

## HISTORIQUE DE L'ETUDE DU CO<sub>2</sub> SOUTERRAIN ATMOSPHERIQUE KARSTIQUE ET APPLICATIONS PRATIQUES

par

Philippe RENAULT<sup>1</sup>

**RESUME.** - Les observations rassemblées depuis la guerre, grâce notamment au détecteur Dräger, montrent que l'atmosphère des cavités karstiques est formée de masses d'air de compositions chimiques différentes plus ou moins morphologiquement isolées, dont les pCO<sub>2</sub> varient en fonction des variations thermobarométriques externes et hydrologiques internes, comme l'ont démontré les mesures répétées en diverses cavités. Ces résultats ont été mis en rapport avec l'évolution de la pCO<sub>2</sub> dans le sol, - dont l'évaluation pose encore quelques problèmes, notamment d'échelle de signification -, avec la dynamique spéléo-météorologique, - avec applications à la conservation des cavités archéologiques -, ou avec l'hydrogéochimie, dans la comparaison des pCO<sub>2</sub> atm sont observées et des pCO<sub>2</sub> eq. aux émergences karstiques.

**ABSTRACT.** - History of the study of underground atmospheric karstic CO<sub>2</sub>, and practical applications.

The atmosphere of karst cavities contains various air masses which have different chemical compositions, are more or less morphologically separated and have pCO<sub>2</sub> that vary according to the outside fluctuations of air temperature and pressure and according to the inside hydrological fluctuations. These observations are related to the pCO<sub>2</sub> evolution in the soil, to the speleo-meteorological dynamics and to the hydrogeochemistry.

La compréhension d'une recherche et de la portée des travaux successifs la constituant, implique de connaître l'enchaînement chronologique entre ceux-ci; s'en dégage une image de la complexité du problème posé.

Dans le cas présent, il s'agit d'une recherche reposant essentiellement sur une longue collaboration entre des scientifiques et des spéléologues, c'est-à-dire des sportifs cultivés cherchant à comprendre un milieu d'exception. Cette combinaison spontanée d'une réflexion très théorique et d'explorateurs opérant in situ, avec des moyens réduits, permet actuellement de préciser un problème fondamental en karstologie.

Cette recherche est considérée ici dans le cadre des pays francophones et, par exemple, néglige les travaux australiens malgré leur intérêt (observation de pCO<sub>2</sub> atm max de 12 ‰ en 1950).

### 1. - PREMIERES OBSERVATIONS

Le rôle du CO<sub>2</sub> dans la karstification paraît, sinon établi, tout au moins possible, à partir des travaux de Ami Boué, vers 1843, et, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la notion est admise par J. Cvijic, A. Grund, etc . . . En France, elle sera mise en balance avec l'érosion mécanique (Martel, 1921). En 1953, P. Chevalier, à partir d'expériences sommaires dans une grotte de montagne, le Trou du Glaz, généralise le caractère limité de la cor-

rosion des eaux courantes en galerie. Sa réputation fortifie cette conclusion, exacte dans le cas particulier étudié.

L'origine pédologique du CO<sub>2</sub> souterrain est précisée, entre 1920 et 1940, dans les milieux karstologiques (Adams & Swinnerton, 1937), en s'appuyant sur les mesures accumulées par les agronomes depuis les premières observations de Schloesing en 1870.

La connaissance du CO<sub>2</sub> atmosphérique en caverne s'est développée beaucoup plus tardivement. Le constat d'extinctions répétées de bougies en un même site fut interprété comme indice de concentrations locales de CO<sub>2</sub>, atteignant, en se référant aux manuels, 10 ‰. A ce propos, Martel parle de "lacs de CO<sub>2</sub>", obstacle mortel (?), expliqué par la "décantation du CO<sub>2</sub> en atmosphère calme".

Le seul dosage ancien, réalisé en 1897 sur un prélèvement dans la Grotte des Fées (St-Maurice, Valais suisse) en site à extinctions répétées de bougie, montre une teneur de 2 ‰ de CO<sub>2</sub> pour 15 ‰ O<sub>2</sub>, donc très loin des 10 ‰ redoutés mais avec une teneur en O<sub>2</sub> expliquant les extinctions.

En 1952, la publication du *Traité de Spéléologie*, de F. Trombe, constitue la première démarche d'une recherche approfondie dans le domaine des pCO<sub>2</sub> at-

<sup>1</sup> Département des Sciences de la Terre de l'Université Claude Bernard, Lyon 1, France.

mosphériques souterraines. A partir de quelques mesures effectuées dans le Quercy, et en chimiste spéléologue, il pose clairement l'existence d'une production du CO<sub>2</sub> pédologique et de ses transferts souterrains, élimine l'hypothèse des accumulations du CO<sub>2</sub> par décantation dans un fond de galerie, qui serait en contradiction avec la loi de Dalton, envisage l'existence de dégagements ponctuels de CO<sub>2</sub>. En l'absence de mesures suffisamment nombreuses, F. Trombe ne peut conclure, mais, pour la première fois en langue française, a posé le problème, en physicien, dans un cadre spéléologique.

## 2. - MESURES SYSTEMATIQUES

Dans les années suivantes, les données vont s'accumuler, d'abord avec les analyses d'eau apportant des pCO<sub>2</sub> équivalentes. A partir de ses premiers dosages, H. Roques, encore étudiant, montre, dans une note aux **Comptes rendus de l'Académie des Sciences**, en 1956, l'existence d'une répartition zonale des pCO<sub>2</sub>, que nous avons mise (Renault, 1958) en rapport avec l'environnement spéléo-morphologique; ceci sera ultérieurement confirmé (Aubert, 1967, par ex.).

Les observations atmosphériques en caverne sont liées à la mise au point d'un matériel de dosage CO<sub>2</sub> facilement utilisable dans les cavités d'accès difficile. Un essai Caumartin-Renault dans le Quercy, en 1958, ne sera pas concluant, les moyens de notre laboratoire de Lille n'ayant pas permis la réalisation d'un appareil fiable. La notion de gradient vertical des teneurs sera cependant établie. En 1962, H. Roques réalise un appareillage précis, mais encombrant, qui sera utilisé efficacement dans le gouffre de la Quèbe de Cotch, en karst d'altitude (Roques, 1963).

Dans la grotte aménagée de Lascaux, le CO<sub>2</sub> atmosphérique est dosé, depuis 1950, de diverses façons, à l'I.R. depuis 1963. De nombreuses données sont ainsi réunies, mais demeurent secrètes. Une brève synthèse de H. Schoeller (1966) conclut en fournissant quelques informations. Cette note, fondamentale mais trop sommaire, n'est pratiquement jamais citée en bibliographie. Il n'en reste pas moins que l'auteur donne une existence scientifique aux "lacs de CO<sub>2</sub>" de Martel.

A partir de 1965, de nouvelles méthodes d'exploration (spéléologie alpine, désobstructions, . . .) amènent la découverte de cavités parfois "irrespirables". Des méthodes "bricolées" sont essayées pour surmonter cet obstacle - bouteilles de O<sub>2</sub> légères, ou pose d'une manche de rilsan pour apport d'air frais (Aven du Paulin, Gard, Durepaire, 1968) - de portée nécessairement limitée.

Des instruments portatifs apparaissent dans le commerce, entre autres le détecteur Dräger adopté par beaucoup de spéléologues, pédologues, etc. pour sa précision et sa facilité d'emploi. Il sera utilisé par R. Gaïa et W. Levier dans l'Ardèche, à partir de 1967,

Ph. Renault, à partir de la même année, dans les Pyrénées, le Quercy, l'Ardèche et autres lieux, le Dr Bögli, en 1970, dans le Hölloch (Suisse), M. Lamouroux, en 1970, au Liban, S. Dayma, puis J.C. Coustou, à partir de 1975 dans le Quercy, G. Rossi, en 1976, à Madagascar, le S.C. Paris dans l'Yonne, etc.

D'autres instruments sont employés. C. Ek (1968, etc.) et J. Godissart (1975), travaillent en Belgique et en Pologne, dans des cavités à faible teneur avec une cellule de Koepf, instrument lourd et encombrant, mais précis et permettant de multiplier les dosages in situ, donc d'étudier les rapports entre volumes d'air de compositions différentes dans une cavité. H. Roques (1963) et J.J. Miserez (1973) utilisent la pHmétrie dans les Pyrénées et en Suisse. Avec un carbonimètre Zeiss I.R., le Laboratoire de Recherches des Monuments historiques (Ministère de la Culture, France) mesure systématiquement les pCO<sub>2</sub> atm dans les grottes à peintures préhistoriques françaises (Vouvé, 1975; Brunet *et al.*, 1980). B. Verdier (1977), dans les Pyrénées, sur échantillons prélevés dans la grotte de Ste-Catherine (Ariège), dose CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> avec un analyseur de Scholander. C. Ek (1981b) puis M. Gewalt & C. Ek (1983) utilisent un analyseur Gastec, basé sur la réaction de l'hydrazine avec le CO<sub>2</sub>.

Une technologie des mesures s'est élaborée simultanément. Rappelons d'abord que les possibilités d'emploi et la précision de chaque méthode conditionnent les résultats. En dehors des mesures ponctuelles, peu nombreuses, lors d'une exploration, sont réalisés des profils longitudinaux de teneurs en galerie. C. Ek (1979, 1981a) dans les grottes belges et québécoises à petites teneurs, multiplie les points de mesures en cherchant à définir des volumes atmosphériques correspondant à des masses d'air de composition donnée (voir aussi Gewalt & Ek, 1983). Ph. Renault simplifie les profils en cherchant à définir des zones, en fonction de la morphologie, dans les cavités à hautes teneurs du Quercy français.

En outre, les variations dans le temps, à une station donnée, ont été étudiées dès 1962 (H. Roques). Plusieurs campagnes ont été réalisées en diverses cavités françaises (Renault, 1979). Citons également les relevés de T.C. Atkinson en 1970 dans les Mendips (Atkinson, 1977), de C. Ek en 1978, au Trou Joney (Belgique) (Ek, 1979), R. Bourgeois, en 1983, dans le Gard (inéd.). Parmi ces relevés il faut mentionner l'"Opération Cocalière, Gard", réalisée avec d'importants crédits C.N.R.S., France, entre 1974 et 1977, ayant pour but d'enregistrer en continu la variation du CO<sub>2</sub> atm et, simultanément, les débits des circulations souterraines, la pluviométrie, les températures, pressions barométriques, . . . externes.

Entre 1967 et ce jour, ces spéléologues ont rassemblé plusieurs milliers de données.

Il convient d'en faire la synthèse, c'est-à-dire d'expliquer des variations allant de 0,02 à 7 % selon

les cavités et l'époque de la mesure.

F. Trombe, en 1952, en posant l'origine pédologique du CO<sub>2</sub> sous karst ne pouvait, en l'absence de données, analyser les processus de transfert. Actuellement, les résultats suivants peuvent être considérés comme acquis :

- dans un type de cavité donné, les **teneurs** varient d'une région géographique à l'autre, en fonction du relief, de l'ensoleillement, etc. (Renault, 1968), avec des pCO<sub>2</sub> max de 1 ‰ dans les Pyrénées, 7 ‰ dans le Quercy, etc., ou dans un massif donné, 1,4 ‰ à proximité du versant sud et 0,06 ‰ près du versant nord (Renault, 1983);

- dans une grotte donnée, coexistent des **masses** d'air de composition chimique et de densité différentes, avec transitions parfois très rapide (passage de 1,2 à 3,8 ‰ sur quelques centimètres, gouffre Pégaze, Lot); ce **cloisonnement morphologique** était empiriquement inclu dans les "lacs de CO<sub>2</sub>" de Martel et dans la formule, physiquement inexacte, mais parlante, du "CO<sub>2</sub> qui se décante", et traduit simplement ce constat que des masses d'air à haute pCO<sub>2</sub> se localisent en certains points bas du spéléosystème, d'autres dispositions étant observables (Ek, 1968; Renault, 1968, 1981);

- les pCO<sub>2</sub> atmosphériques varient suivant le rythme saisonnier thermique et, avec une amplitude moindre, suivant un rythme pluri-journalier, en fonction des oscillations barométriques (Ek, 1979, Renault, 1979);

- d'une année à l'autre, les variations générales de la pCO<sub>2</sub> sont approximativement isomorphes, mais avec des valeurs absolues suivant le régime pluvio-thermique de l'année considérée, ou avec les variations morphologiques de la cavité (amorçages de voûtes mouillantes, désobstructions, ouvertures ou fermetures de portes) (Renault, 1979 et 1983).

Ce modèle est l'aboutissement de 15 ans de prospection avec accumulation de mesures localisées. Ils conduisent à l'analyse de la dynamique atmosphérique souterraine et à l'interprétation des équilibres hydrochimiques karstiques.

### 3. - APPLICATION A LA METEOROLOGIE SOUTERRAINE KARSTIQUE

La météorologie souterraine a été introduite avant le XVIII<sup>e</sup> siècle par ce constat que les souterrains "soufflaient un air frais". Jusqu'à une époque récente, la dynamique des mouvements de l'air souterrain et de ses variations d'humidité, était envisagée d'un point de vue thermique. Mais, dans beaucoup de cas, notamment lorsque la dénivellation du relief est réduite, les variations de températures sont faibles, inférieures à 1/10°C dans beaucoup de cas, ne dépassant pas 1 ou 2°C ailleurs, ce qui limite les possibilités d'analyse et, surtout, ne permet pas d'analyser les effets des variations barométriques.

Les pCO<sub>2</sub>, facilement dosables au 1/100 ou au 1/10 de ‰ dans des cavités où les valeurs oscillent souvent de plusieurs ‰, conduisent à apprécier des variations atmosphériques correspondant non plus aux thermo-circulations, mais à des échanges entre masses d'air différentes (échanges fentes - conduits, réseau profond - zone de versant etc.).

La spéléométéorologie ne se limite plus alors à l'analyse des **thermo-circulations**, observées dans les régions de relief accentué, - montagne ou zone de versant-, mais en outre permet d'étudier les cavités en régime **thermobarométrique** (grottes chaudes et froides des anciens auteurs et zone profonde des régions de plateaux) observé dans les cavités où prédominent les échanges entre masses d'air morphologiquement cloisonnées, échanges trop lents et diffus pour être décelables par la ventilation, mais révélés par les transformations de la pCO<sub>2</sub> atmosphérique.

Cette dualité des réponses dynamiques souterraines aux variations météorologiques régionales interfère avec des variations de pCO<sub>2</sub> liées à l'activité pédologique et à l'activité hydrologique. Ces deux derniers points seront développés plus loin.

Auparavant, signalons les applications de cette spéléométéorologie carbonique à la conservation des sites spéléologiques. Elle a été à la fois découverte et appliquée à propos des grottes à peinture préhistoriques françaises, dans le cadre des études du L.R.M.H. Citons:

- la Grotte thermobarométrique de Lascaux, déjà citée, actuellement climatisée dans un but conservatoire (Vouvé *et al.*, 1982);

- la Grotte de Font-de-Gaume (Dordogne), également climatisée après étude météorologique, au cours de laquelle les variations de la pCO<sub>2</sub> ont été attentivement considérées (Brunet, 1980);

- la Grotte thermo-ventilée du Pech-Merle (Lot), où les variations des pCO<sub>2</sub> biquotidiennes ont permis d'évaluer les effets de la présence des visiteurs en saison touristique (Renault, inéd.);

- le Réseau à régime variable de Niaux-Lombrive (Ariège) dans lequel une longue étude des pCO<sub>2</sub> avec comparaison des régimes spéléométéorologiques à 4 ans d'intervalle, suivie d'une analyse des influences climatiques régionales et des modifications morphologiques, a permis de saisir le processus d'altération des peintures préhistoriques observé depuis 1978 (Renault, 1983).

4. - CONNAISSANCE DES pCO<sub>2</sub> PEDOLOGIQUES

L'analyse des pCO<sub>2</sub> souterraines karstiques est inséparable de l'étude de la dynamique du CO<sub>2</sub> pédolo-

gique. Depuis Schloesing, ce problème a suscité de nombreux travaux dont les résultats alimentent les tableaux de données des manuels et traités. La variété des chiffres obtenus a conduit les karstologues à évaluer les  $\text{CO}_2$  pédologiques in situ. Cette recherche entreprise hors-francophonie (Miotke, 1974; Jakus, 1977) et en France (Vouvé, 1975; Renault, 1979; Bakalowicz, 1979) soulève deux problèmes rarement évoqués.

Le sol est un milieu complexe, zoné en horizons et dont les propriétés varient, en fonction de l'environnement local, dans l'espace (relief, végétation, . . .) et dans le temps (rythme saisonnier). Les  $\text{CO}_2$  pédologiques observés traduisent d'abord les effets du cadre géographique. Le diagramme présenté par M. Bakalowicz (1979) note en sondage 2 ‰ max. de  $\text{CO}_2$  à 1 m sous un chêne et 1,2 ‰  $\text{CO}_2$  max. sous prairie. De même, Rossi (1979) observe 1,2 ‰  $\text{CO}_2$  max. en sol ferrallitique sec et 4,5 ‰  $\text{CO}_2$  max. en sol hydromorphe, etc. Les deux exemples cités marquent l'importance de l'environnement végétal (Bakalowicz) et de la nature de l'horizon étudié (Rossi) dans la valeur obtenue.

L'échantillonnage, en fonction de la méthode utilisée, apporte des informations différentes. Pratiquement, sur le terrain, deux méthodes peuvent être adoptées :

- Les sondages à diverses profondeurs donnent une information ponctuelle en fonction de la structure locale. Ils fournissent des teneurs soumises à l'environnement proche et, dans une certaine mesure, des conditions de réalisation du forage. Les données recueillies correspondent, a priori, à des valeurs minimums.

- Les enceintes, en forme de cloche, posées sur le sol, permettent d'évaluer le flux de  $\text{CO}_2$  migrant vers l'extérieur. Elles fournissent une valeur globale comparable, dans une mesure qui reste à préciser, avec les valeurs souterraines en cavité non ventilée.

D'une façon générale, dans un karst, la mise en rapport des  $\text{pCO}_2$  entre système pédologique, système sous-saturé (biphasé) et système noyé pose des problèmes scalaires, en fonction des méthodes d'observation, et des problèmes d'équilibre, notamment entre aquifère et atmosphère souterraine.

## 5. - TRANSFERTS CARBONIQUES ENTRE ATMOSPHERE SOUTERRAINE ET AQUIFERE KARSTIQUE

Après 1945, le sujet fut abordé sommairement par F. Trombe (1952) d'un point de vue théorique, et développé par H. Roques qui, en 1956, après avoir évalué les  $\text{pCO}_2$  éq. des résurgences du Quercy, pose l'existence d'une distribution spatiale du  $\text{CO}_2$  karstique souterrain. Ultérieurement il publiait le bilan d'une prospection géochimique, portant sur 208 résurgences

franco-belges, ayant toujours valeur de référence (Roques 1963) et dans laquelle les  $\text{pCO}_2$  éq. sont attentivement considérées.

T.C. Atkinson (1977) est, à notre connaissance, le premier à mettre en rapport la  $\text{pCO}_2$  des sols (dosés en sondage sur les eaux d'infiltration) et les  $\text{pCO}_2$  éq. aux résurgences, à la suite d'une campagne d'un an, en 1979, dans les Mendip Hills. Il constate que les teneurs pédologiques sont inférieures aux  $\text{pCO}_2$  éq. des résurgences. Cette différence est expliquée par des apports de matières organiques en profondeur entraînant une élévation progressive des  $\text{pCO}_2$  vers le bas.

M. Bakalowicz (1979) pose au préalable : " le flux de  $\text{CO}_2$  par diffusion dans l'air souterrain ne peut qu'être négligeable devant celui dirigé vers l'atmosphère ". Il démontre cette hypothèse en présentant les résultats d'une campagne dans la Grotte de Ste-Catherine surmontant la résurgence du Baget (Ariège). Il s'agit d'une cavité de versant à plusieurs ouvertures, bien ventilée dans sa partie supérieure. Bakalowicz compare les  $\text{pCO}_2$  du sol (sondages à -1 m), les  $\text{pCO}_2$  éq. de la résurgence sous-jacente et, donnée originale, les  $\text{pCO}_2$  mesurées en sondages dans les parois de la grotte et considérées comme représentatives de la zone sous-saturée.

Les observations publiées (août 1978 à juin 1979) montrent que les  $\text{pCO}_2$  à la résurgence sont proches ou légèrement supérieures aux  $\text{pCO}_2$  dans le sol. Les  $\text{pCO}_2$  en sondage pariétal de cavité opposent les eaux d'infiltration (2,5 ‰ max.) aux dosages en zone ou en période sèche (0,5 ‰, ce qui correspond à une atmosphère de galerie ventilée).

L'auteur ne retient pas l'interprétation d'Atkinson, mais explique les teneurs observées dans la zone sous-saturée par le rôle de "reconcentration" de l'eau "à l'égard du  $\text{CO}_2$  de l'air". Il faut regretter, en raison de la tentative de généralisation de cette notion, l'absence d'étude géomorphologique de ce système complexe connu à partir d'une petite cavité.

S'opposant au schéma déductif précédent, le modèle très empirique de Ph. Renault (1981), élaboré avec les informations recueillies par les spéléologues dans les cavités du Causse de Gramat (Lot, plateau de 60 x 25 km drainé par plusieurs rivières souterraines de plusieurs kilomètres, Padirac, Vitarelles, . . .). Il montre que, après avoir traversé les "réseaux de versant" de la zone sous-saturée, les visiteurs accèdent à une "zone profonde", en rapport direct avec le sol végétal, - à haute  $\text{pCO}_2$ , à certaines époques (7 ‰ en saison sèche)-l'équilibre des  $\text{pCO}_2$  en profondeur résultant des échanges entre phases liquides (transport en solution) ou gazeuse (diffusion, déplacements en masse). Le rôle de cette phase gazeuse n'est pas négligeable comme le montrent les teneurs atmosphériques en cavités cutanées et cavités sèches de la zone sous-saturée.

Dans la partie inférieure du système, le drainage

majeur observé sous la forme de rivières souterraines de débit important, s'effectue dans des conduits où les pCO<sub>2</sub> sont basses (2 à 3 ‰), ce qui traduit une exportation du CO<sub>2</sub> souterrain vers l'extérieur. Les valeurs observées s'accordent avec les pCO<sub>2</sub> éq. à l'émergence évaluées par H. Roques (1963). La modélisation quantitative est en cours d'élaboration.

Il faut encore signaler les travaux de l'Ecole hydrogéologique d'Orléans sur la Source du Loiret (Loiret), animés par M. Lepiller, montrant le rôle des apports organiques, issus des pertes de la Loire, dans la genèse de la pCO<sub>2</sub> éq. à certaines émergences (Chery *et al.*, 1982). Ce travail amorce de nouvelles recherches.

## 6. - CONCLUSION

De cette réflexion collective, soutenue par les observations accumulées ces 20 dernières années, se dégage la notion d'un système atmo-hydrologique souterrain karstique. Les difficultés opératoires de son analyse reposent sur l'étude des liaisons entre des sous-systèmes ayant chacun des caractères et une dynamique propre. Cette analyse implique la prise en considération :

- du **sous-système pédologique** - assimilable à une entrée, remplissant la fonction de zone limite entre l'environnement végétal et le système atmo-hydrologique profond, et, de ce fait, obligeant à distinguer les pCO<sub>2</sub> en sondage du flux de CO<sub>2</sub> vers l'extérieur et vers l'intérieur du massif, sans négliger la production s.s. biopédologique (étude en laboratoire);

- du **sous-système des fentes** (Racovitza), qui est enrichi en CO<sub>2</sub> par le flux vers le bas du sous-système pédologique, sous forme gazeuse ou dissoute dans les eaux d'infiltrations, et connu par examen direct (exploration des fentes ou sondages) ou indirecte en galerie (analyses d'eau ou mesures atmosphériques);

- du **sous-système des cavités sèches explorées** où s'observent les échanges entre le sous-système des fentes, le sous-système hydrologique sous-jacent, et l'environnement atmosphérique externe, en fonction de l'organisation morphologique déterminant un emboîtement complexe de sous-systèmes (réseaux de versant ventilés, réseau profond, . . . ) parmi lesquels les **axes de drainage majeurs** situés à la limite entre zone sèche et zone noyée dynamique et qui, dans le Causse de Gramat, correspondent à un soutirage vers la **sortie hydrologique du système karstique** défini.

La partie sous-jacente de la zone noyée, jusqu'à présent, n'a été considérée qu'accessoirement (notion de limite de karstification en profondeur), et ne relève pas du domaine considéré ici.

Ce résumé conduit à la notion de **spéléogenèse** karstique, c'est-à-dire à l'analyse des effets des pCO<sub>2</sub> non plus à l'échelle subhistorique, mais à l'échelle géologique. Cette analyse déborde du cadre géochimi-

que et implique la prise en considération du cadre climato-orogénique. Les interprétations spéléogénétiques actuellement publiées sont essentiellement hydro-morphologiques ou reposent sur la prise en considération d'un seul paramètre. Elles demeurent trop sommaires pour guider dans l'interprétation du détail des dispositifs morphologiques complexes rencontrés dans la nature. Citons le problème morphogénétique des grandes salles. Actuellement la découverte du système atmo-hydrologique karstique apporte un élément nouveau à considérer dans une perspective systémique des études du karst.

## BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS & SWINNERTON, 1937. The solubility of limestone. Trans. Amer. Geophys. Union, 18 : 504-508.
- ATKINSON, T.C., 1977. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated stone. J. Hydrol., Amsterdam, 35 : 111-123.
- AUBERT, D., 1967. Estimation de la dissolution superficielle dans le Jura. Bull. Soc. Vaudoise Sc. Nat., 324 : 365-376.
- BAKALOWICZ, M., 1979. L'anhydride carbonique dans la karstogenèse. Proc. Int. Symp. Karstic Erosion, Aix en Provence, Mém. 1 de l'Assoc. Fr. de Karstologie, Nîmes, 41-48 et thèse d'Etat, Paris : 59-92.
- BÖGLI, A., 1974. Beobachtungen zum CO<sub>2</sub>-gehalt der luft im Hölloch. Actes 5e Congr. Nat. Speleo., Interlaken : 68-71.
- BRUNET, J., VIDAL, P. & STEFANAGGI, M., 1980. Grotte de Font-de-Gaume aux Eyzies (Dordogne). Etude du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère. Speleon, Barcelone, 25 : 37-45.
- CHEVALIER, P., 1953. Erosion ou corrosion. Essai de contrôle. Actes 1er Congr. Int. Spéléo. Paris, 2 : 35-39.
- CHERY, J.L., LELONG, F., LEPILLER, M., CHATELAIN, S. & LIVROZET, E., 1982. Impact des apports de la Loire sur la qualité des eaux du système karstique de la Beauce sous le Val D'Orléans. 3e Coll. Hydrol. Pays Calc., Neuchâtel, Ann. Sc. Univ. Besançon, Géol. Mém. 1 : 47-76.
- EK, C., DELECOUR, F. & WEISSEN, F., 1968. Teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de quelques grottes belges. Ann. Spéléo., 23 : 243-257.
- EK, C., 1979. Variations saisonnières des teneurs en CO<sub>2</sub> d'une grotte belge : le Trou Joney à Comblain-au-Pont. C.R. Coll. Franco-belge de Karstologie Appl., Liège : 71-75.
- EK, C., 1981a. Mesures de CO<sub>2</sub> dans l'air des grottes : Comparaison Québec-Belgique. Proceedings Eight International Congress of Speleology. Bowling Green, USA, 2 : 672-673.
- EK, C., 1981b. La forte teneur en gaz carbonique de l'air d'une cavité du Québec : la grotte St-Léonard, île de Montréal. Naturaliste canadien, 108 : 57-63.
- GEWELT, M. & EK, C., 1983. Le CO<sub>2</sub> de l'air d'une grotte des Alpes ligures : la Caverna delle Fate. Bull. Soc. géogr. Liège, 19 : 107-117.
- GODISSART, J. & DELVENNE, P., 1975. Observations sur les fluctuations du CO<sub>2</sub> de l'air émis par une caverne dans différentes conditions d'écoulement. Ann. Spéléo., Paris, 30 : 401-402.

- JAKUCS, L., 1977. Morphogenetics of karst regions, A. Hilgers, éd., Bristol, p. 284.
- MARTEL, E.A., 1921. Nouveau traité des eaux souterraines. O. Doin, éd., Paris, p. 839.
- MIOTKE, F.D., 1974. Carbon dioxide and the soil atmosphere. Abhandl. Z. Karst und Höhlenkunde, München A (9), p. 49.
- MISEREZ, J.J., 1973. Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse, Univ. Neuchâtel, Suisse, p. 313.
- RENAULT, Ph. & CAUMARTIN, V., 1958. La corrosion biochimique dans un réseau karstique et la genèse du mond-milch. Notes biospéléo., Paris, 13 : 87-109.
- RENAULT, Ph., 1968. Sur la distinction de plusieurs régions karstiques en raison de la teneur en anhydride carbonique des atmosphères de grottes. C.R. Acad. Sc., Paris, 267 (D) : 2288-2290.
- RENAULT, Ph., 1979. Mesures périodiques de la  $pCO_2$  dans les grottes françaises au cours de ces dix dernières années. Actes Symp. Int. Erosion Karstique, Aix-en-Provence : 17-33.
- RENAULT, Ph., 1981. Le  $CO_2$  atmosphérique dans les grottes du Quercy. Spéléo-Dordogne, Périgueux, 74 : 116.
- RENAULT, Ph., 1983. Etudes récentes sur le karst de Niaux-Lombrive-Sabart (Ariège). Karstologia, Nîmes, 2 : 17-22.
- ROQUES, H., 1956. Sur l'existence d'un gradient karstique des pressions partielles de l'acide carbonique. C.R. Acad. Sc., Paris, 242 : 3100-3102.
- ROQUES, H., 1963. Sur la répartition du  $CO_2$  dans les Karsts. Ann. Spéléo., Paris, 18 : 141-184.
- ROSSI, G., 1979. Quelques observations sur le  $CO_2$  dans les sols tropicaux et leurs conséquences possibles sur la dissolution des calcaires. Actes Symp. Int. Erosion Karstique, Aix-en-Provence : 35-39.
- SCHOELLER, H., 1966. Conduite de l'étude hydrogéologique et climatologique des grottes descendantes. Spelunca, Paris, Mém. 5 : 76-93.
- TROMBE, F., 1952. Traité de spéléologie, Payot, éd., Paris, p. 376.
- VOUVE, J., 1975. Etude en hydrogéologie . . . karstique. Thèse d'Etat, Bordeaux, 254 + 164 p., 11 dpl h.t.
- VOUVE, J., BRUNET, P., VIDAL, P. & MARSAL, J. Lascaux en Périgord Noir. Fanlac P., éd., Périgueux, p. 87.