) est de $1,7 g/m^2/mois$ (plaquette U.I.S.). En revanche, la perte de poids moyenne des plaquettes disposées dans le sol est de $6,6 g/m^2/mois$ (plaquettes U.I.S.), mais les valeurs varient entre 1,6 et $11,2 g/m^2/mois$. Dans les cours d'eau, il est possible de relever des gains de poids relativement importants (exemple : eaux saturées des émergences de Choranche). Au contraire, après un séjour même bref, certaines plaquettes subissent des pertes très importantes qu'il est impossible d'attribuer à la seule corrosion.

Sur la Cordillère Bétique, les valeurs sont toutes inférieures à $1 g/m^2/mois$ (tab. 2). Les différences entre surface et sous sol ne sont pas très importantes.

Devant la variabilité des résultats, il était néces-

Tableau 2. – Valeurs de pertes de poids de plaquettes sur la Serrania de Grazalema (d'après J.J. Delannoy, 1984)

Lieu	Altitude	Site	Type	Perte en 9 m ² /mois	Durée
Sierra de las Nieves	1800 m	sur roche	UIS	- 2.6	12 mois
		" "	UIS	- 0.1	12 mois
Endrinal	1500 m	sur roche	UIS	- 0.3	12 mois
		" "	UIS	- 0.3	-----
		" "	URGO	- 0.4	-----
		" "	URGO	- 0.3	-----
Libar Ventana	1300 m	atmosphère	URGO	- 0.7	12 mois
		sur roche	URGO	- 0.6	-----
		" "	UIS	- 0.4	-----
		sous mousse	URGO	- 0.3	-----
Llano de Libar	900 m	atmosphère	UIS	- 0.4	12 mois
		" "	URGO	- 0.1	-----
		sur sol	URGO	- 0.3	-----
		sous sol	UIS	- 0.5	-----
		" "	URGO	- 0.5	-----
		source	URGO	+ 0.2	-----
		atmosphère	URGO	insignifiant	-----
		sous sol	URGO	- 0.6	-----

saire d'analyser la nature des pertes de poids des plaquettes.

Cette perte peut être due à une combinaison plus ou moins complexe de trois processus :

- l'usure mécanique provoquée par les frottements des plaquettes sur la roche (vent, reptation nivale, courant, etc . . .) ou les impacts d'éléments transportés par les cours d'eau (graviers, sables, etc . . .). Ce processus est surtout décelable dans les cours d'eau et prend d'autant plus d'importance que le calcaire utilisé est plus ou moins résistant à l'abrasion et que le cours d'eau a un débit solide important.

- la gélifraction semble être un processus très important pour l'érosion des plaquettes de surface dans les régions de montagne (y compris la zone méditerranéenne). Elle dépend des caractéristiques de la roche (porosité et microfracturation) et des conditions climatiques (nombre d'alternances gel-dégel, humidité des plaquettes, etc . . .). Il apparaît que les plaquettes U.I.S. absorbent après dessiccation quatre à cinq fois plus d'eau que les plaquettes URGO. Les pertes sont décelables lorsqu'il s'agit d'écaillage ou de fissuration. Une plaquette posée sur le sol à 2.300 m d'altitude sur les Aravis a accusé une perte de 5,4 g/m²/mois alors que les plaquettes voisines avaient perdu 0,3 et 0,4 g/m²/mois. En revanche, la microgélifraction (à l'échelle du limon et du sable fin) est difficile à déceler et demande une observation minutieuse. De plus, la fragilisation de la surface de la plaquette peut jouer un rôle important dans le rendement de la corrosion. La gélifraction est active

en atmosphère, sur les roches, sur les sols et dans les horizons superficiels des sols (jusqu'à 5 ou 10 cm).

- la corrosion doit son efficacité à la solubilité plus ou moins importante de la roche (carbonate de calcium, sulfate de calcium, etc . . .), à la surface de l'interface roche-eau ainsi qu'à l'agressivité variable de la solution au contact de la plaquette (celle-ci est fonction de nombreux paramètres : température, CO₂ dissous, acides organiques, sels dissous, etc . . .).

La nature et la surface de l'interface eau-roche nous semble un facteur important pour l'interprétation des résultats. L'observation de la surface des plaquettes exposées à la corrosion seule (sous horizon humifère par exemple) indique une évolution rapide. La surface d'abord polie par le sciage devient ensuite "accidentée" de petites cupules entre lesquelles des cristaux de calcite et des impuretés sont en relief. Cette surface est plus importante que la surface initiale calculée mais elle est pour le moment très difficile à estimer. Elle peut être 0,1 à 5 fois plus importante suivant l'unité et la précision de mesure de la surface. Etant donné que la corrosion est un phénomène chimique qui agit à l'échelle moléculaire, on saisit l'importance de l'évaluation de la surface. Si celle-ci croît en fonction de la corrosion jusqu'à un équilibre (?) et que la surface augmente en fonction du temps, la corrosion croît d'autant plus vite que la durée s'allonge. Cette hypothèse introduit une dérive des valeurs en fonction du temps dont nous ignorons l'importance actuellement.

Les facteurs qui sont responsables de la perte de poids des plaquettes sont multiples et complexes. Cela rend donc l'exploitation de certains résultats délicate notamment en atmosphère avec des plaquettes sensibles au gel. Toutefois, il est impossible de dégager des tendances. Ainsi, les saisons hiver-printemps montrent des valeurs 1 à 3 fois plus élevées que les saisons été-automne (d'après une cinquantaine de valeurs sur le Vercors). D'autre part, la corrosion est plus forte sous les sols qu'en surface (d'après 80 valeurs sur les Aravis, la Serrania de Grazalema et le Vercors).

Malgré les difficultés d'exploitation de certaines données, il apparaît intéressant de poursuivre et d'approfondir cette méthodologie. Cela passe par une meilleure connaissance du comportement des plaquettes calcaires utilisées.

Plusieurs expériences sont envisagées et en voie de réalisation sur un échantillonnage suffisamment important pour permettre l'exploitation statistique des données :

TRAVAIL EN LABORATOIRE

- influence du "traumatisme" du sciage-polissage (en particulier sur des roches fragiles aux chocs ou à la chaleur : craie ou gypse);
- comportement des plaquettes aux alternances gel-dégel (en chambre froide);

- cinétique de dissolution des plaquettes;
- comportement des plaquettes avec maîtrise de différents paramètres in-vitro : durée, intensité, régularité des précipitations; caractéristiques physico-chimiques des précipitations (température, pH, résistivité, agressivité, etc . . .); caractéristiques des sols percolés par les précipitations (pH, porosité, activité organique, composition chimique des eaux percolantes, etc . . .);
- usure mécanique de plaquettes par frottements ou dans une circulation de solution saturée (pas de dissolution) dont on peut faire varier la vitesse et/ou la charge solide.

TRAVAIL SUR LE TERRAIN

Sur le terrain, il faut disposer un nombre suffisant de plaquettes par site pour obtenir des valeurs ayant une valeur statistique (10 à 20, voire 50 si les variations sont trop importantes).

Il est, par ailleurs, primordial de connaître le plus précisément possible les conditions bioclimatiques et pédochimiques des stations : précipitations (nature des eaux, intensité, répartition saisonnière, nivosité, etc...); hygrométrie; température (cycles gel-dégel); nature des sols et variations saisonnières de la composition chimique des eaux percolant le sol.

Parallèlement aux plaquettes standard (URGO - U.I.S.) qui permettent d'évaluer la part des paramètres bio-climatiques sur la corrosion, il est intéressant de réaliser des plaquettes dans la roche des massifs étudiés afin de mieux cerner sa dynamique karstique. Dans cette perspective, une centaine de plaquettes ont été fabriquées avec du gypse saccharoïde, puis déposées dans plusieurs stations de la région de La Plagne, massif de la Vanoise (France) par G. Rovera, en automne 1983. Un certain nombre de précautions sont indispensables pour utiliser cette roche. Les plaquettes sont plus épaisses (6 à 8 mm au lieu de 4 mm) pour augmenter la solidité et ne doivent être chauffées au-delà de 35°C (sinon le sulfate de calcium perd son eau moléculaire et se transforme en plâtre).

La durée optimale d'exposition aux agents d'érosion semble être de 6 mois. Elle permet d'apprécier les variations saisonnières. L'idéal en montagne serait sans doute de diviser l'année en deux périodes d'une durée variable en fonction de l'altitude : une période nivale (des premières neiges à la fonte) et une période "estivale", comme l'a déjà fait J.J. Delannoy sur le Vercors (1979-1981).

Avant de tirer des conclusions à l'échelle d'un massif, il sera nécessaire de posséder plusieurs centaines

de données issues de stations bien réparties et étagées. Une analyse statistique permettra alors de définir les principaux facteurs de l'érosion des plaquettes et de les corrélérer avec les autres méthodes utilisées.

CONCLUSIONS

La méthode d'évaluation de la corrosion basée sur les plaquettes, malgré ses limites, fournit de précieux renseignements sur la dynamique karstique notamment là où les analyses physico-chimiques sont aléatoires.

Par la multiplicité des stations et des plaquettes par station, l'étude statistique devrait permettre de mieux appréhender l'érosion karstique et de minimiser les écarts de valeurs dus aux différents paramètres interférents. C'est pourquoi, il est nécessaire dans l'avenir, pour les utilisateurs potentiels de cette méthode, de multiplier le nombre de plaquettes par sites et par stations. Enfin, le choix des stations est primordial si l'on désire qu'elles reflètent l'originalité du massif étudié.

Nous nous tenons à la disposition des personnes qui souhaiteraient recevoir des plaquettes (dans la limite de nos capacités de production) ou des renseignements complémentaires.

BIBLIOGRAPHIE

- BOCQUET, F., 1983. Approche géomorphologique de la partie septentrionale de la Chaîne des Aravis (Haute Savoie - France). Mém. de maîtrise de géographie, Grenoble.
- BOCQUET, F., 1984. Recherches préliminaires en karstologie physique sur la partie septentrionale du massif des Aravis: Spelunca Mémoires n° 13, XV^e Congrès National Hyères, 1984 : 47-51.
- DELANNOY, J.J., 1981. Le Vercors septentrional : le karst de surface et le karst souterrain. Thèse de III^e cycle, Grenoble.
- DELANNOY, J.J., 1982. Les variations spatio-temporelles de la corrosion karstique dans un massif de moyenne montagne : le Vercors. Revue de Géogr. Alpine, LXX (3), Grenoble : 241-255.
- DELANNOY, J.J., 1984. La Serrania de Grazelema. Travaux de l'E.R.A. 282 du C.N.R.S., Aix en Provence.
- MAIRE, R., 1976. Recherches géomorphologiques sur les karsts hauts alpins. Thèse de III^e cycle, Nice.
- NICOD, J., 1972. Pays et paysages du calcaire. P.U.F. collection SUP.