

CAMILLE EK

LES PHENOMENES KARSTIQUES

NOTES DE COURS

1998.

**CAMILLE EK**

**LES PHENOMENES KARSTIQUES**

**NOTES DE COURS**

**1998.**

1957	Liège, 1957
1967	Liège, 1967
1973	Liège, 1973
1983	Liège, 1983
1988	Liège, 1988

## AVANT - PROPOS .

-----

C'est à l'intention des étudiants que ces notes ont été rédigées. On y trouvera donc uniquement, et sans prétention stylistique, les notions qui m'ont paru fondamentales pour l'étude des phénomènes karstiques. Les graphiques joints au texte ne font pas que l'illustrer. Ils le complètent aussi en donnant une information quantitative sous une forme très condensée. Les paramètres et les coordonnées étant clairement représentés, ou définis dans la légende, il est laissé au lecteur, dans une certaine mesure, le soin d'interpréter le graphique.

Nombre de notions et d'illustrations de ce syllabus sont directement tirées des recherches effectuées au Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire de l'Université de Liège. A une bibliographie sélective des principaux ouvrages généraux sur le sujet et à la brève liste des ouvrages cités dans le texte ont donc été ajoutées, à titre documentaire, deux autres listes bibliographiques: celle des thèses de doctorat et des mémoires de licence présentés par des étudiants de l'Université de Liège sur des problèmes karstiques, et la liste des études karstiques publiées par notre Laboratoire.

Les éditions successives de ce syllabus ont grandement bénéficié de mes échanges de vues avec les collègues de notre Laboratoire et des collègues d'autres pays; il a profité des critiques constructives de plusieurs. Monsieur A. Laurant, en particulier, est à l'origine de diverses modifications de la Deuxième Partie. Messieurs A. Briffoz, A. Demoulin, M. Gewalt et F. Girolimetto ont également proposé plusieurs améliorations du texte de la troisième édition. Que tous soient chaleureusement remerciés.

Liège, janvier 1998

C. EK.

Première édition:	Liège, 1978
Deuxième tirage:	Montréal, 1979
Troisième tirage:	Montréal, 1980
Deuxième édition:	Liège, 1982
Troisième édition:	Liège, 1987
Quatrième édition:	Liège, 1993
Cinquième édition:	Liège, 1998

## SOMMAIRE.

---

	p.
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1.</b>
<b>I. FACTEURS ET PROCESSUS</b>	<b>3.</b>
<b>A. Processus de la dissolution</b>	<b>3.</b>
<b>B. Facteurs climatiques et météorologiques</b>	<b>8.</b>
<b>C. Les parts respectives de la dissolution         et de l'érosion mécanique</b>	<b>11.</b>
<b>II. FORMES ET DEPOTS</b>	<b>13.</b>
<b>A. Les formes</b>	<b>13.</b>
<b>B. Les variantes climatiques</b>	<b>21.</b>
<b>C. Les dépôts en milieu karstique</b>	<b>25.</b>
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>31.</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>32.</b>

## INTRODUCTION.

### Calcaires et karst; roches karstiques et paysage karstique.

*On peut faire des réserves sur la conception d'un "relief granitique", d'un "relief gréseux"; aucune discussion n'est possible sur la légitimité de l'expression de "relief calcaire".*

E. de MARTONNE.

Des gouffres, des dépressions fermées, des lapiés... tels sont les phénomènes qui, à première vue, font reconnaître un paysage calcaire et qui, dans un état typique, font dire du paysage qu'il constitue un "karst".

Le KARST est, à l'origine, le nom propre d'un plateau calcaire du nord-ouest de la Yougoslavie, à l'est de Trieste. Etymologiquement, le mot viendrait de la racine indo-européenne *krs* désignant un terrain rocheux. Les habitants de la région désignent celle-ci de son nom slovène de Kras; Karst est une dénomination germanique et son usage provient de ce que les premières études géographiques qui ont rendu la région internationalement célèbre, et qui l'ont fait choisir comme lieu éponyme des paysages marqués par la dissolution du calcaire, ont été publiées alors que la région était sous domination autrichienne et que l'allemand en était la langue officielle.

Dans le Karst yougoslave, les calcaires et dolomies mésozoïques (Trias, Jurassique, Crétacé) constituent une série sédimentaire généralement ininterrompue - ou quasiment - sur plus de 1000 m, parfois sur 4000 m de puissance; les phénomènes de dissolution s'y sont développés de façon spectaculaire: grottes, rivières souterraines, dépressions fermées de toutes tailles, vallées sèches et roches ciselées par la dissolution y abondent.

Les calcaires et les dolomies constituent ainsi typiquement des ROCHES KARSTIQUES. On réserve ce nom aux roches carbonatées cohérentes (calcaires et dolomies), présentant des formes superficielles et souterraines caractéristiques de la dissolution; par extension, on donne parfois ce nom à toute roche soluble (comme les formations de sel, de gypse, de craie).

Tout karst n'est donc pas forcément en terrain calcaire. Un terrain calcaire ne donne du reste pas nécessairement un karst (petit synclinal perché, par ex., ne collectant pas assez d'eau; ou calcaire en climat désertique...).

Mais, en première approximation et si l'on tient compte des grands paysages, on peut presque assimiler paysage calcaire et paysage karstique.

Encore faut-il identifier un relief karstique. Les ciselures de la roche, les parois verticales, les dépressions fermées en sont des marques fréquentes. Aucune n'est partout présente.

Le trait commun des paysages karstiques est l'expression (variable dans ses formes) d'un phénomène général: *la tendance de l'eau à descendre, à s'enfouir, à disparaître du paysage.*

Parfois, l'eau disparaît dans des gorges, des canyons; souvent, c'est au sein même de la terre qu'elle s'enfuit.

L'originalité du relief karstique est du reste perçue par les grands géomorphologues: Derruau qualifie le relief calcaire d'"anormal" et d'"absurde" dans son *Précis de Géomorphologie* (1956); Birot, dans son *Précis de Géographie physique* (1959), énonce que "les calcaires sont caractérisés par l'anarchie des versants".

La genèse de la morphologie des calcaires a donné lieu à des controverses passionnées. La dissolution souterraine est-elle le fait de l'eau des nappes aquifères, ou au contraire de courants d'eau localisés ? La dissolution des calcaires est-elle la plus forte dans les régions chaudes ou dans les régions froides ? Ces questions furent à l'origine de vives polémiques. Telles quelles, cependant, comme nous allons le voir, elles sont mal posées.

Si l'eau descend plus vite que le relief et tend à disparaître du paysage, c'est que le calcaire est soluble. Il peut dès lors être entraîné par l'eau sans intervention des agents de désagrégation mécanique, sans énergie cinétique. Le calcaire voyage à l'état d'ions dans des filets d'eau qui seraient bien incapables de contribuer à l'abaissement du relief ou au transport des moindres particules solides.

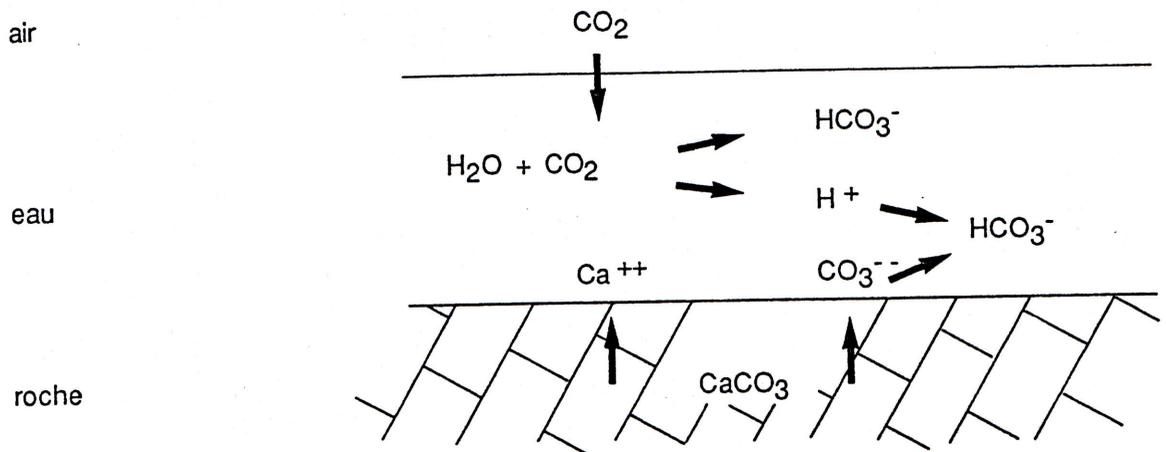
Le principe du processus karstique réside donc dans son aspect chimique.

# I. FACTEURS ET PROCESSUS

## A. PROCESSUS DE LA DISSOLUTION

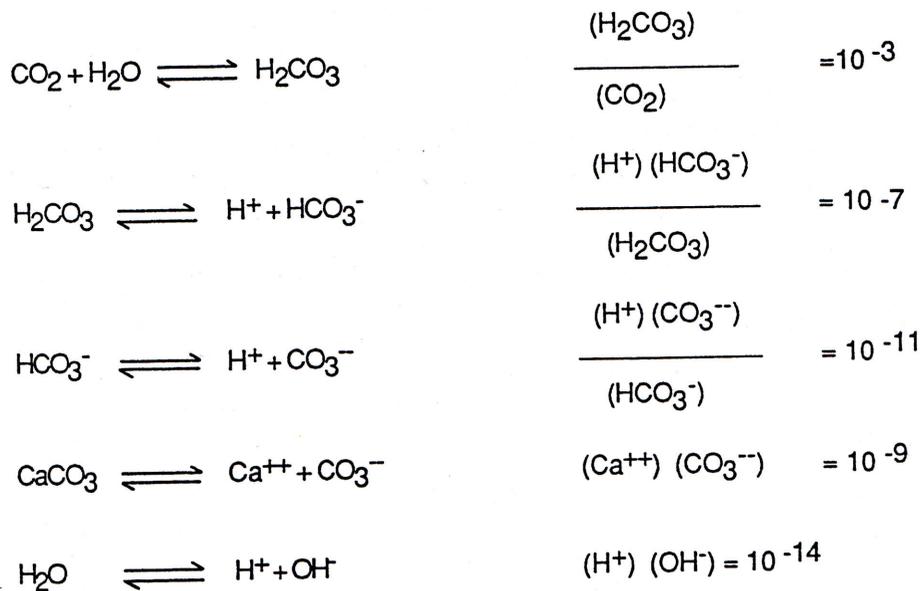
### 1. Principe de la dissolution du $\text{CaCO}_3$

A. Bögli (1960) propose le schéma suivant:



La réaction globale est donc:  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

Réactions partielles et leurs constantes d'équilibre (1):



(1) On ne donne ici que les ordres de grandeur des constantes; on trouvera des chiffres plus précis dans le chapitre 7 (rédigé par Picknett, Bray et Stenner) du livre de T.D. Ford et C.H.D. Cullingford: *The Science of Speleology*, 1976.

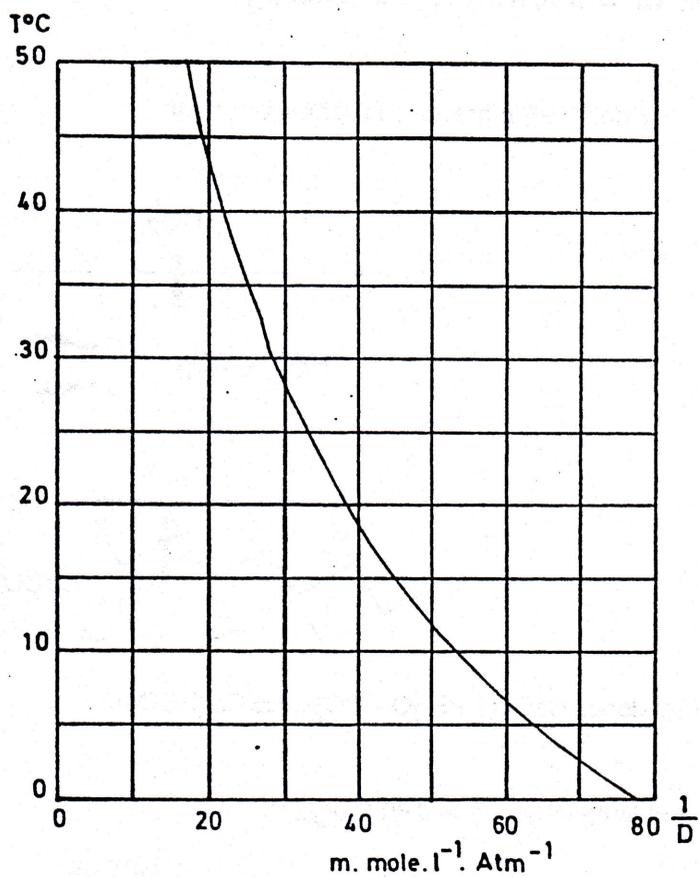


FIGURE 1. Coefficient de dissolution  $\frac{1}{D}$  du CO<sub>2</sub> dans l'eau (d'après H. Roques, 1962).

La première constante d'équilibre montre que 99,9 % du  $\text{CO}_2$  présent dans l'eau y est simplement physiquement dissous.

La comparaison des deux constantes de dissociation qui suivent ( $10^{-7}$  et  $10^{-11}$ ) montre que la concentration en  $\text{CO}_3^{2-}$  est négligeable, dans des conditions ordinaires, devant la concentration en  $\text{HCO}_3^-$ : l'assimilation de tous les carbonates et bicarbonates dissous aux seuls bicarbonates entraîne une erreur négligeable en premier ressort.

Enfin, le produit de solubilité du carbonate de calcium le montre soluble à raison de 10 mg/l dans l'eau pure, ce qui, sans être négligeable, est cependant très faible devant les teneurs observées dans la nature, dans de l'eau contenant toujours du dioxyde de carbone.

Dans l'eau pure,  $\text{CaCO}_3$  se dissout à raison de 10 mg/l à 10°C,  
 " " " " 14 mg/l à 25°C.

## 2. Dissolution du $\text{CaCO}_3$ dans l'eau chargée de $\text{CO}_2$

a) loi de Henry:  $p\text{CO}_2 \text{ air} = D \cdot (\text{CO}_2) \text{ eau}$

où D est un coefficient qui varie avec la température (fig.1).

A l'équilibre, à 10°C, si  $p\text{CO}_2 = 3 \cdot 10^{-4}$  atm,  $(\text{CO}_2) = 0,7$  mg/l.

b) influence de T sur D:

nous donnons ici, à titre d'exemple, les teneurs en  $\text{CO}_2$  de l'eau à 0°, 10° et 20°C pour deux teneurs dans l'air.

$p\text{CO}_2 \text{ air} \text{ (atm)}$	$\text{CO}_2$ dissous (mg/l)		
	0°C	10°C	20°C
$3 \cdot 10^{-4}$	1	0,75	0,5
$1 \cdot 10^{-2}$	33	24	17

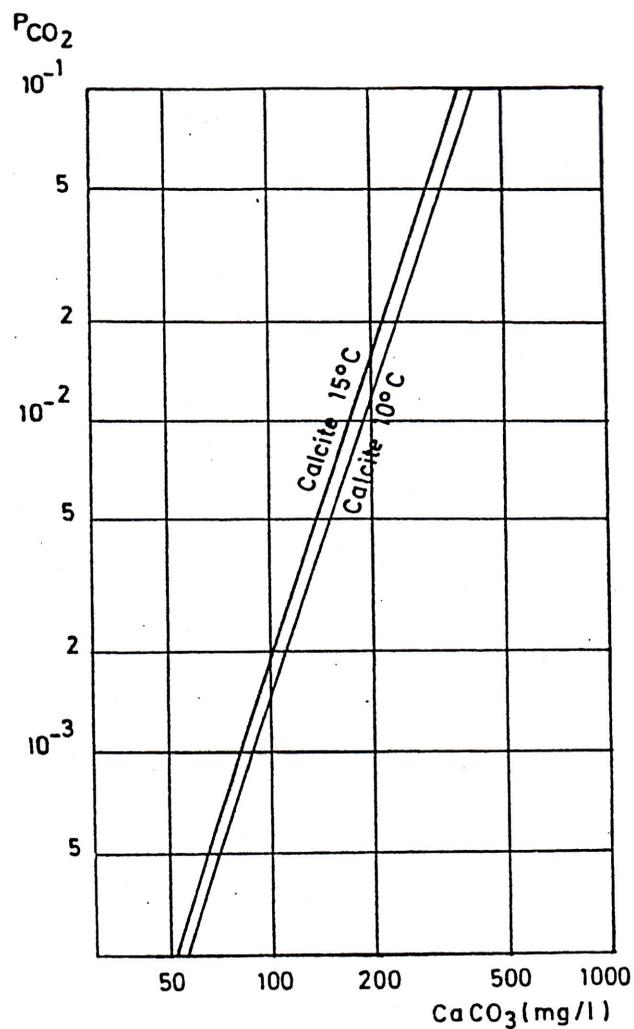


FIGURE 2. Relation entre  $pCO_2$  d'équilibre et  $CaCO_3$  (d'après H. Roques, 1964).

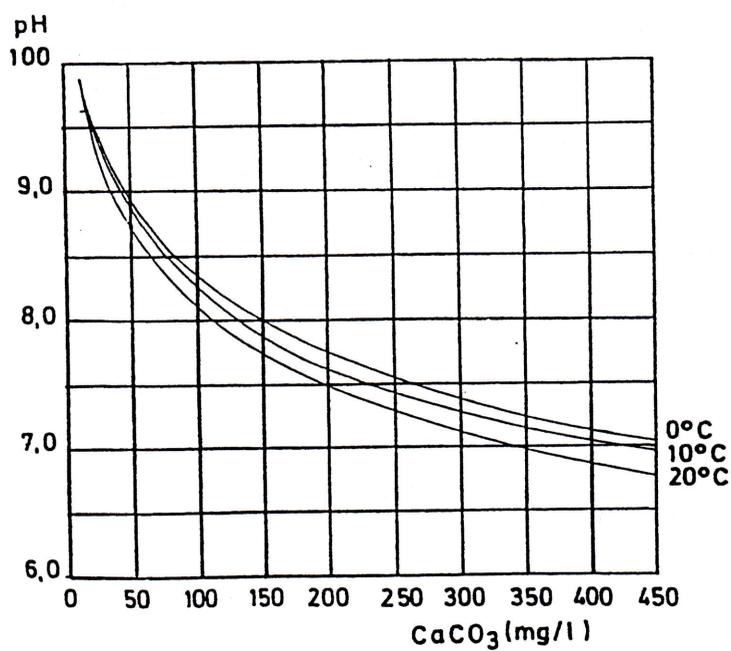


FIGURE 3. Relation entre pH et  $CaCO_3$ , à l'équilibre (d'après Tillmans, 1932, modifié).

c) effets sur la solubilité de  $\text{CaCO}_3$ :

à l'équilibre, les  $p\text{CO}_2$  envisagées déterminent la dissolution des quantités suivantes de calcaire (fig.2):

$p\text{CO}_2 \text{ air}^{(\text{atm})}$	$\text{CaCO}_3$ dissous (mg/l)	
	10°C	20°C
$3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 60$	$\pm 45$
$1 \cdot 10^{-2}$	$\pm 200$	$\pm 150$

d) solubilité du  $\text{CaCO}_3$  en l'absence d'air:

si la solution est coupée du contact de l'air avant que l'équilibre prévu par la fig.2 soit atteint, la réaction sera limitée à une dissolution moindre. C'est le cas, par exemple, lorsqu'un ruisseau se perd sous terre dans des fissures entièrement remplies d'eau, ou lorsqu'une rivière souterraine entre dans un long siphon. Le  $\text{CO}_2$  consommé par la dissolution n'est alors plus remplacé; au lieu d'une source de  $p\text{CO}_2$  constante, on se trouve disposer d'une *quantité* donnée de  $\text{CO}_2$ . Dans ces conditions, la solubilité de  $\text{CaCO}_3$  est fortement diminuée ( fig. 4).

e) la corrosion par mélange des eaux:

A. Bögli a montré en 1964 que le mélange de deux eaux, toutes deux saturées en bicarbonate de calcium par rapport à leur contenu en  $\text{CO}_2$ , mais à des teneurs différentes, donne une eau agressive vis-à-vis du calcaire (fig.5).

La découverte de Bögli permet d'expliquer des processus de dissolution, même en l'absence de fourniture de  $\text{CO}_2$ , là où on n'eût pu jusqu'ici les comprendre. Bien que la théorie ait été établie pour des eaux saturées (c'est-à-dire à l'équilibre), elle est transposable dans les cas où il n'y a pas d'équilibre, c'est-à-dire dans le domaine de la cinétique de la dissolution.

### 3. Le $\text{CO}_2$ de l'air, moteur de la réaction

a) prééminence du  $\text{CO}_2$  comme agent de dissolution:

la dissolution par le  $\text{CO}_2$  amène la réaction globale bien connue:



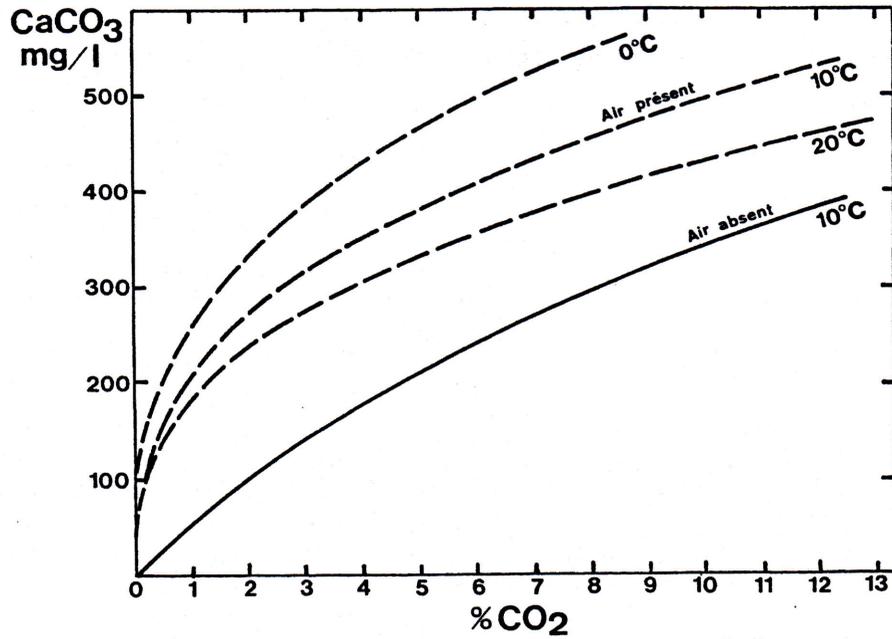


FIGURE 4. Comparaison de la solubilité du calcaire en présence et en absence d'air. Courbes à 10°C (d'après Picknett, Bray et Stenner in Ford et Cullingford, 1976).

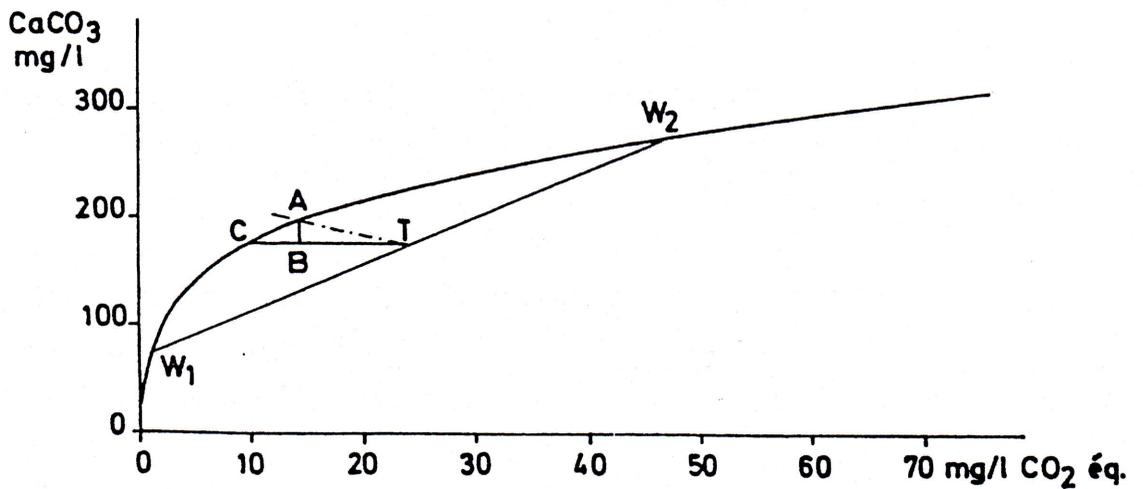


FIGURE 5. Résultat du mélange de deux eaux saturées:  $W_1$  et  $W_2$ , mélangées à parts égales, donnent une eau T, sous-saturée (d'après Bögli, 1964).

avec, par conséquent, en solution, un ion calcium pour deux ions bicarbonate. Tout autre acide amène l'apparition d'un ion calcium, un seul ion bicarbonate et un ou des autres ions. Or, en régions tempérées du moins, il est aisé de vérifier qu'il y a bien dans l'eau des calcaires, en général, à peu près un ion calcium pour deux ions bicarbonates (en général un peu moins de deux);

b) vérification expérimentale de la loi de Henry:

des mesures effectuées en Belgique surtout, mais aussi au Canada, en Pologne, en Suède, en Italie et aux Canaries, ont montré que, dans l'ensemble, la dissolution observée dans les calcaires est d'autant plus forte que l'*atmosphère* (au-dessus de l'eau de dissolution) est riche en  $\text{CO}_2$ , celui-ci, lorsqu'il est abondant, étant, dans les cas observés, toujours d'origine biologique (fig. 6 et 7);

c) d'une part, plus la température est basse, plus le  $\text{CO}_2$  de l'air a tendance à se dissoudre dans l'eau et, à ce point de vue, les températures basses sont donc favorables à la dissolution du calcaire. D'autre part, le  $\text{CO}_2$  atmosphérique étant essentiellement dû, lorsqu'il est abondant, au métabolisme du Bios, les températures basses, à cet égard, sont moins favorables à l'activité biologique et donc à la production de  $\text{CO}_2$  (fig. 8 à 11). La température a donc sur la dissolution du  $\text{CO}_2$  deux effets de sens contraires.

#### 4. Les autres acides

La dissolution du  $\text{CaCO}_3$  peut être assurée par des réactifs très divers autres que le  $\text{CO}_2$ .

a) acides inorganiques:

l'acide nitrique est produit dans les sols par l'oxydation de l'ammoniaque; on trouve cependant peu de nitrates dans les eaux du sous-sol en général (mais l'homme en introduit dans le sol comme engrais); l'acide sulfurique peut être produit par l'oxydation de la pyrite ou d'autres sulfures; il semble bien que, dans des cas particuliers, un matériel très pyriteux peut provoquer des dissolutions notables. La grotte de Hastière, par exemple, dans les dolomies tournaisiennes entre Dinant et Givet, est toute entière localisée le long d'un niveau de schistes très pyriteux.

b) acides organiques:

les acides organiques sont produits par les végétaux et libérés à la mort de ceux-ci par la décomposition bactérienne; certains y voient une cause importante de la dissolution.

Il est un fait que les mousses, lichens et champignons forment parfois des figures de dissolution, de même que les racines. Quantitativement, cependant, la proportion de 2 ions bicarbonate pour 1 ion calcium, approximativement vérifiée dans beaucoup d'eaux des régions tempérées, donne à penser que les acides organiques ont surtout des actions très locales, au contact même des

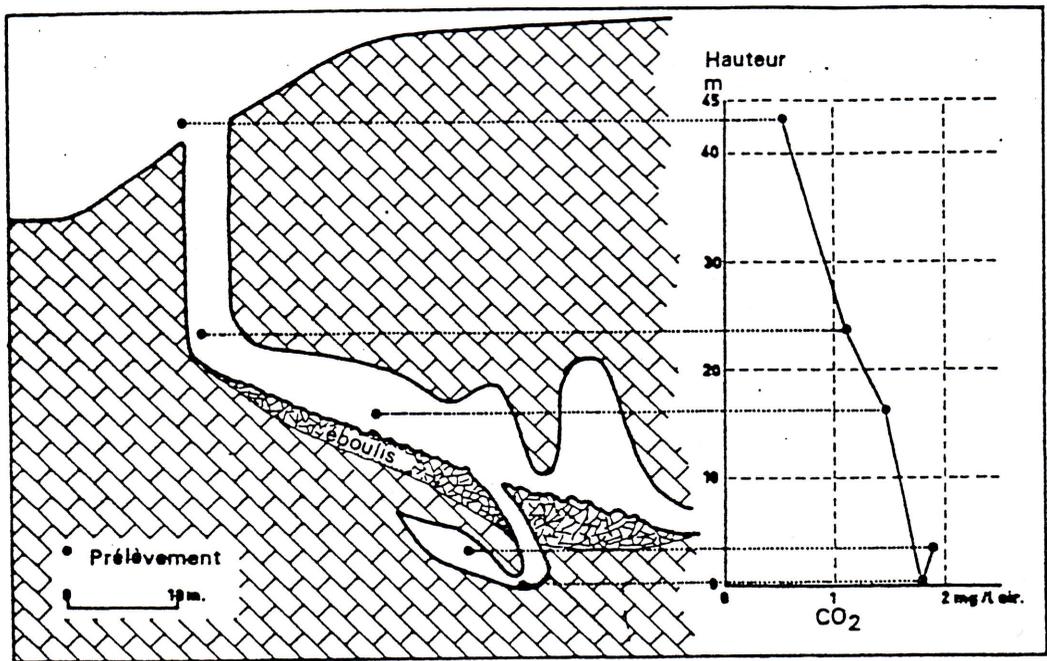


FIGURE 6. Coupe dans l'abîme de Comblain-au-Pont.  
Localisation des prélèvements d'air.  
A droite, teneur en  $CO_2$ . Plus on va vers l'air libre, plus les teneurs sont faibles.

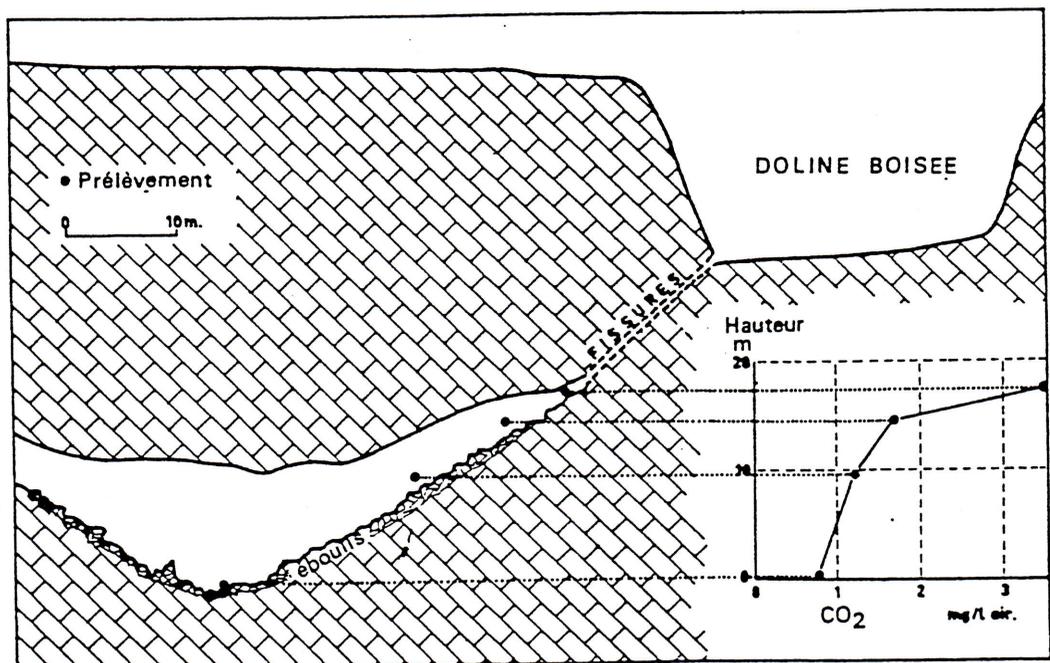


FIGURE 7. Coupe dans la salle dite Val d'Enfer, à Rochefort.  
Localisation des prélèvements d'air.  
A droite, teneurs en  $CO_2$ . Plus on va vers les fissures en relation avec le sol de la doline boisée, plus les teneurs sont fortes.

végétaux.

Enfin, il ne faut évidemment pas perdre de vue qu'une très grande partie du  $\text{CO}_2$  est d'origine organique.

## 5. Aspect cinétique de la dissolution

### a) la loi de Nernst:

les eaux qui arrivent douces sur le calcaire augmentent assez rapidement leur teneur en calcium mais la prise en charge par dissolution ralentit ensuite progressivement (fig.12).

Le ralentissement de l'attaque est l'expression de la loi de Nernst sur les vitesses de dissolution: au fur et à mesure que diminue le déséquilibre, la réaction ralentit.

### b) vitesse de réaction et température:

à température élevée, la vitesse de dissolution du calcaire, pour une  $\text{pCO}_2$  donnée dans l'air, est plus grande, mais l'équilibre de dissolution est atteint à une valeur plus faible; à basse température, et pour la même  $\text{pCO}_2$  dans l'air, le calcaire se dissout en plus grande quantité mais plus lentement.

Ceci a été mis en évidence de façon claire par Tatiana Stchouzkoy-Muxart en 1971 (fig.13).

## 6. Dissolution et phénomènes karstiques dans les roches non carbonatées.

En dehors des calcaires et des dolomies, les seules roches solubles qui méritent d'être citées ici sont le sel ( $\text{NaCl}$ ), l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) et le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ): ces trois roches sont des évaporites. Dans la dissolution de ces trois substances, le  $\text{CO}_2$  n'intervient pas: elles sont solubles dans l'eau pure.

### a) dissolution de la halite:

le chlorure de sodium, ou halite, est très soluble dans l'eau: celle-ci peut en dissoudre le tiers de son poids: 357 gr/l à  $0^\circ\text{C}$  et 359 gr/l à  $20^\circ\text{C}$  (T.Muxart et P.Birot, 1977). La variation de solubilité en fonction de la température est, on le voit, très faible. En raison de sa grande solubilité, le sel gemme ne subsiste en surface que dans des régions très arides, comme le rocher de sel de Djelfa (Algérie), percé de puits absorbants; toutefois, il en existe de rares exemples en Europe; ainsi, à Cardona (Espagne), dans la dépression de l'Ebre, affleure sur quelques hectares un important diapir de sel éocène (fig.14); dans celui-ci s'est développée la grotte du Forat Micó, parcours méandrant d'une rivière souterraine; la grotte a un développement total de 640 m et comporte deux niveaux superposés dont l'inférieur est encore parcouru en hiver par un cours d'eau souterrain (fig.15). En surface, le sel présente de profondes dolines et des lapiés.

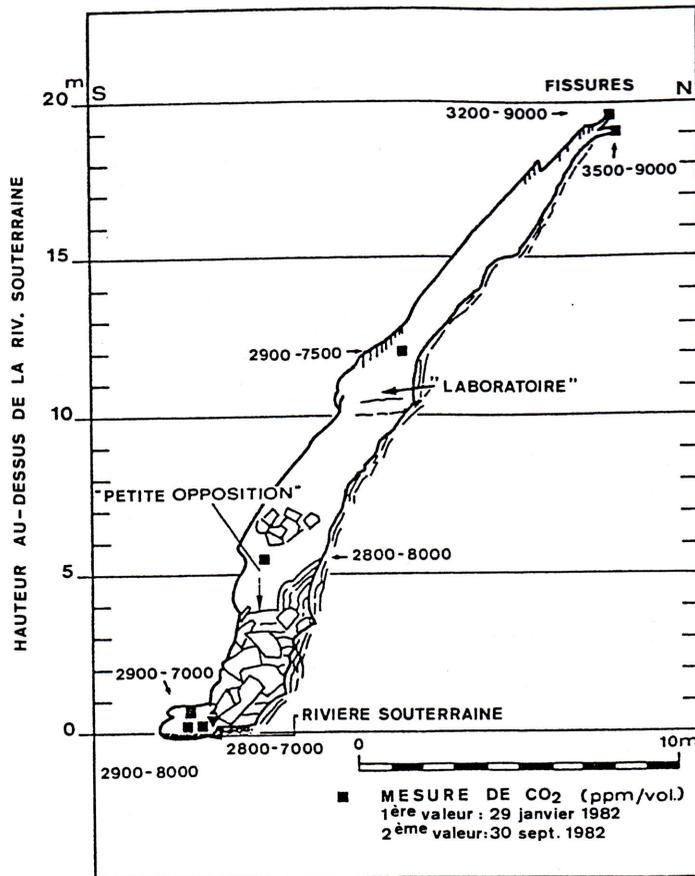


FIGURE 8. Les teneurs de l'air en dioxyde de carbone (exprimées en p.p.m.) en hiver et en été, dans un passage ("la petite opposition") de la grotte Ste-Anne (Tilff, Belgique). Les teneurs sont nettement plus fortes en été qu'en hiver; les teneurs dans les fissures sont plus fortes que celles des galeries (d'après Ek et Gewalt, 1985, simplifié).

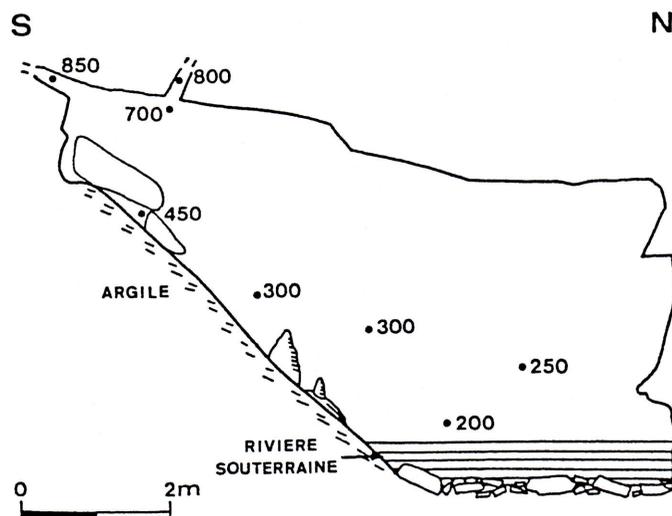


FIGURE 9. Les teneurs de l'air en dioxyde de carbone en été (juillet 1982) à la grotte inférieure de Björkliden (Laponie suédoise). Comparer aux chiffres de la figure précédente. La végétation environnante est ici la toundra et la forêt boréale.

b) dissolution du gypse et de l'anhydrite:

la solubilité maximum du gypse est d'environ 2,65 gr/l à 37°C; la solubilité maximum de l'anhydrite est d'environ 2 gr/l entre 20 et 50°C. On voit que ces deux substances sont beaucoup moins solubles que la halite et beaucoup plus que le calcaire. On voit aussi que les solubilités de l'anhydrite et du gypse sont plus fortes dans les régions chaudes que dans les régions froides. Le gypse et l'anhydrite, comme le sel, ont une plus grande plasticité que le calcaire et la dolomie. Peut-être ceci contribue-t-il à expliquer la rareté comparative des grottes dans ces roches. La transformation de l'anhydrite en gypse s'accompagne d'un foisonnement de l'ordre de 26 %. Ceci est en soi susceptible de provoquer d'importants mouvements de terrain. Un sondage à Saint-Ghislain (Belgique) a révélé en 1978, à plus de 2000 mètres de profondeur, dans le Dinantien, un karst s'étendant sur plus de 200 mètres dans de l'anhydrite, minéral jusqu'ici considéré comme très rare dans les roches de la Belgique. La circulation des eaux dans ce karst a donné naissance à un jaillissement artésien de plus de 90 m<sup>3</sup>/heure d'une eau dont la température est d'environ 70°C, que l'on utilise maintenant pour du chauffage urbain dans la région de Mons.

En France, à Contrexéville, la sortie des eaux thermales représente la dissolution de 130 tonnes de CaSO<sub>4</sub> par an dans le sous-sol de la région (Castany, cité par Nicod, 1972).

## B. FACTEURS CLIMATIQUES ET METEOROLOGIQUES DE LA DISSOLUTION DES CALCAIRES

### 1. La quantité d'eau

La quantité d'eau qui entre en contact avec le calcaire est un facteur primordial de la dissolution. Il suffit, pour s'en convaincre, de localiser la région éponyme des paysages karstiques, le Karst, sur une carte des précipitations.

La figure 16 montre les effets d'une période de pluie sur la quantité de calcaire dissous transportée par une rivière.

Il s'agit des pluies les plus importantes de 1964 sur la basse-Ambève; après une huitaine de jours secs, dix jours de pluie ont apporté 112 mm d'eau. L'augmentation du débit est accompagnée d'une baisse de la dureté (du fait de la dilution par l'eau de pluie). La baisse la plus importante de dureté survient après les premières pluies: elle est le fait de l'eau qui, tombée aux abords immédiats de la rivière principale, n'a guère eu le temps de rien dissoudre; les eaux qui, plusieurs jours plus tard, amènent le débit maximum de l'Ambève comportent, en partie au moins, des eaux qui ont percolé, ou qui proviennent de régions plus éloignées, et aussi des eaux élaborées provenant de la hausse du niveau phréatique: aussi, alors que le débit augmente encore fortement, la teneur en sels dissous diminue faiblement.

La figure 16 montre une autre conséquence de la pluie: la hausse brutale et temporaire de la teneur de l'eau en CO<sub>2</sub> libre sitôt après les premières précipitations.

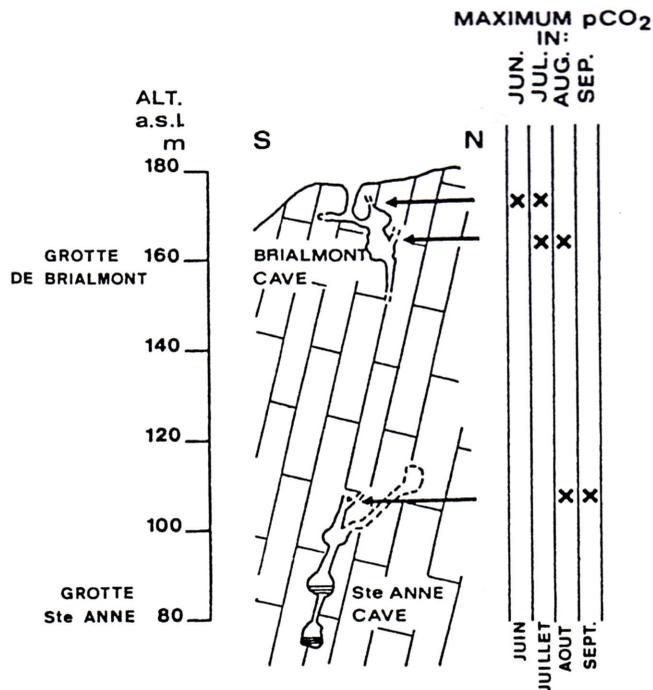


FIGURE 10. La grotte de Brialmont et la grotte Ste Anne, à Tilff. Coupe schématique. A droite, représentation de la diffusion saisonnière du dioxyde de carbone telle qu'elle est révélée par les mesures représentées à la figure 11 (d'après Ek et Gewalt, 1985).

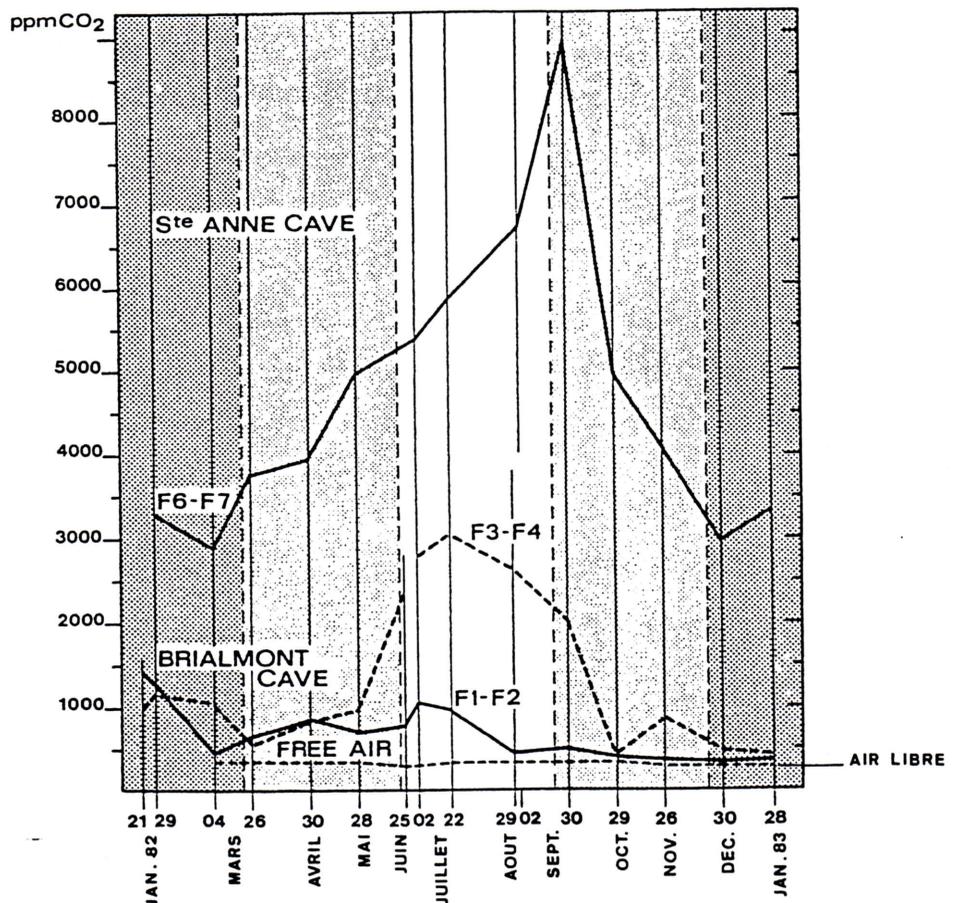


FIGURE 11. Evolution saisonnière de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air des fissures dans les grottes de Ste-Anne et de Brialmont. Chaque courbe est la moyenne des mesures prises chaque mois dans deux fissures adjacentes. F1-F2: fissures dans l'étage supérieur de la grotte de Brialmont, F3-F4: fissures dans l'étage inférieur de la même, F6-F7: fissures dans la grotte Ste-Anne (d'après Ek et Gewalt, 1985). Les maximums estivaux sont très nets, et d'autant plus tardifs qu'on descend dans le massif: F1-F2, puis F3-F4, puis F6-F7.

Le dioxyde de carbone dégagé par les plantes et accumulé durant la sécheresse dans la partie superficielle du sol est aisément absorbé par les eaux de ruissellement dès le début de la pluie; mais, la crue continuant, la fourniture de  $\text{CO}_2$  ne peut suivre cette augmentation et la teneur en dioxyde de carbone *par litre d'eau* diminue.

Les conséquences chimiques des crues sont évidemment d'autant plus spectaculaires que la variation du débit est forte entre l'étiage et la crue. Le fait s'observe sur la figure 17 qui montre les effets d'un orage sur la dureté d'un ruisseau s'engouffrant dans une perte, le "chantoir" de Grandchamps.

L'orage a fait passer le débit du ruisseau de 0,1 à 400 l/sec, tandis que la dureté passait de 144 mg  $\text{CaCO}_3$ /l à 40 mg/l. En multipliant la dureté par le débit à un moment donné, on obtient la quantité de calcaire dissous transporté. L'intégration de ce produit durant les 24 heures considérées montre qu'il s'est engouffré ce jour-là à Grandchamps plus de 600 kg de calcaire dissous, soit 100 fois plus qu'un jour modérément pluvieux.

## 2. L'agressivité de l'eau

L'agressivité de l'eau est essentiellement fonction de son acidité. Bien que divers acides puissent être présents dans l'eau, il est certain que, d'une façon générale, le  $\text{CO}_2$  dissous ( $> \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ ) est le principal responsable de la dissolution des calcaires, en particulier sous les climats tempérés (voir plus haut, A3 et A4).

Le  $\text{CO}_2$  présent dans l'atmosphère libre ( $3.10^{-4}$  atm) y est en teneur insuffisante pour expliquer les teneurs en  $\text{CO}_2$  et en  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  de beaucoup de cours d'eau (surtout les plus petits). C'est à du  $\text{CO}_2$  d'origine organique qu'il faut attribuer ces teneurs; il est souvent abondant dans l'air du sol et dans l'eau du sol, en particulier sous climat tempéré. Les eaux sont souvent agressives vis-à-vis du calcaire là où la végétation est abondante.

Les figures 2 et 3 montrent des courbes délimitant d'une part une plage où la composition de l'eau fait que celle-ci est agressive, d'autre part une plage où peuvent se trouver les points représentatifs d'eaux sursaturées. L'agressivité d'une eau ne dépend pas seulement de la quantité d'acide qu'elle contient mais est aussi une fonction inverse de la quantité de calcaire déjà dissoute. Ceci explique que certaines eaux, issues d'un milieu où l'activité biologique les a enrichies en  $\text{CO}_2$ , mais qui ont aussi déjà dissous du carbonate de calcium, peuvent ne plus être agressives vis-à-vis des calcaires qu'elles parcourent ensuite. C'est le cas, par exemple, des eaux issues des grès famenniens du Condroz, qui comportent fréquemment 10 à 20 % de ciment calcaire aisément soluble: quand les eaux issues de ces grès arrivent sur les formations purement calcaires, elles n'ont plus aucune agressivité.

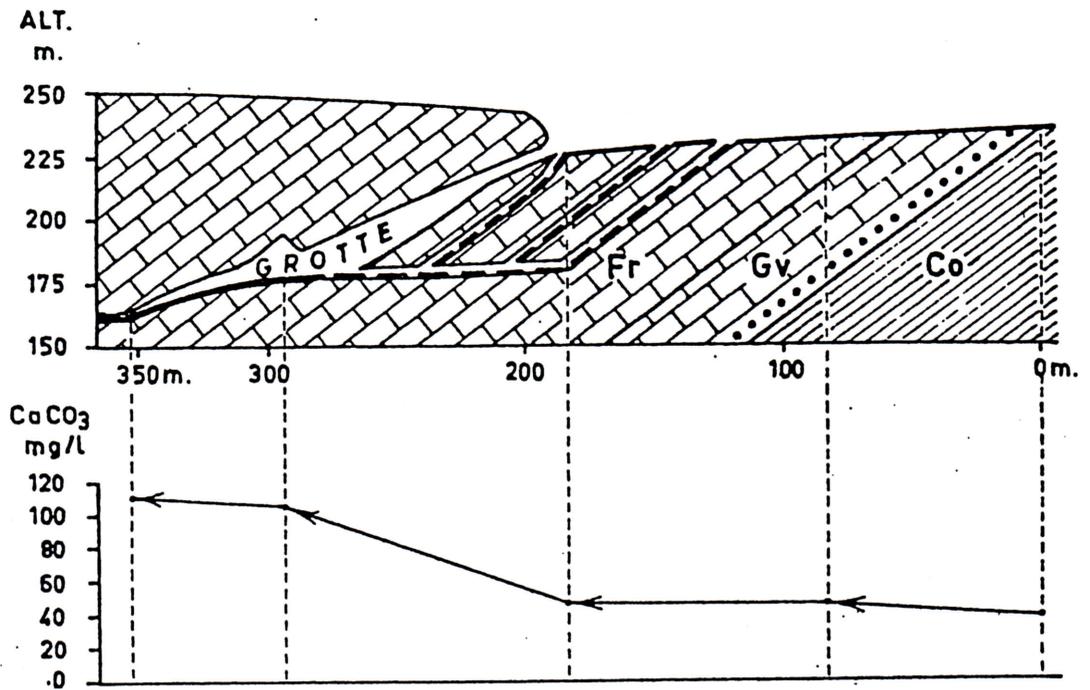


FIGURE 12. La perte du ruisseau du Rouge-Thiers, à Louveigné.  
 Au-dessus: profil en long du ruisseau et coupe géologique.  
 En-dessous: évolution de la dureté au long du cours d'eau.

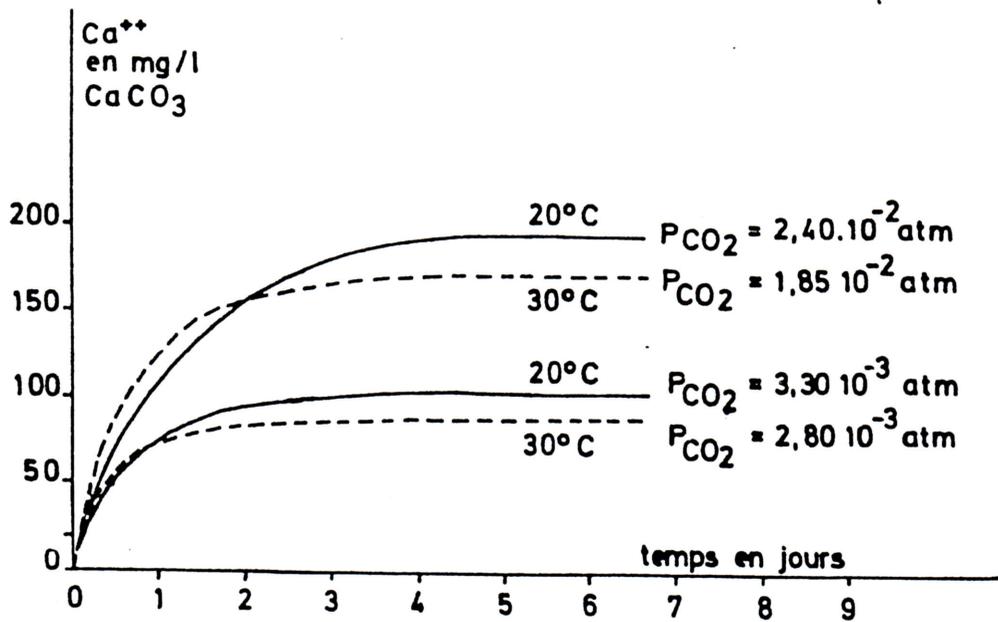


FIGURE 13. Vitesse de dissolution de la calcite, en fonction de la température et de la teneur de l'eau en  $CO_2$ , d'après des expériences de T. Stchoutzkoy-Muxart, 1971.

La neige et la glace ont longtemps été considérées, dans la littérature du karst, comme des réservoirs de CO<sub>2</sub>. La neige est en fait un réservoir qui est susceptible de fournir assez peu de CO<sub>2</sub> aux eaux de fonte, car le gaz carbonique se dégage en grande partie dans l'air au moment de la fusion, et la vieille glace, celle de la langue des glaciers, qui alimente les cours d'eau proglaciaires, n'est en fait pas riche en CO<sub>2</sub>.

Les figures 2 et 3 ne doivent pas faire perdre de vue que les courbes d'équilibre théoriques ou expérimentales, mais faites en laboratoire, n'ont qu'un caractère indicatif car elles se réfèrent à des eaux pures, ou à tout le moins à des types d'eau bien déterminés; les eaux naturelles contiennent en général plusieurs sels dissous qui modifient réciproquement leurs solubilités. D'autre part, en vertu de la loi de Nernst sur les vitesses de réaction, celles-ci diminuent considérablement au fur et à mesure que l'on s'approche de l'équilibre, ce qui fait que les points représentatifs, sur des diagrammes du type des figures 2 et 3, des eaux ne réagissant pratiquement pas ne sont pas nécessairement sur les courbes d'équilibre, mais simplement à proximité.

Enfin, on ne perdra pas de vue que dans bien des régions, lorsqu'une eau s'écoule et passe, par exemple, d'une nappe à l'air libre, les *conditions* de l'équilibre (température, pression du CO<sub>2</sub>, ...) se modifient parfois *avant* que l'équilibre ait pu être atteint.

### 3. La température

La température a une influence sur le coefficient de dissolution  $\frac{1}{D}$  du CO<sub>2</sub> (fig.1): à égalité de pression partielle dans l'air, il se dissout deux fois plus de CO<sub>2</sub> à 0°C qu'à 18°C.

Mais il est fréquent que, du fait de l'activité biologique, le CO<sub>2</sub> soit plus abondant dans l'air du sol des régions tempérées et chaudes que dans l'air du sol des régions froides, et ceci dans des proportions qui, dans la plupart des cas, font plus que contrebalancer l'influence de la température sur le coefficient de dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'eau (voir les fig. 8 et 9).

Au point de vue des réactions de dissolution, l'influence majeure de la température porte non sur l'équilibre, mais sur la cinétique des réactions: plus la température est élevée, plus rapides sont les réactions: celles-ci, *grosso modo*, doublent de vitesse lorsque la température augmente de 10°C.

Enfin, 0°C représente une limite puisque, sous cette température - approximativement - l'eau passe à l'état solide et cesse pratiquement de dissoudre du calcaire.

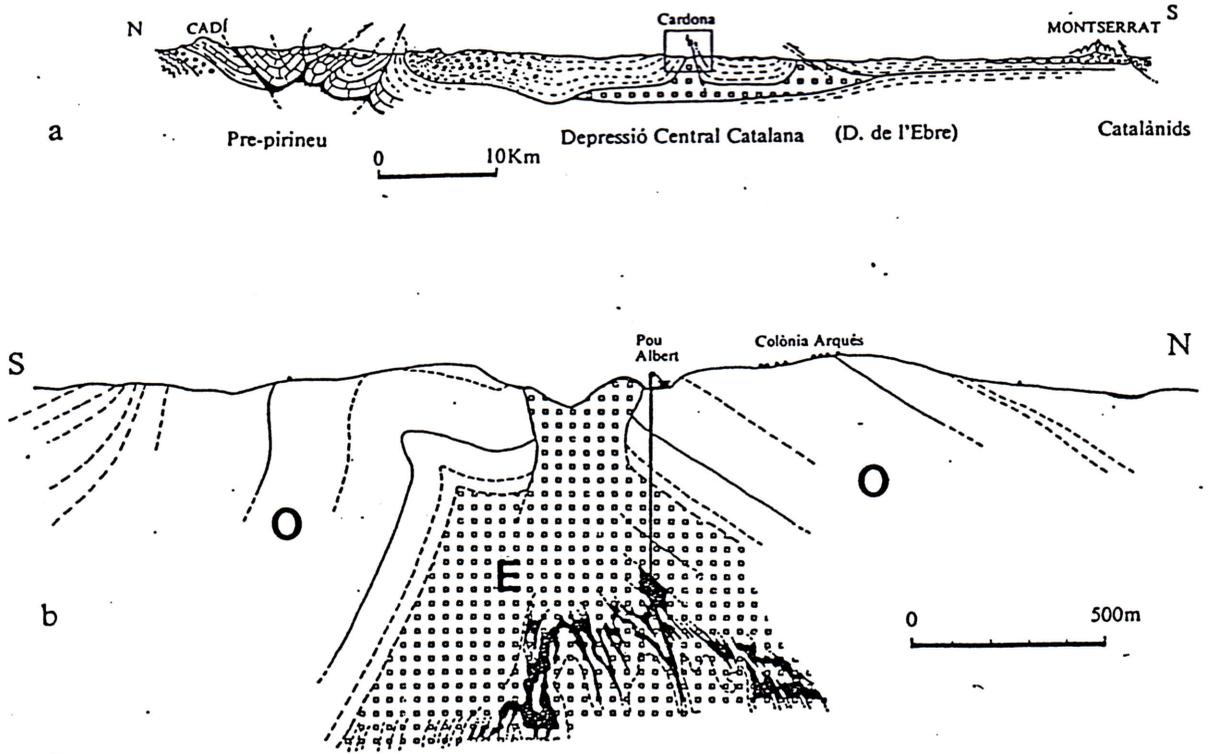


FIGURE 14. Coupe schématique du diapir de Cordona.  
 O: Oligocène. Grès et argiles rouges  
 E: Eocène. Halite et autres matériaux salins (simplifié, d'après Riba *et al.*, 1975).

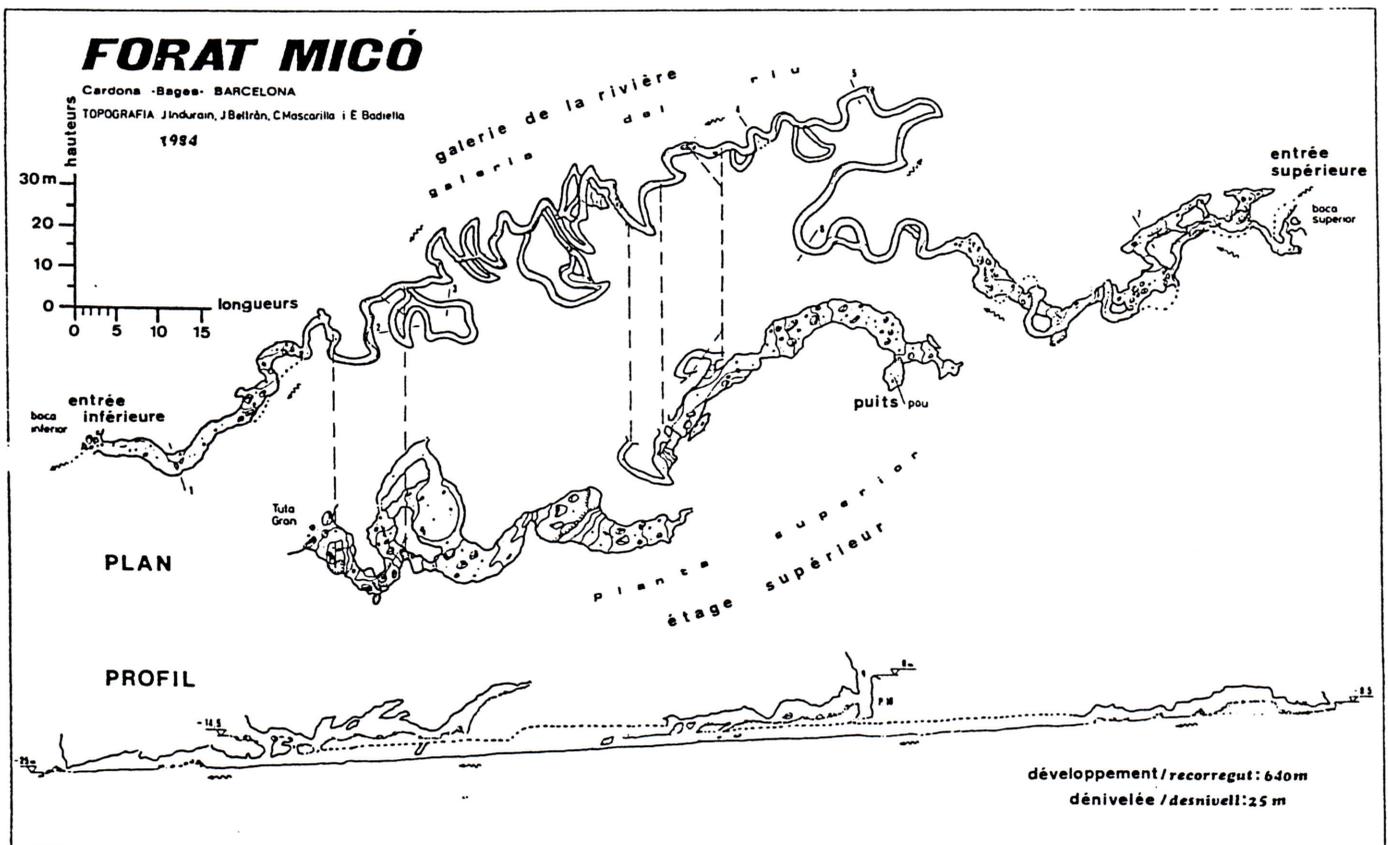


FIGURE 15. La grotte de Forat Micó. Plan et coupe (simplifié, d'après des levés de Indurain *et al.*, 1984).

## C. LES PARTS RESPECTIVES DE LA DISSOLUTION ET DE L'EROSION MECANIQUE

### 1. Le stade initial de la karstification

Dans les premiers moments de l'évolution karstique, c'est-à-dire lorsque l'eau commence à s'infiltrer dans les fissures de la roche soluble, par exemple, la dissolution seule agit. Il y a à cela, en général, deux causes qui se cumulent; la première est la faiblesse du *débit* de l'eau dans les fissures ou autres conduits préexistants: un filet d'eau trop mince n'a pas de capacité de transport; la deuxième est la faiblesse de la *vitesse* de l'eau qui lui donne une compétence nulle: les courbes de Hjulström revues par Sundborg montrent qu'à des vitesses inférieures à 10 cm par seconde, rien ne s'érode; tout au plus le transport d'une suspension colloïdale peut-il s'envisager si le matériel ne floccule pas.

Par contre, la dissolution et le transport en solution peuvent se faire pour des débits et des vitesses très faibles. La dureté de l'eau qui sourd des fissures dans les conduits karstiques est fréquemment de 200 à 300 mg (CaCO<sub>3</sub>)/l (eau). La dissolution est donc susceptible d'élargir seule des fissures et de sculpter, seule, certains lapiés.

Certes, dès le début, la dissolution même provoque aussi un départ des particules solides (par exemple, mais non exclusivement, des particules de silice et d'autres produits insolubles présents dans la roche; il s'agit aussi, parfois, de particules de calcaire non encore dissoutes, détachées de la masse par désagrégation); ce départ est couramment de l'ordre de 10 à 20 % de la perte de poids totale pour des échantillons de calcaires divers (Roques et Ek, 1973). Mais la matière solide ainsi détachée l'est du fait même de la dissolution; dans bien des cas, elle tombe et n'est pas transportée.

### 2. Importance spatiale et localisation respective des deux phénomènes

Avec le temps, au fur et à mesure que les conduits s'élargissent et que les formes karstiques se développent, et surtout en fonction des augmentations des vitesses et des débits maximums de l'eau, les transports solides deviennent de plus en plus importants. Les rivières souterraines transportent du sable et des cailloux roulés. Dans certains cas du reste, comme dans la rivière souterraine de Remouchamps, il y a transport de limon et de sable et il n'y a plus de dissolution dans la partie aval de la rivière, l'eau étant chimiquement saturée. Dans les conduits dont l'ampleur finale est due à un cours d'eau souterrain, le calibrage même du conduit, sa relative indépendance des détails de la structure et de la lithologie de la roche encaissante peuvent témoigner, dans bien des cas, de l'importance de l'action mécanique de l'eau.

En résumé, en eau calme, la dissolution est le facteur essentiel et déterminant, mais non unique; en cours d'eau, la dissolution peut décroître -jusqu'à zéro dans les cas extrêmes- et le transport des matières solides subsister, seul parfois.

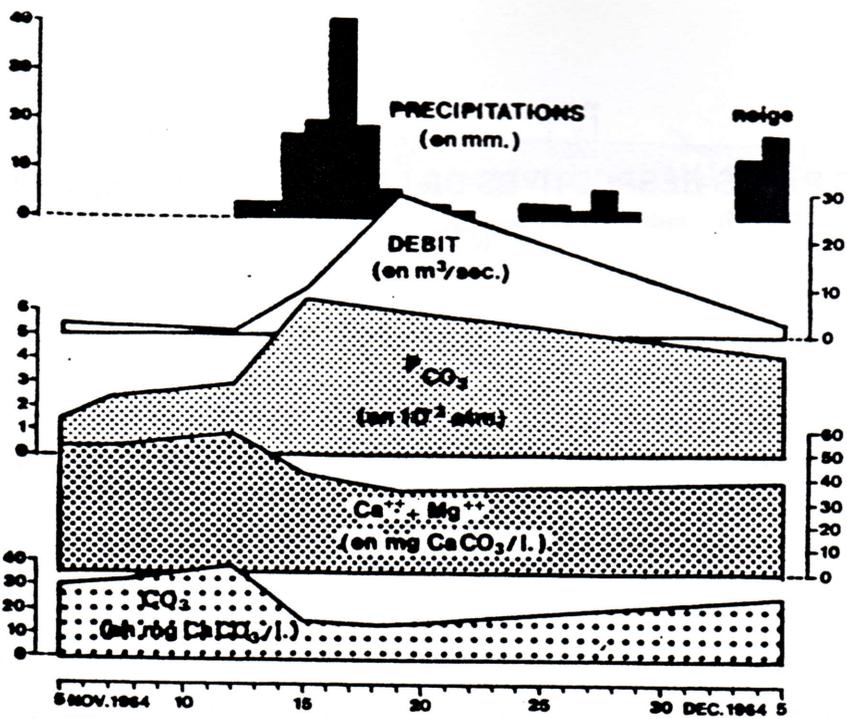


FIGURE 16. Les effets d'une période de pluie sur la Basse-Ambiève à Pont-de-Scay.

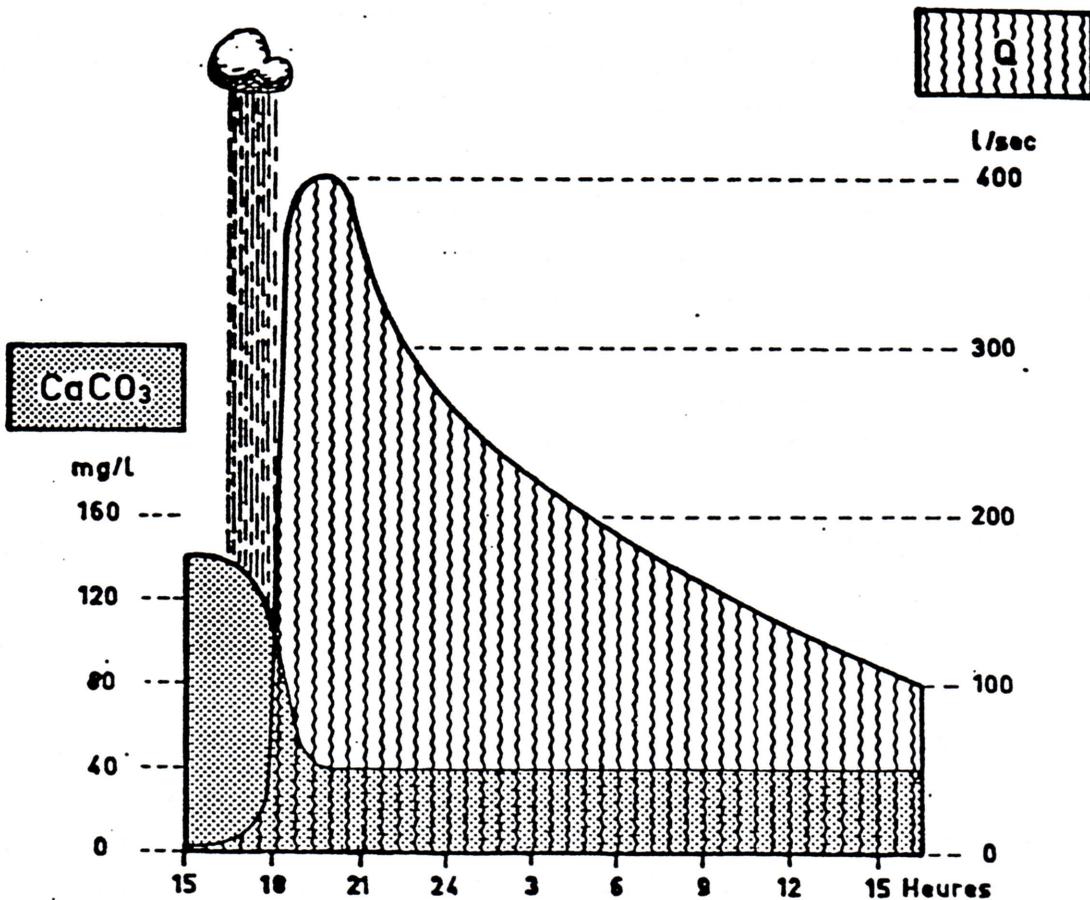


FIGURE 17. Le ruisseau de Grandchamps, au chantoir du même nom à Louveigné.  
Effet d'un orage.

Hachures ondulées: débit en litre/sec.

Pointillés gris: dureté totale en mg CaCO<sub>3</sub>/litre.

En multipliant le débit, à un moment donné, par la dureté au même moment, on obtient la quantité de calcaire dissous transportée.

Le cas des siphons est particulier, et d'ailleurs variable. Leur morphologie peut être due soit à l'érosion mécanique (comme au Trou des Crevés, à Belvaux), soit à la corrosion (comme en amont de la Grotte de Remouchamps). Le plus souvent, la dissolution prédomine; nous avons observé, à la grotte de l'Adugeoir, à Pétigny, un siphon qui est généralement à sec en été, et qui fut élargi par l'homme en 1894; 70 ans plus tard, nous avons noté que tous les angles de la roche dus à la fracturation artificielle avaient été fortement attaqués et des résidus ferrugineux subsistant en relief montraient que la dissolution avait été, en moyenne, de l'ordre de 5 mm, ce qui représente environ 7 mm par siècle. Cependant, en temps de crue, l'action mécanique peut être très importante dans les siphons, à en juger par les débris grossiers qui s'y accumulent, et parfois les franchissent.

Les salles des grottes, et surtout les plus grandes salles, témoignent fréquemment de l'importance des éboulements sur leur morphologie finale. Mais le volume des éboulis est toujours plus grand que le volume créé dans la roche en place par l'écroulement, et une grotte ne peut s'agrandir ainsi que si une partie suffisante des débris est évacuée. Cette évacuation ne peut se faire que par l'eau: si un cours d'eau souterrain coule encore au fond de la cavité après les éboulements, il peut emporter une partie du calcaire, à l'état solide ou (le plus souvent) à l'état dissous.

### 3. Ordre de succession des phénomènes

- a) corrosion, seule ou accompagnée du simple détachement de particules solides, durant une phase qui peut être d'un effet érosif très minime (quelques microns, rarement quelques cm);
- b) corrosion accompagnée d'un peu de départ de matières non dissoutes;
- c) augmentation de la part des transports solides au fur et à mesure que les conduits s'agrandissent; au stade des rivières souterraines, éventuellement, l'érosion mécanique peut agir pratiquement seule;
- d) possibilité d'action de la gravité seule: écroulements, dont la probabilité augmente avec la dimension des cavités.

Ensuite, ou simultanément, tous les stades antérieurs (a à c) peuvent se présenter à nouveau en ordre variable.

SUR LE PLAN GENETIQUE, LA CORROSION APPARAÎT COMME LE FACTEUR ORIGINAL, ORIGINEL ET DETERMINANT DU CREUSEMENT DES GROTTES.

ORIGINAL PUISQUE LES GROTTES SONT CARACTERISTIQUES DES ROCHES SOLUBLES;  
 ORIGINEL PARCE QUE SEULE LA DISSOLUTION PEUT AGIR DANS DES CONDUITS TRES ETROITS AU DEPART;

DETERMINANT PARCE QUE, SANS CORROSION, LA SUITE NE PEUT SE PRESENTER.

MAIS, DANS LES CAVITES IMPORTANTES, LES TRAITS PRINCIPAUX DE LA MORPHOLOGIE, SOUVENT, NE SONT PAS DES EFFETS DIRECTS DE LA CORROSION.

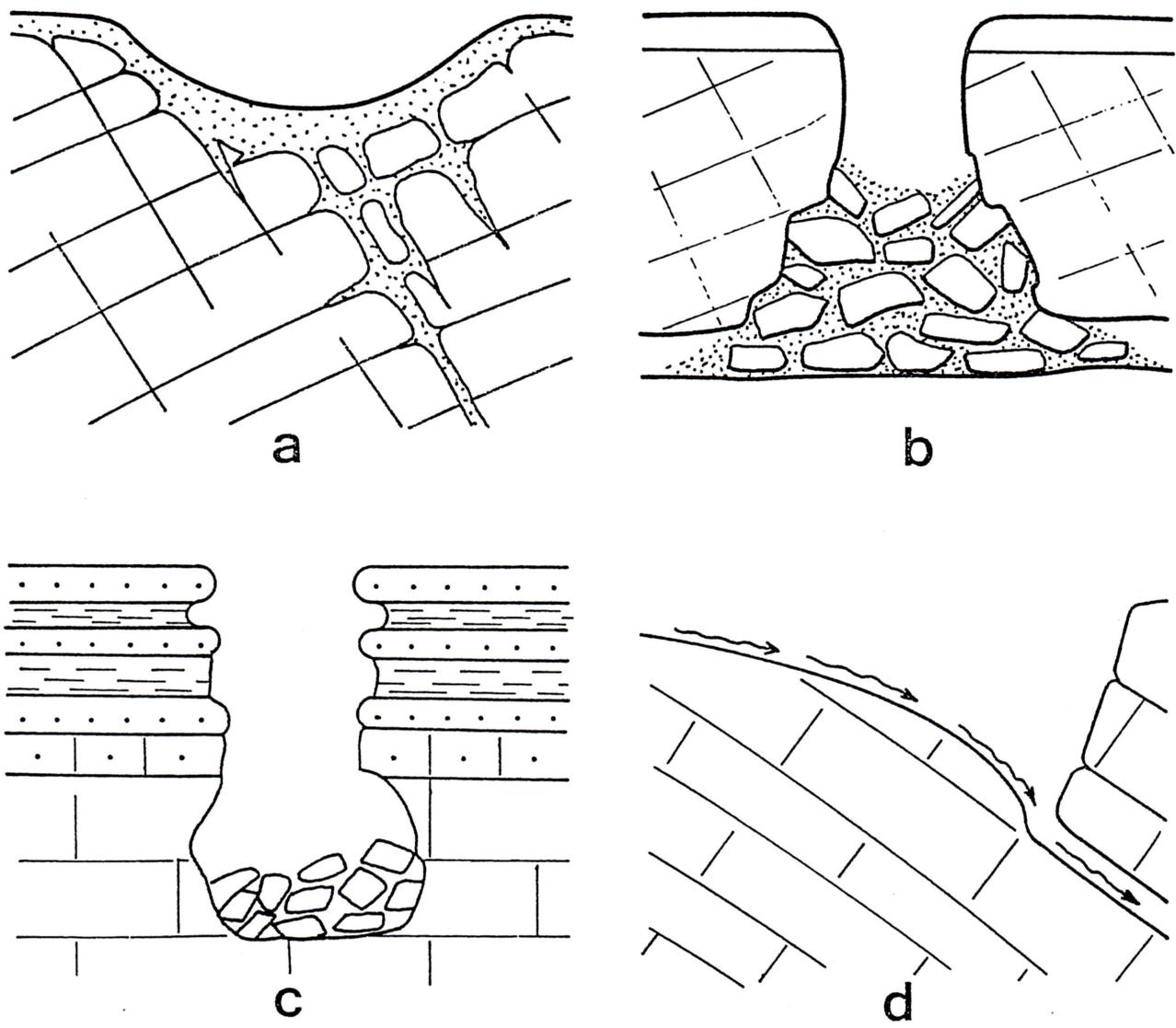


FIGURE 18. Quelques types de dolines: (a) doline de dissolution et tassement; (b) doline d'effondrement; (c) doline d'effondrement dans un karst couvert; (d) doline-perte.

## II. FORMES ET DEPOTS.

### A. LES FORMES.

#### 1. Les lapiés.

Formes mineures de sculpture de la surface de la roche karstique par la dissolution (étude détaillée dans A. Bögli, 1960 et 1980, et M. Sweeting, 1972). Les lapiés présentent des formes différentes suivant qu'ils sont apparus sur une surface de roche nue ou sous une couverture meuble.

##### a) Lapiés nus:

Lapiés à cannelures, en rigoles, en empreintes de pas, lapiés de diaclases, kamenitza,... toutes ces formes en creux sont dues à la dissolution par l'eau de pluie, parfois avant toute concentration de l'écoulement, parfois par l'eau de ruissellement concentré; les bogaz ou couloirs karstiques, souvent larges de plus d'un mètre, généralement profonds de plusieurs mètres, représentent l'agrandissement et l'approfondissement de diaclases.

Les clapiers et les tables de lapiés (Karrentische: blocs rocheux plats subsistant au-dessus de la topographie générale) sont des effets de la combinaison de la dissolution et de la gélifraction. Les deux phénomènes peuvent alterner saisonnièrement, ou se succéder suivant une évolution climatique générale.

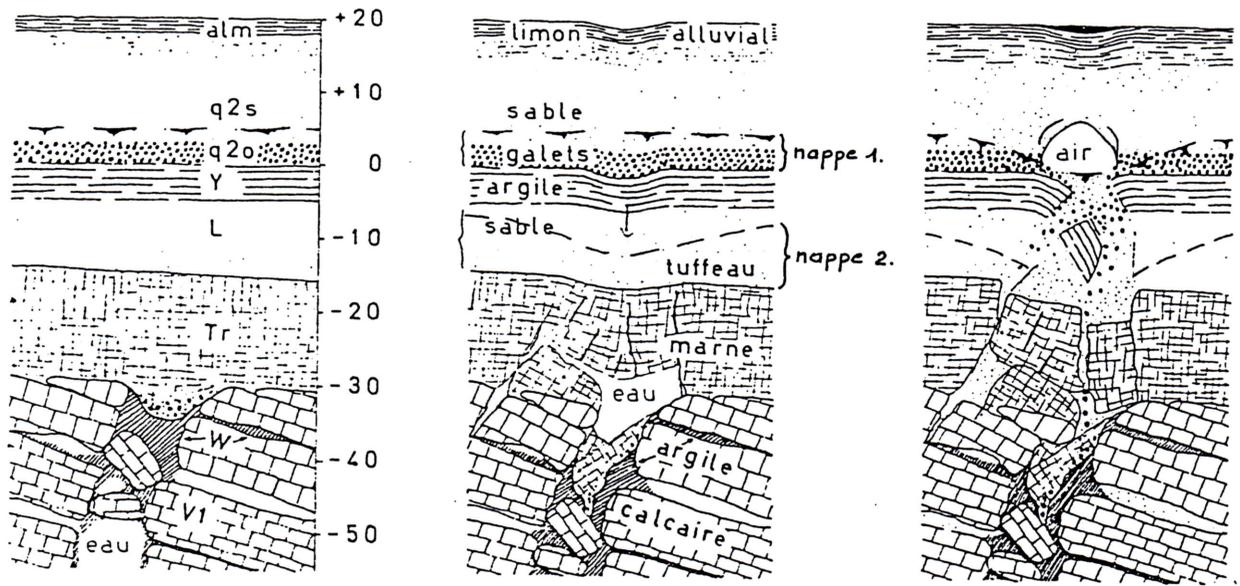
##### b) Lapiés couverts:

Ils se distinguent des précédents par la présence de trous semblables à des petits tunnels dans la roche, par l'existence de chicots, et par diverses manifestations qui indiquent que d'autres facteurs que la seule pesanteur ont régi le mouvement de l'eau. Celle-ci, guidée par des racines, transportée parfois par capillarité, déviée par des obstacles dans la couverture pédologique, d'une agressivité variable suivant les composés rencontrés (acides humiques, etc...), crée alors des formes très différentes des lapiés nus.

Il ne faut pas perdre de vue, dans l'observation des lapiés, qu'ils peuvent avoir été successivement nus puis couverts, ou inversement: l'environnement actuel d'un lapié ne correspond pas nécessairement à celui dans lequel il s'est développé.

#### 2. Les dolines.

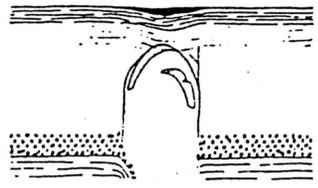
Dépressions fermées, généralement circulaires en plan, et de dimensions modestes ou moyennes (généralement de l'ordre du mètre ou du décamètre, parfois de l'hectomètre).



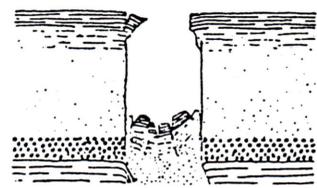
1. Karst enfoui

2. Effondrement

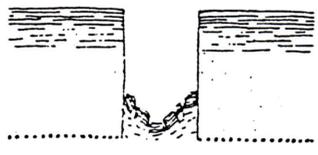
3. Début de l'ogive



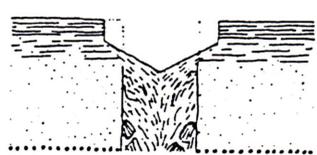
4. Montée de l'ogive



5. Percée de l'ogive



6. Maturité



7. Sénilité

**FIGURE 19.** Schéma du mécanisme de l'évolution des puits naturels dans le Tournaisis. (d'après R. Legrand, 1964 et N. Delattre, 1983). Les chiffres le long de l'échelle verticale indiquent les altitudes par rapport au niveau de la mer.

**a) Forme :**

Les formes des dolines sont très variées: en entonnoir, en assiette, en baquet, dolines-puits, ...

**b) Genèse:**

Très variable; deux types principaux (fig. 18):

- dolines de dissolution et tassement: l'élargissement localisé de fissures par la dissolution permet la descente de matériaux de la couverture (pédologique par ex.) et provoque un abaissement localisé progressif de la surface du sol (fig. 18,a).
- dolines d'effondrement: des cavités souterraines, éventuellement très anciennes, ont parfois leur plafond qui s'écroule; des éboulements successifs peuvent finalement provoquer un effondrement de la surface (fig.18,b). Les dolines d'effondrement peuvent parfois se produire sous une couverture meuble, qui s'y éboule également, ou même sous une roche de couverture non karstique, comme c'est le cas au Kentucky, dans la région de Mammoth Cave. Dans les régions méditerranéennes, on observe souvent des dolines d'effondrement sur le pourtour des poljés, au-dessus de la zone de circulation active qui les draine.

C'est au même type qu'il faut rattacher les "puits naturels" du Tournaisis, effondrements généralement cylindriques pouvant atteindre d'un seul coup une dizaine de mètres de profondeur sur une ou plusieurs dizaines de mètres de diamètre. Ces puits apparaissent en surface par la propagation à travers une couverture non karstique d'effondrements de roches dans des cavités karstiques profondes du Calcaire Carbonifère (fig.19). Leur formation est actuellement accélérée par le rabattement de la nappe aquifère. Un tel puits, de 6,50 m de diamètre, s'est produit en 1977 dans une cour d'école, à Kain, engloutissant plus de 100 m<sup>3</sup> de terre. Le même jour, un trou de 275 m<sup>3</sup> a coupé un chemin et mis en porte à faux un gazoduc sur 12 m de long, et un autre encore s'ouvrait en bordure même de l'Escaut, créant un trou de 2800 m<sup>3</sup> et avalant une partie du débit du fleuve (de Roubaix et al., 1979).

**c) Facteurs de localisation:**

- fracturation de la roche;
- circulation souterraine;
- pente de la surface: sur les pentes fortes, le ruissellement se fait au détriment de l'infiltration. Dans le vallon de Beauregard (au sud de Liège), M. Bay (1968, inédit) observe que les dolines ne se forment pas sur les pentes supérieures à 26°.

**d) Evolution:**

Les dolines peuvent évoluer en s'approfondissant, en s'élargissant, en devenant coalescentes (formation d'ouvalas), ou en se remblayant ou se remplissant d'eau. Voir un exemple d'évolution observé dans la craie

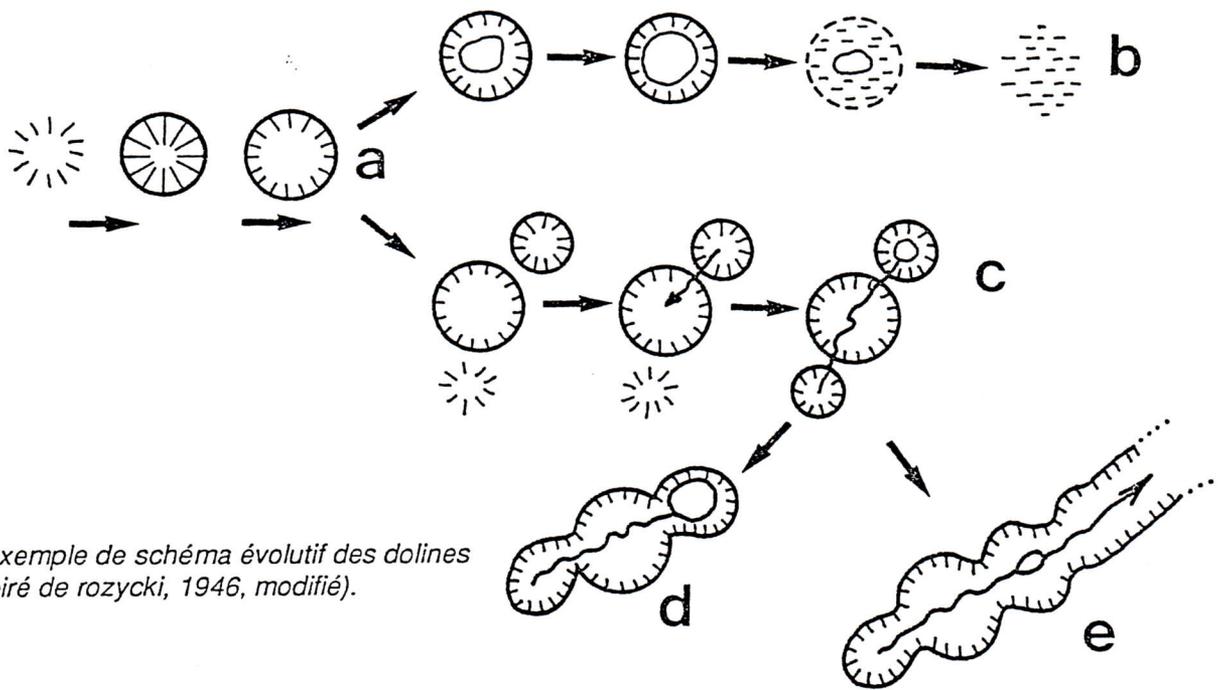


FIGURE 20. Un exemple de schéma évolutif des dolines (inspiré de rozycki, 1946, modifié).

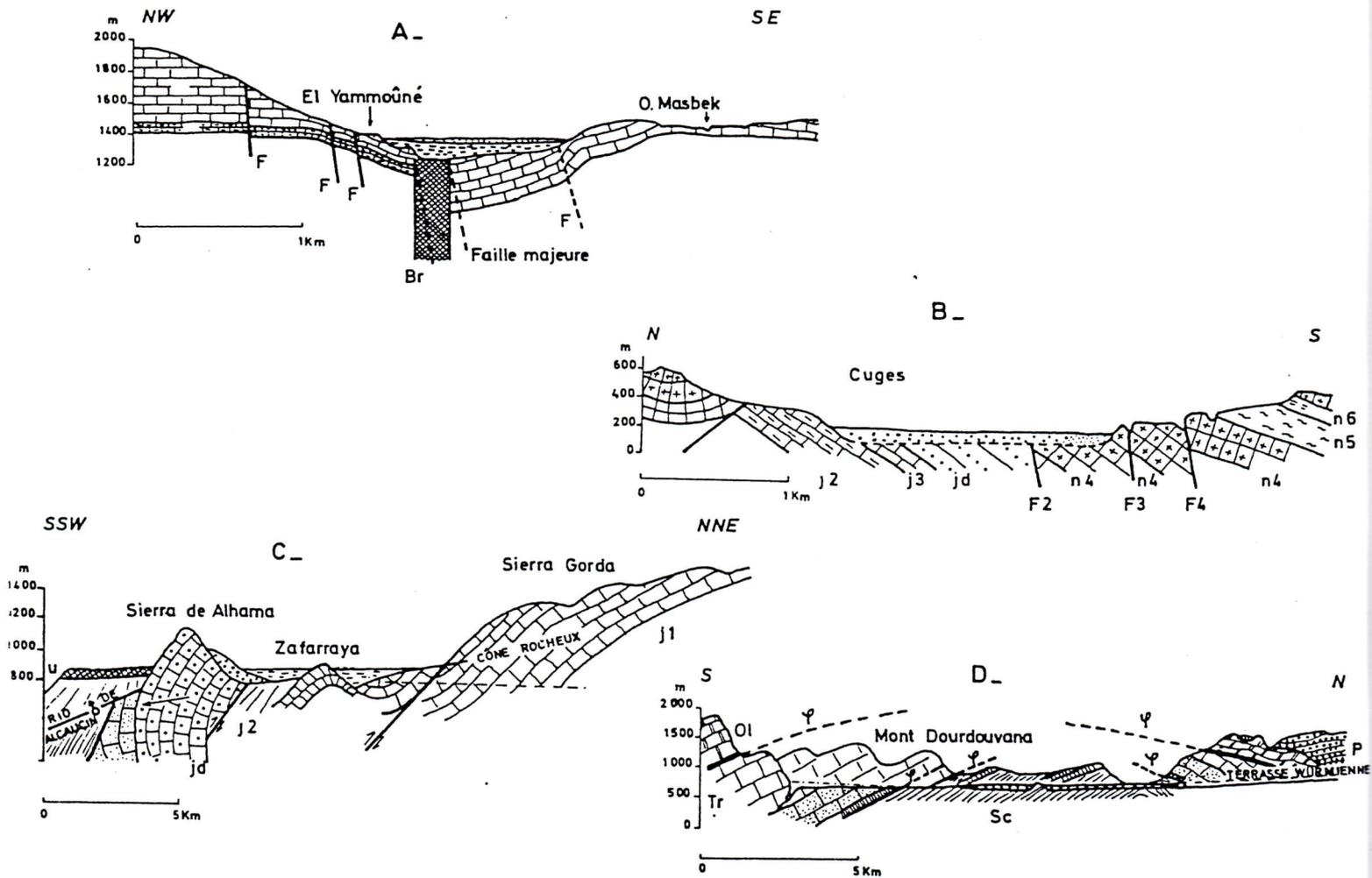


FIGURE 21. Relations entre poljés et tectonique d'après quelques exemples classiques (extrait de Nicod, 1979).

- A. Le poljé de El Yammouné (Liban), avec la zone de broyage d'une faille majeure, en coulissement actif (d'après Besancon 1963)
- B. Le poljé de Cuges (Provence), commandé par un champs de failles (d'après Nicod, 1967)
- C. Le poljé de Zafaraya (Cordillère Bétique, Andalousie), lié à des accidents majeurs entre 3 unités (néotectonique probable) (d'après Lhenaff, 1968)
- D. Le poljé de Fénéos (Péloponèse) en combe dans un anticlinorial de nappe, d'après Dufaure, 1963).

Ol.-calcaires d'Olonos; Tr. - calc. cristallins de Tripolotza; Sc. - Schistes; P - Poudingues pliocènes

en Pologne par Rozycki (1946): fig. 20. Des dolines s'agrandissent, puis leur fond se colmate (a). Certaines s'inondent dès lors, tandis que le fond continue à se remblayer sous l'effet du ruissellement; ceci donne parfois naissance à un petit marécage (b). D'autres dolines deviennent coalescentes (c), ce qui amène la formation d'ouvalas (d) ou l'intégration des dépressions, sous la forme d'un vallon, dans le réseau hydrographique de surface (e).

#### **e) Origine de l'eau:**

L'eau qui remplit certaines dolines peut être l'eau d'une nappe aquifère (dolines en Floride); plus souvent, c'est de l'eau de ruissellement dont l'infiltration est ralentie par une couverture peu perméable.

#### **f) Dolines dans le gypse et le sel et dissolution accélérée:**

Alors que l'on trouve rarement plus de 0,2 ou 0,3 gramme de calcaire par litre d'eau dans les eaux superficielles, l'anhydrite est soluble à raison de 2,5 gr/l, et le chlorure de sodium à raison de 300 gr/l. En outre, pour ces minéraux, la dissolution n'est pas liée à la présence de CO<sub>2</sub>. Aussi y observe-t-on des formes de dissolution spectaculaires se produisant très rapidement. Ainsi, en Lorraine, des dolines et des ouvalas se sont développés rapidement en surface à la suite de l'exploitation du sel par dissolution et pompage de la saumure; des maisons se sont effondrées, et le développement de l'étang de Pontcé, dans un de ces ouvalas au sud-est de Nancy, a obligé à surélever une route sur plus d'un kilomètre (R. Haby, cité par J. Nicod, 1972).

### **3. Les poljés.**

Fond plan et subhorizontal d'une vaste dépression karstique, entouré, avec une rupture de pente très nette, par des versants souvent assez raides.

Un poljé n'est pas simplement le développement d'un ouvala.

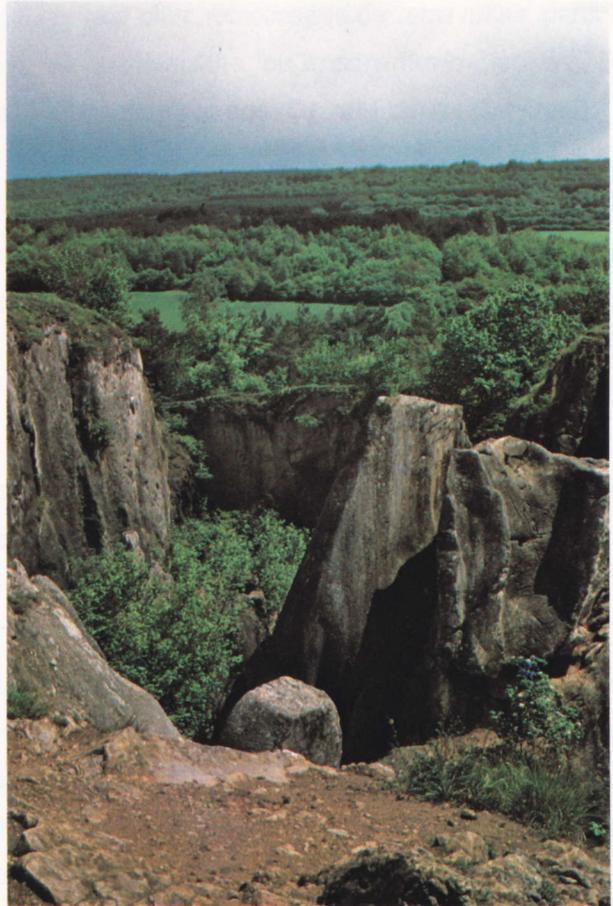
Les poljés sont généralement des dépressions fermées mais, en Yougoslavie (d'où le mot est originaire), on appelle aussi poljés certaines larges dépressions "ouvertes" (c'est-à-dire drainées par un cours d'eau effluent ou un cours d'eau qui les traverse de part en part).

Concernant les poljés, voir, par exemple, J. Nicod, 1972, ou M. Sweeting, 1972.

#### **a) Influence de la structure:**

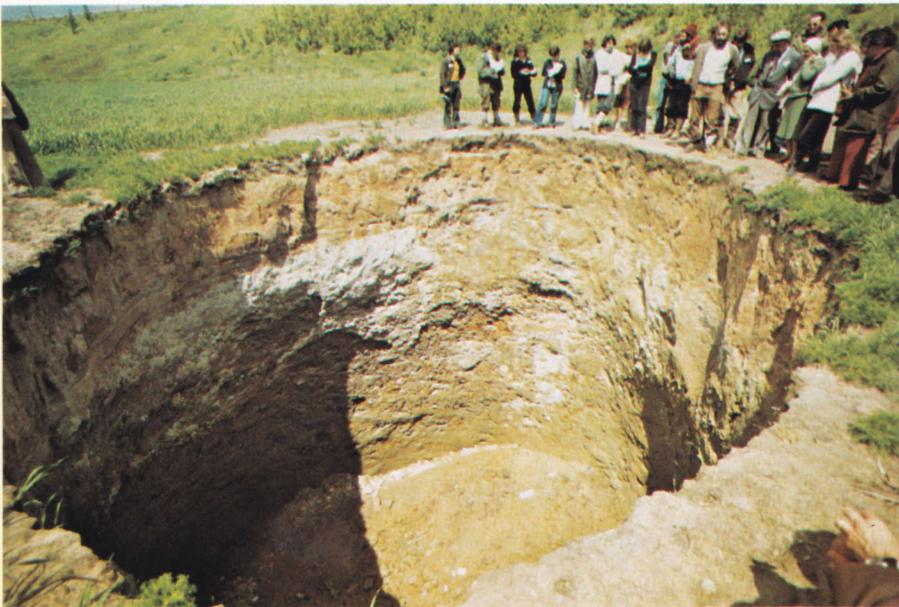
Les poljés sont liés à des dispositions structurales favorables: synclinal, faille, contact du calcaire avec une formation imperméable,... (fig. 21).

Un paléokarst belge :  
le Fondry des Chiens,  
un des «abannets» de  
Nismes



Un «puits naturel» à  
Kain (Tournai),  
effondrement provoqué  
par le rabattement  
actuel de la nappe  
aquifère dans le calcaire  
sous-jacent.

Photos J. Grimbérieux.



## b) Morphologie du fond et des versants:

Le fond des poljés est plat; parfois c'est le fond rocheux en place, calcaire ou non, qui affleure; plus souvent, c'est le sommet du remplissage qui est plan: remplissage de *terra rossa* dans les cas les plus typiques, mais parfois remplissage alluvial, ou périglaciaire, ou encore fluvio-glaciaire. Parfois, l'érosion de la couverture provoque l'apparition du soubassement corrodé (Grand Plan de Canjuers).

Les rebords du poljé sont généralement en pente raide; le bas du versant est même fréquemment marqué de redans, surtout sous les tropiques. Des chicots résiduels, ou *hums*, subsistent parfois dans le poljé même, qu'ils dominent abruptement.

## c) Nappe d'inondation:

Les poljés, généralement très secs en été, du fait de leur drainage, sont presque toujours inondés en périodes de hautes eaux; très rares par contre sont ceux qui possèdent une nappe d'eau permanente.

L'inondation vient-elle d'en haut (crue rapide, *ponors* trop étroits ou obstrués) ou d'en bas (montée de la "nappe")? Les deux existent. Dans certains cas, il est acquis que les eaux souterraines remontent: on appelle *estavelles* les gouffres tour à tour absorbants et émissifs; toutefois, même dans le cas de remontée des eaux, l'inégalité des niveaux atteints dans les différentes dolines atteste fréquemment qu'il s'agit d'une *circulation* souterraine relativement rapide (poljé d'Imotski, Yougoslavie) et non d'une *nappe* aquifère au sens propre. Dans des cas qui semblent plus rares, il s'agit d'une vraie nappe.

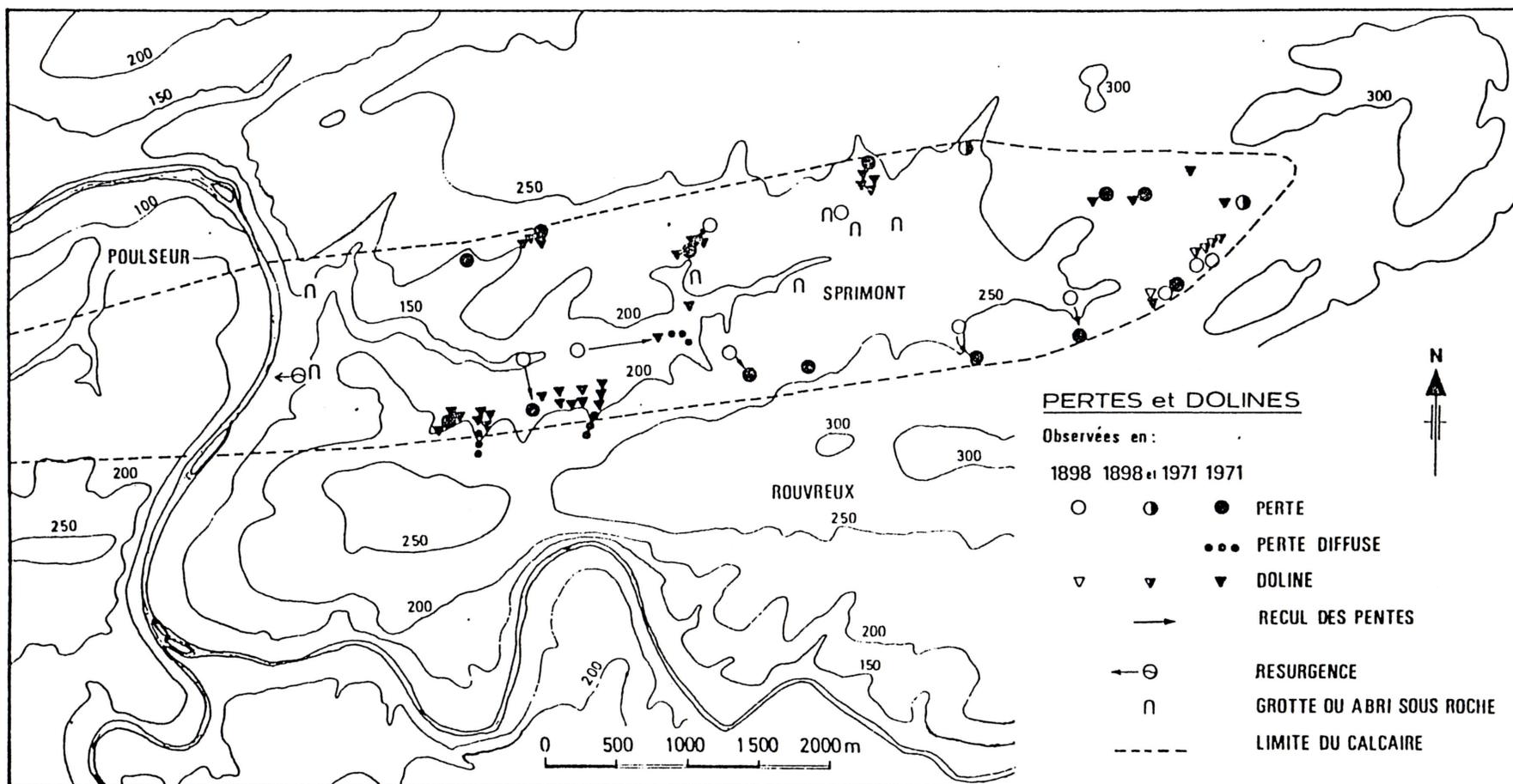
## d) Genèse:

L'érosion karstique est un des facteurs du développement des poljés (redans, élargissement par corrosion, drainage des *ponors*). La dissolution peut être le fait d'eaux de pluie et de ruissellement, ou de fonte des neiges ou de glace, ou encore d'une nappe d'inondation. Mais l'érosion fluviale a un rôle aussi dans bien des poljés. Tous ces facteurs agissent dans des dépressions *structurales* (à un degré variable).

Enfin, le fond plat du poljé est le plus souvent un effet du remplissage, ce dernier n'étant souvent pas proprement karstique.

Beaucoup de poljés sont anciens et leur apparition remonte, par exemple, au Néogène. Ils ont donc connu des climats variés et ont été soumis successivement, de ce fait, à des processus divers.

L'histoire des poljés est complexe et les stades successifs de creusement, d'élargissement, de remblaiement et d'étalement du remplissage peuvent être dus à des processus sans relation entre eux.



**FIGURE 22.** *La vallée sèche du synclinal de Sprimont. Evolution des phénomènes karstiques entre 1898 et 1971. Le trait interrompu délimite le synclinal calcaire de Sprimont (tiré de C. Ek, 1976, d'après les observations de R. Michel, 1971).*

#### 4. Pertes, vallées sèches et résurgences:

L'association de ces trois éléments représente une expression géomorphologique parfaitement typique du karst.

##### a) Pertes:

Les points d'enfouissement de l'eau peuvent être localisés (ponors) ou diffus. Ils peuvent être multiples, en fonction du régime (crue, étiage).

La localisation des points de perte évolue généralement au cours du temps: les pertes se produisent de plus en plus en amont, jusqu'à ce qu'elles soient localisées à la limite amont du calcaire.

Dans deux vallons de Belgique (vallon de Sprimont à Chanxhe et vallon du Fonds d'Hestroy), plusieurs pertes ont reculé d'une centaine de mètres en un siècle, et parfois bien davantage (fig. 22). Probablement faut-il chercher des influences anthropiques sur un processus aussi accéléré: l'extrapolation serait en effet embarrassante! Mais le fait est clairement établi. Il témoigne de l'actuelle rapidité d'évolution du réseau hydrographique karstique et des problèmes que pose dans nos régions la circulation des eaux dans les régions calcaires.

##### b) Vallées sèches:

Les vallées sèches sont un signe de l'évolution géomorphologique "vers" le karst (puisque'il y a eu antérieurement écoulement fluvial).

En amont de la vallée sèche, il y a parfois - mais non toujours - une *vallée aveugle*.

Les vallées sèches sont souvent jalonnées de dolines.

##### c) Résurgences:

Venues d'eaux karstiques ramenant au jour un cours d'eau qui s'est enfoui à l'amont; par opposition, on appelle *exurgence* une source karstique qui n'est pas alimentée par des cours d'eau superficiels, mais par des réserves souterraines. Les termes *émergence*, *source karstique* et *exutoire karstique* embrassent tous les trois les deux précédents.

Les résurgences peuvent être localisées ou diffuses, pérennes ou temporaires; elles sont parfois sous-fluviales ou sous-marines.

Les sources karstiques peuvent présenter de forts débits. Ainsi, la Fontaine de Vaucluse débite le plus souvent entre 8 et 80 m<sup>3</sup>/sec, mais peut, en crue, atteindre 200 m<sup>3</sup>/sec. (1)

L'importance des débits des sources karstiques en fait le fournisseur principal d'eau de beaucoup de populations et, dans certains cas, une importante source d'énergie hydro-électrique. Il en est ainsi en Yougoslavie. Dans ce pays, les eaux de la Trebisnjica -pour se limiter à l'exemple le plus important- proviennent de deux poljés. Elles sont accumulées dans une retenue de plus d'un milliard de mètres cubes. Une partie de ces eaux sert à l'irrigation du poljé Popovo, mais la plus grande partie (100 m<sup>3</sup>/sec) est turbinée dans la centrale souterraine de Dubrovnik, qui peut produire annuellement plus de 2200 GWh.

Les résurgences sont, avec les pertes, des clefs fondamentales de l'évolution des vallées en terrain calcaire: elles s'ouvrent parfois au fond de *reculées*; elles déterminent les *vallées à éclipses* (alternance de vallées vives et de parcours souterrains).

## 5. La morphologie souterraine:

La morphologie souterraine comporte essentiellement des formes dues à l'action de l'eau et d'autres dues à celle de la seule gravité: les effondrements.

### a) Les formes dues à l'action de l'eau:

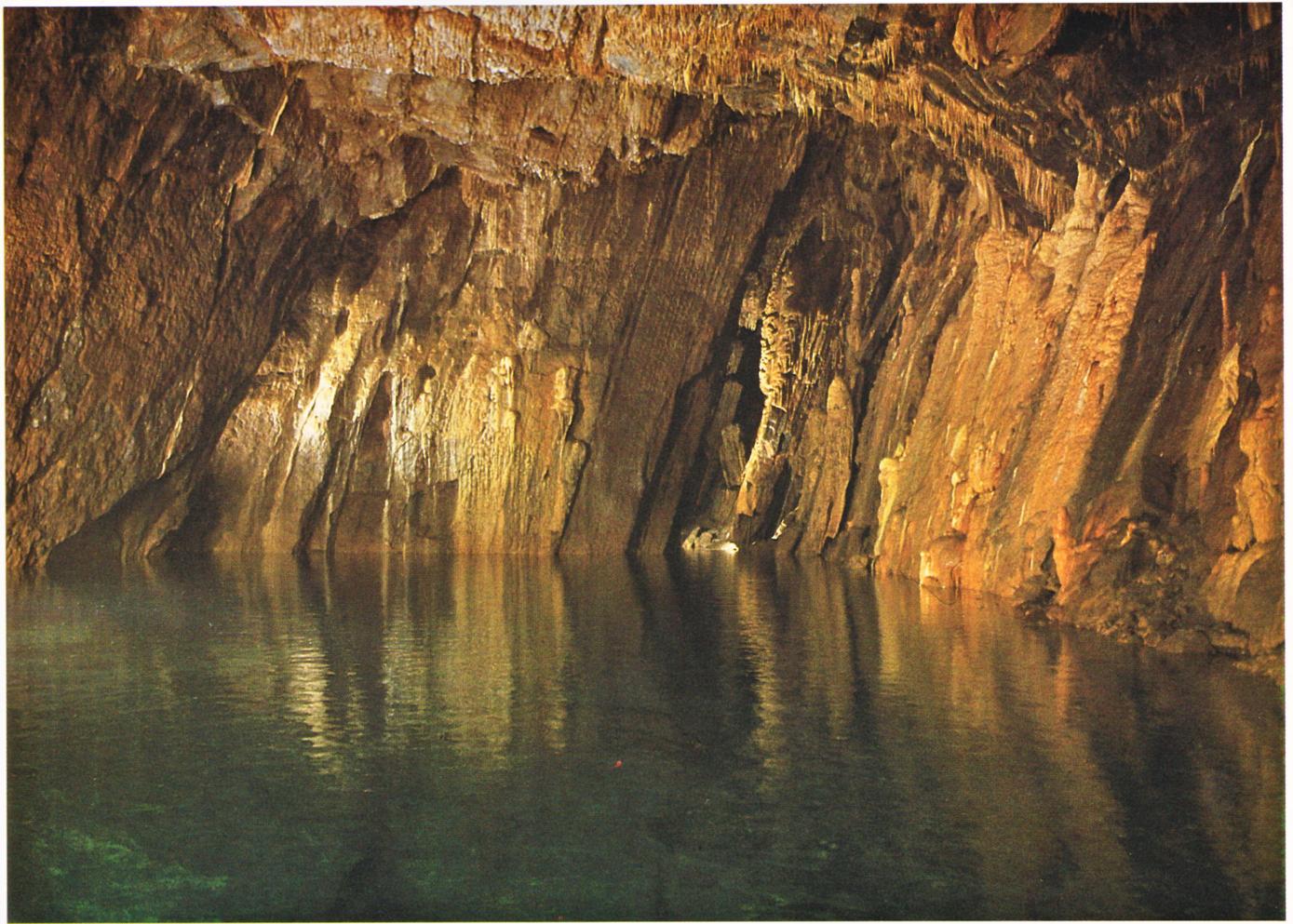
Les *fissures* sont les formes les plus élémentaires observées de l'action de l'eau. La plupart des fissures étroites doivent leur aspect à l'action de ruissellement: elles présentent souvent des sillons ou des ondulations allongés verticalement et, par temps humide, des suintements plus ou moins abondants. D'autres fissures, souvent plus larges, sont dues au mouvement latéral de l'eau occupant tous les interstices d'un réseau noyé. C'est le sens dans lequel on emploie le mot dans l'expression "réseau de fissures" et plus encore dans l'expression anglo-saxonne de "fissure cave".

La morphologie des *puits* est, dans beaucoup de cas, due à l'action de l'eau qui dévale, comme en témoignent les larges cannelures ou les sillons hélicoïdaux qui s'y observent parfois. Ce processus explique que beaucoup de puits soient plus larges en bas qu'en haut (augmentation de l'énergie cinétique avec la hauteur de chute).

Certains puits, cependant, peuvent être dus à l'action de l'eau circulant de bas en haut en conduite forcée (F. Trombe, 1952). D'autre part, des puits peuvent se former aussi par propagation progressive vers le haut d'effondrements de plafond de salle de grotte.

---

(1) La Fontaine de Vaucluse est une source siphonnante dans laquelle on a déjà atteint en plongée libre la profondeur de 153 m (1981) et dans laquelle un petit sous-marin télécommandé est descendu jusqu'à - 315 m (1985) sans encore atteindre la branche amont (remontante) du siphon.



## GROTTE DE LA FONTAINE DE RIVÛRE : LE LAC

(Photo : Joseph Godissart et Michel Philippe)

La Grotte de la Fontaine de RivÛre s'ouvre sur la rive droite de l'Ourthe, au sud de Hamoir, dans les calcaires frasniens. Elle a été découverte en 1968 par le Centre de Prospection liégeois de la Fédération nationale de Spéléologie et d'Alpinisme. Son développement est de près d'un kilomètre.

Le lac de la grotte occupe une surface de 1000 m<sup>2</sup> ; sa profondeur atteint 15 m ; sa longueur totale est de 70 m, et sa largeur maximum (entre le bord droit et le bord gauche de la photographie) environ 25 m. Le plafond

s'élève à 17 m au-dessus du plan d'eau à l'étiage. Les parois latérales sont conformes au pendage sud des bancs calcaires.

Sur la paroi du fond (paroi ouest), on peu distinguer, à 10 m au-dessus du lac, un ancien niveau, matérialisé par un léger bourrelet de calcite. C'est l'examen de cette photographie qui a révélé l'existence de cette formation, jusqu'alors inaperçue, et qui se prolonge à la même altitude au-delà de l'extension actuelle du lac. La calcite a été dat e de 220.000 ± 33.000 ans B.P. (trois datations <sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U de M. Gewalt).

Les *conduits tubulaires* sont dus à une circulation forcée de l'eau les remplissant intégralement, du moins pour autant qu'il s'agisse de conduits s'étendant sur une certaine distance en conservant un diamètre constant, présentant des parois relativement lisses et un aspect qui ne soit pas dû à une desquamation mécanique liée à l'effet des contraintes de la roche.

Les conduites forcées "en tube" peuvent présenter toutes les pentes (et contre-pentes) de 0 à 90°.

Les conduits de *rivières souterraines* sont ceux qui sont parcourus par un véritable *cours* d'eau présentant une surface libre et susceptible d'éroder verticalement ou latéralement et de transporter une charge en suspension ou autrement. Les vraies "rivières" souterraines ont, comme leurs soeurs épigées, tendance à régulariser leur profil en long et à se créer une section dont la surface est plus ou moins constante. Cependant, les rivières hypogées se distinguent des rivières épigées par l'absence de versants et donc l'absence d'apports solides tout au long du parcours et aussi par la présence possible de siphons.

Les *cavités phréatiques* sont caractérisées par une morphologie d'eau calme et par les effets d'une dissolution sans érosion mécanique, donc susceptible d'être finement différentielle ("boxwork, "spongework "de J.H. Bretz, 1942).

Bien d'autres aspects de la morphologie sont encore attribuables à l'action de l'eau, mais ceux qui viennent d'être énumérés sont certes les principaux.

## **b) Les effondrements:**

La grande majorité des salles des grottes ont leur plancher jonché d'éboulis. Et plus la salle est vaste, plus la présence d'éboulis est fréquente. La grotte du Père Noël à Wavreille (Belgique) comporte ainsi plus de 6000 m<sup>2</sup> d'éboulis d'un seul tenant.

Certes, tout éboulement suppose la présence préalable d'un vide au moins égal au volume éboulé, et généralement plus grand; en ce sens, une cavité a tendance à "disparaître" par les écroulements. Mais un éboulement modeste peut se produire dans un vide restreint, et les eaux peuvent emporter les débris en solution par exemple, et faire ainsi de la place pour un éboulement plus important, et ainsi de suite. Les effondrements jouent donc le rôle important d'amener par gravité une matière divisée (fût-ce en gros blocs) à l'endroit où l'eau courante est susceptible de l'évacuer.

Les blocs éboulés présentent parfois des faces formées par cassure (sauf les plans de stratification) et le plafond au-dessus d'eux apparaît lui-même sillonné de fractures. Mais, parfois, des traces indubitables de corrosion se présentent sur certaines faces des blocs. Ceci permet de distinguer des effondrements d'origine essentiellement mécanique (séismes, trop grande portée du plafond, gélivation,...) et des effondrements provoqués (ou largement préparés) par des actions de dissolution.

## TABLEAU I.

### Les 10 cavités les plus profondes du monde (1989).

1. Réseau Jean Bernard (Haute-Savoie, France) .....	1535 m
2. Viatcheslav Pantjukhin (C.E.I.) .....	1508 m
3. Laminako Ateak (Puertas de Illamina, BU 56) (Navarre, Espagne).....	1408 m
4. Sistema del Trave (Asturies, Espagne) .....	1381 m
5. Sneznaia (Abkhazie) .....	1370 m
6. Sistema Huautla (Oaxaca, Mexique).....	1353 m
7. Réseau de la Pierre St-Martin (France-Espagne) .....	1342 m
8. Réseau du Berger (Isère, France) .....	1248 m
9. Système Vladimir Ilyukhin (C.E. I.) .....	1240 m
10. Sistema Cuicateca (Mexique). .....	1230 m

Au total, 32 grottes de plus de 1000 m de dénivelée étaient recensées en 1989.

## TABLEAU II.

### Les 10 cavités les plus longues du monde (1989).

1. Mammoth Cave System (Kentucky, Etat-Unis).....	531 km
2. Optimisticeskaja (Ukraine, C.E.I.) .....	165 km
3. Hoelloch (Schwyz, Suisse).....	148 km
4. Jewel Cave (South Dakota, Etat-Unis).....	127 km
5. Siebenhengste (Berne, Suisse) .....	110 km
6. Ozernaja (Ukraine, C.E.I.).....	107 km
7. Système de la Coumo d'Hyuernedo (Haute-Garonne, France)....	90 km
8. Système de Ojo Guarena (Burgos, Espagne).....	89 km
9. Wind Cave (South Dakota, Etats-Unis) .....	82 km
10. Zoluska (Ukraine, C.E.I.) .....	82 km

Au total, en 1989, étaient recensées 27 grottes de plus de 50 km de développement.

## B. LES VARIANTES CLIMATIQUES.

Sous à peu près toutes les latitudes, dans presque toutes les zones climatiques, les calcaires s'individualisent dans la morphologie et, s'il y a de l'eau, celle-ci a tendance à s'enfouir dans les cavités souterraines. Mais chaque climat introduit cependant des variantes dans l'aspect du paysage karstique.

On considéra jadis que les différenciations climatiques les plus importantes étaient liées aux différences de température: les températures élevées étaient censées favoriser la karstification; on observait du reste que les paysages karstiques les plus impressionnants étaient essentiellement trouvés dans les régions chaudes. Jean Corbel, dans sa thèse de doctorat (1957) contredit cette opinion: des variations du coefficient de dissolution du dioxyde de carbone en fonction de la température, il déduisit (erronément) que le dioxyde de carbone était plus abondant dans les eaux froides que dans les eaux chaudes, et se livra dès lors à une prospection intensive des calcaires des régions froides. Nous avons fait le point plus haut ( I A et I B) à ce sujet, et nous voulons seulement ici évoquer brièvement quelques processus et quelques formes caractéristiques de l'influence de certains climats sur la morphologie des calcaires.

Nous envisagerons seulement, et très brièvement, pour leurs effets essentiels, les climats périglaciaires, le climat tempéré océanique, le climat méditerranéen et les climats équatorial et tropical humide.

### 1. Climats périglaciaires:

Les traits fondamentaux en sont l'importance géomorphologique du gel, la présence fréquente d'un pergélisol et les précipitations sous forme de neige.

A l'action de la dissolution s'ajoute la gélifraction; les lapiés sont parfois très développés, mais les *clapiers* (amas de pierrailles calcaires) plus encore.

La neige et les eaux de fonte donnent naissance à des *névières* (puits à neige) et des *glacières* (grottes remplies de glace); la cryoclastie favorise des dolines d'effondrement et, d'après R. Ciry, des *grottes cutanées* (c'est-à-dire superficielles, liées à la zone active surmontant le pergélisol). Le fait que la fusion de la neige est influencée par l'orientation provoque parfois la dissymétrie des dolines: le versant "d'adret", où les alternances de gel et de dégel sont plus fréquentes présentant une pente plus douce (cryergie et congélifluxion) et le versant à l'ombre ("ubac") une pente plus raide (effet de "niche de nivation" sous la congère persistante).

Dans certaines régions qui ont connu un climat périglaciaire à plusieurs reprises au Quaternaire, les périodes froides ont provoqué de la cryoclastie et de la congélifluxion qui ont abouti à un colmatage des réseaux souterrains. Des bouchons de glace aux points de perte ont pu également

collaborer au blocage de la circulation karstique. Dans les vallées sèches s'est alors rétablie une circulation de surface. Ce fut le cas en Belgique notamment. La fin des conditions périglaciaires a amené la désobstruction progressive des conduits souterrains et le retour à la circulation karstique.

## 2. Climat tempéré océanique:

La pluviosité favorise la couverture végétale et, par là, le développement d'un sol. Dès lors, la roche est rarement nue; peu de lapiés apparaissent. Mais l'abondance de l'eau fait que les dolines sont nombreuses, souvent de formes molles, et que les pertes évoluent activement, par érosion (souterraine) régressive. Le sol, en favorisant une infiltration plutôt diffuse, fait que dolines et ponors sont nombreux plutôt que grands.

Cependant, là où le calcaire est épais et affleure sur de vastes surfaces, comme dans les Causses du Massif Central, il impose malgré tout son paysage (*l'holokarst*, c'est-à-dire le karst typique, intégral) <sup>(1)</sup>. Pourtant, dans les Causses, la pluviosité est aussi importante que dans le Condroz belge, où le calcaire, exposé en affleurements moins étendus, coincé entre d'autres roches, ne peut manifester aussi bien son identité (et exhibe un *mérokarst*, karst incomplètement développé).

## 3. Climat méditerranéen:

La concentration de toute la pluviosité dans une moitié de l'année favorise le ruissellement, la concentration des eaux et, par là, la karstification. Dans le karst dinarique typique -c'est important- la pluviosité dépasse deux mètres par an. Il y a donc beaucoup d'eau. Ainsi, la rivière souterraine Reka a un débit moyen de 10 m<sup>3</sup>/sec, mais bien des *sources karstiques* ont un débit encore plus grand: 60 m<sup>3</sup>/sec, par exemple pour une seule source du Gacko Polje.

On voit dès lors quelle peut être l'importance, sur le plan humain, des réserves karstiques dans une zone climatique où le besoin d'eau est un des problèmes majeurs. En Yougoslavie, le captage judicieux et l'accumulation d'eau dans les poljés permet d'alimenter des centrales hydro-électriques capables de fournir 2000 GWh et davantage (voir J. Nicod, 1972).

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'en Méditerranée deux facteurs structuraux jouent un rôle favorable fondamental dans le développement du karst (J. Nicod, 1972):

- a) la puissance et la pureté des calcaires et dolomies: dans la région de la Méditerranée, les dépôts calcaires ont été très puissants durant le Mésozoïque. La puissance des seuls calcaires triasiques dépasse 1000 m dans le karst dinarique; les calcaires et dolomies jurassiques ont plus de 1000 m en Provence).

---

(1) Pour J. Cvijic (1960), créateur des termes *holokarst* et *mérokarst*, les Causses sont cependant un cas intermédiaire, du fait de l'existence de vallées normales à cours d'eau superficiel, de l'existence d'un niveau aquifère à profondeur "modérée" et de l'inexistence des poljés.

b) l'intensité de la fracturation: les plissements alpins ont déformé tout le pourtour de la Méditerranée et provoqué, dans les roches compétentes que sont les calcaires et dolomies, une intense dislocation: failles, fractures, diaclases. Beaucoup des plus grands poljés sont dans de telles zones de fracturation.

On voit l'importance de l'interférence avec le climat de deux facteurs géologiques: la lithologie et la structure.

#### 4. Climats équatorial et tropical humide:

Ces climats sont caractérisés par l'abondance des précipitations, mais aussi par celle de l'évapo-transpiration qui prélève souvent les 3/4 des 2 ou 3 mètres d'eau tombée.

Les coups d'eau des averses torrentielles entraînent un ruissellement bref mais colossal, et l'évaporation entraîne la formation de concrétions abondantes.

L'eau attaque le calcaire très vigoureusement mais très localement. Vu la vitesse des réactions, elle est en effet vite saturée.

De tous les types climatiques de karst, le karst tropical est le mieux individualisé; ce qui y saute aux yeux, par rapport aux régions tempérées et froides, c'est l'inversion des deux éléments du relief: les dépressions qui trouent la surface des régions karstiques tempérées et froides sont remplacées par des reliefs résiduels qui s'élèvent au-dessus d'une surface aplanie, érodée.

Les deux types principaux sont le *karst à pitons* (*Kegelkarst, cone karst*), et le *karst à tourelles* (*Turmkarst, tower karst*); mais il existe bien des types intermédiaires et d'autres variétés. C'est ainsi que le *karst à mamelons* (*Kuppenkarst, bowl karst*) est très répandu sous les tropiques: collines arrondies où le calcaire, masqué sous l'abondant couvert végétal, apparaît peu.

En Chine, où le karst est très développé (les roches carbonatées affleurent sur plus de 1,25 million de km<sup>2</sup>), on distingue le *Qiufung*, karst caractérisé par des collines à pentes convexes, dont le diamètre est nettement plus grand que la hauteur, et le *Zunclin*, qui rassemble karst à tourelles et karst à pitons.

##### a) Le karst à pitons:

Il est caractérisé par de nombreuses buttes coniques, entre lesquelles s'étendent des dépressions profondes qu'on appelle des *cockpits*. Parfois, ces dépressions ont une forme en plan étoilée, car elles s'insinuent entre les collines. Le *Kegelkarst* a des collines plus hautes que le *Kuppenkarst* mais, surtout, le calcaire est plus souvent visible au flanc des buttes, particulièrement vers la base.

Le *Kegelkarst* s'observe en Chine, en Malaisie, au Mexique, à la Jamaïque ("cockpit country")... A son origine, il faut voir l'intense ruissellement qui, lors des averses torrentielles, crée des cours d'eau très courts et temporaires qui s'engouffrent dans les *cockpits*.

#### b) Le karst à tourelles:

Des collines élevées (100-300 m) à pentes très raides (60 à 90°), entourées de rivières ou dominant une plaine alluviale, caractérisent ce karst. La région de *Turmkarst* la plus spectaculaire du monde est certes l'Asie des Moussons; en Chine, le *Kegelkarst* du Yunnan fait place, vers l'est, au *Turmkarst* du Guizhou et du Guangxi. Dans la baie d'Along (au nord du delta du Fleuve Rouge, au Vietnam), les tourelles dominant la mer qui a envahi une ancienne plaine alluviale.

La corrosion latérale intense au pied des versants est due aux effets du ruissellement en nappe lors des averses, aux nappes d'inondation ou aux eaux des fonds marécageux. L'abondance des transports en suspension des rivières crée d'importantes plaines alluviales.

Le *Turmkarst* apparaît comme un stade ultime et très développé du *Kegelkarst*.

Il y a deux types de *karst à tourelles*: les tourelles sont soit les affleurements d'un massif calcaire aplani et recouvert d'alluvions, soit des résidus calcaires surmontant un terrain non karstique qui constitue la plaine, comme cela se voit par endroits à la Jamaïque.

Dans les karsts tropicaux, les reliefs dominant les plaines sont souvent forestiers, ou nus lorsque les pentes sont très raides; les plaines sont généralement fertiles, souvent couvertes d'un épais sol d'altération -argile latéritique- ou d'alluvions.

En résumé, la karstification tropicale opère surtout en surface, où elle est violente. Les eaux dissolvent vite, et sont donc vite saturées; le calcaire est redéposé sous forme de concrétions, souvent aragonitiques, abondantes. La corrosion latérale est un effet majeur de ce que la dissolution s'exerce vite, dès que les eaux de pluie ou de ruissellement entrent en contact avec le calcaire. La corrosion se manifeste donc surtout en surface; la dissolution, largement favorisée par les acides libérés par des micro-organismes, se concentre dans les régions marécageuses ou dans le fond des *cockpits*. Les grottes sont généralement peu profondes, abris sous roche, grottes de pied de versant ou tunnels de rivières souterraines.

Enfin, on notera que les karsts à *mogotes* (collines à flancs généralement raides) de Cuba et de Porto-Rico semblent évoluer ainsi depuis le Néogène: la durée du processus explique sans doute la force avec laquelle il s'imprime dans le paysage. Quant au *karst à tourelles* de la Chine du Sud et du Cambodge, il représente un milieu continental chaud depuis le Secondaire! On voit l'importance du temps dans la caractéristique du paysage.

## CONCLUSIONS.

UN RAPIDE SURVOL DE QUELQUES TYPES CLIMATIQUES DE KARSTS NOUS AMENE AUX CONCLUSIONS SUIVANTES CONCERNANT LES FACTEURS DE LA DIFFERENCIATION CLIMATIQUE:

1. LA QUANTITE D'EAU ARRIVANT SUR LE KARST EST UN FACTEUR DE GRANDE IMPORTANCE.
2. LA REPARTITION DE L'AGRESSIVITE DE L'EAU SUIVANT LES ENDROITS EST EGALEMENT FONDAMENTALE.
3. LES PLUS BEAUX KARSTS (LES PLUS DEVELOPPES) SONT FAVORISES PAR LES FACTEURS STRUCTURAUX.
4. LA DUREE DU PHENOMENE REGIT LARGEMENT LA NETTETE DE SA MANIFESTATION DANS LE PAYSAGE.

ENFIN, BIEN ENTENDU, ON SERA ATTENTIF A DES HERITAGES POSSIBLES D'AUTRES CLIMATS, AYANT ENGENDRE DANS CERTAINES REGIONS DES FORMES ANCIENNES QUE NE POURRAIENT EXPLIQUER LES CONDITIONS ACTUELLES.

## C. LES DEPOTS EN MILIEU KARSTIQUE.

Les formes que nous avons examinées jusqu'ici sont des formes en creux, souterraines (les grottes) ou superficielles (dolines, poljés,...). Divers processus tendent au comblement partiel ou total de ces formes d'érosion.

Dans les grottes mêmes, les remplissages peuvent être chimiques, détritiques ou organiques. Ils occupent parfois une partie importante des cavités; parfois même, les comblant entièrement, ils en font des *grottes fossiles*. Il faut distinguer les dépôts autochtones (provenant de la grotte même ou de son massif) des dépôts allochtones. On classera à part les dépôts de glace qui constituent parfois d'importants remplissages des grottes de haute altitude ou de haute latitude. Nous ne les étudierons pas ici. On pourra consulter à ce sujet Jennings (1985) et surtout Bögli (1980).

Dans le karst en général, nous classerons pragmatiquement les remplissages en dépôts de précipitation, sédiments détritiques et dépôts organiques.

Nous ferons une place à part aux dépôts résiduels d'altération, tels que la *terra rossa* et les bauxites.

## 1. Dépôts de précipitation.

### a) Dans les grottes:

Les dépôts chimiques (les dépôts de précipitation) sont les remplissages les plus caractéristiques des grottes. Ils peuvent être constitués de sels divers, parmi lesquels le plus abondant, et de très loin, est évidemment le carbonate de calcium auquel on peut appliquer, à propos de la précipitation, ce qui a été dit au chapitre I sur sa dissolution.

La formation des concrétions carbonatées est directement liée à la dissolution, qu'elle implique nécessairement. Les eaux de percolation corrodent le calcaire de la roche encaissante, surtout dans les fissures situées entre la surface du sol et les cavités souterraines. Dans l'atmosphère de celles-ci, la pression de  $\text{CO}_2$  est souvent beaucoup plus faible que la pression équilibrant les solutions qui parcourent les fissures ( $\text{CO}_2$  biogénique du sol). Une partie du  $\text{CO}_2$  s'évade alors de l'eau de percolation, et du carbonate de calcium précipite sous forme de concrétions. La variation de la pression de  $\text{CO}_2$  qui engendre le concrétionnement peut avoir un caractère saisonnier.

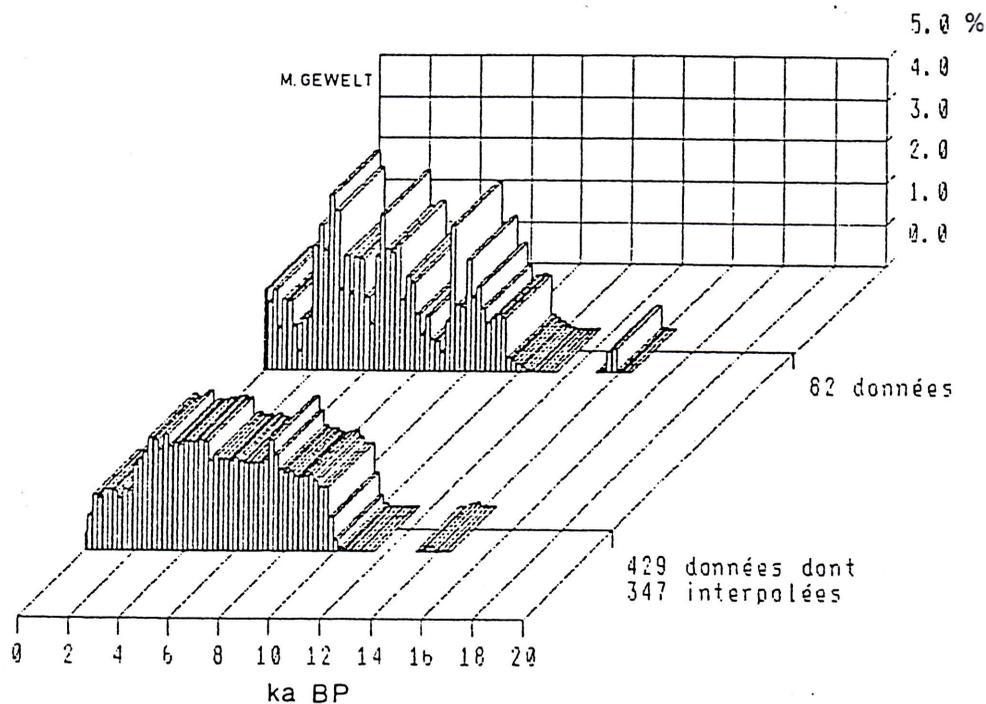
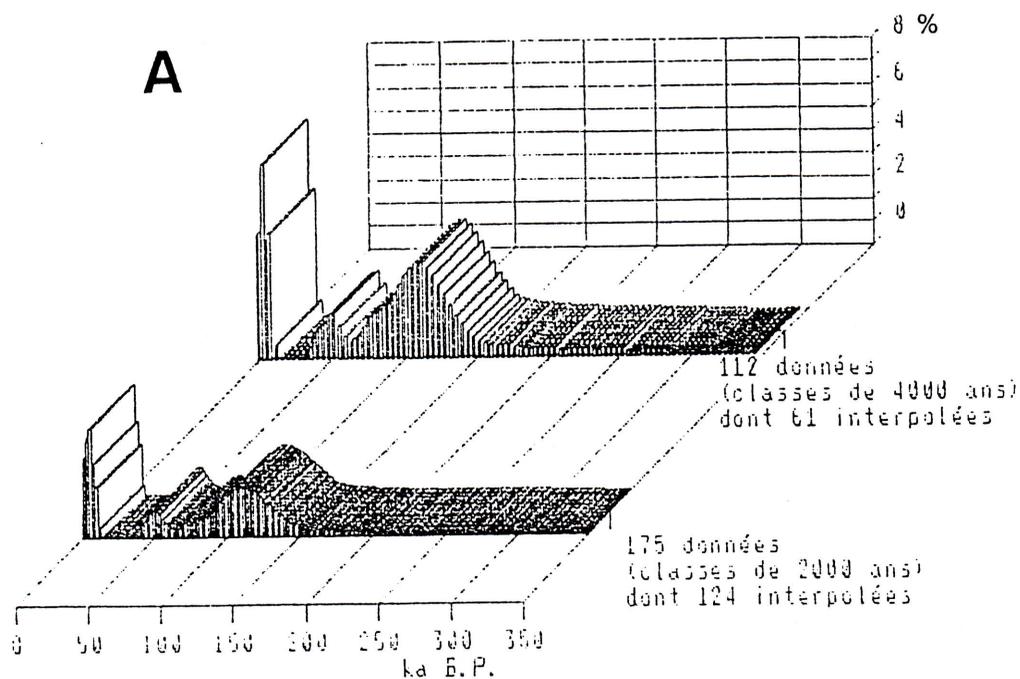
Les concrétions sont beaucoup plus nombreuses et plus développées dans les grottes de climat chaud que dans les grottes de climat froid. Dans les régions froides (Nord du Québec, Laponie etc...) elles sont presque inexistantes. L'abondance des concrétions en climat chaud semble liée à la rapidité de la dissolution, qui amène dans les salles des grottes des solutions fréquemment sursaturées, parfois sans doute aussi à l'évaporation qui peut favoriser la concentration des solutions.

Les formes de concrétions les plus typiques sont les stalactites et les stalagmites, mais on rencontre aussi sous terre des planchers stalagmitiques, des coulées de calcite, des draperies, des perles des cavernes, des dépôts de gours (petits bassins de calcite fermés par des barrages), des excentriques (dont la forme est liée à la capillarité), du lait de lune (mou lors de sa formation), etc... Le gypse cristallise parfois en inflorescences de cristaux courbes, l'aragonite souvent sous forme d'aiguilles...

Dans l'ensemble cependant, la plupart des concrétions peuvent entrer dans une des deux catégories suivantes:

- concrétions liées à la percolation (*dripstones*): stalactites, draperies, stalagmites...
- concrétions liées à l'écoulement (*flowstones*): planchers, coulées...

Les découvertes récentes les plus importantes concernant les concrétions sont relatives à leur âge et aux climats sous lesquels elles se sont formées. Ces progrès sont dus essentiellement à l'apport des méthodes radiométriques et isotopiques (en particulier, mais non exclusivement:  $^{14}\text{C}$ ,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ).



**FIGURE 23. Distribution des âges Th/u et  $^{14}\text{C}$  de concrétions de grottes belges.**

**A.** Histogrammes (classes de 2000 à 4000 ans) basés sur 51 datations  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ , montrant que le concrétionnement est surtout actif pendant les périodes "interglaciaires" (stades isotopiques 1 et 5) et dans une moindre mesure pendant les interstades (stade isotopique 3). On notera l'absence de datations pendant le stade isotopique 2 qui correspond au maximum du froid de la dernière glaciation.

**B.** Détail de la distribution des âges  $^{14}\text{C}$  (82 datations) entre 20 ka B.P. et la période actuelle. La reprise du concrétionnement se marque très bien vers 10 ka B.P. (début de l'Holocène). Les âges  $^{14}\text{C}$  ont été corrigés pour une activité  $^{14}\text{C}$  initiale de 85% du carbone moderne.

**Rem.:** La construction des histogrammes intègre les erreurs associées à chaque datation. Les âges "interpolés" ont été ajoutés aux datations en tenant compte des vitesses verticales de croissance des concrétions et des arrêts éventuels dans le concrétionnement.

Figure et légende: M. GEWELT, 1987.

Ces méthodes ont, ensemble, contribué à montrer que le concrétionnement semble avoir été très abondant depuis l'Holocène (à peu près depuis 10000 ans B.P.), abondant aussi durant le dernier interglaciaire, et beaucoup plus restreint durant les périodes froides (voir fig. 23).

#### b) En surface:

Il n'y a guère que dans les régions chaudes que les concrétions que nous venons de décrire se présentent parfois en surface, du fait que les facteurs favorables énumérés ci-dessus se présentent aussi à l'air libre. Dans des régions moins chaudes, des concrétionnements abondants peuvent se produire aussi en surface à l'émergence d'eaux thermales. Dans celles-ci, les teneurs très élevées en dioxyde de carbone et en bicarbonate de calcium mettent les solutions en déséquilibre lorsqu'elles arrivent à l'air; la haute température de l'eau, favorisant à la fois son évaporation et la vitesse des réactions, provoque la naissance de *travertins* puissants, parfois en forme de *gours* (petits bassins de calcite fermés par un barrage de même matière et renfermant une petite nappe d'eau), comme à Pamukkale (Turquie).

Plus souvent, le concrétionnement est poreux et s'opère surtout sur des débris végétaux; le travertin prend lorsqu'il est poreux et friable le nom de *tuf calcaire* (onomatopée).

Mais il existe des dépôts calcaires superficiels karstiques bien plus étendus: les *croûtes calcaires* ("calcretes" des auteurs anglo-saxons). Les croûtes calcaires s'observent fréquemment sur de très grandes surfaces au pied de massifs calcaires, dans les régions de climat méditerranéen surtout. Elles surmontent parfois des *encroûtements* plus ou moins diffus dans le sol, ou parfois noduleux; ces encroûtements calcaires sont des phénomènes pédologiques, mais deux types de croûtes au moins sont à proprement parler des dépôts d'eau courante; le premier type est la *croûte massive caollouteuse*: il s'agit d'une masse de calcaire enrobant des cailloux roulés épars en son sein; sa formation est contemporaine du dépôt des cailloux et s'est donc faite en des endroits où circulait, au moins épisodiquement, de l'eau; le second type est la *croûte lamellaire* qui, fréquemment, recouvre et scelle le type précédent. On n'y trouve plus de cailloux mais la stratification est parfois entrecroisée et l'examen microscopique révèle de rares lentilles comportant des grains de sable siliceux; on est là devant un phénomène de ruissellement postérieur à l'apport des cailloux roulés et du calcaire massif.

Ces deux types de croûtes sont en général, dans les régions méditerranéennes, des formations anciennes qui ne sont plus en voie d'édification; il faut très probablement chercher leur origine sous un paléo-climat différent de l'actuel.

Certains auteurs ont voulu voir jadis -et naguère- dans les croûtes calcaires la conséquence de la remontée par capillarité de l'eau des réserves aquifères souterraines; l'évaporation de cette eau aurait provoqué la précipitation du calcaire. Dans tous les cas que nous avons observés, le caractère sédimentaire ne peut faire de doute. La formation de croûtes calcaires "per ascensum" ne nous paraît pas impossible, mais nous ne l'avons jamais observée -même aux endroits où elle était postulée par un

autre auteur. L'origine sédimentaire est certes la plus fréquente; l'étude de terrain et de laboratoire le confirme souvent aisément.

## 2. Dépôts détritiques:

Dans les grottes comme en surface, le karst est riche aussi en sédiments qui ont été transportés à l'état solide: argile, silt, sable, cailloux et blocs répondent aux mêmes lois que dans les régions non karstiques. Il ne faut pas perdre de vue cependant que leur accumulation peut influencer fortement le déroulement des processus karstiques.

Les dépôts détritiques autochtones comportent essentiellement les résidus de dissolution abandonnés sur place lors du creusement, et les matériaux écroulés du plafond et des parois.

Les remplissages allochtones sont surtout l'oeuvre des rivières souterraines qui transportent, grâce à la vitesse de leur courant, des matériaux parfois grossiers, souvent abrasifs. Enfin, il arrive que l'accumulation de sédiments crée un bouchon que l'eau ne peut plus franchir, du fait que les galeries, contrairement aux rivières épiquées, ont un plafond: l'alluvionnement conduit alors à l'obstruction et à la fossilisation du conduit où les dépôts s'accumulent.

## 3. Dépôts organiques:

Les vases organiques et les accumulations végétales sont fréquentes dans les ponors et les grottes. Des accumulations d'origine organique animale, peut-être moins fréquentes en général, peuvent prendre une grande importance (scientifique ou économique): gisements d'iguanodons à Bernissart (Belgique), gisements de mammifères du Quercy (France), très riches en phosphorite, gisements de guano de chauves-souris à Carlsbad Caverns (Nouveau-Mexique)...

## 4. Dépôts résiduels d'altération:

En surface, sur le calcaire ou dans ses fissures et ses creux peuvent s'accumuler des résidus de l'altération du calcaire lui-même ou de roches surincombantes. Nous n'en prendrons que deux exemples.

### a) La terra rossa:

La *terra rossa* est, par définition, pour G. Manil (Cours de pédologie, inédit), un sol rouge sur calcaire, et presque toujours une formation ancienne. Pour Duchaufour (1965), c'est une "argile de décalcification", provenant de la décarbonatation de calcaires durs. La décarbonatation est due à la dissolution du calcaire, qui est ensuite entraîné, dissous, par lessivage, et la rubéfaction est due à la déshydratation des sels de fer. La formation de la terra rossa exige donc un climat où alternent une saison

très humide (décarbonatation et lessivage) et une saison très chaude et très sèche (déshydratation des sels de fer).

Remplissant les trous et fissures du calcaire, la terra rossa est un sol généralement discontinu, laissant à nu de larges surfaces de roche; en profondeur, elle passe parfois (vers 2 ou 3 m) à une argile ocre, humide, à concrétions calcaires: la constance de l'humidité empêche là la déshydratation et la rubéfaction; les carbonates lessivés reprécipitent.

Dans un profil complet et typique, l'horizon A est humifère, grumeleux, brun; l'horizon B est rouge, plastique à l'état humide, polyédrique ou prismatique à l'état sec.

La micro-structure montre le fer sous deux états différents, en proportions variables: d'une part un gel ferrisilicique ocre, plus ou moins mobile; d'autre part, des oxydes ferriques précipités, en taches localisées ou même en concrétions.

L'analyse minéralogique des argiles montre, suivant l'âge et le milieu, la prédominance de divers types d'argile:

- la *kaolinite* dans les *terra rossa* les plus anciennes, ayant subi plusieurs rubéfections, et très appauvries en silice (pour rappel, la kaolinite est la famille argileuse la plus pauvre en silice:  $2 \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ );
- l'*illite* dans les formations moins anciennes, ayant encore leur gel ferrisilicique;
- la *montmorillonite* en milieu mal drainé.

Le fer provient parfois, d'après Rousset (1970), d'une roche autre que le calcaire, par exemple du démantèlement de marnes glauconifères (on retrouve des grains de glauconie); la glauconie a alors subi une altération oxydante après son arrivée en milieu karstique.

Beaucoup de terra rossa sont tertiaires; pourtant certains climats rubéfiants se sont encore produits au Quaternaire, jusqu'à la dernière période pluviale Würm en Afrique du Nord, mais faiblement. Les terra rossa sont donc des héritages d'une ancienne altération du calcaire (et parfois d'autres roches en plus contenant du fer).

## b) Les bauxites:

La *bauxite* est un oxyde d'aluminium hydraté ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Son nom vient d'une localité: les Baux de Provence. La bauxite ne provient pas du calcaire mais celui-ci, on va le voir, favorise sa précipitation, son accumulation et sa préservation.

La bauxite, qui représente un état extrême de destruction des silicates, peut provenir de roches diverses mais riches en alumine.

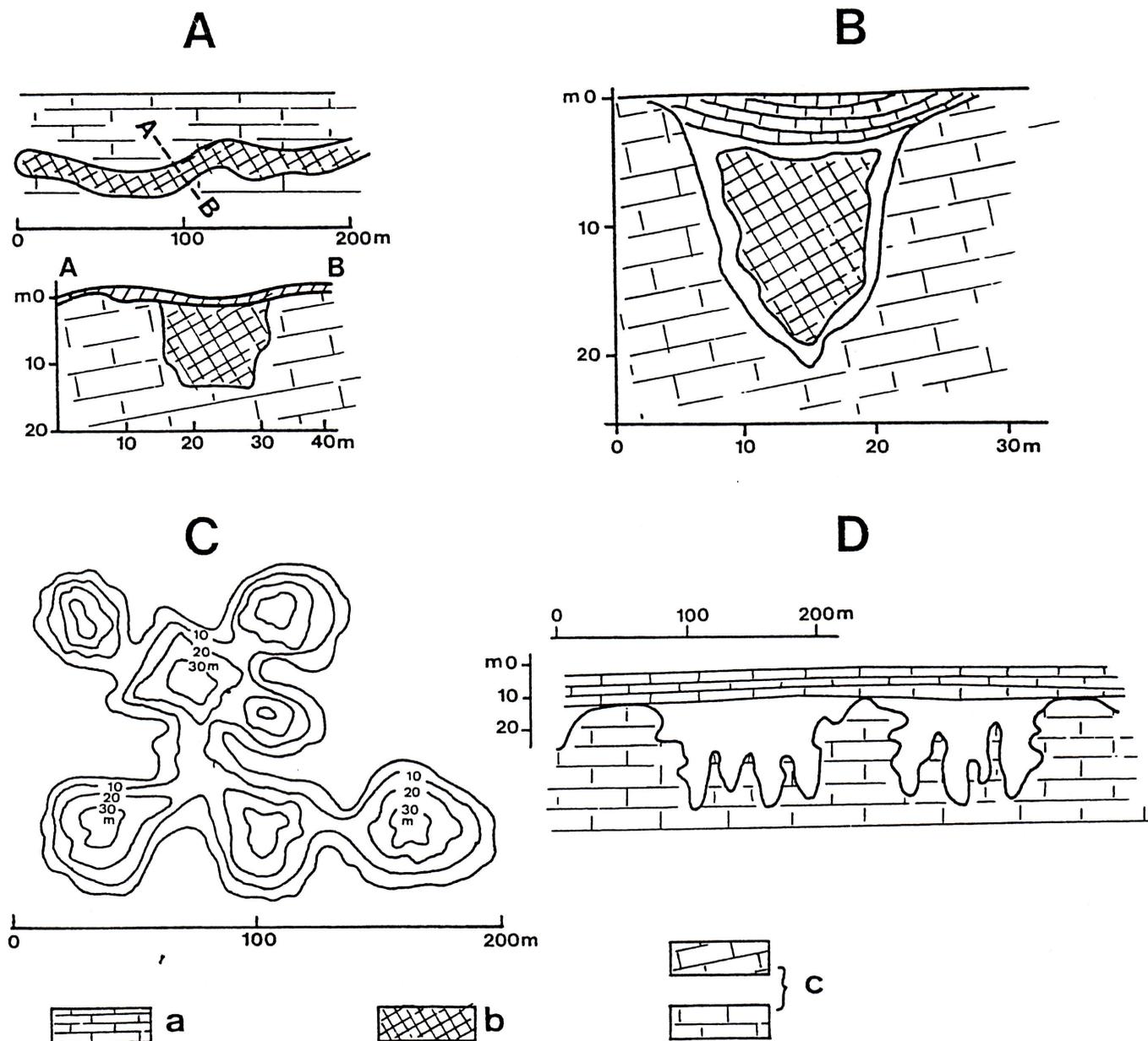


FIGURE 24. Quatre exemples de gisements karstiques de bauxite (d'après Bárdossy, 1982, partiellement modifié)

- A. Dépôt de bauxite dans une dépression en forme de canyon (Blizanci, près de Mostar, Yougoslavie).
- B. Dépôt de bauxite dans une doline conique (Visnjan, Istrie, Yougoslavie).
- C. Complexe de dolines (ouvala) contenant de la bauxite (Tavernes, Haut-Var, France).
- D. Dépôt de bauxite dans un complexe de dolines et pinnacles (Monts Kiona, Grèce).

a: calcaire de couverture b: bauxite c: calcaire encaissant.

A la Jamaïque, par exemple, une roche éruptive andésitique recouvre un substratum calcaire à relief karstique. Sous le niveau de la nappe aquifère, la roche andésitique a subi une kaolinisation. En milieu bien drainé, et nettement au-dessus de la nappe, la roche est bauxitisée. Là, où il n'y a pas de substratum calcaire, le drainage est insuffisant et il n'y a pas de bauxite.

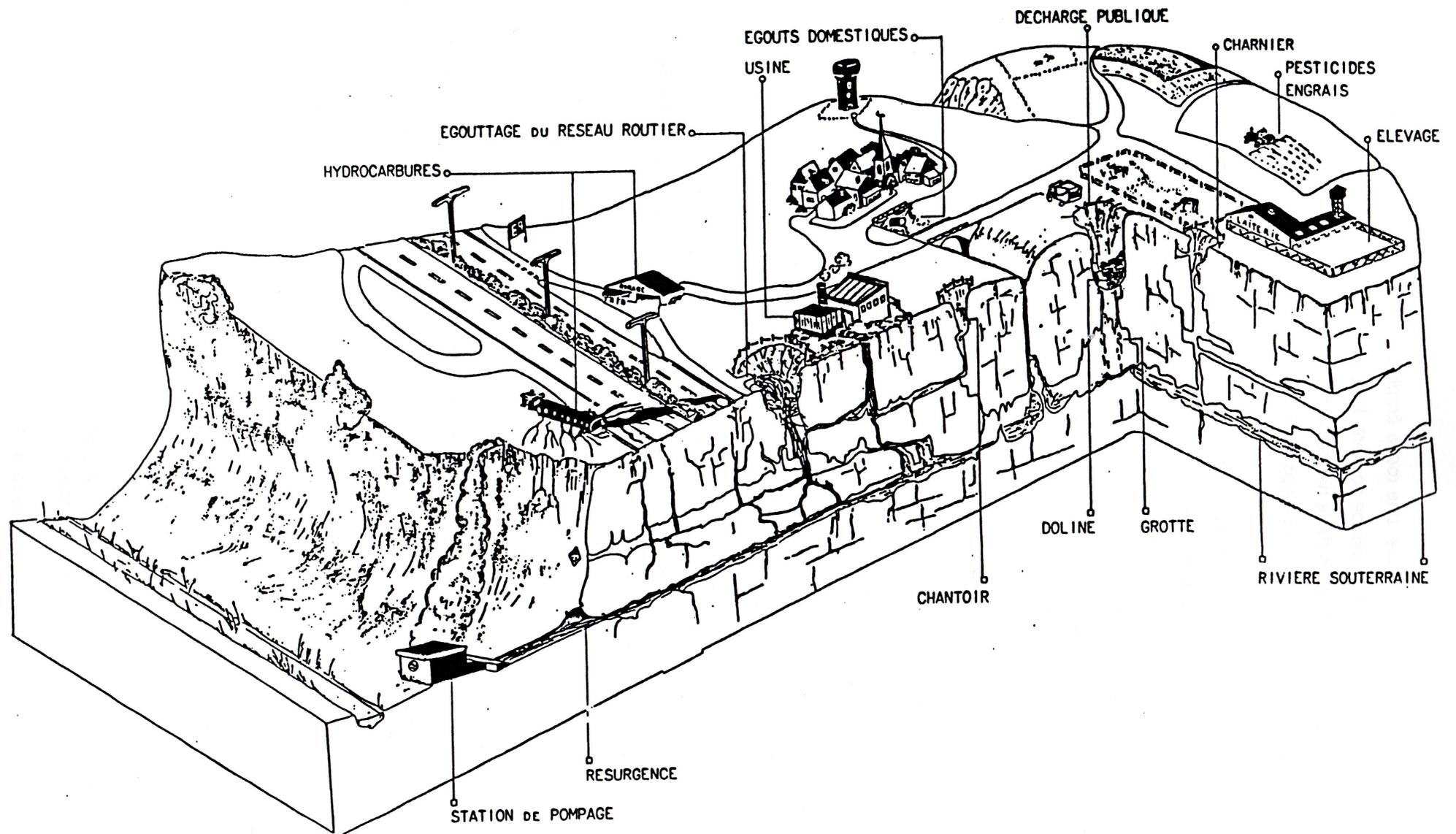
En France, aux Baux de Provence, des marnes crétacées ont été érodées et fortement altérées, puis une partie des produits d'altération est arrivée sur calcaire, dans les zones déprimées mais néanmoins bien drainées d'un karst et l'évolution s'est poursuivie. L'alumine est, on le sait, amphotère et soluble en milieu nettement acide comme en milieu nettement basique. Mais elle est insoluble en milieu à peu près neutre; or, la dissolution du calcaire tamponne généralement le pH de l'eau vers 7 ou 8. A ces pH, l'alumine précipite. Elle s'est conservée dans un milieu lessivé mais bien drainé.

En résumé:

- la bauxite ne provient pas de roches karstiques, mais
- les dépressions karstiques sont un piège très favorable à la collecte du matériel parental;
- elles fournissent un milieu très bien drainé, avec une surface piézométrique basse;
- le pH très légèrement alcalin des eaux karstiques est favorable à la précipitation de l'alumine;
- les dépressions protègent la bauxite de l'érosion ultérieure (voir fig. 24).

Les gisements ne sont plus actuellement en voie d'enrichissement: les bauxites se sont formées surtout au Crétacé et au début du Tertiaire, apparemment sous un climat très chaud, probablement plus chaud encore que celui qui a vu se former les terra rossa.

Certains chercheurs assimilent la bauxite à un sol. Ceci n'est que partiellement correct. Le sol est, en épaisseur, limité à la profondeur à laquelle s'exerce l'action des plantes. La bauxitisation implique une pédogénèse de climat chaud: la ferralitisation. Mais, dans le karst, elle implique aussi un remaniement et la mise en place secondaire dans les dépressions karstiques (fig. 24). Ceci est un processus sédimentaire (Bárdossy, 1982).



**FIGURE 25. La pollution des eaux d'un massif calcaire.**

*Dans le massif calcaire, les nombreuses substances polluantes déversées en surface sont entraînées par les eaux directement vers la nappe souterraine. Les conduits occasionnent un écoulement rapide qui ne permet pas l'épuration naturelle. L'eau pompée dans le massif n'est donc que le résultat de la dilution des divers polluants; (dessin C.N.P.S.S. d'après une idée de la F.F.S.).*

## CONCLUSIONS.

L'originalité du karst réside fondamentalement dans la part que prend la dissolution de la roche dans la genèse de ce milieu, par ailleurs soumis aux mêmes agents physiques que les autres milieux.

Dans le karst, l'étude morphologique et hydrologique de la surface est indissociable de celle du monde souterrain sous-jacent.

Le milieu karstique est édaphiquement sec, mais il est en général perché sur les réserves d'eau les plus importantes, et, surtout, susceptibles de fournir les plus gros débits captés.

La grande rapidité de parcours des eaux souterraines du karst est à l'origine de l'intensité de l'exploitation de ses ressources en eau. Elle est aussi une source de problèmes importants résultant de la vulnérabilité des aquifères karstiques à la surexploitation et à la pollution.

Des facteurs naturels (variations de niveau des aquifères, engorgement des ponors, instabilité des voûtes des grottes...) et anthropiques (pompages excessifs, pollution, ouvrages d'art intempestifs...) peuvent provoquer dans le karst des risques divers: effondrements, tassements, inondations, perturbation de l'éco-système, pollution ...

A côté des études fondamentales devraient donc se développer des recherches tournées vers la création de solutions originales aux problèmes humains, pratiques, liés au karst. Le milieu karstique est le lieu de tant d'interactions que s'y impose, de façon très typique, une *approche systémique*, seule capable de mener à un *projet global*.

1998

## ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE.

## I. OUVRAGES GENERAUX

## Une sélection.

- BÖGLI A., 1978. *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Berlin (Springer - Verlag), 292 p. Bel ouvrage de synthèse sur l'hydrologie karstique dans ses rapports avec le climat et la météorologie des grottes et avec les formes d'érosion et d'accumulation dans celles-ci. Riche illustration : 160 figures et des photographies.
- BÖGLI A., 1980. *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Berlin, (Springer - Verlag), 284 p. Adaptation en anglais de l'ouvrage précédent.
- FORD T.D. & CULLINGFORD C.H.D., 1976. *The Science of Speleology*. London, New-York (Academic Press), 593 p. Traité collectif, excellent dans l'ensemble, accessible à tous.
- FORD D. & WILLIAMS P., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. London (Unwin Hyman), 601 p. Brillant et fondamental traité par les deux plus grands karstologues anglophones. Index de plus de 2000 entrées.
- JAKUCS L., 1977. *Morphogenetics of Karst Regions*. Bristol (Hilger), 284 p. Synthèse originale, ayant l'intérêt supplémentaire de rendre compte des travaux d'Europe orientale et de Russie.
- JENNINGS J.N., 1985. *Karst Geomorphology*. Oxford (Blackwell), 293 p. Magnifique synthèse de la géomorphologie karstique, claire, bien illustrée (91 fig., 45 photographies) et comportant un index des matières de 500 entrées.
- MUXART T. & BIROT P., 1977. *L'Altération météorique des Roches*. Paris; Département de Géographie de l'Université de Paris - Sorbonne, 280 p. Très bon manuel, consacrant environ 70 pages aux notions chimiques nécessaires et 70 pages à l'altération des roches salines et carbonatées.
- NICOD J., 1972. *Pays et Paysages du Calcaire*. Paris, P.U.F., coll. Sup., 244 p. La meilleure synthèse en français sur ce sujet; remarquable en particulier par l'attention apportée aux conséquences des phénomènes physiques étudiés sur la géographie humaine.
- SALOMON J.-N. & MAIRE R., 1992. *Karst et Evolutions climatiques*. Bordeaux. (Presses Universitaires de Bordeaux), 520 p. Recueil d'une trentaine de communications, ordonnées par sujets, rédigées par les chefs de file de la karstologie mondiale, surtout francophones; tous les articles en français.
- SWEETING M., 1972. *Karst Landforms*. London (MacMillan), 362 p. Monographie très complète de la géomorphologie des calcaires; 127 figures, 57 photographies.

## II. AUTRES OUVRAGES CITES ET AUTRES OUVRAGES IMPORTANTS :

- BARDOSSY G., 1982. Karst Bauxites. Amsterdam (Elsevier), 441 p.
- BASTIN B., 1984. Le milieu karstique belge envisagé sous l'angle de la géologie du Quaternaire, pp. 78-86 in : D. Cahen et P. Haesaerts (éditeurs) : *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*, Bruxelles (Inst. roy. Sc. nat.), 282 p.
- BECK B.F., (ed.), 1989. *Engineering and Environmental Impacts of Sinkholes and Karst*. Proceedings of the 3rd Conference on Sinkholes, St. Petersburg Beach, Florida, 1989, 384 p.
- BÖGLI A., 1960. Kalklösung und Karrenbildung. *Zeit. für Geomorph.*, Supplementband 2 : 4-21.
- BÖGLI A., 1964. Mischungskorrosion - ein Beitrag zum Verkarstungsproblem. *Erdkunde*, 18 : 83-92.
- BRETZ J.H., 1942. Vadose and phreatic features of limestone caverns. *Journal of Geology*, 50 : 675-811.
- CORBEL J., 1957. *Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe et de quelques régions de comparaison*. Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon. Mémoires et documents, 12 : 542 p.
- CVIJIC J., 1960. *La géographie des terrains calcaires*. Académie serbe des Sciences et des Arts, Monographies, tome 241. Belgrade, 212 p.
- de ROUBAIX E., DERYCKE F., GULINCK M., LEGRAND R. & LOY W., 1979. *Tournaisis 77-78. Effondrements à Kain et évolution récente de la nappe aquifère*. Professional Paper n° 157 du Service géologique de Belgique, 157 : 47 p.
- EK C., 1976. Les phénomènes karstiques, pp. 137-157, in : *Géomorphologie de la Belgique. Hommage au Professeur P. Macar*. Ouvrage coordonné par A. Pissart, Liège, 224 p.
- EK C., DELECOUR F. & WEISSEN F., 1968. Teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de quelques grottes belges. Technique employée et premiers résultats. *Ann. de Spéléol.*, 23 : 243-257.
- EK C. & GRIMBERIEUX J. (éditeurs), 1979. Comptes rendus du Colloque franco-belge de Karstologie appliquée. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 102 : 1-180.
- EK C. & GRIMBERIEUX J. (éditeurs), 1985. Comptes rendus du Colloque international de Karstologie appliquée. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 108 : 1-306.
- EK C. & PFEFFER K.-H. (éditeurs), 1984. *Le Karst belge. Karstphänomene in Nordrhein-Westfalen*. Kölner geographische Arbeiten, 45 : 584 p.
- GEZE B., 1973. Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie. *Ann. de Spéléol.*, 28 : 1-20.

- HILL C. & FORTI P., 1986. *Cave Minerals of the World*, U.S.A. (National Speleological Society), 238 p.
- MATHIEU L., THOREZ J. & EK C., 1975. Contribution à l'étude des encroûtements calcaires dans le cadre de la morphogenèse et de la pédogenèse. *Colloque sur les types de croûtes calcaires*, Strasbourg, 114-120.
- NICOD J., 1979. Sur le rôle de la tectonique et des variations des circulations karstiques dans l'évolution des poljés. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 102 : 87-93.
- RENAULT P., 1970. *La formation des cavernes*. Collection Que sais-je, Paris (P.U.F.), 127 p.
- ROQUES H., 1964. Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique - eau - carbonate. *Ann. de Spéléol.*, 19 : 258-484.
- ROQUES H. & EK C., 1973. Etude expérimentale de la dissolution des calcaires. *Ann. de Spéléol.*, 28 : 549-563.
- ROUSSET C., 1970. Le problème des terra rossa et des bauxites. *Actes de la réunion internat. de Karstologie. Languedoc - Provence 1968*. 117-122.
- STCHOUZKOY-MUXART T., 1971. Contribution à l'étude de la solubilité de la calcite dans l'eau en présence d'anhydride carbonique à 20° C et 30° C. *Bull. Ass. Géogr. français*, 389 : 215-226.
- TROMBE F., 1952. *Traité de Spéléologie*. Paris (Payot), 376 p.
- TRUDGILL S., 1985. *Limestone Geomorphology*. London, New-York (Longman), 196 p.

**III. MEMOIRES DE LICENCE ET THESES DE DOCTORAT  
présentés à l'Université de Liège sur des sujets karstiques  
(ou concernant en partie de tels sujets).**

- ABRASSART B., 1991. *Facteurs structuraux de la géomorphologie karstique dans la vallée de la Meuse entre Andenne et Flémalle* (Mémoire).
- AGUIDI A., 1993. *Les croûtes zonaires de quelques régions d'Espagne (Andalousie, Aragon, Pyrénées)* (Mémoire de maîtrise).
- BAY M., 1968. *Le vallon de Beauregard. Etude géomorphologique d'un synclinal calcaire* (Mémoire).
- BOUVY L., 1981. *Contribution à l'étude géomorphologique de la région de Welkenraedt-La Calamine* (Mémoire).
- BURTON L., 1993. *Cartes des phénomènes karstiques de Wallonie* (Mémoire)
- CLOSE - LECOCQ J. Fr., 1981. *Les transports en suspension de la Meuse à Liège et à Tailfer* (Mémoire).
- CLOSKIN P., 1991. *Variations des paramètres hydrologiques et physico-chimiques de sources se différenciant par la lithologie de leur bassin d'alimentation. Condroz et Condroz ardennais* (Mémoire).
- CORNET Y., 1987. *Les terrasses de l'Ourthe inférieure et quelques problèmes méthodologiques de l'étude des terrasses fluviales*. (Mémoire; traite notamment des raccords entre grottes horizontales et niveaux de terrasses et de la karstification superficielle).
- DALEMANS Th., 1977. *La région de Godinne. Etude de photolithologie et de géomorphologie karstique* (Mémoire).
- DELATTRE Nat., 1983. *Les puits naturels du Tournaisis. Contribution à l'étude de leur genèse* (Mémoire).
- DETHIER P., 1982. *Phénomènes karstiques dans la région verviétoise* (Mémoire).
- DOMANGE C., 1972. *Contribution à l'étude géomorphologique du karst de la Lomme. Ses rapports avec les cycles d'érosion fluviale* (Mémoire).
- DONNAY M., 1975. *La sédimentation actuelle dans une rivière souterraine. Le Rubicon dans la Grotte de Remouchamps* (Mémoire).
- DUPAGNE D., 1977. *Evolution géomorphologique de la vallée du Burnot au cours du Quaternaire. Condroz occidental* (Mémoire).
- EK C., 1969. *Facteurs, processus et morphologie karstiques dans les calcaires paléozoïques de la Belgique* (Thèse de doctorat en sc., 3 vol. + 2 annexes).
- GEWELT M., 1978. *Géomorphologie et paléoclimatologie isotopique dans le vallon des chantoirs* (Mémoire).
- GHISLAIN A., 1981. *Contribution à l'étude géomorphologique des vallées de la Haine (Belgique) et de la Scarpe (France) inférieures* (Mémoire).

- GIROLIMETTO F., 1981. *L'évolution paléogéographique de la Meuse de Dinant au Néogène* (Mémoire).
- KUPPER M., 1972. *Les vitesses d'altération des calcaires. Première partie : l'altération par les agents atmosphériques. Deuxième partie : l'altération par l'eau de rivière* (Mémoire, + 1 annexe).
- KUPPER M. ép. GEROME, 1981. *Les vitesses d'érosion du calcaire. Etude de processus actuels sous différents climats* (Thèse de doctorat en sc.).
- LAMBION J., 1965. *Le vallon des chantoirs. Etude de géomorphologie* (Mémoire).
- LIPS R., 1990. *Les recoupements souterrains de méandre en Belgique. Le cas de la Galerie des Sources à Chaleux et comparaison avec quelques autres grottes* (Mémoire).
- MERENNE B. ép. SCHOUMAKER, 1974. *Aspects de l'influence des touristes sur les microclimats de la Grotte de Remouchamps* (Thèse annexe).
- MEUS Ph., 1993. *Hydrogéologie d'un Aquifère karstique dans les Calcaires carbonifères (Néblon - Anthisnes, Belgique). Apport des traçages en milieu karstique.* Thèse de Doctorat, ULg, 323 p.
- MEYERS L., 1984. *Les terrasses de l'Ourthe inférieure et le vallon karstique de la Chawresse* (Mémoire).
- MICHEL R., 1971. *Le vallon de Sprimont à Chanxhe. Etude géomorphologique d'un synclinal calcaire* (Mémoire).
- MOUSNY V., 1993. *La reconversion des carrières : contraintes et potentialités. Application aux synclinaux de Calcaire Carbonifère de Sprimont et de Comblain* (Mémoire).
- OCULA Th., 1983. *Contribution à l'étude géomorphologique de la Lomme inférieure* (Mémoire).
- OZER A., 1967. *Contribution à l'étude géomorphologique des régions où affleure "Le Poudingue de Malmédy"* (Mémoire).
- PLOUVIER Ph., 1977. *Contribution à l'étude du climat des milieux souterrains; exemple de la Grotte de l'Abîme à Couvin* (Mémoire).
- RENARD V., 1984. *Contribution à l'étude du fonctionnement karstique du vallon de Sprimont à Chanxhe* (Mémoire).
- ROLAND Chr., 1982. *Etude de photo-interprétation : les linéaments* (Mémoire).
- ROSEN E., 1993. *Variations des paramètres physico-chimiques de sources suivant les assises géologiques dans la région de Malmédy* (Mémoire).
- SCHROEDER J., 1968. *Les parois calcaires de la vallée de la Meuse de Waulsort à Marche-les Dames* (Mémoire).
- SOKOLOFF M., 1978. *Aspects de la pollution causée par les dépôts d'ordures ménagères dans les cours d'eau en terrain calcaire* (Mémoire).

- VAN ASTEN, M., 1991. *Structure, paléoenvironnement et hydrologie, facteurs du développement d'un système karstique: le Réseau de Frênes, Province de Namur* (Mémoire).
- VROLIX, M., 1988. *Etude des variations de la charge en suspension de la Meuse entre Hastière et Eysden (NL)* (Mémoire).

et, de 1994 à 1997:

- BRENDEL, R., 1995. *Les Beach-Rocks. Exemples en Ligurie occidentale* (Mémoire).
- COELMONT, C., 1994. *Critères d'implantation de décharges en sites carriers. Etude de cas* (Mémoire).
- GARBACKI, N., 1995. *Contribution à l'étude de la flore et de l'écologie des plantes des grottes de Belgique* (Mémoire).
- HABETS, S., 1997. *Rattachement de la topographie de la grotte de Comblain-au-Pont avec la surface et les phénomènes géomorphologiques corrélatifs* (Mémoire).
- HEINEN, J., 1997. *Apports du Distance-mètre à Laser dans les levers souterrains: application à la grotte de Comblain-au-Pont* (Mémoire).
- HEINESCH, C., 1995. *L'impact du tourisme sur le commerce local à Sougné-Remouchamps. Comparaison avec Aywaille et Comblain-au-Pont* (Mémoire).
- MARTIN, L., 1995. *Géomorphologie structurale et karstique dans la vallée du Hoyoux, de Huy à Pont-de-Bonne* (Mémoire).
- MEERT, D., 1996. *Le vallon de la Chaweresse et la grotte Ste-Anne. Etude sédimentologique* (Mémoire).
- PIRONET, C., 1995. *Régime hydrologique, transports de sédiments et dynamique fluviale de la Magne, rivière du sud-ouest du plateau de Herve* (Mémoire).
- POTVIN, A., 1994. *La Calestienne. Etude de géomorphologie karstique en Entre-Sambre-et-Meuse* (Mémoire).
- ROSEN, E., 1993. *Variation des paramètres physico-chimiques des sources suivant les assises géologiques dans la région de Malmedy* (Mémoire).
- SBAI, A., 1998. *Les karsts du Jura méridional: structure, fonctionnement et évolution. Deux tomes; 1050 p.* (Thèse de Doctorat).
- VAN HOUTT, R., 1997. *La répartition des habitations troglodytiques* (Mémoire).
- WUIDART, S., 1996. *La grotte de la Belle-Roche. Paléoenvironnement et géomorphologie. Vers une stratégie de protection* (Mémoire).

**IV. TRAVAUX PUBLIES PAR LE LABORATOIRE DE  
GEOMORPHOLOGIE ET DE GEOLOGIE DU QUATERNAIRE  
DE L'UNIVERSITE DE LIEGE  
SUR LES PROBLEMES KARSTIQUES.**

Les sigles placés devant chaque référence indiquent le pays concerné par le travail (suivant les abréviations en usage pour les véhicules automobiles).

En outre : (g) : ouvrage (d'intérêt) général.  
(x) : travail expérimental.

- B.** EK C., 1961. Conduits souterrains en relation avec les terrasses fluviales. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **84** : 313-340, 8 fig.
- B.** EK C., 1962. La genèse d'une cavité polycyclique. La grotte Ste Anne à Tilff. *Rass. Speleo. Ital.*, **14** : 224-232, 4 fig.
- MA.** EK C. & MATHIEU L., 1964. La Daïa Chiker (Moyen Atlas, Maroc). Etude géomorphologique. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **87** : B 65-103, 8 fig., 1 pl.
- F.** EK C., 1964. Note sur les eaux de fonte des glaciers de la Haute Maurienne. Leur action sur les carbonates. *Revue belge de Géogr.* **88** : 127-156, 7 fig., 2 ph., 10 tabl.
- B.** EK C., 1964. Les phases successives de l'évolution de certains conduits vadoses. *Troisième Congrès Intern. de Spéléol.*, **2** : 49-52, 1 fig., 1 pl.
- (x)** EK C. & PISSART A., 1965. Dépôt de carbonate de calcium par congélation et teneur en bicarbonate des eaux résiduelles. *C.R. Acad. Sc. Paris*, **260** : 929-932, 2 tabl.
- I.** EK C., 1966. Faible agressivité des eaux de fonte des glaciers : l'exemple de la Marmolada (Dolomites). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **89** : B 178-188, 2 fig.
- B.** EK C., 1966. Une relation entre les grottes à développement horizontal et les terrasses fluviales. *Troisième Congrès Intern. de Spéléol.*, **5** : 83-86.
- B.** EK C., 1968. La teneur en Ca (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> des eaux des grottes belges. *Actes du IVe Congrès Intern. de Spéléol. en Yougoslavie*, **3** : 75-77.
- B. (g)** EK C., DELECOUR F. & WEISSEN F., 1968. Teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de quelques grottes belges. Technique employée et premiers résultats. *Ann. de Spéléol.*, **23** : 243-257.
- B.** SERET G. & LAMBION J., 1968. Erosion et remblaiement quaternaires dans le "Vallon des Chantoirs" (Louveigné-Remouchamps). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **91** : 377-385.
- B.** FOURNEAU R., 1968. Les phénomènes karstiques de la région de Marcinelle-Loverval. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **91** : 387-392.

- B. (g)** DELECOUR F., WEISSEN F. & EK C., 1968. An electrolytic field device for the titration of CO<sub>2</sub> in air. *The Nat. Speleol. Soc. Bull.*, **30** : 131-136.
- PL.** EK C., GILEWSKA S., KASZOWSKI L., KOBYLECKI A., OLEKSYNOWA K. & OLEKSYNOWNA B., 1969. Some analyses of the CO<sub>2</sub> content of the air in five Polish caves. *Zeit. für Geomorph.*, Neue Folge, **13** : 267-286.
- (g)** EK C., 1969. L'effet de la loi de Henry sur la dissolution du CO<sub>2</sub> dans les eaux naturelles. *Problems of karst denudation*, Brno, 53-56.
- B.** COURTOIS H., COURTOIS J., DENOEL R. & EK C., 1969. Les explorations de la grotte de Remouchamps. Notice historique. *Parcs Nationaux*, **24** : 19-29.
- (g)** EK C., 1969. La cartographie géomorphologique des grottes. *VIIIe Congrès INQUA*, Paris, 328.
- (g)** EK C., 1969. Abondance du gaz carbonique dans des fissures de grottes. *5. Intern. Kongress für Speläol. Abhandlungen. Sektion Speläogenese*, **2** : 14/1-14/3.
- B.** EK C., 1970. Carte géologique de la Grotte de Remouchamps (Belgique). Notice explicative. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **93** : 287-292.
- B.** EK C., 1970. Les influences structurales sur la morphologie de la Grotte de Remouchamps (Belgique). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **93** : 293-304.
- B.** EK C., 1970. La grotte de Remouchamps. Compte rendu de l'excursion de la Société Géographique de Liège, le 28 Mai 1969. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **6** : 197-203.
- B.** OZER A., 1971. Les phénomènes karstiques développés dans le Poudingue de Malmédy. *Ann. de Spéléol.*, **26** : 407-422.
- B.** FOURNEAU R., 1972. La Basse-Marlagne calcaire. Etude géomorphologique. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **8** : 23-67.
- (g)** EK C. & ROQUES H., 1972. Dissolution expérimentale de calcaires dans une solution de gaz carbonique. Note préliminaire. *Transactions of the Cave Research Group of Great Britain*, **14** : 67-82.
- B.** EK C., 1972. (direction de rédaction), *La Grotte de Remouchamps*. (livret-guide à l'usage des visiteurs). Articles de COURTOIS H., DELHEZ F., DENOEL R., DEWEZ M. & EK C., 64 p.
- (g)** EK C., 1973. La dissolution du carbonate de calcium. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **9** : 55-87.
- E.** EK C., 1973. Les phénomènes karstiques du bassin du Rio Aragon Subordan (Pyrénées). *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **9** : 117-122.

- (x) ROQUES H., & EK C., 1973. Etude expérimentale de la dissolution des calcaires par une eau chargée en CO<sub>2</sub>. *Ann. de Spéléo.*, **28** : 549-563.
- B. EK C., 1973. Analyse d'eaux des calcaires paléozoïques de la Belgique. Service Géologique de Belgique, *Professional Papers*, **18** : 33 p., 58 tableaux.
- B. EK C., 1974. (avec la collaboration de ALEXANDRE-PYRE S. & JUVIGNE E.), Nouvelles recherches à la Grotte de Remouchamps. Le cadre géologique et géomorphologique. Etude sédimentologique dans la grotte de Remouchamps. *Bull. Soc. Roy. belge Anthropol. préhist.*, **85** : 7-41.
- B. KUPPER M. & PISSART A., 1974. Vitesse d'érosion en Belgique de calcaires d'âge primaire exposés à l'air libre ou soumis à l'action de l'eau courante. *Abhand. der Akad. der Wissensch. in Göttingen. Mathem.-Phys. Klasse, III*, **29** : 241-248.
- B. KUPPER M., 1975. Recherches en Haute-Belgique sur les vitesses de dissolution des calcaires soumis à l'action de l'eau de rivière. *Ann. de Spéléo.*, **30** : 255-265.
- B. MERENNE-SCHOUMAKER B., 1975. Aspects de l'influence des touristes sur les microclimats de la grotte de Remouchamps. *Ann. de Spéléo.*, **30** : 273-285.
- B. KUPPER M., 1975. Recherches dans la région liégeoise (Belgique) sur l'altération des pierres calcaires exposées à l'air libre. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **98** : 165-176.
- (g) KUPPER M., 1975. Méthodes de mesure de l'érosion des calcaires in : Karst processes and relevant landforms. *Int. Speleol. Union. Com. of karst Denudation*, 127-135.
- MA. MATHIEU L., THOREZ J. & EK C., 1975. Contribution à l'étude des encroûtements calcaires dans le cadre de la morphogenèse et de la pédogenèse en climat méditerranéen semi-aride. *Colloque sur les types de croûtes calcaires et leur répartition régionale*. Strasbourg, 114-120.
- B. EK C., 1976. Les phénomènes karstiques, pp. 137-157, in : *Géomorphologie de la Belgique. Hommage au Professeur P. MACAR* (ouvrage coordonné par A. Pissart), Liège, 224 p.
- MA. MATHIEU L., LACROIX D., EK C. & THOREZ J., 1977. North-African calcretes : soil horizon or sediment ? *Xe Congrès intern. INQUA, Birmingham, INQUA Congress Volume of Abstracts*, 291.
- MA. MATHIEU L., THOREZ J. & EK C., 1977. Place et signification des croûtes et encroûtements calcaires dans les profils des sols d'Afrique du Nord-Ouest. *Comptes rendus du Séminaire de Pédologie d'Alger-El-Harrach*.
- B. MICHEL R., 1978. Etude cryoclastique d'une paroi calcaire à Sprimont (Belgique). *Bull. Soc. belge d'Et. géogr.*, **47** : 191-200.

- CDN.** EK C., 1978. Dissolution et précipitation des carbonates en relation avec le gel, principalement au Québec : essai de mise au point. *Géogr. phys. et Quat.*, **32** (3) : 273-279.
- B.** EK C., 1979. Colloque franco-belge de karstologie appliquée. Liège, 24-28 mai 1979. Introduction. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 3-8.
- B.** EK C., 1979. Colloque franco-belge de karstologie appliquée. Liège, 24-28 mai 1979. Compte-rendu de la réunion. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 9-12.
- B.** EK C., 1979. Colloque franco-belge de karstologie appliquée. Liège, 24-28 mai 1979. Compte-rendu des excursions. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 155-180.
- B.** EK C., 1979. Les phénomènes karstiques dans les roches paléozoïques de la Belgique. Processus actuels, problèmes actuels. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 13-26.
- B.** EK C., 1979. Variations saisonnières des teneurs en CO<sub>2</sub> d'une grotte belge : le trou Joney à Comblain-au-Pont. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 71-75.
- B.** KUPPER M., 1979. Mesure de l'ablation du calcaire dans une rivière belge. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 69-70.
- B.** SOKOLOFF M., 1979. L'influence des dépôts d'immondices sur la qualité des cours d'eau souterrains. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 137-140.
- B.** OZER A., 1979. Les phénomènes karstiques dans le Poudingue de Malmédy. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 141-144.
- B.** GEWELT M., 1979. Influence de l'autoroute E9 sur l'hydrologie du vallon des chantoirs (Belgique). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 151-153.
- CDN.** MOREL R., KUPPER M. & EK C., 1979. Vitesse de dissolution du calcaire sous l'effet de la fonte de la neige : expérience en milieu naturel. *Spéléo-Québec*, **5-6** : 12-25.
- B.** QUINIF Y., DUPUIS C., BASTIN B. & JUVIGNE E., 1979. Etude d'une coupe dans les sédiments quaternaires de la Grotte de la Vilaine Source (Arbre, Belgique). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102** : 229-241.
- CDN.** EK C., 1980. Le gaz carbonique de l'air des grottes québécoises. *Ass. canad. des Géogr. Réunion annuelle. Résumés des communications*, 10.
- CDN.** EK C., CARON D. & ROBERGE J., 1981. La forte teneur en gaz carbonique de l'air d'une cavité du Québec : la grotte de Saint-Léonard, île de Montréal. *Le naturaliste canadien*, **108** : 57-63.
- CDN.** EK C., 1981. Morphogenesis and sedimentology in a Quebec Cave : the "Spéos de la Fée" (Matapédia). *8th Int. Congress of Speleol. Proceedings*, **1** : 104-105.

- CDN. EK C.**, 1981. Mesures du CO<sub>2</sub> dans l'air des grottes : comparaison Belgique-Québec. *8th Int. Congress of Speleol. Proceedings*, **2** : 672-673.
- B. GEWELT M.**, 1981. Les variations isotopiques du carbone et de l'oxygène dans une stalagmite de la grotte de Remouchamps (Belgique). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **104** : 269-279.
- MA. EK C., MATHIEU L. & LACROIX D.**, 1981. Croûtes et encroûtements calcaires en climat méditerranéen. L'exemple du ble Ouljamane (Maroc oriental). *Actes du Colloque de l'A.G.F., "Formations carbonatées externes, tufs et travertins"*. Paris, 9 mai 1981, 61-72.
- CDN. EK C., HILLAIRE - MARCEL C. & TRUDEL B.**, 1981. Sédimentologie et paléoclimatologie isotopique dans une grotte de Gaspésie, Québec. *Géogr. phys. et Quat.*, **35** (3) : 317-328, 6 fig. 1 tableau.
- B. CLOSE-LECOCQ J.F., PISSART A. & KOCH G.**, 1982. Les transports en suspension et en solution de la Meuse à Liège et à Tailfer (amont de Namur). *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **18** : 5-18.
- B. GIROLIMETTO Fr.**, 1982. L'origine des dépôts cénozoïques "Om" et "On" à l'ouest de la Meuse de Dinant. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **18** : 49-57.
- (g) MICHEL-DEWEZ N. & EK C.**, 1982. Méthode rapide de caractérisation des dolomies et calcaires magnésiens : la gaz-volumétrie. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **18** : 41-48.
- B. EK C. & POTY E.**, 1982. Esquisse d'une chronologie des phénomènes karstiques en Belgique. *Revue Belge de Géographie*, **106** (1) : 73-85.
- B. GIROLIMETTO Fr.**, 1982. Aspects de la sédimentaologie des sables tertiaires à l'ouest de la Meuse de Dinant. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **105** : 249-257.
- B. EK C.**, 1983. L'eau dans le vallon des chantoirs. *Hydrographica*, **1-2** : 7-14.
- I. GEWELT M. & EK C.**, 1983. Le CO<sub>2</sub> de l'air d'une grotte des Alpes ligures : La Caverna delle Fate. Premières mesures. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **19** : 107-117.
- I. GEWELT M. & FIERRO G.**, 1984. Le beach-rock de Capo Napoli (Finale Ligure, Italie) : Datations <sup>14</sup>C et variations diurnes du pH dans des cuvettes. *Travaux de la Maison de l'Orient "Le BEACH-ROCK"*, Colloque tenu à Lyon les 28 et 29 nov. 83, GIS, **8** : 55-66.
- I. OZER A., TUCCI S. & ULZEGA A.**, 1984. Les beach-rocks de Sardaigne. Distribution et implications paléogéographiques. *Travaux de la Maison de l'Orient "LE BEACH-ROCK"*, Colloque tenu à Lyon les 28 et 29 nov. 83, GIS, **8** : 113-124.
- B. GEWELT M., GASCOYNE M., QUINIF Y. & CANTILLANA R.**, 1984. Les datations radiométriques. *Kölner Geogr. Arb.*, **45** : 95-104.

- B. EK C., 1984. Les formations karstifiables. *Kölner Geogr. Arb.*, **45** : 13-20.
- B. EK C., 1984. Phénomènes et processus karstiques. *Kölner Geogr. Arb.*, **45** : 21-30.
- B. EK C., 1984. Phénomènes karstiques cénozoïques et actuels. *Kölner Geogr. Arb.*, **45** : 79-86.
- B. EK C., 1984. Géochimie des eaux du karst. *Kölner Geogr. Arb.*, **45** : 135-141.
- (g) KOCH G. & GEWELT M., 1984. Les méthodes radioactives de datation. *Le Temps. Des milliards d'années au milliardième de seconde.* **13.1** : 214-225.
- (g) GEROME-KUPPER M., 1984. L'érosion des calcaires à l'air libre : mesure de processus actuels. *Zeit. für Geomorph.*, suppl. **Bd. 49** : 59-74.
- B. EK C., 1984. Karst in Belgium, in J. Denis, ed. *Geography in Belgium*, *Bull. Soc. belge Et. géogr.*, **53** (2).
- B. BASTIN B. & GEWELT M., 1984. L'évolution des forêts holocènes en région calcaire reconstituée par l'analyse pollinique de stalagmites, étayée par 16 datations  $^{14}\text{C}$ . In *Groupes de Contacts FNRS (Physique, Chimie, Géophysique et Sciences de la Terre)*, F.N.R.S., Bruxelles, 1984, 208-210.
- (g) EK C. & GEWELT M., 1984. Age des phénomènes karstiques et datation des concrétions des cavernes. In *Groupes de Contacts FNRS (Physique, Chimie, Géophysique et Sciences de la Terre)*, F.N.R.S., Bruxelles, 1984, 87-96.
- (g) EK C. & GEWELT M., 1985. Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth surface processes and landforms*, **10** : 173-187.
- B. GEWELT M., 1985. Cinétique du concrétionnement dans quelques grottes belges. Apport des datations  $^{14}\text{C}$  et  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **t. 108** : 267-273.
- (g) EK C., 1985. De la connaissance du milieu karstique à sa gestion. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **108** : 303-304.
- (g) KUPPER M., 1985. Les vitesses d'érosion du calcaire dans l'eau : étude des phénomènes actuels. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **108** : 261-265.
- B. DELATTRE N., 1985. Les puits naturels du Tournaisis. Etude de leur localisation et contribution à l'étude de leur genèse. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **108** : 117-123.
- B. CLOSE-LECOCQ J.F. & EK C., 1985. Quantités de matières transportées en solution et en suspension par l'affluent majeur des karsts belges : la Meuse. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **108** : 275-280.

- (g) BRIFFOZ A., EK C. & GEWELT M., 1985. Karstification souterraine en milieu saturé. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **108** : 251-254.
- (g) BRIFFOZ A., 1985. Des influences possibles de la Thermodynamique sur la forme et le trajet des conduits karstiques originels. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **108** : 255-259.
- (g) HURTGEN C., GEWELT M. & HOFKENS K., 1985. A new radiochemical Procedure for U-series Dating of Speleothems. *Karlsruhe Int. Conf. on Analytical Chemistry in Nuclear Technology*, June 3-6, 1985. Abstract + 8 p.
- B. EK C., GEWELT M., GODISSART G. & GRIMBERIEUX J., 1985. Phénomènes karstiques en Belgique. C.R. des excursions du C.I.K.A., Liège, Belgique, 31 mai - 3 juin 1984. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, **21** : 25-39.
- B. GEWELT M., 1986. Datations  $^{14}\text{C}$  et  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  du concrétionnement stalagmitique de grottes belges. *9e Congreso Internacional de Espeleologia*, Barcelona, 1986, **1**, résumé : 300-301.
- B. GEWELT M. & JUVIGNE E., 1986. Découverte de cendres volcaniques dans des concrétions stalagmitiques datées par  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . Une nouvelle perspective pour la téphrostratigraphie. *9e Congreso Internacional de Espeleologia*, Barcelona, 1986, **2** : 70-71.
- B. GEWELT M., 1986. Datation  $^{14}\text{C}$  de concrétions de grottes belges : vitesses de croissance durant l'Holocène et implications paléoclimatiques. *New Directions in Karst. Proceedings of the Anglo-French Karst Symposium (1983)*. K. PATERSON & M.M. SWEETING ed. *Geo Books*, Norwich, 293-322.
- B. GEWELT M. & EK C., 1986. L'évolution saisonnière de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'air de deux grottes belges : Ste Anne et Brialmont, Tilff. *New Directions in Karst. proceedings of the Anglo-French Karst Symposium (1983)*. K. PATERSON & M.M. SWEETING ed. *Geo Books*, Norwich, 49-76.
- B. BASTIN B., CORDY J.M. GEWELT, M. & OTTE M., 1986. Fluctuations climatique enregistrées depuis 125.000 ans dans les couches de remplissage de la grotte Scladina (Province de Namur, Belgique). *Bull. Assoc. franç. Et. Quat.*, **1-2** : 168-177.
- B. WALTHAM A.C., VANDENVEN G. & EK C., 1986. Site investigations on cavernous limestone for the Remouchamps Viaduct, Belgium. *Ground Engineering*, **19** (8) : 16-18.
- H. EK C., GABRIS G., HEVESI A. & LENART L., 1986. Teneur en  $\text{CO}_2$  de l'air de quatre grottes de Hongrie. *Neuvième Congrès Intern. Spéléo.*, Barcelone **1**, 89-93.
- (g) BASTIN B. & GEWELT M., 1986. Analyse pollinique et datation  $^{14}\text{C}$  de concrétions stalagmitiques holocènes : apports complémentaires des deux méthodes. *Géographie physique et Quaternaire*, **40** (2) : 185-196.

- B.** GEWELT M. & JUVIGNE E., 1986. Les "Téphra de Remouchamps", un nouveau marqueur stratigraphique dans le Pléistocène supérieur daté par  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dans des concrétions stalagmitiques. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **109** : 489-497.
- B.** EK C. & GEWELT M., 1986. Composition cationique de trois concrétions colorées de la grotte de Ramioul. *Bull. Chercheurs de Wallonie*, **27** : 37-47.
- (g)** EK C., 1986. Les remplissages des grottes : concrétions et dépôts détritiques. Aperçu synthétique. *Jornadas sobre el Karst en Euskadi, Tomo 2. Comunicaciones*, San Sebastian, 1986 : 77-104.
- (g)** EK C., 1987. Carbon dioxide of the air of shallow caves in mountainous areas. *International Symposium on the Problems of Karst Study in Mountainous Countries, Tbilissi. Abstracts*, 35.
- B.** EK C., GEWELT M. & GOOSSENS R., 1987. La Grotte de Rochefort. Le karst du Thier des Falizes, in : *Livret-guide des excursions, Colloque international de Sédimentologie karstique, Han-sur-Lesse, 18-22 mai 1987* : 5-14.
- B.** EK C. & HUBART J.-M., 1988. *La Grotte de Ramioul et son site. Problèmes d'environnement*. Livret-guide de l'excursion du 4 juin 1988 de la Société géographique de Liège, 13 p.
- B.** PISSART A., VAN VLIET-LANOË B., EK C. & JUVIGNE E., 1988. Traces of Ice in Caves : Evidence of Former Permafrost. *Vth Int. Conference Permafrost - Proceedings* (Edit. Sc. Kaare Senneset), Norwegian Institute of Technology, Trondheim Norway, **1** : 840-845.
- (g)** EK C. & QUINIF Y., 1988. Les sédiments détritiques des grottes : aperçu synthétique. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **111** : 1-7.
- (g)** GEWELT M. & EK C., 1988. Les concrétions carbonatées des grottes. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **111** : 9-19.
- B.** PISSART A., VAN VLIET-LANOË B., EK C. & JUVIGNE E., 1988. Des traces de glace de ségrégation dans la grotte de Remouchamps (Belgique) : Conséquences en ce qui concerne la sédimentation et la paléoclimatologie. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **111** : 125-133.
- (g)** EK C., BRIFFOZ A. & GEWELT M., 1988. L'élargissement des conduits karstiques sous l'action d'eaux saturées. Actes du XVIe Congrès National de Spéléologie (Nancy - Metz, 1985). *Spelunca, Mémoires*, **14** : 100.
- B.** CHEN Z., EK C. & LACROIX D., 1988. Sédimentologie de quelques loess de la grotte Walou à Trooz, Belgique. *Bulletin des Chercheurs de la Wallonie, Société Royale belge d'Etudes géologiques et archéologiques*, **28** : 69-79.

- (g) GEWELT M., 1988. Data of environmental changes in the past, in : *Belgian Research on global Change, IGBP, Proc. Symp. Brussels – Acad. Sciences Belgium*, p. 119-120.
- (g) EK C. , 1988. The significance of CO<sub>2</sub> in the dissolution of limestone, *Bulletin de la Société belge d'Etudes géographiques*, 57 (1) : 110-112.
- RC. GEWELT M., LIU MINGLIN , QUINIF Y., ZHAO SHUSSEN, 1989. Uranium series dating of speleothems from Teng Long Cave (Lichuan, Hubei Province, China), Preliminary results, in : *Proceedings of the 10th international Congress of Speleology*, Budapest, 13-20 August 1989, Vol.. 1 p. 665.
- RC. GEWELT M., MEUS P. , JIN YUZHANG , 1989. Physico-chemical analyses and dye tracing of Teng Long Dong Cave Waters (Lichuan, Hubei Province, China) in : *Proceedings of the 10th International Congress of Speleology*, Budapest, 13-20 August 1989, Vol II, p. 656.
- RC. EK C., GEWELT M. & ZHANG S., 1989. Carbon dioxide content of cave sediments and air in China. *10<sup>ème</sup> Congrès international de Spéléologie*, Budapest. Communications, 1 : 63-64.
- RC. EK C., 1990. Morphology : mapping the Flying Dragon. In *Teng Long Dong*, Belgian-Chinese Karst and Cave Association, 64 p.
- B EK C., 1990. *La Merveilleuse, la Nouvelle Grotte de Dinant*. Livret –guide, Photographies de Joseph Godissart. Topographies de Jean Godissart. Liège (Lesire), 64p.
- ZRE MICHEL R., 1991 a. Le karst tropical humide. Essai de synthèse. L'exemple du Zaïre. In : Petit F. et al (Eds.), *Afrique Centrale : Géomorphologie et Géologie récente. Hommage au Professeur J. Alexandre – Bull. Soc. Géogr., Liège* Vol. 27 : 3-22.
- ZRE MICHEL R., 1991 b . Le massif karstique du mont Hoyo (N.E. Zaïre). In : Petit, F. et al . (Eds), *Afrique Centrale : Géomorphologie et Géographie récente. Hommage au Professeur Alexandre – Bull. Soc. Géogr. , Liège*, Vol. 27 :23-38.
- ZRE MICHEL R., 1991 c. Les grottes du mont Hoyo (N.E. Zaïre). Un paléoenvironnement karstique de plus de 150.000 ans *Geo-Eco-Trop*, 15 (1-2), 59p
- RC MEUS P., GEWELT M. , EK C. & ZHANG SHOUYUE , 1991. Le système de Teng Long, Lichuan, Province de Hubei , Chine, *Spelunca*, 41 : 10-18.
- (g) VAN ASTEN M., 1991. Application de l'informatique à la géomorphologie structurale en grotte, *Bull. SOBEG*, 29 : 79-85.
- B EK C., 1992 . Les calcaires de Wallonie, pp. 19-22 in *Atlas du Karst Wallon : Province de Namur*, de Broyer C. (édit.), Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains, 246 p.

- (g) GRIMBERIEUX J. & EK C. (éditeurs), 1993. Comptes rendus de la Conférence européenne de Spéléologie. Vol. 2 : Spéléologie physique et karstologie. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, **29** : 184 p.
- B VAN ASTEN M., 1993. Géomorphologie structurale et faciès sédimentaire du réseau karstique de Frênes (Belgique), *Bull. S.G.L.*, t. p. 79-85.
- B FOURNEAU R.O., 1993. Carte géomorphologique et géomorphologie de la Wallonie occidentale, *Point sur le I de géographie*, (S.G.L.), Vol 2, 28 p.
- L MAQUIL R., EK C., & FABER A., 1994. Le Muschelkalk supérieur : stratigraphie et hydrologie. *Comptes rendus du Colloque international de Karstologie*, Service géologique du Luxembourg, p. 19-43.
- B EK C., 1995. Grottes et rivières des calcaires pp. 178-193, in : *L'Ardenne, Essai de Géographie physique. Hommage à A. Pissart*, A. Demoulin (édit.), 238 p.
- B GENTY D., BASTIN B., & EK C. 1995. Nouvel exemple d'alternance de lamines annuelles dans une stalagmite. *Spéléochronos*, **6** : 3-8.
- B EK C., 1995. Les roches karstifiables de la Province de Hainaut, p. 23-25, in : *Atlas du Karst Wallon : Province de Hainaut*, Cl. De Broyer C. (édit.), Bruxelles, Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains, 432p.
- B EK C., & MUCSI L., 1995. Redissolved forms on stalagmites in Belgian caves, p 147-153. In *Environmental Effects on Karst Terrains, homage to Laszlo Jakucs*, Ilona Barany-Kevei editor, University of Szeged, 213 p.
- F SBAI A., EK C., DROUIN P., CHIROL B., ARIAGNO J.-C., PELISSON A. & QUINIF Y., 1995. Le remplissage karstique de la Grotte Sous-les-Sangles, Jura méridional (France). *Quaternaire*, **6** : 35-45.
- F SBAI A., EK C. & RENAULT P., 1996. Variation saisonnière du CO<sub>2</sub> de l'air de deux grottes du Jura. Comparaison avec d'autres grottes française. *Annales de la Société géologique de Belgique*, **119** : 135-143.
- B EK C., MICHEL R., MOUSNY V. & CLOSSON D., 1997. The dynamics of the karstic features of Sprimont (Belgium) and its consequences on land on land-use planning. Preliminary Note. *Proceedings of the 12th Congress of Speleology, La Chaux-de-fonds*, **5** : 13-16.
- B EK C. & CLOSSON D., 1997. Le karst en tant que contrainte physique en aménagement du territoire. Exemple de la commune de Sprimont (Belgique). *Proceedings of the 12th Congress of Speleology. La Chaux-de-Fonds*, **1** : 322 (Résumé de la présentation d'un poster).
- F SBAI A., GAIFFE M., EK C., & LHENAFF R., 1997. Intensité de la corrosion dans les sols du Jura méridional (France). *Proceedings of the 12th Congress of Speleology, La Chaux-de-Fonds*, **1** : 297-299.

