

## VIII. Terminologie et classifications

L'ensemble des observations réalisées tant au Niger occidental qu'au Cameroun montre l'existence de nombreuses formes souterraines et de surface développées en roches silicatées non carbonatées et similaires à celles trouvées dans les karsts calcaires. Des processus d'érosion chimique, dissolution congruente, hydrolyse, et des processus d'érosion physique, soutirage, suffosion, ruissellement... sont avancés dans leur développement. Doit-on dès lors parler de karsts pour ces formes ? Suite aux découvertes faites depuis plusieurs décennies dans des lithologies non carbonatées (voir II.), plusieurs auteurs se sont essayés à cette question et ont proposé quelques solutions. Nous les reprendrons ici avec, cependant, une discussion préliminaire sur le terme « karst ». Son acception diffère selon les auteurs consultés et entraîne une difficulté supplémentaire qu'il nous faut essayer de lever.

### VIII.1 Terminologie karstique - Acception des termes

Si au départ le karst désigne un plateau calcaire à cheval sur la Croatie et la Slovénie, actuellement le terme englobe au moins un des quatre concepts suivants : le paysage, les formes, la lithologie ou les processus (GRIMES, 1997).

Pour définir le karst, de nombreux auteurs mettent l'accent sur les morphologies et les processus observés (ou supposés). Jennings (1985) le considère caractérisé "*par des paysages et des morphologies distincts et par un drainage issu d'une plus grande solubilité des roches dans les eaux naturelles que partout ailleurs.*" Choppy (1988) parle de « *roches karstiques si les formes qui y sont observées peuvent être attribuées à la dissolution* ». White (1988) caractérise les reliefs karstiques « *par un paysage parsemé de dépressions fermées de position et de taille différentes, d'un drainage de surface démantelé, de grottes et de systèmes de drainage souterrain* ». Il adopte le point de vue d'un grand nombre d'auteurs d'Europe de l'Est et de l'ex-URSS qui considèrent que tout paysage produit par des processus de dissolution est un karst.

Parker et Higgings (1990) donnent une définition centrée sur les processus : « *le karst est la remobilisation de roches solides et solubles par la dissolution chimique, le pseudokarst est la remobilisation de restes rocheux solides en suspension.* »

Ford et Williams (1989) se basent uniquement sur l'aspect hydrologique et sur les paysages caractéristiques. "*Le karst est un terrain avec une hydrologie distincte et des paysages résultant d'une combinaison de solubilité rocheuse élevée et d'une porosité secondaire bien développée.*"

Certains scientifiques tel que Gèze (1973) s'appuient principalement sur les formes et la lithologie. Ainsi, pour ce dernier, le karst est "*une région constituée par des roches carbonatées... dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques. Par extension, le terme peut être utilisé pour toute région constituée de roches solubles : gypse, sel, etc.,*" et de

préciser que la karstification englobe *"l'ensemble des processus de genèse et d'évolution des formes superficielles et souterraines dans une région karstique ou pseudokarstique."*

Ce point de vue est également partagé par Fénelon *et al.* (1965) qui présentent le karst comme *«toute région formée de roches calcaires où se retrouvent les caractères morphologiques du karst. Un karst peut comprendre en surface des canyons, des vallées sèches, des dolines, des lapiés, des poljés, des ouvalas, des hums et en profondeur des grottes, des cavernes, ..»*

Ek (1987) est un des rares auteurs à inclure à la fois les formes, la lithologie et les processus puisqu'il réserve le nom de karst *"aux roches carbonatées cohérentes (calcaire et dolomie), présentant des formes superficielles et souterraines caractéristiques de la dissolution"* et d'ajouter *"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."*

Généralement plus évasifs, différents dictionnaires des Sciences de la Terre examinent le karst en tant que modelé karstique réduit aux paysages développés dans les calcaires et issu principalement de l'attaque chimique des eaux.

*"Type de relief affectant les pays calcaires, et principalement dû à la dissolution de leurs roches par les eaux météoriques chargées de gaz carbonique."* (FOUCAULT et RAOULT, 1992). *"The topography characteristic of a limestone country, with its underground drainage and effects of surface solution."* (CHALLINOR'S DICTIONARY OF GEOLOGY, 1986)

Gèze envisage déjà des processus de karstification dans des régions pseudokarstiques, ce qui marque peut-être le début de la confusion dans la terminologie face aux découvertes de formes "karstiques" contemporaines dans d'autres lithologies.

Self et Mullan (1996) considèrent le karst *« comme un terme général utilisé pour décrire certains objets physiques dans des environnements de surface et à proximité de la surface; nommément : cours d'eau souterrains (sinking streams), grottes, dépressions fermées, affleurement de lapiés et sources importantes ».*

En 1997, un groupe de contact de l'Union Internationale de Spéléologie (KEMPE et HALLIDAY, 1997) proposa que les définitions s'appuient uniquement sur des paysages et non sur des objets isolés. La définition suivante fut proposée :

*"Les karsts sont des paysages avec une prédominance d'écoulement souterrain, développés à travers le temps par la dissolution et (pour une plus petite part) par une érosion physique. Les sous-classes incluent les karsts carbonatés (ou classiques), les karsts du gypse, les karsts du sel, les karsts des quartzites ou classés par lithologie dominante au cas ou plus d'un des types de roches repris ci-dessus sont présents."*

## VIII.2 Pseudokarst

D'une façon générale, la définition du terme "*pseudokarst*" s'appuie sur la convergence des morphologies avec celles du karst classique, sur la différence des processus ayant conduit à leur façonnement, ou indirectement sur la nature des roches dans laquelle les phénomènes se développent. Le terme aurait été proposé en premier lieu par Von Knebel (1906) pour se référer à l'hydrologie observée dans certains terrains de lave (McGRAW-HILL, 1991).

Pour Halliday (1960) ce terme désigne "*des phénomènes dont l'origine n'est pas la dissolution et qui sont analogues à ceux des zones à morphologie karstique.*" Ce point de vue est partagé également par Jennings (1985) pour qui "*le pseudokarst englobe des morphologies produites par des processus relativement différents de ceux du karst*" et est repris par plusieurs dictionnaires anglophones :

*"Topographie qui ressemble au karst mais qui n'est pas formée par la dissolution des calcaires : habituellement un champ recouvert de lave en surface et dans lequel les plafonds des tubes de lave se sont effondrés."* (BATES et JACKSON, 1987).

*"Topographie qui ressemble au karst mais qui n'a pas été formée par la dissolution de la roche."*(McGRAW-HILL, 1991).

Les auteurs francophones insistent plus sur la nature de la lithologie dans laquelle se développent les formes pseudokarstiques. Ainsi Fénelon *et al.* (1965) considèrent le pseudokarst comme "*des reliefs voisins de ceux du karst, grottes, dolines, avens, galeries dans des roches qui ne sont pas solubles; des cours d'eau souterrains peuvent y couler et des nappes d'eau s'y accumuler grâce à des joints et à des diaclases plus ou moins élargies dans des grès à masses compactes; ou bien la circulation s'effectue par les grottes et les tunnels des coulées de basalte et entre les boules résiduelles des granites et des gneiss. Une partie de ces reliefs provient des conditions mêmes de la formation des roches : tunnels d'éclusement, fente de retrait; il s'y ajoute également des phénomènes d'érosion et de corrosion comme dans les calcaires, mais en général à un degré bien moindre, ces roches ne contenant pas de sel aussi soluble que le carbonate de calcium.*"

Gèze (1973) et Nicod (1985) reprennent d'une façon plus générale cette acception. "*Tout effet analogue à ceux de la karstification dans des roches non ou peu karstifiables*" (GEZE, 1973). "*Région présentant des formes analogues à celles du karst dans des roches non ou peu karstifiables.*" (NICOD, 1985)

Une enquête menée par Quinlan en 1966 (d'après Grimes, 1997) auprès de dix-huit scientifiques nord-américains montre des opinions semblables. La plupart d'entre eux définirent "*pseudokarst*" comme des formes, des paysages karstiques dérivés d'un processus différent (de la dissolution), ou formé dans des roches non solubles - ce qui signifie la même chose.

Seuls quelques karstologues interrogés rejettent le terme. Les uns arguent qu'ils utilisent une définition du karst basée uniquement sur un paysage, et les autres considèrent le processus karstique comme une érosion souterraine par n'importe quel courant.

Self et Mullan (1996) considèrent le pseudokarst comme étant en général seulement un élément occasionnel dans des terrains dominés par d'autres phénomènes. Ils soulignent que contrairement au karst, le pseudokarst ne présente pas de "*suite pseudokarstique*".

En 1997, lors du 12<sup>e</sup> congrès de l'Union Internationale de Spéléologie un groupe de travail se pencha sur le terme *pseudokarst* et son acception (KEMPE et HALLIDAY, 1997). Il proposa notamment les deux points suivants :

“• *Les définitions devraient être basées sur les paysages et non sur des formes isolées.*  
• *Les pseudokarsts sont des paysages avec des morphologies ressemblant au karst et/ou qui doivent avoir une prédominance du drainage de subsurface à travers des conduits de type vide, mais manque l'élément d'une évolution à long terme par dissolution et érosion physique. Les sous-classes incluent les pseudokarst des laves, les pseudokarsts dans la glace (notez que nous n'avons pas considéré la fusion comme un processus de dissolution), le pseudokarst du permafrost, les pseudokarst de talus, les pseudokarsts dans les sédiments non consolidés ou dans les poussières volcaniques. Nous avons soutenu qu'une grotte individuelle n'est pas nécessairement une partie d'un paysage karstique ou pseudokarstique. Les grottes doivent donc être classées par le ou les processus qui les ont formées. Seulement alors peut-on déterminer si une grotte est un dispositif de karst ou de pseudokarst, ou juste une caverne dans un endroit singulier. Par exemple, une caverne de talus peut être juste cela; elle devient seulement un élément d'un pseudokarst si elle cause un drainage étendu à un niveau horizontal à fleur de terre.*”

Cette vue des choses rejoint la définition initiale que donnait Von Knebel en 1906.

### **VIII.3 Principales classifications**

Tout comme les définitions données pour le karst, les essais de classification que l'on peut répertorier dans la littérature reposent en grande partie sur les quatre concepts exposés précédemment (paysage, formes, lithologie, processus) mais également sur d'autres facteurs tel que l'origine des eaux. Ceci entraîne une diversité et donc une complexité encore accrue dans la définition et la description des karsts.

Une des classifications les plus anciennes est celle de Cvijic (1925 et 1927) qui se base sur les formes caractéristiques du karst en roche calcaire, idée déjà proposée par Grund en 1914 (GRUND, 1914). Peut-on imaginer que l'auteur a volontairement limité son acception du karst aux seules

roches carbonatées ? Il semble évident qu'à cette époque la question ne se posait pas encore en ces termes, les observations dans d'autres roches étant pratiquement inexistantes.

D'autres classements s'appuient sur les zones climatiques et sur les morphologies caractéristiques qui leur sont associées : karst périglaciaire, karst tropical, karst méditerranéen, fluviokarst, glaciokarst, pluviokarst... avec des sous-catégories rendant compte des diversités géomorphologiques rencontrées (karst à tourelles, conique...) (LEHMAN, 1956; CORBEL, 1957; MAIRE, 1980)

La classification peut également reposer sur la localisation originelle des phénomènes karstiques par rapport au contexte géologique environnant. Ainsi Katzer (1909) différencie le karst profond du karst superficiel. D'autres auteurs parlent encore de karst couvert, de cryptokarst, de karst vert, .. (par ex. : PENK, 1924; SEGRE, 1948; LLOPIS LLADO, 1979; ROGLIC, 1957; GEZE, 1973; NICOD, 1985).

Certains auteurs vont intégrer un nombre plus important de facteurs dans leur classification comme Gvozdeckij en 1965 ou Quinlan en 1966. Le premier se base principalement sur la couverture biopédologique, le climat et la position altimétrique. Il distingue le karst nu (*bare karst*), couvert par d'autres roches (*(rock)-covered karst*), à couverture pédologique (*soil-covered karst*), enterré (*buried karst*), tropical (*tropical karst* ou *cone karst*) et du permafrost (*permafrost karst*). Le second tient compte du type de couverture, de la lithologie, du climat, de la structure géologique, de la physiographie (géomorphologie ?) et de ses modifications survenues durant ou après la karstification.

Les années 50 (RENAULT, 1953) et 70 (par ex. : BELLARD-PIETRI, 1974; WHITE *et al.*, 1966; URBANI et SZCZERBAN, 1975) marquent la découverte de phénomènes de grande importance et similaires à ceux trouvés dans les karsts "classiques". Une adaptation du vocabulaire employé devint de plus en plus nécessaire. De nouvelles classifications vont être proposées, s'appuyant essentiellement sur les processus physico-chimiques et la lithologie. Ces tentatives voient une grande extension de l'emploi du terme pseudokarst.

En 1978, Cigna propose une classification centrée sur les processus physico-chimiques et le nombre de phases physico-chimiques présentes dans les phénomènes observés. Ainsi, il propose les termes hyperkarst, karst, parakarst, hypokarst et pseudokarst, dont la signification est donnée par le tableau ci-dessus (Tableau 10). Pour l'auteur « *les grottes tectoniques, les cavités issues de bulle de gaz, l'érosion due au vent ou à l'action de l'eau, peuvent être considérées comme des phénomènes pseudokarstiques. On peut supposer que la seule connexion de tels phénomènes avec les phénomènes karstiques est purement morphologique, si les mécanismes de formation et de développement sont complètement différents.* » (Cigna, p.5).

Classes	Equilibre de phase Nbre de composantes	Sous-classes	Exemple(s)
Hyperkarst	>3	---	Environnements hydrothermaux spéciaux
Karst	3 (par ex. : eau, amer, calcaire)	Holokarst	Calcaire pur
		Mérokarst	Dolomie, calcaire marneux
Parakarst	2 (par ex. : gypse et eau)	Lent ( <i>Brady</i> ) rapide ( <i>Tachy</i> )	Quartzite, tuf, gypse, roches salées.
Hypokarst	1	---	Glace, tubes dans les écoulements de laves
Pseudokarst	0**	Syngénétique	
		Epigénétique	Grottes de bulle de gaz dans les laves, grottes tectoniques, d'érosion.

Tableau 10. Classification des phénomènes karstiques d'après Cigna (1978).\* Brady : adjectif grec utilisé par Maximovitch (1975) pour distinguer les phénomènes karstiques à basse solubilité des phénomènes à haute solubilité (Tachy). (\*\*\*) au sens chimique du terme.

Silvestru (1990) propose une classification basée sur la lithologie et sur "l'essence du processus modérateur" à savoir le processus responsable du façonnement du substrat. Il distingue ainsi l'orthokarst, le parakarst et le pseudokarst (Tableau 11).

L'orthokarst représente "les formes de relief de surface ou de sub-surface qui se développent dans un substrat carbonaté, essentiellement par corrosion/dissolution."

Le parakarst regroupe "les formes de relief de surface ou de subsurface développées dans des substrats non carbonatés et dont le principal agent génétique est la corrosion."

Le pseudokarst désigne "des formes de relief de surface ou de sub-surface développés dans n'importe quel type de substrat par des processus autres que la corrosion mais générant des morphologies comparables à celles liées à l'orthokarst." (SILVESTRU, 1990)

Chacune de ces catégories est subdivisée dans un premier temps en fonction de la position des phénomènes par rapport au contexte géologique (*karst endogène, karst exogène*), puis soit en fonction du processus prédominant (*karst hydrothermal, karst thermal*), soit directement en fonction des caractéristiques géologiques de la roche (*karst des roches carbonatées cristallines, karst des roches carbonatées volcaniques, parakarst des évaporites, parakarst des roches ignées, pseudokarst des roches volcaniques, pseudokarst thermique...*).

<b>Orthokarst</b>		
	<u>Karst endogène</u>	Karst hydrothermal/thermal
	<u>Karst exogène</u>	Karsts des roches carbonatées sédimentaires/cristallines/volcaniques
<b>Parakarst</b>	<u>Parakarst endogène</u>	
	<u>Parakarst exogène</u>	Parakarst des évaporites Parakarst des roches détritiques Parakarst des roches ignées Parakarst des roches résiduelles
<b>Pseudokarst</b>	<u>Pseudokarst endogène</u>	Pseudokarst des roches volcaniques Pseudokarst des roches sédimentaires cristallines Pseudokarst thermal de la glace
	<u>Pseudokarst exogène</u>	Pseudokarst d'érosion Pseudokarst thermique

Tableau 11. Résumé de la classification de Silvestru, 1990

### VIII.6 Discussion - Proposition de définition et de classification

Que ce soit à travers les définitions ou les classifications du karst (et du pseudokarst), d'importantes divergences des points de vue présentés apparaissent.

Jennings (1985), au début de son livre "*Karst Geomorphology*", discute de l'opportunité de baser l'une ou l'autre définition du karst sur certains concepts. Notons qu'il considère que «*la dissolution n'est pas toujours le processus le plus répandu du karst, ni nécessairement le plus dominant, mais il joue un rôle plus important ici que dans les autres types de paysage.*»

Jennings réfute les définitions du karst basées sur la prédominance d'un drainage souterrain. Il met en évidence le cas des karsts à tours tropicaux où le drainage de surface reste plus développé par rapport à d'autres terrains non karstiques tels que les zones volcaniques constituées de pierres ponce. Dans un même ordre d'idée, nous pouvons également nous interroger sur les karsts trouvés en milieu aride ou semi-aride. L'impression d'une prédominance du drainage souterrain n'est-elle pas due à une absence de précipitations et non à un élargissement important des passages souterrains ?

Jennings repousse également les définitions basées sur l'importance des vides souterrains que l'on retrouve en nombre dans les karsts classiques. Il souligne l'absence de grottes dans des terrains

karstifiés en surface et la présence de cavités d'origine assez différente dans d'autres types de terrain notamment ceux issus d'une activité volcanique récente. Un cas comparable existe pour les biohermes du Frasnien en bordure de la Famenne. Non fracturés, ils ne présentent que peu, voire aucun phénomène karstique. Seuls des conduits syngénétiques comblés se retrouvent dans la masse de certains biohermes et n'ont fait l'objet d'aucune karstification une fois mis à l'air libre (par ex. : EK, 1969 ; MAMET et BOULVAIN, 1988).

Jennings montre également qu'un drainage interrompu en surface et des dépressions fermées ne sauraient suffire à définir un karst puisque de tels phénomènes peuvent être dus à un climat trop sec ou à des phénomènes géomorphologiques autres que ceux observés dans le karst (dépression intradunaire par ex.).

Deux autres arguments soutiennent ce point de vue. Le premier est l'échelle de temps durant laquelle peut s'effectuer une karstification. Cette dernière peut se réaliser sur une période marquée par plusieurs changements climatiques dans une région considérée. Par ailleurs, une classification morphoclimatique peut difficilement rendre compte de l'évolution de karsts profonds qui, par définition, sont peu dépendants des conditions de surface. Ainsi, la grotte de Mfoula et une partie des phénomènes karstiques du Niger occidental et oriental illustrent ce cas. Mis en place au sein d'aquifères superposés, une partie d'entre eux se sont créés à l'abri des conditions climatiques de surface. Ces dernières n'interviennent que tardivement dans le remaniement des formes exhumées par l'érosion du paysage. Aussi, les classifications basées sur les zones climatiques ou morphoclimatiques (par ex. : DOKUCHAEV, 1883 ; LEHMAN, 1956; CORBEL, 1957; MAIRE, 1980, MICHEL, 1991) peuvent-elles masquer une grande partie de la réalité des phénomènes auxquels nous sommes confrontés. Il en va de même pour la définition de pseudokarst avancée au congrès de l'U.I.S. (KEMPE et HALLIDAY, 1997). Pour toutes ces raisons, ce type de classification nous semble donc devoir être écarté.

Une définition restreinte à la lithologie calcaire ne convient pas plus à Jennings. Il pointe notamment les grandes grottes développées dans le gypse. De plus, il souligne que toutes les roches carbonatées ne donnent pas naissance à un karst. Et de conclure que *“ finalement, toutes les roches capables de développer un karst ont aussi besoin de circulation d'eau pour qu'il apparaisse. Pluies ou eaux de fonte (meltwater) et reliefs locaux sont nécessaires pour fournir l'énergie indispensable au travail souterrain et de surface des eaux ”* et de souligner que *“ l'eau et son énergie peuvent être fournies par d'autres voies. ”* Ces constatations rendent donc obsolète la classification proposée par Cvijic (1925 et 1927).

A la fin de sa discussion, Jennings se penche sur le problème des formes trouvées en roche silicatée. Il souligne que si l'altération chimique de roches telles que le granite ou l'éclotite peut donner des formes semblables à celles trouvées dans les calcaires, les résidus de ces altérations diminuent la perméabilité et le développement du drainage souterrain, crucial pour l'aspect du karst (considéré ici comme paysage). Ceci entraîne que les produits de la dénudation ne sont pas évacués en solution dans le système de drainage, ce qui est un processus caractéristique dans le karst.

Cet aspect de la dissolution incongruente et des résidus insolubles censés être évacués par transport mécanique est le principal argument utilisé notamment par Gunn (1986) pour distinguer les roches véritablement karstiques (évaporites et carbonates), des autres. Si on adopte cette position, on pourrait donc également inclure dans le karst, les formes développées dans les quartzites, où la différence minérale s'exprime principalement par la forme de cristallisation de la silice. Or, les observations réalisées par McFarlane et Twidale (voir IV.6.3.2) et l'étude des formes développées au sein du Continental terminal ou dans la lithomarge du socle birimien nigérien (voir IV.4.2 et IV.4.3) montrent que ces résidus solides peuvent être également solubilisés. Au Niger, des transferts rapides des eaux de la surface vers les profondeurs sont avérés et les systèmes de drainage sont pérennisés. Au Cameroun, la vallée bordant la grotte de Mfoula (VII.4) présente un aspect de vallée sèche alors que le climat de ce pays est de type équatorial. Guéssédoundou (IV.4.2), Mfoula (VII.4.3.1), Akok Bekoé (VII.4.1) et la grotte de Mezesse (VII.6.2) sont autant d'exemples qui montrent que ce postulat est loin d'être aussi généralisable. Deux faits peuvent expliquer cette « erreur ». Le postulat repose essentiellement sur l'observation, en surface, de matériaux résiduels peu solubles issus de l'altération de roches silicatées dans des contextes de couvertures ferrallitiques. Par ailleurs, à l'époque, Gunn et Jennings ignoraient l'importance du rôle des micro-organismes dans l'altération de matériaux réputés peu solubles. La mise en évidence de bactéries vivantes à grande profondeur ou à quelques dizaines de mètres sous la surface (voir III.8), la découverte des bactéries au sein des aiguilles siliceuses de Nkongmeyos (VII.4.6) ou dans les lamines des concrétions de Mezesse (VII.6.4.2) laisse présager le rôle de ces organismes dans la mise en place de vides souterrains ou de solubilisation de certains matériaux (par ex. : EHRlich, 1998).

Un autre problème se pose : comment considérer une grotte dans des calcaires dont l'affleurement en surface est réduit et ne peut donner de paysage caractéristique ? Ainsi, contrairement à la tradition historique reposant essentiellement sur le concept de paysage, considérer le karst en premier lieu comme une forme ou un phénomène à une échelle plus locale nous semble plus

approprié. Cette position est en accord également avec les vides souterrains qui sont recoupés par sondage dans des calcaires (*cryptokarst*) et qui n'ont pas encore donné naissance à une morphologie de surface caractéristique.

On peut également envisager une certaine continuité entre les formes issues d'une dissolution généralisée de celles provoquées par une dissolution incongruente. Ceci est surtout vrai si on envisage à la fois les formes qui se développent en surface ou à proximité de la surface (grottes d'Angoula, VII.4.4.3, ou de Mbilibekon VII.4.3.2), celles formées en profondeur (grotte de Mfoula, VII.4.3.1) et qui sont réparties sur une même zone, dans une continuité lithologique.

Si, tant au Niger qu'au Cameroun, la dissolution a joué un rôle déterminant dans l'apparition de grottes, d'alvéoles... il existe une réelle difficulté à l'évaluer correctement tant en quantité, qu'en terme de mécanisme déclencheur d'autres processus chimiques ou physiques. Ainsi, lorsqu'on est confronté à un glissement d'une dalle rocheuse le long d'un plan de fracturation, de cisaillement, .. comment savoir la part de l'érosion chimique dans l'élargissement d'un plan de faiblesse ? Par ailleurs, même dans un karst classique, une évolution prolongée peut amener la prédominance des processus physiques sur les processus chimiques. Ainsi, "*dans les cavités importantes, les traits principaux de la morphologie, souvent, ne sont pas des effets directs de la corrosion.*" (EK, 1987). Pour ces différentes raisons, les classifications proposées par Cigna (1978) et Silvestru (1990) nous semblent peu opérationnelles.

Afin de tenter de répondre aux différents problèmes et objections que nous venons d'exposer, nous proposons la définition suivante du karst:

**Le karst est d'abord une ou des formes caractéristiques de la suite karstique classique<sup>28</sup> : grotte, lapies, gouffre... où la dissolution a joué un rôle déterminant dans la genèse.**

Cette définition est très proche du point de vue émis par Jennings<sup>29</sup> si ce n'est que nous ne considérons pas le karst comme un paysage. Elle rejoint la position de Choppy (1988) qui parle de *roches karstiques* si les formes qui y sont observées peuvent être attribuées à la dissolution.

Cependant, le terme de *roches karstiques* semble obsolète puisque toute roche, quelle que soit sa nature, est susceptible de subir une karstification.

---

<sup>28</sup> karst des calcaires

<sup>29</sup> «*La dissolution n'est pas toujours le processus le plus répandu du karst, ni nécessairement le plus dominant, mais il joue un rôle plus important ici que dans les autres types de paysage.*»

**La lithologie initiale dans laquelle les phénomènes se développent servira de base à cette classification.**

Nous rejoignons en ceci les positions adoptées notamment par Renault (1953) (karst des grès, voir II.2) et celle de Wirthmann (1966, 1970) qui parle de karsts silicatés à propos de processus de dissolution dans les péridotites de Nouvelle Calédonie.

Nous pensons que l'expression « processus karstique » est à éviter car il s'agit d'un ensemble de phénomènes physiques, chimiques ou biologiques qui ne sont pas exclusifs du karst mais qui se déroulent également dans l'apparition d'autres morphologies. Seule la dissolution initiale du matériel rocheux par le biais de fissures diverses est le point de départ caractéristique de la mise en place de karst (au sens de forme).

En fonction de notre position vis-à-vis du karst, notre classification (Tableau 12) se base tout d'abord sur la lithologie dans laquelle se développent les formes karstiques initiales et non dans les terrains sus-jacents qui subirait des effets d'affaissement secondaires. Une seule exception : si ces affaissements secondaires permettent le développement d'une nouvelle karstification avec ses objets propres. Dans ce cas, le terme de karstification secondaire sera employé.

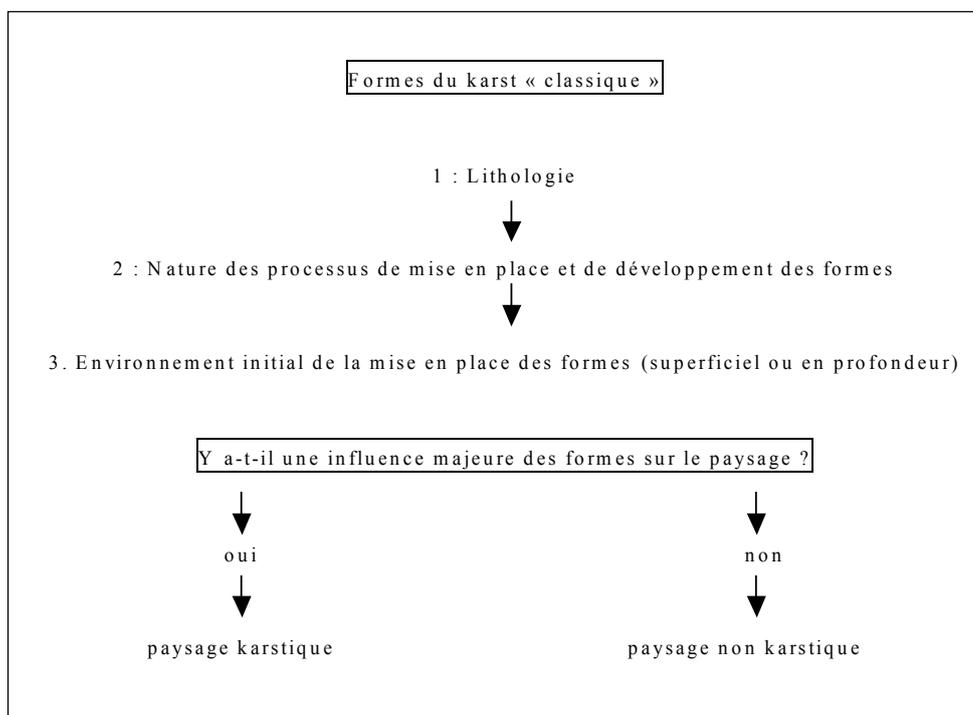


Tableau 12. Démarche de classification lithologique. Chaque niveau représente une étape dans la détermination du karst. Le terme « superficiel » sera utilisé dans le sens « en surface » ou à quelques mètres sous la surface.

Le karst des grès (RENAULT, 1953) ou les sous-groupes repris par le groupe de contact de l'U.I.S. (KEMPE et HALLIDAY, 1997) deviennent les catégories premières de notre classification.

En fonction de ce tableau nous parlerons donc de karst des calcaires, des granites, des grès, des gneiss, des micaschistes... et nous isolerons les facteurs et processus principaux responsables de l'apparition et du développement de formes karstiques.

Localisation du karst	Type de karst	Lithologie	Env. initial de mise en place	processus impliqués	Influence sur le paysage
<b>Niger occidental</b>					oui
Niger occidental Fandou Kangaré	doline	grès	superficiel	dissolution	
Niger occidental Diffa Doga	grotte	grès	en profondeur	dissolution, suffosion	
Niger occidental Guéssédoundou	grotte	métagabbros	en profondeur	dissolution	
Niger occidental Guiddéré	grotte	Manteau d'altération ferrallitique	en profondeur	dissolution	
<b>Cameroun méridional</b>					
Site de Mfoula	grotte de Mfoula	gneiss	en profondeur	dissolution, effondrement	non
Site d'Akok Bekoé	grottes	micaschistes	en profondeur	dissolution	oui
Site d'Ako Akas	lapiés	granite	superficiel	dissolution, ruissellement	oui
Site de Mezesse	lapiés, gnamas	granite	superficiel	dissolution, ruissellement	oui
	grotte	granite	superficiel	dissolution, ruissellement	non

Tableau 13. Essai de classification des karsts trouvés au Niger occidental et au Cameroun méridional.

Le cas des couvertures ferrallitiques est plus complexe. Comme nous l'avons vu précédemment, elles peuvent être soumises à des phénomènes de dissolution et conséquemment à l'apparition de macro-vides. Si cette dissolution et ses conséquences sont clairement établies, nous proposons de considérer ces manteaux d'altération au même titre que les roches non-altérées et nous proposons d'utiliser dans ce cas le terme de *karst des altérites*.

Afin d'éviter une confusion avec certains objets, cette classification ne s'envisagera que pour des formes développées dans les roches en place (nous considérerons les loess comme roche en place).

Nous pensons qu'il faut abandonner le terme de "pseudokarst". Il entraîne une confusion supplémentaire par son imprécision. Nous considérerons les formes souterraines développées dans les massifs glaciaires, issus d'un changement d'état de l'eau comme de simples phénomènes glaciaires. De même, les dépôts morainiques et les morceaux de glace enfouis qui dégèlent et donnent des dépressions ne seront donc pas inclus dans les karsts. Les tunnels de lave seront

considérés comme un phénomène volcanique sans autre besoin de classification. Ils ne sont rien d'autre qu'un facteur pouvant favoriser l'apparition de karst au même titre que les fractures parcourant les roches. Ils pourront créer les conditions favorables à une karstification secondaire telle que la mise en place de concrétions. Ainsi, des cavités issues d'un simple glissement de terrain seront-elles également écartées. Il en sera de même pour les formes ouvertes au sein des altérites et résultant de processus mécaniques. Une certaine simplification sera admise pour les karsts en roches à forte variabilité lithologique tels que ceux du Niger occidental (les grès de Continental terminal étant constitués de dépôts sablo-argileux (IV.2.2).

Cette classification évite une profusion de termes plus ou moins définis et souvent ambigus dans les différentes langues. En outre, elle est indépendante du facteur "temps" et du facteur "climat". Les conditions climatiques peuvent changer plusieurs fois durant la mise en place des formes et influencer l'aspect "drainage" visible par le chercheur pendant un laps de temps trop bref. (Dans de nombreux cas, un climat trop sec ou un manque d'accès au monde souterrain empêche une évaluation de la part du drainage souterrain par rapport au drainage de surface alors que c'est un des paramètres retenus par certains auteurs pour distinguer le "vrai" karst du "pseudo" karst.

Des termes comme *cryptokarst*, karst *de profondeur* ou *de surface* peuvent toujours venir compléter le tableau sans introduire d'ambiguïté quant à leur signification. Cependant, ces termes ne rendent compte du karst qu'à un moment de son histoire. Il sera donc important d'envisager la position initiale de la forme lors de son développement majeur.

Le tableau 13 représente un essai de classement selon la démarche que nous proposons. Ainsi, dans le cas de la grotte de Mfoula, nous parlerons d'un karst gneissique de profondeur, dégagé par l'érosion de surface. Pour la grotte de Mezesse, il s'agit vraisemblablement d'un karst granitique superficiel. Angoula, Mbilibekon, Nkongméyos, Karey Gorou, Kahé ne seront pas repris dans ce tableau, la dissolution n'étant pas clairement identifiée comme phénomène clé dans leur genèse.

## **IX. Perspectives et conclusions générales**

Les différents sites abordés dans ce travail montrent que les karsts en roches silicatées présentent de nombreuses similitudes avec les karsts calcaires. La découverte de dépôts ferro-siliceux sous forme d'enduits (Akok Bekoé) ou sous forme de concrétions (cave pop-corn du Tchigai et de Mezesse) ainsi que des formes caractéristiques (colonnes de Mezesse, d'Akok Bekoé, vasques et lapiés de Mezesse et d'Ako Akas, nids d'abeilles de Mezesse, ...) démontrent l'importance des phénomènes chimiques dans leur édification. Une mobilisation d'éléments tels que Si et Al dans des environnements réputés peu propice à leur départ est constatée (Akok Bekoé, Mezesse, Tchigai).

On pourrait imaginer que cette mobilisation de la silice est propre aux karsts non carbonatés. Pourtant plusieurs études mettent en évidence des quantités non négligeable de silice dans des concrétions carbonatées (par ex. : FANNING, 1970 ; BROUGHTON, 1971, 1974). Souvent noyée dans la calcite, la silice (par ex. sous forme d'opale ou de calcédoine) n'en est pas moins présente. Une continuité entre karsts calcaires et non calcaires existe donc.

L'hypothèse d'une genèse initiale de karsts en profondeur doit être également envisagée pour les roches calcaires. Si, à l'heure actuelle, de nombreux karstologues considèrent leur mise en place à partir d'une altération progressant de la surface vers la profondeur, cette vision des choses peut être en partie erronée. La vitesse d'altération des processus de surface dans des lithologies carbonatées doit entraîner une modification également rapide des formes issues de la profondeur (élargissement des entrées supérieures...) et masquer l'histoire ancienne de ces morphologies.

Une des questions non résolues est le rôle exact joué par les bactéries dans la karstification. Dans le cas de Mezesse, la mobilisation et le dépôt de Si apparaissent comme extrêmement rapides, peut-être liés à une activité bactérienne. La dissolution généralisée des gneiss à l'origine de la grotte de Mfoula pourrait s'expliquer par l'action de micro-organismes en profondeur. Leurs rôles dans la karstification de toutes les lithologies doivent être envisagés, au même titre que les autres facteurs traditionnellement évoqués.

Dans le cas des différentes cavités répertoriées au sein des micaschistes d'Akok Bekoé, du Continental terminal et de la lithomarge du Niger, rien ne nous permet d'avancer une genèse rapide dans leur formation. Tant les « micro » formes qu'elles abritent, leur taille et leur position respective suggèrent une genèse sur une échelle de temps longue et en milieu noyé, nécessaire au départ d'une grande quantité de silice. Ceci suppose une mise en place à suffisamment grande profondeur, laissant le temps aux formes de se développer avant que l'érosion de surface ne les dégage. Seules les formes liées à des plans de décompression superficiels peuvent se former plus rapidement. C'est le cas de Mezesse et de ses concrétions qui montrent une karstification rapide au sein des granites.

Quelle est l'occurrence des différents karsts dans les différentes lithologies étudiées et peut-on parler de régions karstiques ?

Les karsts répertoriés tant dans les granites que dans les micaschistes et les gneiss sont encore trop peu nombreux que pour pouvoir répondre à ces questions. En revanche, les nombreux karsts décrits au Niger occidental et oriental influencent incontestablement l'évolution géomorphologique des paysages tant dans le développement des réseaux hydrographiques que dans la dissection des plateaux. Les lithologies gréseuses sont fort abondantes dans tout le Sahel et ont une structuration similaire à celle de la région de Niamey. On peut donc envisager qu'une grande partie du Sahel est karstifiée. Les grottes trouvées au Mali (CALANDRI, 1996 ; CALANDRI et OSENDA, 1991) ainsi que dans d'autres régions sahéliennes (RENAULT, 1953 ; SPONHOLZ, 1987; BUSCHE ET SPONHOLZ, 1992, 1994; BUSCHE et ERBE, 1987; SZENTES, 1989) appuient cette conclusion. On comprend dès lors l'intérêt d'études plus approfondies dans ces zones où le manque d'eau en surface se fait cruellement sentir.

La découverte et l'étude d'autres karsts en roches non carbonatées devraient se poursuivre et permettre d'affiner les connaissances des différents processus responsables de leur développement. Leur impact sur la géomorphologie et l'hydrogéologie des régions est encore à évaluer.

---

## Bibliographie

ABOUCAMI, W., BOHER, M., MICHARD, A., et ALBAREDE, F. (1990). *A major 2.1 Ga event of mafic magmatism in West Africa : an early stage of crustal accretion*. J. Geophys. Res., 95 : 17,605-17,629.

AMA SALAH, I. (1991). *Péetrographie et relations structurales des formations méta-volcaniques et sédimentaires du Birrimien du Niger occidental. Problème de l'accrétion crustale au Protérozoïque inférieur*. Thèse, Université d'Orléans 231 p.

ANDERSON, C.A. (1930). *Opal stalactites and stalagmites from a lava tube in northern California*. Am. J. Sci., 20 : 22-26.

ANNUAIRE METEOROLOGIQUE DU NIGER (1985). Direction de la Météorologie Nationale du Niger, Niamey.

AUCAMP, J.P. et SWART, D.P.R. (1992). *The Underground Movement in Zimbabwe : Chimanimani Caving Expedition 1992*. Bull. South African Spel. Ass. Vol. 32/ 1991 : 79-91.

AULER, A. et FARRANT, A.R. (1996). *A brief introduction to karst and caves in Brazil*. Proc. Univ. Bristol Spelaeol. Soc., 20(3) : 187-200.

BAILLIE, I.C. (1975). *Piping as an erosional process in the uplands of Sarawak*. Journal of Tropical Geography, 4 : 9-15, d'après Thomas, 1994.

BALKWILL, D. (1989). *Numbers, Diversity, and Morphological Characteristics of Aerobic, Chemoheterotrophic Bacteria in Deep Subsurface Sediments from a Site in South Carolina*. Geomicrob. J., 7:33-52.

BARDEN, M.J. (1978). *Speleogenesis of sandstone caves*. Wisconsin Speleol. 16, 1 : 12-19.

BATES et JACKSON (1987). *Glossary of Geology*. 3ème édition, American Geological Institute, p. 298.

BATTIAU-QUENEY, Y. (1977). *Un phénomène karstique dans des grès siliceux (Pays de Galles méridional)*. Norois, Sonderh. Karstologia, 95bis.

BAUMHAUER, R., FELIX-HENNINGSSEN, P., FERHAT, N. et SCHÜTT, B. (1995). *Zur Landschaftsentwicklung in der Zentralen Sahara : Das Beispiel Termit*. Trierer Geographische Studien, Heft 11 : 71-79.

B.C.R.A. (BRITISH CAVE RESEARCH ASSOCIATION) Bull. (1975), 15 d'après Chabert 1980.

BEAUX F. et WAGNEUR, C.(1991). *Les abris gravés de la Malmontagne, forêt domaniale de Fontainebleau, Seine-et-Marne*. Art rupestre, N° 34, p. 45-48.

BECK, B.,F. et CRAM, C. (1977). *On the occurrence and origin of karren on granodiorite in Puerto Rico*. Proc. 7th Int. Speleol. Congr. (Sheffield). : 28-31.

BELLARD-PIETRI, E. (1974). *Exploration préliminaire du plateau de Sarisarinama (Venezuela). Les gouffres Humboldt et Martel*. Spelunca (4). 14/4 : 99-101.

BELLION, Y. (1989). *Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires*. Pub. occasionnelle CIFEG, 17, 302 p.

BENNETT, P.C., MELCER, M.E., SIEGAL, D.I. et HASSETT, J.P. (1988). *The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25 °C*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52 : 1521-1530.

BERNABEI, T., MECCHIA, M., PEZZOLATO, P., PICCINI, L. et PREZIOSI, E. (1993). *Tepuy '93 : ancora Venezuela !*. Speleologia SSI, anno 14, Venezuela 29, ottobre 1993 : 8-23.

BERTHELIN, J. et BOYMOND, D. (1978). D'après *Environmental Biogeochemistry*. Ed. Krumbein, W.E., Ann Arbor Sci. Publ., Ann Arbor, U.S.A., vol. II, chap. 53.

BERTHELIN, J. et TOUTAIN, F. (1979). *Biologie des sols*. D'après Pédologie, 2. Constituants et propriétés du sol. Eds. BONNEAU, M. et B. SOUCHIER, publ. Masson, Paris, pp. 124-160.

BEVERIDGE, T.J. (1989). *Metal Ions and Bacteria*. T.J. Beveridge et R.J. Doyle Eds, New York, Chichester, J. Wiley, 461 p.

BIGOT, J.Y. (1990). *Les grottes de Coquibu - cavités des grès de Fontainebleau (Milly-la-Forêt, Essone)*. L'Aven, n° 50, 39-61.

BIGOT, J.Y. (1993). *La grotte de l'Hôpital, Abbéville-la-Rivière, Essonne. Le topographe et la caverne*. Grottes et Gouffres : 1993, n° 127, p. 13-14.

BILONG P., ANGUE ABANE, M. et ENO BELINGA, S.M. (1982). *Etude cartographique des processus morphoclimatiques et pédogénétiques du secteur sud-ouest de Yaoundé*. Ann. Fac. Sci. Yaoundé, Vol. 4/1 : 67.1-77.1.

BIRKELAND, P.W. (1984). *Soils and Geomorphology*. Oxford Univ. Press, New York, d'après Thomas, 1994.

BLACK, C.A. (1957). *Soil-plant Relationships*. Wiley, New York, d'après Thomas, 1994.

BLANCK, J.P. (1968). *La boucle du Niger (Mali)*. Cartes géomorphologiques et notice. Rapport projet d'aménagement U.L.P., 41 p. + notice 26 p.

BLOOMFIELD, C. (1957). *The possible significance of polyphenols in soil formation*. J. Sci. Food. Agric., 8 : 389-392, d'après McFarlane et Twidale, 1987.

BÖGLI A. (1980). – Karst hydrology and physical speleology. – Berlin, 284 p.

BOL. SOC. VENEZOLANA ESPEL. (1976). *Catastro Espeleologico de Venezuela*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 7(13). : 81-99.

BOL. SOC. VENEZOLANA ESPEL. (1976). *Noticiero Espeleológico. Expedición Espeleológica Polaco-Venezolana, 1976, A La Meseta de SarisariNama, Estado Bolívar*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 7(13). : 101-119.

BOTZEM, A. (1987). *Grotte de la Petite Fleur*. Vie souterraine.

BOUBE GADO (1980). *Le Zarmatarey, Contribution à l'histoire des populations d'entre le Niger et Dallol Mawri*. Etudes Nigériennes, N° 45 : 70-72.

BOUQUET, C. (1955). *Trois cavités dans le granite*. Ann. de Spéléol., X/3 : 97-102.

BOWDEN, D.J. (1980). *Sub-laterite cave systems and other pseudokarst phenomena in the humid tropics ; the example of the Kasewe Hills, Sierra Leone, West Africa, and their geomorphological significance*. Z Geomorph. N.F., 64 : 39-53, d'après Thomas, 1994.

BRINCKMANN, R. (1970). *Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process*. Geoderma 3 : 199-206, d'après Thiry, 1997.

BRINCKMANN, R., JONGMANS, A.G., MIODEMA, R. ET MAASKANT, P. (1973). *Clay decomposition in seasonally wet, acid soils : micromorphological, chemical and mineralogical evidence from individual argilans*. Geoderma 10 : 259-270, d'après Thiry, 1997.

BROCK, T.D., MADIGAN, M., MARTINKO, Jh. M. et PARKER, J. (1994). *Biology of microorganisms*. Seventh ed., Prentice-Hall Int., Englewood Cliffs, 909 p..

BROUGHTON, P.L.(1971). *The stalactite group of cave minerals*. Nat. Speleol. Soc. News., V.29/8, p. 102.

BROUGHTON, P.L. (1974). *Silica deposits in eastern Wyoming caves*. Nat. Speol. Soc. Bull., V.36/3 :9-11.

BROWN, D.A., KAMINENI, D.C., SAWICKI, J.A. et BEVERIDGE, T.J. (1994). *Appl. Environ. Microbiol.*, 60, 3182, d'après Stevens et McKinley, 1995.

BUNNELL, D. et RICHARDS, B. (1977). *Granitoid Corrasional Caves in California*. Proc. 7th Int. Speleol. Congr. (Sheffield) : 11.

BURNHAM, C. W. (1991). *LCLSQ version 8.4, last-squares refinement of crystallographic lattice parameters*. Dept. of Earth and Planetary Sciences, Harvard University.

BUSCHE, D. et ERBE W. (1987). *Silicate karst landforms of the southern Sahara (north-eastern Niger and southern Libya)*. Z. Geomorph., suppl-Bd. 64 : 55-72.

BUSCHE, D. et SPONHOLZ, B. (1992). *Morphological and micromorphological aspects of the sandstone karst of eastern Niger*. Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd 85, Februar 1992 : 1-18.

BUSHINSKY, G.I. (1975). *Geology of Bauxites*. 2<sup>nd</sup> Edn. Isd. Nedra, Moscow, d'après Thomas, 1994.

BUTTY, D.L. et CHAPALLAZ, C.A. (1984). *Bauxite genesis*. In *Bauxite*. Proceedings Symposium, Los Angeles, 1984 (Ed. L. Jacob, Jr.), pp. 111-151. Soc. Of Mining Engineers, American Inst. For Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, d'après Thomas, 1994.

CALANDRI, G. (1996). *Le falesie di Bandiagara e le grotte di Banani-Bongo (Mali)*. Boll. del Gruppo Speleol. Imperiese CAI 46 : 8-17.

CALANDRI, G. et OSENDA, G. (1996). *Fare speleologia In Mali* . Bollettino del Gruppo Speleologico Imperiese CAI 46 : 18-23.

CALCIATI et BRACCIANI, *Nel Paese di Cumana*. 1822-23, Milan, 1027, in Martel, 1930.

CALLOT, Y. (1981). *Sur quelques formes souterraines pseudokarstiques en France*. Proceed, 8th I.C.S. Bowling Green : 682-685.

CHABERT, C. (1980). *Les grandes cavités en roches pseudokarstiques*. Spelunca 3 : 109-115.

CHABERT, C. (1990). *Les cavités françaises en roches non-calcaires*. Spelunca n° 40 : 23-24.

CHABERT, C. (1995). *Dans le Grès des Vosges*. Grottes et Gouffres, 136, juin 1995 : 18 - 19.

CHABERT, C. et BIGOT, J.Y. (1993). *A travers le grès des Vosges. Matériaux pour servir à la connaissance du Bas-Rhin*. Grottes et Gouffres : 1993, n° 129, p. 4-9.

CHABERT, C. et COURBON, P. (1997). *Atlas des cavités non calcaires du Monde*. Union Inter. Spéléol., 109 p.

CHALLINOR'S DICTIONARY OF GEOLOGY, 1986. Antony Wyatt, 6ème éd, Cardiff, Univers. of Wales Press, 374 p..

CHAMPETIER DE RIBES, G. et AUBAGUE, M., 1956. *Carte géologique de reconnaissance à l'échelle du 1/500 000, feuille Yaoundé Est, avec notice explicative*. Dir. Mines. Geol. Cameroun, 35 p.

CHANOV, St., BENDEREV, Al., ILLIEVA, I. et VESELINOV, Str. (1986). *Phénomène karstique dans les granites allochtones de Stara Planina (Bulgarie). Genèse et formes morphologiques*. Comunicaciones 9º Congreso Internacional de Espeleologia, Barcelona, Espana. Vol. II. : 29-35.

CHAPELLE, F.H. et LOVLEY, D.R. (1990). *Rates of microbial activity in deep coastal plain aquifers*. Appl. Environ. Microbiol., 56 : 1865-1874, d'après Ehrlich, 1998.

CHAPELLE, F.H., ZELIBOR, L.J., GRIMES, D.J. et KNOBEL, L.L. (1987). *Bacteria in deep coastal plain sediments of Maryland : A possible source of CO<sub>2</sub> to groundwater*. Water Resources Res. 23 : 1625-1632, d'après Sinclair et Ghiorse, 1989.

CHAUSSIDON, J. et PEDRO, G. (1979). *Rôle de l'état hydrique du système poreux sur l'évolution du milieu. Réalité de l'altération dans les systèmes à faible teneur en eau*. Sci. Sol 2 : 223-237, d'après Thiry, 1997.

CHOPPY, J. (1988). *Roches solubles non carbonatées et karstification*. chez l'auteur, Paris : 1988, 78 p.

CHOPPY, J. (1990). *Dissolution des Grès sous climat tempéré dans la montagne de la Table, Sudètes, Basse-Silésie, Pologne*. Karstologia, N° 16 : 48-50.

CIGNA, A.A. (1978). *A classification of karstic phenomena*. Intern. Journal of Speleology 10(1). 3-9.

CLAUSEN, E.N. (1970). *Badlands caves of Wyoming*. Nat. Speleol. Soc. Bull. 32 : 59-69.

CLOSSON, D. (1991). *Contribution à l'étude du massif du Nkoma et des régions limitrophes de Karera, Rutana, Bukemba, Gihafi et Bareremba (République du Burundi)*. Mém. Sc. Géogr., Fac. des Sciences, Univ. Liège, 169 p.

COLVEE, P. (1973). *Cueva en cuarzitas en el cerro Autana, Territorio federal Amazonas*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 4/1 : 5-13.

CONRAD G., GEZE R., PALOC H. (1967). *Observations sur des phénomènes karstiques et pseudo-karstiques du Sahara*. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynamique IX/5 : 357-369.

COOK, T.L. et STAKES, D.S. (1995). *Biogeological mineralization in deep-sea hydrothermal deposits*. Science, 267 : 1975-1979.

CORBEL, J. (1957). *Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe et de quelques régions de comparaison*. Thèse. Rev. Géogr. Lyon; Mém. et Doc. Inst. Et. Rhodaniennes 12, 541 p.

CORENS, C.W. (1939). *Die Sedimentgesteine*. I. Verwitterung, d'après Barth, Correns et Eskola, Springer, Berlin, pp. 116-130.

CORENS, C.W. (1940). *Die chemische Verwitterung der Silicate*. Die Naturwissensch., 28, pp. 369-376.

CORENS, C.W. (1941). *Über die Löslichkeit von Kieselsäure in schwachsauren und alkalischen Lösungen*. Chemie der Erde, 13, pp. 92-96.

CORENS, C.W. et ENGELHARDT, W. von (1938). *Neue Untersuchungen über die Verwitterung des Kalifespates*. Chemie der Erde, 12, pp. 1-22.

COURBON, P. (1984). *Echo des profondeurs, étranger*. Spelunca (Paris), N°15, juillet-septembre 1984 : p. 14.

COWAN, D.A. (1995). *Hyperthermophilic enzymes : biochemistry and biotechnology*. Hydrothermal Vents and Processes, Geol. Soc. Special Pub., Ed. Parson, L.M., Walker, C.L. & Dixon, D.R., N°87 : 351-363.

CRAFT, F. (1987). *Sandstone caves*. J. Sydney Spel. Soc. 31 (nr. 10). : 205-207.

CVIJIC, J. (1925). *Types morphologiques des terrains calcaires*. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 180, 1038-1040.

CVIJIC, J. (1927). *La géographie des terrains calcaires*. Monogr. Acad. Serbe Sc. Arts CCCXLI, Classe des Sc. math. et Nat., n°26, Beograd, 212 p.

DEFOSSEZ, M. (1958), *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la boucle du Niger*. Thèse Sci. Strasbourg, 227 p., d'après Millot, 1964.

DEMOULIN, A. (1997). *L'altération*. Notes de cours dans le cadre des 2ème candidatures en Sc. Géogr. Univ. de Liège, pp. 14-16.

DOKUCHAEV (1883), d'après R. Michel, 1991.

DOUGLAS, I. (1976). *Erosion rates and climate : geomorphological implications*. In *Geomorphology and Climate* (éd. E. Derbyshire), pp. 269-287, Wiley, New York, d'après Thomas, 1994.

DUBLIANSKY V. *et al.*, (1991). *The cadastre of the conglomerate and sandstone caves of the USSR*. Manuscript déposant d'après VINITI, Moskva, n° 2118 - B91 : 1-152.

DUBOIS, D., ICOLE, M. et TRICHET, J. (1984). *Evolution géomorphologique de la vallée du Niger aux abords de Niamey (République du Niger)*. Bull. Soc. géol. Fr., 6 : 1305-1318.

DUNKERLEY, D.L. (1979). *The morphology and development of Rillenkarrren*. Z. Geomorphol., 23 : 332-348 , d'après Wray, 1997.

DUNKERLEY, D.L. (1983). *Lithology and micro-topography In the Chillagoe karst. Queensland. Australia*. Z. Geomorphol., 27 : 191-204, d'après Wray, 1997.

DUSANG, G. (1974). *Die Höhlen im Tibestit-Gebirge (Zentrale Sahara)*. Abh. 5. int. Kongr. Speläol., Stuttgart 1969 (München). 2 : 5 17/1-7.

DYGA, R.T., SZEKELY K. et ZAWIZKI, P. (1976). *Sandstone shafts on the Sarisarinama Plateau In Venezuela*. Karszt-ès Barlang (Budapest) 1/2 : 43-46.

EGRE, A.G., 1948. *I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio*. Pub. dell. Istit. di Geogr. dell. Univers. di Roma 17, 239 p., d'après Choppy, 1988.

EHRlich, H.L. (1993). *Bacterial mineralization of organic carbon under anaerobic conditions*. In : Bollag, J.M., Stotzky, G. (Eds). *Soil Biochemistry*, Vol. 8. Marcel Dekker, New York, d'après Ehrlich, 1998.

EHRlich, H.L. (1996). *Geomicrobiology*, 3rd edn. Marcel Dekker, New York, d'après Ehrlich, 1998.

EHRlich, H.L. (1998). *Geomicrobiology : its significance for geology*. Elsevier, Earth.Sc. Rev. 45:45-60.

EK, C. (1969). *Facteurs, processus et morphologie karstiques dans les calcaires paléozoïques de la Belgique*. Thèse de doctorat en Sc., Univ. de Liège, vol. 2, p. 69.

EK, C. (1987). *Les phénomènes karstiques*. Notes de cours, Univ. de Liège, 3ème ed., 42 p.

ELENGA, H., SCHWARTZ, D. et VINCENS, A. (1992). *Changements climatiques et action anthropique sur le littoral congolais au cours de l'Holocène*. Bull. Soc. géol. de France, 163/1 : 83-90.

ENO BELINGA, S.M. et KABEYENE BEYALAV, V. (1982). *Géologie dynamique du paysage du fer de la ville de Yaoundé, secteur nord*. Ann. Fac. Sci. Yaoundé, Vol. 4/1 : 51.1-66.1.

ESPELEOTEMA (1978), 8 (11), d'après Chabert, 1980.

ESPIAU, P. et PEDRO, G. (1983). *Etude du phénomène de ferrolyse par voie expérimentale. Production d'acidité d'échange et mise en évidence du rôle catalytique des minéraux argileux*. Sci. Sol 3 : 173-184, d'après THIRY, 1997.

ESTEVEZ, M. et LENOIR, F. (1994). *Un exemple de fonctionnement hydrologique dans la région de Niamey : le bassin de Sama Dey*. Cahiers de l'Orstom.

FANNING, D.S. (1970). *Cave features : Information concerning the nature and genesis of soils*. Soil Sci. Soc. Am. Proc., V.34 : 98-104.

FAURE, H. (1966). *Reconnaissance géologique des formations sédimentaires postpaléozoïques du Niger Oriental*. Ed. du BRGM, Paris, 630 p.

FENELON, P. (1965). *Vocabulaire français des phénomènes karstiques*. Comité national de géographie, collectif : 3-6.

FILIPPOV, A. (1978). *Taranakite from two deposits in Bulgaria*. Ann. of the University of Sofia, 70, 287-298.

FINLAYSON B. (1982). *Granite Caves in Girraween National Park, Southeast Queensland*. Granite Caves, Helictite 20 (2) : 53.

FINLAYSON, B. et WEBB, J.A. (1985). *Amorphous speleothems*. Cave Sci. 12(1) : 3-8.

FIGLIANO, S. et LAVIANO R. (1991). *Brushite, hydroxylapatite, and taranakite from Apulian caves (southern Italy) : New mineralogical data*. American Mineralogist, Vol. 76 : 1722-1727.

FORD, D.C. et WILLIAMS, P.W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. Unwin Hyman, London, 601 p.

FOUCAULT, A. et RAOULT, J.F. (1992). *Dictionnaire de géologie*. Ed. Masson, 3ème éd. : 209-210.

FREDRICKSON, J. et ONSTOTT, T (1996). *Les micro-organismes de l'intérieur du Globe*. Pour la Science, 230 : 90-95.

FRIPIAT, J.J. (1971). *Interaction eau-argile*. Bull. Gr. Fr. Argiles 23 : 1-8. d'après Thiry, 1997.

GALAN, C. (1982). *Notas sobre la morfología de la cueva autana y algunos comentarios generales sobre las formas pseudocarsicas desarrolladas en cuarcitas del grupo Roraima, Guayana Venezolana*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 10(19) : 115-128.

GALAN, C. (1984). *La Sima Aonda, -362 m. Venezuela*. Spelunca N° 14, avril - mai - juin 1984 : 14-17.

GALAN, C. (1988). *Cavernas y formas de superficie en rocas silíceas recambricas del grupo Roraima, Guayana, Venezuela*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 23 : 1-12.

GALAN, C. (1994). *Exploration y estudio de cavidades en rocas silíceas precámbricas del grupo Roraima, Guayana Venezolana : una síntesis actual*. Karaitza (4). 1995 : 1-45.

GALAN, C. et LAGARDE, J. (1988). *Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les Quartzites du Roraima (Vénézuéla)*. Karstologia n° 11-12 : 49-60.

GALL, J-C. (1990). *Le rôle biosédimentaire des voiles microbiens. Critères de reconnaissance*. Bull. Soc. Géologique de France, 8, t. VI, 1 : 75-82.

GARDNER, L.R. (1992). *Long-term isovolumetric leaching of aluminium from rocks during weathering; implications for the genesis of saprolite*. Catena, 19, pp. 521-537, d'après Thomas, 1994

GARNIER, Ch. (1986). *Le "Pseudo-karst Luxembourgeois"*. CSEB Info : 9-10.

GARTZ, V. (1990). *Schildergat and Klein Schildergat : two forgotten sandstone caves In the Oudtshoorn District*. Bull. South African Speleol. Ass. vol. 31/1990 (publ. 1991) : 72-76.

GAVAUD, M. (1977). *Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional*. ORSTOM, Paris, Trav. et Docum., N° 76, 102 p.

GAVAZZI, C. (1977). *Grotte tettoniche del Biellese*. Orso speleo 5(5). : 23-34.

GAVRILOVIC, D. (1969). *Die Höhlen im Tibesti-Gebirge (Zentrale Sahara)*. Inter. Congr. Speleol., Stuttgart, 2 : 17/1-17/7.

GENTY, D. (1993). *"Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites. Intérêt pour la reconstitution des paléoenvironnements continentaux."* C.R.Acad. Sc. de Paris, V. 317, série II : 1229-1236.

GENTY, D. BASTIN, B. et EK, C. (1995). *"Nouvel exemple de lamines annuelles dans une stalagmite (grotte de Dinant, La merveilleuse, Belgique)." Speleochronos, 6:3-8.*

GEZE, B. (1973). *Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie*. Ann. de Spél. 28/1 : 1-20.

GOLDSMITH, P.R. et SMITH, E.H. (1985). *Tunnelling erosion in S. Auckland, New Zealand*. Engineering Geology, 22 : 1-13, in Thomas, 1996.

GORI, S., INGLESE, M., TOGNINI, P., TREZZI, G. et RIGAMONTI, I. (1993). *Auyantepuy, speleologia tropicale nelle quarciti*. Speleologia SSI anno 14, Nr. 28, marzo 1993 : 23-33.

GUIRAUD, R. *et al.* (1987). *Post-Hercynian tectonics in Northern and Western Africa*. Geol. J., 22, Thematic Issue : 433-466, in Vicat *et al.* (1994).

GREIGERT, J. (1966). *Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale)*. Pub. Dir. Mines et Géologie, Niger, 2, B.R.G.M. éd., 234 p.

GREIGERT, J. (1979). *Atlas des eaux souterraines du Niger, Etat des Connaissances (Mai 1978), Les nappes du Continental Terminal du Synclinal de Dogondoutchi*. Pub. Minis. Min. et de l'Hydr., Tome 1, Fasc. V, Chap. 7, B.R.G.M. éd. : 81-102.

GREIGERT, J. et POUUNET, R. (1967). *Essai de description des formations géologiques de la République du Niger*. Min. des Trav. Publ. et Transport, Niamey, Publ. N°3 : 238 p.

GRIMES, K. G. (1997). *Redefining the boundary between karst and pseudokarst : a discussion*. Cave and Karst Sc., 24/2 : 87-90.

GRUND, A. (1914). *Der geographische Zyklus im Karst*. Ges. Erkunde 52 : 621-640 d'après Ford et Williams, 1989.

GUNN, J. (1986). *Solute processes and karst landforms*. Solute Processes, S.T. Trudgill, John Wiley & Sons Ltd : 363-437.

GVOZDECKIJ, N.A. (1965). *Types of karst in the U.S.S.R.* Prob. Speleol. Res., Prague, 47-54.

HALLIDAY, W.R. (1960). *Pseudokarst in the United States*. Nat. Speleol. Soc. Bull., Vol. 23(2), 57-62.

HALLIDAY, W.R. (1997). *Recent exploration of lava tube systems in Kona and on Mauna Loa, Hawaii*. Proceed. of the 12th Inter. Congres. of Speleol., Switzerland, Vol. 1, symp. 8 Karst Geomorph. : 461-463.

HASEMAN, J.F., BRIWN, E.H. et WHITT, C.D. (1950). *Some reaction of phosphate with caly and hydrous oxides of iron and aluminum*. Soil Science, 70, 257-271.

HASEMAN, J.F., LEHRn J.R. and SMITH, J.P. (1951). *Mineralogical character of some iron and aluminum phosphates containing potassium and ammonium*. Soil Science Society of America Proceedings, 15, 76-84.

HERRMANN, L., SPONHOLZ, B. et STAHR, K. (1994). *Quellregionen für den Harmattan-Staub in Westafrika : ein mineralogischer und geochemischer Ansatz.- Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 73 : 367-370.*

HILL, C.A. et FORTI, P. (1986). *Cave minerals of the world*. National Spel. Society, USA, p. 98.

HILL, C.A. et FORTI, P. (1997). *Cave minerals of the world*. National Spel. Society, USA, 2nd ed., p. 335.

HINGSTON, F.J. (1962). *Activity of polyphenolic constituents of leaves of Eucalyptus and other species in complexing and dissolving iron oxide*. Aust. J. Sci. Res., 1 : 63-73.

HOF, B. (1977). *Recherches Spéléologiques en Colombie 1977* d'après Chabert, 1980.

HUANG, W.H. et KELLER, W.D. (1970). *Dissolution of rock-forming silicate minerals in dilute organic acids*. American Mineralogist, 55, pp.2076-2094, d'après Thomas, 1994.

IITA (1975). *1975 Annual Report. Intern Instit. For Tropical Agriculture*. Ibadan, Nigeria, d'après Thomas, 1994.

INAGAKI, F., HAYASHI, S., DOI, K., MOTOMURA, Y., IZAWA, E. et OGATA S. (1997). *Microbial participation in the formation of siliceous deposits from geothermal water and analysis of the extremely thermophilic bacterial community*, FEMS Microbiol. ECOL. 24/41-48.

INGLESE, M. et TOGNINI, P. (1993). *Auyantepuy : The Devil's mountain, Estado Bolivar, Venezuela*. International Caver nr. 6, January 1993 : 3-10.

JENNINGS, J.N. (1967). *Further remarks on the Big Hole, near Braidwood, New South Wales*. Helictite, 6 : 3-9.

JENNINGS, J.N. (1968). *Cave and karst terminology*. Speleo Handbook. Austral. Speleol. Fed. (<http://wasg.iinet.net.au/termcp.html>).

JENNINGS, J.N. (1976). *A test of the importance of cliff-foot caves in tower karst development*. Z. Geomorph., supplementary issue, 26, 92-7.

JENNINGS, J.N. (1985). *Some karst areas of Australia*. Karst in Australia, Landform Studies 12 : 256-293.

JENNINGS, J.N. (1987). *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell Ltd., 2ème éd., 79-80.

JOYCE, E.B. (1974). *The sandstone caves of Mt Moffatt Station, Southern Queensland, Australia. Speleogenesis, cave deposits and aboriginal occupation*. Abh. 5. Int. Kongr. Speläol. Stuttgart 1969 (München). 2 : 5 2/1-11.

JUNIPER, S.K. et FOUQUET, Y. (1988). *Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites*. Canadian Mineralogist, 26 : 859-869.

JUNIPER, SK., MARTINEU, P., SARRAZIN, J. et GELINAS, Y. (1995). *Microbial-mineral floc associated with nascent hydrothermal activity on CoAxial Segment, Juan de Fuca Ridge*. Geophys. Res. Letters, 22:179-182.

KARMANN, I. (1986). *General characterization and genetic aspects of the sandstone cave "Refugion do Maroaga", Amazonas*. Espeleotema nr. 15 : 9-18.

KASTNING, E.H. (1977). *Karst landforms and speleogenesis in Precambrian Granite, Llano County, Texas, USA*. Proc. 7th Int. Speleol. Congr. (Sheffield). : 253 - 255.

KATZER, F. (1909). *Karst und Karsthydrographie*. In Zur Kunde der Balkanhalbinsel H 8, Sarajevo, d'après Choppy, 1988.

KELLER, P. (1982). *Karst im Granit ?* Reflektor 3 : 22-23.

KEMPE, St. et HALLIDAY, R. (1997). *Report of the Discussion on Pseudokarst*. Proceed. of the 12th Inter. Congress. of Speleol., Switzerland, Vol. 6, p. 107.

KIEFT, T.L. et PHELPS, T.J. (1997). *Life in the slow lane :activities of microorganismes in the subsurface*. In : Amy, P.S., Haldeman, D.L. (Eds). *The Microbiology of the Terrestrial Deep Subsurface*. CRC Press, Boca Raton, FL : 137-163, d'après Ehrlich, 1998.

KLITZSCH, E. (1970). *Die Strukturgeschichte der Zentralsahara*. *Geologische Rundschau*, 59/2 : 459-527.

KNUST, E. et WEBER, D. (1987). *Röhrenförmige Strukturen und Röhrenhöhlen im Sandstein*. *Karst u. Höhle* : 1986/87 : 103-110, 12 Abb.

KRAUSKOPF, K.B. (1956). *Dissolution and precipitation of silica at low temperatures*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 10 pp. 1-27, d'après Millot, 1964.

KRAUSKOPF, K.B. (1959). *The geochemistry of silica in sedimentary environments*. *Soc. Econ. Pal. Miner. Spec. Publ.*, 7, pp. 4-19, d'après Millot, 1964.

KRAUSKOPF, K.B. (1967). *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill, New York d'après Thomas, 1994.

KRONBERG, B.I., FYFE, W.S., MCKINNON, B.J., COUSTON, J.F., FILHO, N.S. et NASH, R.A. (1982). *Model for bauxite formation : Paragominas (Brazil)*. *Chemical Geology*, 35 :311-320.

KUCZYNSKI, M. (1976). *Sarisarinama 1976 (sandstone caves)*. *Taternik (Warszawa)*. 3(232) : 123-128.

La Géographie (1910), XXI d'après Chabert 1980.

LANG, J., KOGBE,C., ALIDOU, S., ALZOUMA,K.A., BELLION,Y., DUBOIS, D., DURAND, A., GUIRAUD, R., HOUESSO, A., DE KLAZ,I., ROMANN, SALARDCHEBOLDAEFF, M. et TRICHET, J. (1990). *The Continental Terminal In West Africa*. *J. Af. Earth Sc.*, 10 : 79-99.

LE BRET, M. (1976). *Merveilleux Brésil souterrain*. p. 213.

LE BRET, M. et SLAVEC, M. (1962). *Spelunca*, 3, d'après Chabert, 1980.

LEHMAN, D.S. (1963). *Some principles of chelation chemistry*. *Soil Science Society of America Proceedings*, 27, pp. 167-170 d'après Thomas, 1994.

LEHMAN, H. (1954). *Der tropische Kegelkarst auf der grossen Antillen*. *Ertkunde* 8, 130-139, d'après White, 1988.

LEHMAN, H. (1956). *Karstmorphologische, geologische und botanische Studien In der Sierra de Los Organos, auf Cuba*. *Erdkunde* X, 185-204, d'après Choppy, 1988.

LINTON, D.L. (1955). *The problem of tors*. *Geographical Journ.*, 121:163-179.

LIPS, B. (1995a). *Spéléologie au Cameroun - Gouffre de Mbilibekon (Trou des Fantômes)*. *Echo des Vulcains*, 51, : 24-30.

LIPS, B. (1995b). *Spéléologie au Cameroun*. *Echo des Vulcains*, 52 : 18-37.

LIPS, B. et VICAT, J.P.(1998). Phénomènes karstiques dans les grès de Garoua (Nord-Cameroun). Géosciences au Cameroun, Vicat J.P. et Bilong éd., collect. GEOCAM 1/1998, Press. Univ. Yaoundé :101-106.

LLOPIS LADO, N. (1979). *Dundamentos de hidrogeoloia carstica*. Ed. Blume, Madrid, XII, 269 p. d'après Choppy, 1988.

LÖFFLER, E. (1978), *Karst features in igneous rocks in Papua New Guinea*. D'après Landform Evolution in Australia (ed. J.L. Davies et M.A.J. Williams), pp. 238-249 A.N.U. Press, Canberra, d'après Thomas, 1994.

LOUMPET, G., 1994. *Peuplement et environnement de l'homme en zones forestière et post-forestière du Cameroun au début du Pléistocène*. Atelier national : "Etat de la recherche archéologique au Cameroun. Bilan et perspectives", 24 et 25 novembre 1994, p. 14.

LUCAS, Y., BOULET, R., CHAUVEL, A., VEILLON, K., 1987. Systèmes sols ferrallitiques-podzols en région amazonienne. In Podzols et Podzolisation (ed. D. Righi & A. Chauvel), pp. 53-65, Comptes Rendus de la Table Ronde International, Asso. Franç. Pour l'Etude du Sol, INRA/ORSTOM, Poitiers.

LUCAS, Y., BOULET, R., CHAUVEL, A., 1988. Intervention simultanée des phénomènes d'enfoncement vertical et de transformation latérale dans la mise en place de systèmes sols ferrallitiques-podzols de l'Amazonie Brésilienne. C.R. Académie des Sciences, Paris, Série II, 306, 1395-1400.

MACHENS, M. (1967). *Notice explicative sur la carte géologique du Niger Occidental à l'échelle 1 : 200 000*, Minis. TP, Transp et Urb., Niamey, 35 p.

MACHENS. M. (1973). *Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger*, Mém. B.R.G.M., 82, 168 p.

MAINGUET, M. (1972), *Le modèle des grès : problèmes généraux*. Paris : Inst. Geogr. Nat., d'après Ford et Williams, 1989.

MAIRE, R., (1980). *Eléments de karstologie physique*. Spelunca, Bull. et Mém. Soc. Spéléol. (1) 52, 149-75, d'après Choppy, 1988.

MALEY, J. (1987). *Fragmentation de la forêt dense humide africaine et extension des biotopes montagnards au Quaternaire récent : nouvelles données polliniques et chronologiques. Implications paléoclimatiques et biogéographiques*. Palaeoecology of Africa, 18 : 307-334.

MALEY, J. (1990). *L'histoire récente de la forêt dense humide africaine : essai sur le dynamisme de quelques formations forestières*. D'après Lanfranchi et Schwartz éd., Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique, coll. Didact. ORSTOM : 67-389.

MALEY, J. (1991). *The African rain forest vegetation and paleoenvironments during late Quaternary*. Climatic Change, 19 : 79-98.

MALEY, J. (1992). *Mise en évidence d'une péjoration climatique entre ca. 2500 et 2000 B.P. en Afrique tropicale humide*. Bull. Soc. géol. France, 163, 3 : 363-365.

MALEY, J. et BRENAC, B. (1998). *Les variations de la végétation et des paléoenvironnements du Sud Cameroun au cours des derniers millénaires. Etude de l'expansion du palmier à huile. Géosciences au Cameroun*. Eds. Vicat et Bilong, coll. Géocam 1/1998, pp 85-97.

MAMET, B. and BOULVAIN, F. (1988). *Remplissages bactériens de cavités biothermales frasniennees*. Bull. Soc. Geol. Belg., T. 97, Fasc.1 : 63-76.

MARECHAL, B. (1996). *Modélisation de la cimentation des Sables de Fontainebleau*. D.E.A. Méthodes quantitatives et modélisation des bassins sédimentaires. Centre d'Info. Géol., Lab. d'Hydrogéol. Math., Ec. Nation. Sup. des Mines de Paris, 58 p.

MARESCAUX, M.G. (1973). *Les grottes du Gabon Nord-Oriental : un karst dans l'oxyde de fer et la silice*. Bull. Ass. Géogr. Franç. (Paris), N° 140 : 607-618.

MARKER, E. et SWART (1995). *Pseudokarst In the Western Cape, South Africa : its paleoenvironmental significance*. Cave and karst science, Vol. 22, N°1, Augustus 1995, 31-38.

MARKER, M.E. (1976). *Note on some South African Pseudokarst*. Bol. Soc. venez. Espeleol. (Caracas). 7 (13). : 5-12.

MARTEL, E.A. (1904). C.R.Acad. Sc. du 22.02.1904 d'après Chabert 1980.

MARTEL, E.A. (1930). *Des Ardennes aux Pyrénées*. Ed. Paris, 306 p.

MARTINEZ M. F. (1990). *Camerun*. SUBTERRANEA 5 : 36-41.

MARTINI, J. (1981). *The control of karst development with reference to the formation of caves In poorly soluble rocks in the Eastern Transvaal, South Africa*. Proceed, 8th intern. congress speleol. Bowling Green 1981, vol. 1 : 4-5.

MARTINI, J. (1985). *Caves of South Africa*. Karstologia, N° 5 : 39-43.

MARTINI, J. (1987). *Les phénomènes karstiques des quartzites d'Afrique du Sud*. Karstologia N° 9, 1987, 1er semestre 1987 : 45-52.

MASOTTI, D. (1979). *Etude d'une cavité creusée dans les quartzites : la grotte des Nains (Nax, Valais)*. Actes 6e congr. Suisse Spéléol. Porrentruy 1978 : 235-238.

McFARLANE, M.J.(1976). *Laterite and landscape*. Acad. Press. London, 151 p.

McFARLANE, M.J. (1985). *Some aspects of kaolinite dissolution by a laterite-indegenous microorganism*. Geo. Eco. Trop., 8:73-91.

McFARLANE,, M.J. et TWIDALE, C.R. (1987). *Karstic features associated with tropical weathering profiles*. Z Geomorph. N.F., Suppl.-Bd 85, juin : 73-95.

McGRAW-HILL (1991). *Dictionary of Earth Science*. S. P. PARKER ed, p. 505 et 536.

MEDVILLE, D.M. et MEDVILLE, H.E. (1997). *Recent exploration of lava tube systems in Kona*

and on Mauna Loa, Hawaii. Proceed. of the 12th Inter. Congres. of Speleol., Switzerland, symp. 8, Karst Geomorphology/1 : 457-459.

MEYSSONNIER, M. (1982). *Inventaire préliminaire des cavités du département de Haute-Loire*. S.C.V. Activités n°43 (éd. 1922) : 41-67.

MICHEL, J.-P. et FAIRBRIDGE, R.W. (1992). *Dictionnaire des Sciences de la Terre, anglais/français-français/anglais*. Ed. Masson & Wiley, 2<sup>ème</sup> éd., 299 p.

MICHEL, R. (1991). « *Le karst tropical humide. Essai de synthèse. L'exemple du Zaïre* ». Bull. Soc. Géogr. de Liège, 27 :3-22.

MILLOT, G. (1964). *Géologie des argiles, Altérations-Sédimentologie-Géochimie*. Ed. Masson et Cie, 499 p.

MINIS. MIN. ENERG. INDUS. ET ART., D.R.G.M. (1992), *Mise en exécution du plan de développement minéral du Niger, Moyenne Sirba, Liptako, Phase III*, Rap.Tech. Vol.1, Niamey : 4.26-4.44.

MORTIMER, R.J.G. et COLEMAN, M.L. (1997). *Microbial influence on the oxygen isotopic composition of diagenetic siderite*. Geochim. Cosmochim. Acta 61 : 1705-1711 d'après Ehrlich, 1998.

MOURET, C. (1981). *Une grotte naturelle dans les gneiss : le cro de Jovi (Château-Chervix, Haute-Vienne)*. Bull. G.S.C. info n° 5 : 24-27.

MULLAN, G.J.(1989). *Caves in the Fell sandstone of Northumberland*. Proc. Univ. Bristol Spelaeol. Soc. 18(3) : 430-437.

MUNTHE, J. (1975). *Eastern Nepal : Caves and cave potential*. Bull. Brit. Cave Research Ass. (Bridgwater). 8 : 21-23.

NAHON, D. (1976). *Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence*. Thèse doct. es sc., Univ. Marseille - Saint-Jérôme, 232 p.

NDAM, J., BRAUN, J.J., MEYBECK, M. et BEDIMO BEDIMO, J.P. (1998). *Réactualisation des données hydroclimatologiques des bassins fluviaux de la Sanaga et du Nyong (Sud-Cameroun)*. Géosciences au Cameroun, Vicat J.P. et Bilong éd., collect. GEOCAM 1/1998, Press. Univ. Yaoundé : 51-64.

NEDELEC, A., GREGOIRE, V. et RALINSON, B. (1996). *Une équipe franco-malgache au sommet des syénites d'Andringitra*. Géochronique : 57-100, d'après Vicat et Willems, 1997.

NEDELEC, A., MACAUDIERE, J. NZENTI, J.P. et BARBEY, P. (1986). *Evolution structurale et métamorphique de la série de Mbalmayo (Cameroun). Implications pour la structure de la zone mobile panafricaine au contact du craton du Congo*. C.R. Acad. Sci. Paris, 303 : 75-80.

NICOD, J. (1985). *Observations inédites*, d'après Choppy, 1988.

NOTT, J.F. et RYAN, P. (1996). *Large-scale, subcircular, depressions across western Arnhem*

*Land interpreted as exhumed giant lunate current ripples.* Aus. J. Earth Sci., 43 : 139-145, d'après Wray, 1997.

OKAMOTO, G., OKURA, T. et GOTO, K. (1957). Properties of silica in water. Geochim. Cosmochim. Acta, 12, pp. 123-132, d'après Millot, 1964.

OLLIER, C.D. (1965). *Some features of granite weathering in Australia.* Z. Geomorph. 9 : 285-304.

ONG, H.L., SWANSON, V.E. et BISQUE, R.E. (1970). *Natural organic acids as agents of chemical weathering.* In *Geological Survey Research 1970*, US Geological Survey Professional Paper 700-C, pp. C130-137.

OUSMANE, B., FONTES, Ch., ARANYOSSY, J.-F. et JOSEPH, A. (1984). *Hydrologie isotopique et hydrochimie des aquifères discontinus de la bande sahélienne et de l'Air (Niger).* I.A.E.A. – SM – 270/59 : 81-109.

OZER, A. (1971). *Les phénomènes karstiques développés dans le Poudingue de Malmédy.* Ann. Spéléol., 26 : 407-422.

PARKER, G.G. (1963). *Piping, a geomorphic agent in land development in drylands.* Intern. Assoc. of Sc. Hydrol, Pub., 65 : 103-114, d'après Thomas, 1994.

PARKER, G.G. et JENNE, E.A. (1967). *Structural failure of western US highways caused by piping.* Report US Geol. Survey Water Ressource Div. , Washington, d'après Thomas, 1994.

PARKER, G.G. Sr. et HIGGINS, C.G. (1990). *Piping and pseudokarst in drylands with case studies by Parker, G.G. r. and Wood. W.W. : 77-110* in Higgins, C G et Coates, D.R. (eds), *Groudwater Geomorphology : The role of Subsurface Water in Earth-Surface Process.*

PEDERSEN, K. et EKENDAHL, S. (1992). *Microbiology Ecology.* J. Gen. Microbiol., 138, d'après Stevens et McKinley, 1995.

PEDRO, G. et DELMAS, A.B. (1979). *Regards actuels sur les phénomènes d'altération hydrolytique. Leur nature, leur diversité et leur place au cours de l'évolution géochimique superficielle.* Cah. ORSTOM, Ser Pédol. 18 : 217-234, d'après Thiry, 1997.

PENAYE J., TOTEU S.F., VAN SCHMUS W.R., NZENTI J.P. (1993), *U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaoundé series, Cameroon; re-interpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the "Centrafican" belt.* C.R. Acad. Sci. Paris, t. 317, Série II :789-794.

PENK, A. (1924). *Das unterirdischen Karstphenomen.* Zbornik Radova Poxecen Jovann Cvijicu, éd. P. Vujevic, Belgrade, 175-197, d'après Choppy, 1988.

PEREZ, R.C. et GROSSI, W. (1986). *The quatzitic speleological districto of the Parque Florestal Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brazil.* Communications 9. Congr. intern. espel. Barcelona 1986; vol. 2 : 12-14 (savn. summ.).

PEYROT, B. (1997). *Phénomènes karstiques et pseudo-karstiques dans les quartzites du Burundi.* Karstologia, 29, 1/1997 : 7-16.

PHELPS, T.J, RAIONE, E.G. et WHITE, D.C. (1989). *Microbial Activities in Deep Subsurface Environments*. Geomicrob. J., 79-91.

PIA, J. (1927). *Thallophyta*. D'après : Hirmer, M (ed.) : Handbuch der Paläobotanik 1 : 31-136.

PNUD (1990). *Atlas des ressources en eaux souterraines du Continental Terminal*. Min. Hydraul. Environ., Dir. Ressources en Eau, Niamey, Projet PNUD/DCTD -NER86/001, 42 p. + cartes.

POUCLET, A., PROST, A.E. AMA-SALAH, I. et LAPIERRE, H. (1990). *Les ceintures birimiennes du Niger occidental (Protérozoïque inférieur), nouvelles données pétrologiques et structurales des formations métavolcaniques*. C.R. Acad. Sci., Paris, 311, Sér. II : 333-340.

POUYLLAU, M. et SEURIN, M. (1985). *Pseudo-karst dans des roches grésos-quartzitiques de la formation Roraima*. Karstologia n°5, p. 45-52.

QUINLAN, J.F. (1966). *Classification of karst and pseudokarst types : a review and synthesis emphasising the North American literature, 1941-1966*. Paper to the 123rd Meeting of the Amer. Assoc. for the Advancement of Science, Symp. 25 years of American Sp.

RADIER, H. (1959). *Contribution à l'étude géologique du Soudan oriental (A.O.F.). Le bassin crétacé et tertiaire de Gao. Le détroit soudanais*. Bull. Serv. géol. prosp. min., Dakar, 26, 550 p.

RASMUSSEN, G. (1959). *Karstformen im Granit des Fichtelgebirges*. Die Höhle 10/1 : 1-4, marz 1959.

RAYOT, V., SELF, P. et THIRY, M. (1992). *Transition of clay minerals to opal-CT during ground-water silicification*. In *Mineralogical and geochemical records of paleoweathering*, Schmitt & Gall (eds). ENSMP Mém. Sc. de la Terre, 18 : 47-59.

REEVE, T. (1982). *Oldbury Rock Shelters, natural caves in sandstone at Ightham, Kent*. Caves et Caving nr. 16 : 27.

REEVES, R.H. (1997). *Phylogenetic analysis and implications for subsurface microbiology*. In : Amy, P.S., Haldeman, D.L. (Eds). *The Microbiology of the Terrestrial Deep Subsurface*. CRC Press, Boca Raton, FL : 165-183, d'après Ehrlich, 1998.

REICHELDT, R. (1972). *Géologie du Gourma*. Mém. B.R.G.M., 53 : 213 p.

RENAULT Ph. (1953). *Caractères généraux des grottes gréseuses du Sahara méridional*. 1er Congrès Intern. de Spéléol. 2/1 : 275-289.

RENAULT, R.W., JONES, B. et TIERCELIN, J-J. (1998). *Rapid in-situ silicification of microbes at Loburu hot springs, Lake Bogoria, Kenya Rift Valley*. Sedimentology, 45 : 1083-1103.

ROBINSON, D.A. et WILLIAMS, R.B.G. (1992). *Sandstone weathering In the High Atlas, Morocco*. Z. Geomorphol. N.F., 36 : 423-439.

RODIN, L.E. et BASILEVIC, N.I. (1967). *Production and Mineral Cycling in Terrestrial Vegetation*. Oliver and Boyd, Edingburgh, d'après Thomas, 1994.

- RODRIGUEZ, M. V. (1992). *Formacions en cavitades graniticas*. Furada 6 : 41-43.
- ROMERO, E. A. et DE LIMA, M. (1989). *The Itacolomi quartzite karst, Minas Gerais, Brazil : application of the underground drainage direction prediction method*. Proceed. Intern. Congr. Speleol., Budapest 1989; vol. 2 : 476-480.
- ROY, C.J. (1945). *Silica in natural waters*. Amer. Journ. Sci., 243, pp. 393-403.
- RUBBIOLI, E.L. (1998). *Into the "Devil's throat", Gruta do Centenário - the world's deepest quartzite cave*. The international Caver (22)., 19-24.
- SCHOELLER H. (1962) . - Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et valuation des ressources.- Paris : Masson, 642 p. : 187 fig.
- SCHWARTZ, D. (1992). Assèchement climatique vers 300 B.P. et expansion bantu en Afrique centrale atlantique; quelques réflexions. Bull. Soc. géol. de France, 163/3 : 353-361.
- SELF, C.A. et MULLAN, G.J. (1996). *Redefining the boundary between karst and pseudokarst*. Cave and Karst Science, Vol. 23 (2) : 63-70.
- SELLA, R. (1976). *Zona di Boccioleto-primo aggiornamento catastale*. Orso Speleo. Biellese (biella) 4(4) : 33-39.
- SHANNON, C.H.C (1975). *Pseudokarst caves In duricrust/granite terrain, Banana Range, Central Queensland*. Proc. 10th Bienn. conf. Austrl. Speleo. Fed., 20-24, Brisbane.
- SHAW, P. (1980). *Cave development on a granite inselberg, South Rupununi Savannas, Guyana*, Z. Geomorph. N.F., 24/1 : 68-76.
- SHOPOV, Y. (1990). *Unusual caves In the Garhwal Himalaya*. 4th pseudokarst symposium proceedings, Praha, 1990 : 134-137.
- SIGHA-NKAMDJOU, L., ORANGE, D., SIGHOMNOU D., SEYLER, P., NIA, P. ET NAAH, E. (1998). *Physico-chimie des précipitations en milieu forestier sud-camerounais*. Géosciences au Cameroun, coll. Géocam 1/1998, Presses Univ. de Yaoundé, pp 41-50.
- SILVERMAN, M.P. et EHRLICH, H.L. (1964). *Microbial formation and degradation of minerals*. Adv. Appl. Microbiol. 6 : 153-206, d'après Ehrlich, 1998.
- SILVESTRU, E. (1990). *Propositions pour une classification lithogénétique des formes karstiques et apparentées*. Karstologia, N° 15, 1er sem. : 55-57.
- SINCLAIR, J.L. et GHIORSE, W.C. (1989). *Distribution of Aerobic Bacteria, Protozoa, Algae, and Fungi in Deep Subsurface Sediments*. Geomicrobiol. Journ., 7:15-31.
- SJÖBERG, R. (1969). *A proposal for a classification system for Granitic Caves*. Abh. 5. int. Kongr. Speläol. Stuttgart (München), 2 : 5 2/ 25-28.
- SJÖBERG, R. (1982). *Sveriges längsta ubergsgrottan, Maj. 82. Grottan 17(2)*. : 9.

SJÖBERG, R. (1985). *An inventory of caves In the county of Västernorrland, N. Sweden*. 2. Symposium o Pseudokrasu, Janovicky u Broumova, 1985 : 71-79.

SJOGREN, G. (1965). *Gidea, Oernsköldsvik, Sweden*.

SMITH, A.R. et VENI, G. (1996). *Karst regions of Texas*. Texas Speleological Survey/NSS covention Brackettville, Texas [www.utexas.edu/depts/tnhc/.WWW/txkarst.htm](http://www.utexas.edu/depts/tnhc/.WWW/txkarst.htm).

SMITH, K.G. (1958). *Erosional processes and landforms in Badlands National Monument, South Dakota*. Geol. Soc. Amer. Bull. 69 : 975-1008, d'après White, 1988.

SPEL. EMILIANA (1976). mono. 1, d'après Chabert, 1980.

SPONHOLZ, B. (1987). *Silicate karst landforms of the southern Sahara (north-eastern Niger and southern Libya)*. Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd 85, Juin 1987 : 55-72.

SPONHOLZ, B. (1989). *Karsterscheinungen In Nichtkarbonatischen gesteinen der Östlichen Republik Niger*. Thèse, Wurzburg, 1989, 265 p.

SPONHOLZ, B. (1994 a). *Phénomènes karstiques dans les roches siliceuses au Niger Oriental*. Karstologia N° 23, 1/1994 : 23-32.

SPONHOLZ, B. (1994 b). *Silicate karst associated with lateritic formations (examples from eastern Niger)*. Catena 21 (1994). 269-278.

SROGLIC, J. (1957). *Quelques problèmes fondamentaux du karst*. L'information géographique, XXI, 1-12, d'après Choppy, 1988.

STEVENS, T.O. et McKINLEY, J.P. (1995). *Lithoautotrophic Microbial Ecosystems in Deep Basalt Aquifers*. Science, 270:450-454.

STRIEBEL, Th. (1987). *Die Sandsteinhöhlen im Kartenblatt 1 : 25000 6035 Bayreuth*. Mitteilungsheft der HFGB Höhlenforschungsgruppe Blaustein, Jg. 10, Nr.1, Juni 1987 : 5-34.

STRIEBEL, Th. (1991). *Granithöhlen am Prinzenfelsen/ Fichtelgebirge*. Mitteilungsheft der HFGB Höhlenforschungsgruppe Blaustein, Jg. 10, Nr.2, Augustus 1991 : 43-51.

STRIEBEL, Th. (1996a). *Sansteinhöhlen im südöstlichten Heinersreuther Forst und den angrenzenden Waldgebieten*. Mitteilungsheft der HFGB Höhlenforschungsgruppe Blaustein, Jg. 14, Nr.1, Juni 1996 : 9-24.

STRIEBEL, Th. (1996b). *Zehn Jahre Höhlenkataster Nordostbayern : ein Blick auf die bisherige Entwicklung*. Mitteilungsheft der HFGB Höhlenforschungsgruppe Blaustein, Jg. 14, Nr.1, Juni 1996 : 3-8.

SWEETMAN, T. (1990). *Caving In Zimbabwe*. ICRO News1 nr. 19 : 14 quartzite cave.

SZCZERVAN, E., URBANI, F. (1974). *Carso de Venezuela, Parte 4 : Formas carsicas en areniscas precamblicas del Territoria Federal Amazonas y Estado Bolivar*. Bol. Soc. venez. Espeleol. (Caracas). 5, (1) : 27-54, d'après Ford et Williams, 1989.

SZCZERVAN, E., URBANI, F. et COLVEE, P. (1977). *Cuevas y simas en cuarcitas y metalimolitas del grupo Roraima, Meseta de Guaiquinim, Estado Bolivar*. Bol. Soc. venez. Espeleol. (Caracas). 8, (16) : 127-154.

SZENTES, G. (1989). *Sandsteinhöhlen In Nigeria/Sandstone caves In Nigeria*. Edit. Höhlenforschergruppe Rhein-Main, Frankfurt 1989, Sonderheft N°. 2 : 3-35 Seiten.

TADEUSZ, D.R., SZEKELY, K. et ZAWIDZKI, P. (1976). *A Venezuelai Sarisarinama-Fennsik homokkoaknai*. Karszt és Barlang, 1976. évf. I-II. f.zet, p. 43-46, Budapest.

TCHAMENI, R. (1997). *Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Paléoprotérozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, craton du Congo)*. Thèse, Univ. Orléans, 365 p.,

TCHAMENI, R. et NSIFA, E.N. (1998). *Revue des données géochronologiques sur la partie nord-ouest du craton du Congo (groupe du Ntem), Sud-Cameroun*. Géosciences au Cameroun, Vicat J.P. et Bilong éd., collect. GEOCAM 1/1998, Press. Univ. Yaoundé : 351-359.

TCHAMENI, R., MEZGER, K., NSIFA, N.E. et POUCKET, A. (2000). *Neoarchean crustal evolution in the Congo craton : evidence from K-rich granitoids of the Ntem Complex, Southern Cameroon*. J. Afr. Earth Sc., 30:133-147.

TELL, L. (1974). *Höhlenphänomene In Granit und anderen kristallinen Urgesteinen*. Abh. 5. Int. Kongr. Speleol., Stuttgart 1969 (München) 2 : 3 p.

TELL, L. (1977). *Cave development In non-calcareous archean igneous rocks*. Proc. 7th Int. Speleol. Congr. (Sheffield). : 393.

THIRY, M. (1997). *Soils and Sediments. Mineralogy and Geochemistry*. Eds. PAQUET et CLAUER, Springer-Verlag, New York-Berlin :191-221.

THIRY, M. (1999). *Diversity of continental silicification features : examples from the Cenozoic deposits in the Paris Basin and neighbouring basement*. Spec. Publs int. Ass. Sediment., 27:87-127.

THIRY, M., DELAUNAY, A., DEWOLF, Y., DUPUIS, C., MENILLET, F., PELLERIN, J. et RASPLUS, L. (1983). *Les périodes de silicification au Cénozoïque dans le bassin de Paris*. (7), XXV:31-40.

THIRY, M., BERTRAND AYRAULT M. (1988). *Les grès de Fontainebleau : genèse par écoulement de nappes phréatiques lors de l'entaille des vallées durant le plio-quaternaire et phénomènes connexes*. Bull. d'info. des géol. du bassin de Paris, V. 25, n° 4 :25-40.

THIRY, M., BERTRAND AYRAULT M., GRISONI J.-Cl., MENILLET F. et J.-M. SCHMITT (1988). *Les Grès de Fontainebleau : silicifications de nappes liées à l'évolution géomorphologique du bassin de Paris durant le Plio-Quaternaire*. Bull. Soc. géol. France, (8), t. IV, n° 3 : 419-430.

THIRY, M. et MILNES, A.R. (1991). *Pedogenic and groundwater silcretes at stuart creek opal field, South Australia*. Journ. of Sedim. Petrol., Vol. 61, n° 1 : 111-117.

THIRY, M., SCHMITT, J.-M., RAYOT, V. et MILNES, A.R. (1995). *Géochimie des altérations des profils blanchis du régoélite tertiaire de l'intérieur de l'Australie*. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 320, série Iia : 279-285.

THOMAS, M.F. (1954). Swallow holes on the millstone grit and Carboniferous limestone of the South Wales Coalfield. *Geogr. J.*, 120 : 466-475 d'après Wray, 1996.

THOMAS, M.F. (1966), *The origin of bornhardts*. *Z. Geomorph. N.F.*- Berlin - Stuttgart, 10/478-480.

THOMAS, M.F. (1994). *Geomorphology in the Tropic*. Wiley ed., 460 p.

THRAILKILL, J., (1976). *Speleothems*. *Devonian Sedimentology*, 20 : 73-86.

TOTEU S.F., VAN SCHMUS W.R., PENAYE J., NYOBE J.B. (1994). *U-Pb and Sm-Nd evidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon*. *Precambrian Res.*, 67, p.321-347.

TRICART, J. (1972). *The landforms of the Humid Tropics, Forests and Savannas*. Longman, London, 306 p., d'après Wray, 1997.

TRULUCK, T.F. (1992). *Deepest and Longest Caves In Africa and Southern Africa and the Deepest Sandstone Caves in the World*. *Bull. South Africa Spel. Ass.* vol. 32/1991 : 99-101.

TRULUCK, T.F. (1994). *The sandstone shafts of the Chimanimani Mountains*. *Caves et Caving*, 15-18.

TRULUCK, T.F., KOLIASNIKOFF A, HARLEY, D., WARD, D.P. et AUCAMP, J.P. (1994). *The 1993 Chimanimani Expedition. The weathering of Quartzite + The formation of the Frontier Shafts*. *Bull. South Africa Spel. Ass.* vol. 34/1994 : 1-88.

TURCHINOV, I. (1997). *Cave minerals of the Western Ukraine*. *Proceed. of the 12th Inter. Congres. of Speleol.*, Switzerland, Vol. 1, Symp. 7 : *Phys. Speleol.* : 239-242.

TWIDALE, C.R. (1962). *Steepened margins of inselbergs from north-western Eyre Peninsula, South Australia*. *Z. Geomorph.*, 6 : 51-59.

TWIDALE, C.R. (1984). *So-called pseudokarst in granite*. *Bol. soc. venez. espel.* 21 : 3-12.

TWIDALE, C.R. (1987). *Sinkholes (Dolines) in lateritised sediments, Western Sturt Plateau, Northern Territory, Australia*. *Geomorphology* 1, 1 : 33-52.

TWIDALE, C.R. (1997). *Some recently developed landforms : climatic implications*. *Geomorphology*, 19 : 349-365.

TWIDALE, C.R. et BOURNE, J.A. (1975). *The subsurface initiation of some minor granite landforms*. *Journal of the geological Society of Australia*, Vol. 22, Pt. 4, 477-484, décembre.

TWIDALE, C.R., BOURNE, J.A. et VIDAL, R. (1999). *Bornhardt inselbergs in the Salt River Valley, south of Kellerberrin, Western Australia (with notes on a tessellated pavement In granite and pinnacles In laterite)*. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 82 : 33-49.

UGOLINI, F.C. et SLETTEN, R.S. (1991). *The role of proton donors in pedogenesis as revealed by soil solution studies*. Soil Science, 151, pp. 59-75, d'après Thomas, 1994.

URBANI, F. (1978). *Les karsts gréseux du Venezuela*. Spelunca (Paris). 18, 1) : 25-28.

URBANI, F. (1981). *Karst development In siliceous rocks, Venezuelan Guiana Shield*. Proceed, 8th intern. congress speleol. Bowling Green 1981 : 548.

URBANI, F. (1986). *Cavidades en rocas cuaríferas del grupo Roraima, Venezuela*. Communications 9, congr.intern. espel. Barcelona 1986; vol. 2 : 15-17.

URBANI, F. (1990). *Algunos comentarios sobre terminología karstica aplicada a rocas silíceas*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 24 : 5-6.

URBANI, F. (1993). *Quartzite caves in Venezuela*. Caves et Caving nr. 61 : 32-33.

URBANI, F. (1997). *Venezuelan cave minerals : a short overview*. Proceed. of the 12th Inter. Congress. of Speleol., Switzerland, Vol. 1, Symp. 7 : Phys. Speleol. : 243-246.

URBANI, F. et SZCZERBAN, E. (1975). *Formas pseudocarsicas en granito rapkivi precámbrico, Territorio Federal Amazonas*. Bol. Soc. Venez. espeleol. (Caracas). 6 (12). : 57-70.

URRUTIA, M.M. et BEVERIDGE, T.J. (1994). *Formation of fine-grained metal and silicate precipitates on a bacterial surface (Bacillus subtilis)*. Chemical Geology, 116 : 261-280.

VICAT, J.P., LEGER, J.M., AHMED, Y. et WILLEMS, L. (1994). *Les indices de déformation plio-quadernaire de la bordure occidentale du bassin des Iullemenden dans la région de Niamey (Niger)*. Rev. de Géogr Alpine (Grenoble), Au contact Sahara-Sahel, Milieux et Sociétés du Niger, V. 1 : 15-24.

VICAT, J.P., LEGER, J.M., LIPS, B., LIPS, J. et PIGUET, P. (1995). *La grotte de Mbilibekon. Un pseudokarst dans la couverture latéritique du craton du Congo (Ebolowa, Cameroun)*. Karstologia, 26 : 51-54.

VICAT, J.P., LIPS, B., POUCKET, A., LEGER, J.M. et WILLEMS, L. (1996). *Phénomènes pseudo-karstiques dans les roches plutoniques et métamorphiques du Sud du Cameroun*. Karstologia, N°29, 1/97 : 17-22.

VICAT J.P., WILLEMS, L et POUCKET, A (1998). *Phénomènes pseudo-karstiques et karstiques dans la couverture latéritique et le substratum plutono-métamorphique du Sud du Cameroun*. Géoscience au Cameroun, Vicat J.P. et Bilong P. éd., collect. GEOCAM, 1/1998, Press. Univ. Yaoundé I : 107-128.

VICAT, J.P. et WILLEMS, L. (1998). *Les karsts siliceux d'Afrique*. Géosciences au Cameroun, Vicat J.P. et Bilong éd., collect. GEOCAM 1/1998, Press. Univ. Yaoundé : 139-145.

VITEK, J. (1978). *Types of pseudokarst caves In Bohemia*. Ceskoslovensky Kras 30 : 17-28.

VITEK, J. (1979). *Pseudokarst phenomena In the Prachovske skaly (Rocks)*. Ceskoslovensky Kras 31 : 45-56.

VITEK, J. (1982). *Types of lapies In sandstones of the Bohemian Cretaceous Basin*. Ceskolov. Kras 32 : 41-50.

VITEK, J. (1983). *Classification of pseudokarst forms In Czechoslovakia*. Int. J. Speleol. 13 : 1-18 : (1985).

VITEK, J. (1987). *Pseudokarst forms in Carboniferous sediments northwest from Plzen*. Ceskoslov. Kras 38 : 125-127 (Czech.).

VITEK, J. (1987). *Pseudokrasové tvary v pískovcích kлокocských skal*. Kras 1987, n° 38, 71-85.

VITEK, J. (1989). *General short review of problems connected with the study of pseudokarst features in Czechoslovakia since the last symposium in 1982*. 2nd Symposium on pseudokarst. Proceedings of the symposium in Janovický near Broumov 1985. in Knih. Ces. speleol. spol., vol. 10 : 9-11.

VÖLKEL, J. (1989). *Geomorphologische und pedologische Untersuchungen zum jungquartären Klimawandel in den Dünengebieten Ost-Nigers (Südsahara und Sahel)*. Bonner Geogr. Abh., 79 : 258 S.

VON KNEBEL, W. (1906). *Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene*. Branschweig, Fried. Vieweg u. Sohn, 222 p.

WATSON, A., et PYE, K. (1985). *Pseudokarstic micro-relief and other weathering features on the Mswati Granite (Swaziland)*. Z. Geomorph. N.F., 29/3, september 1985 : 285-300.

WALL, J.R.D. et WILFORD, G.E. (1966). *A comparison of small-scale solution features on micro-granidiorite and limestone in West Sarawak, Malaysia*. Z. Geomorph. N.F., 1966/10 : 462-468.

WALEFFE, A. (1966). *Phénomènes karstiques dans les quartzites du Mont Nkoma (Burundi)*. De Africa Tervuren XII, 2 :44-47.

WALTER, M.R. (1976). *Stromatolites*. Developments in Sedimentology, 20, Elsevier, 790 pp.

WATSON, A. et PYE, K. (1985). *Pseudokarstic micro-relief and other weathering features on the Mswati Granite (Swaziland)*. Z. Geomorph. N.F., 29/3, september 1985 : 285-300.

WEBB, J.A. et FINLAYSON, B.L. (1984). *Allophane and opal speleothems from granite caves in south-east Queensland*. Aust. J. Earth Sci., 31 : 341-349 .

WEBER, D. (1987). *Der Studerbildschacht - ein Beispiel einer engen Klufthöhle im Buntsandstein*. Karst u. Höhle : 1986/87 : 117-119, 1 Taf.

WEIRICH, G. et SCHWEISFURTH, R (1985). *Extraction and culture of microorganismes from rock*. Geomicrobiol. J., 4 :1-20, d'après Sinclair et Giorse, 1989.

WEY, R. (1962), d'après Millot, 1964.

WEY, R. et SIFFERT, B. (1961). *Réaction de la silice monomoléculaire en solution avec les ions  $Al^{3+}$  et  $Mg^{2+}$* . Genèse et synthèse des argiles. Coll. Inter. C.N.R.S., 105, pp. 11-23, in Millot, 1964.

WHITE, D.C., FREDERICKSON, H.F., GEHRON, M.H., SMITH, G.A. et MARTZ, R.F. (1983). *The groundwater aquifer microbiota : Biomass, community structure and nutritional status*. Dev. Ind. Microbiol., 24 :189-199, d'après Sinclair et Ghiorse, 1989.

WHITE, D.C. et RINGELBERG, D.B. (1997). *Utility of signature lipid biomarker analysis in determining in situ viable biomass, community structure, and nutritional/physiological status of deep subsurface microbiota*. In : Amy, P.S., Haldeman, D.L. (Eds). *The Microbiology of the Terrestrial Deep Subsurface*. CRC Press, Boca Raton, FL : 119-136, d'après Ehrlich, 1998.

WHITE, W. B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, p.98.

WHITE, W.B., JEFFERSON, G.L. et HAMAN, J.F. (1966). *Quartzite karst In Southeastern Venezuela*. Int. Jour. Speleol., 2 : 309-314.

WILFORD, G.E. et WALL, J.R.D., 1965. *Karst topography in Sarawak*. J. Trop. Geogr., 21, 44-70, d'après Jennings, 1987.

WILLEMS, L. (1997), *Karsts siliceux au Niger occidental*. Proceedings of The 12th International Cong. of Speleo, Vol. I, Symp. 8 : Karst Geomorphology : 477-480.

WILLEMS, L., LENOIR, F., LEVECQ, J.M. et VICAT, J.P. (1993). *Evolution du relief au Niger occidental : rôle de la fracturation du socle précambrien et de la formation de pseudo-karsts au sein de la lithomarge et de la couverture sédimentaire*. C.R. Acad. Sc. de Paris, t. 317, Série II, p. 97-102.

WILLEMS, L. et BERGOEING, J.P. (1994), *Observations de coupes dans la terrasse T3 dans la vallée du Niger en aval de Niamey*. Rev. de Géographie Alpine (Grenoble), Au contact Sahara-Sahel, Milieux et Sociétés du Niger, Vol. 1 : 47-64.

WILLEMS, L., POUCKET, A., LENOIR, F. et VICAT, J.P. (1996), *Phénomènes karstiques en milieux non-carbonatés. Etudes de cavités et problématique de leur développement au Niger Occidental*. Z. Geomorph. N.F. - Berlin - Stuttgart, Suppl.-Bd 103 : 193-214.

WILLEMS, L., POUCKET, A. et VICAT, J.P. (1997), *Karst non carbonaté au Cameroun méridional. L'exemple des grottes de Mfoula*, Würzburger Geograph. Arb., 89, Würzburg, 14 p.

WILLEMS, L., COMPERE, Ph. et SPONHOLZ, B. (1998a), *Study of siliceous karst genesis in Eastern Niger. Microscopy and analysis of speleothems*. Z. Geomorph. N.F.- Berlin - Stuttgart, 42/2 : 129-142.

WILLEMS, L., COMPERE, Ph., SPONHOLZ, B. et VICAT, J.P (1998b). *Spéléothèmes des karsts siliceux du Niger et du Cameroun*. Géosciences au Cameroun, Vicat J.P. et Bilong éd., collect. GEOCAM 1/1998, Press. Univ. Yaoundé : 128-138.

WILLEMS, L., POUCKET, A., VICAT, J.P. et COMPERE, Ph. (1999a), *Phénomènes karstiques en roches non carbonatées au Cameroun méridional*. Poster présenté dans le cadre du Deuxième Congrès européen de Spéléologie, Lisbonne, Octobre 1999.

WILLEMS, L., COMPERE, Ph., HATTERT, F., BOULVAIN, F., VICAT, J.P. et POUCKET, A. (1999b). *Karst granitique au Sud Cameroun. Analyses de concrétions siliceuses coralloïdes et genèse d'une grotte*. Poster présenté dans le cadre du Deuxième Congrès européen de Spéléologie, Lisbonne, Octobre 1999.

WILLEMS, L., VICAT, J.P. et POUCKET, A. (2000), *Karst dans les micaschistes d'Akok Bekoé - Sud Cameroun*", Bull. Soc. Géogr. de Liège, sous-presse.

WIRTHMANN, A. (1966). *Die Reliefentwicklung von Neukaledonien*. Tagungsber. u. Wissenschaftl. Abhandl. des Dr. Geographen-Tages Boschum 1965, Wiesbaden : 323-325 d'après Busche et Erbe, 1987.

WIRTHMANN, A. (1970). *Zur Geomorphologie der Peridotite auf Neukaledonien*. Festschrift H. Wilhelmi, Tübinger Geograph. Studien 34:191-202 d'après Busche et Erbe, 1987.

WOJCIK, Z. (1961). *Caves in granite in the Tatra Mountains*. Actes 3, Congr. Intern. Spéol. (Salzburg), 43-44.

WOOLFOLK, C.A. et WHITELEY, H.R. (1962). *Reduction of inorganic compounds with molecular hydrogen by Micrococcus lactylyticus ; I. Stoichiometry with compounds of arsenic, selenium, tellurium, transition and other elements*. J. Bacteriol., 84 : 647-658, d'après Ehrlich, 1998.

WRAY, R.A.L. (1997). *A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones*. Earth-Sc. Rev. 42, 137-160.

WYART, J. (1995). Encyclop. Universalis, corpus 21, pp. 6-12.

WYATT, A. (1986). *Challinor's dictionary of Geology*. 6ème éd, Univ. of Wales Press, p. 174.

YOUNG, R. (1986). *Tower karst in sandstone : Bungle Bungle massif, northwestern Australia*. Z. Geomorph. N.F. 30(2) : 189-202.

YOUNG, R. (1988). *Quartz etching and sandstone karst : Examples from the East Kimberleys, Northwestern Australia*. Z. Geomorph. N.F. 32(4) : 409-423.

ZAWIDZKI, P., URBANI, F., EGM, UCV et KOISAR, B. (1976). *Preliminary notes on the geology of the Sarisarinama plateau, Venezuela, and the origin of its caves*. Bol. Soc. Venezolana Espel. 7(13). : 29-37.

ZIERENBERG, R.A. et SCHIFFMAN, P. (1990). *Microbial control of silver mineralization at a sea-floor hydrothermal site on the northern Gorda Ridge*. Nature, 348, 155-157.

ZILIO, C. et KARMANN, I. (1975). *Caverna em mica-xisto*. Espeleo, TE MM17, n°11, p 34.

---

## Annexe I - Analyses des eaux au Cameroun

### Matériels d'analyse

Le matériel d'analyse utilisé dans l'étude des eaux au Cameroun provient de la firme HACH Europe S.A. et comprenait :

- une valise DRELL 2000,
- un spectrophotomètre à lecture directe,
- un titrateur digital et ses réactifs
- un pHmètre digital,
- un turbidimètre,
- une sonde pour la mesure du sodium,
- un conductimètre

#### **DR/2000 Spectrophotometer**

##### **Model 45250**

##### **Optical System**

*Monochromator:* Littrow prism, aspheric optics

*Lamp:* Gas-filled tungsten

*Detector:* Silicon photodiode, UV enhanced

*Wavelength:* Range, 400–900 nm; Accuracy,  $\pm 2$  nm;  
Resolution,  $\pm 1$  nm

*Bandwidth:* at 600 nm,  $12 \pm 2$  nm

*Stray light:* <1.00% at 400 nm

*Photometric performance:* Linearity,  $\pm 0.002A$

(0–1A 500 nm, constant-on mode); Reproducibility,  
 $\pm 0.005A$  (0–1A, constant-on mode)

##### **Physical Specifications**

*Dimensions:* 22 × 24 × 11 cm (8.75 × 9.5 ×  
4.375")

*Weight:* 2 kg (4.4 lb)

*Power requirements:* Selectable 110/220V, 50/60Hz,  
6-battery "D" cell pack or optional rechargeable  
battery

*External outputs:* RS-232 serial, (printer optional)  
0–1V analog.

**Principales méthodes d'analyse des eaux utilisées dans ce travail (d'après le livre de la firme HACH « Water Analysis Handbook », 2<sup>ème</sup> édition, 1992, 831 p.)**

**ACIDITY**

For water, wastewater and seawater

**Titration Method**

**Introduction**

Acidity, a quantitative expression of water's capacity to neutralize a strong base to a designated pH, indicates how corrosive water is. Acidity is caused by weak organic acids, such as acetic and tannic acids, and strong mineral acids including sulfuric and hydrochloric acids. The most common source of acidity in unpolluted water is carbon dioxide in the form of carbonic acid.

Acidity is classified by the pH value of a titration end point. Acidity caused by mineral acids exhibits a pH below 4.5. Salts of certain metals, particularly those with trivalent iron and aluminum, may hydrolyze in water and also contribute to acidity.

*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (future reference: *Standard Methods*) recommends titration with sodium hydroxide to an end point pH of 3.7 to determine mineral acidity. Titrate to pH 8.3 to determine total acidity.

Acidity commonly is determined using methyl orange as a color indicator of the pH end point. Because methyl orange undergoes a color change from red to orange at a pH of 3.7, the results of the titration are termed methyl orange acidity. Each procedure for acidity use bromphenol blue indicator instead of methyl orange because the methyl orange color change is difficult to detect. The bromphenol blue indicator gives a sharp end point change from yellow to blue-violet.

Total acidity includes acidity caused by mineral acids, weak organic acids and carbon dioxide (in the form of carbonic acid). Acidity determined by titrating to a phenolphthalein end point pH of 8.3 corresponds to the neutralization of carbonic acid to bicarbonate. Because carbon dioxide is the major cause of acidity in natural waters, in most cases the phenolphthalein acidity is equal to the total acidity. Acidity tests can be performed using a pH meter to detect the end points. However, methyl orange acidity and phenolphthalein acidity are the terms used to describe the results. Results of the acidity tests are reported as mg CaCO<sub>3</sub>/L.

**Chemical Reactions**

Methyl Orange Acidity

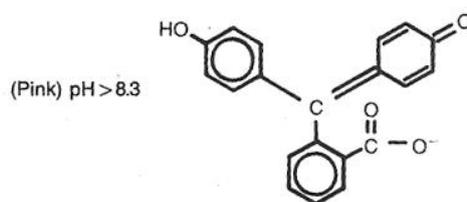
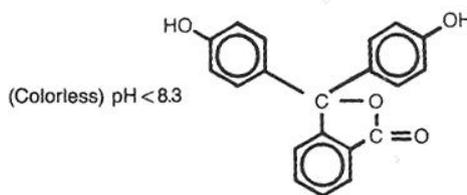


Phenolphthalein Acidity



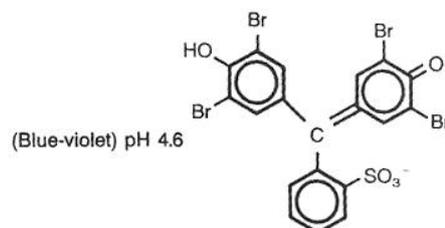
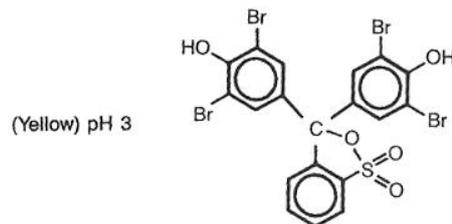
**Reactions of Indicators**

**Phenolphthalein**



**Bromphenol Blue**

3',3'',5',5''-Tetrabromophenolsulfonephthalein



# ALKALINITY

For water, wastewater and seawater

## Titration Method

### Introduction

Alkalinity is a measure of the capacity of water to neutralize acids. Alkalinity of water is due primarily to the presence of bicarbonate, carbonate and hydroxide ions. Salts of weak acids, such as borates, silicates and phosphates, also may contribute. Salts of certain organic acids may contribute to alkalinity in polluted or anaerobic water; but their contribution usually is negligible. Bicarbonate is the major form of alkalinity. Carbonates and hydroxide may be significant when algal activity is high and in certain industrial water and wastewater, such as boiler water.

Alkalinity is significant in the treatment processes for potable water and wastewater. The alkalinity acts as a pH buffer in coagulation and lime-soda softening of water. In wastewater treatment, alkalinity is an important parameter in determining the amenability of wastes to the treatment process and control of processes such as anaerobic digestion where bicarbonate alkalinity, total alkalinity and any fraction contributed by volatile acid salts become considerations.

Alkalinity is expressed as phenolphthalein alkalinity or total alkalinity. Both types can be determined by titration with a standard sulfuric acid solution to an end point pH, evidenced by the color change of a standard indicator solution. The pH also can be determined with a pH meter.

Phenolphthalein alkalinity is determined by titration to a pH of 8.3 (the phenolphthalein end point) and registers the total hydroxide and one half the carbonate present. Total alkalinity is determined by titration to a pH of 5.1, 4.8, 4.5 or 3.7, depending on the amount of carbon dioxide present. The total alkalinity includes all carbonate bicarbonate and hydroxide alkalinity.

The following end points are recommended for determining total alkalinity in water samples of various compositions and alkalinity concentrations:

Sample Trait	End Point
Alkalinity approximately 30 mg/L	pH 5.1
Alkalinity approximately 150 mg/L	pH 4.8
Alkalinity approximately 500 mg/L	pH 4.5
Silicates or phosphates known present or suspected	pH 4.5
Industrial waste or complex system	pH 3.7

### Chemical Reactions

Sulfuric acid (hydrochloric acid also may be used) reacts with the three forms of alkalinity converting them to water or carbonic acid. If hydroxide is present it reacts to form water:



This conversion usually is complete at a pH of about 10. Phenolphthalein alkalinity is determined by titration to an end point pH of 8.3, which corresponds to the conversion of carbonate to bicarbonate.

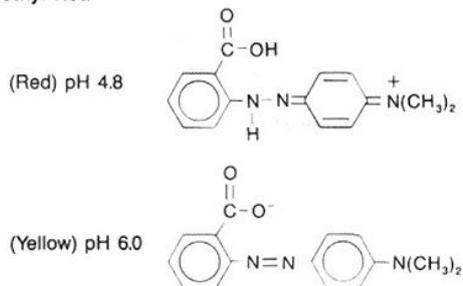


If hydroxide is present, titration to pH 8.3 will indicate the alkalinity due to all of the hydroxide plus one-half of the carbonate. Continued titration to pH 4.5 completes the conversion of carbonate plus any bicarbonate present to carbonic acid. This value is termed total alkalinity.

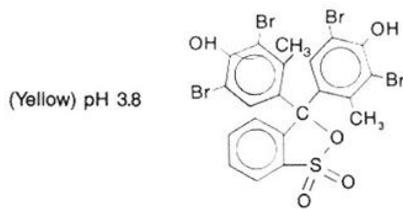
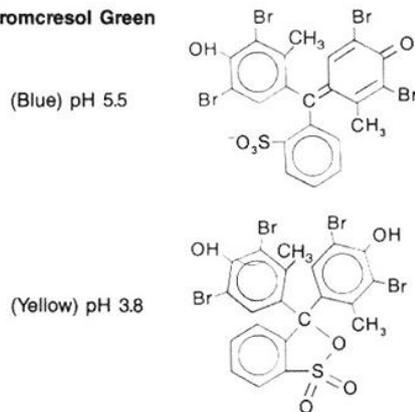


The color indicator traditionally used is methyl orange, hence total alkalinity sometimes is referred to as methyl orange alkalinity. Each procedure uses either bromphenol blue (see the acidity section) or a mixed indicator solution, bromocresol green-methyl red, for a more distinct end point color change. The mixed indicator goes through a series of color change from blue to pink in the pH region of interest.

### Methyl Red



### Bromocresol Green



**Aluminon Method**

**Introduction**

Aluminum, the earth's most abundant metal, is present in natural waters from contact with rocks, soil and clay. Alum coagulation in water clarification systems also may contribute to the aluminum content of treated water although only 20 to 50 µg/l. of aluminum remain in the finished product from a well-controlled operation.

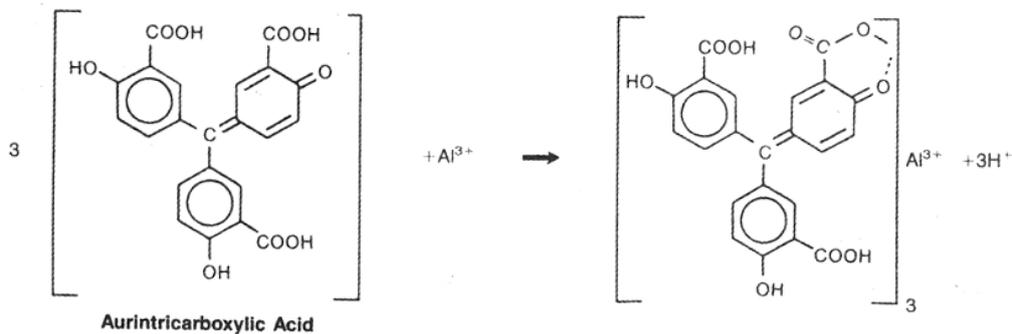
The Aluminon Method is one of the oldest and most thoroughly documented methods available for determining aluminum in water. The AluVer 3 Aluminum Reagent, packaged in powder pillow form, has exceptional stability.

**Chemical Reactions**

AluVer 3 is an aluminon reagent in combination with a pH buffer. AluVer 3 reacts with aluminum present in a sample to form a reddish-colored solution in direct proportion to the aluminum concentration.

**Reaction of AluVer 3 with Aluminum Ions**

Ascorbic acid is added prior to addition of AluVer 3 to eliminate interference due to iron. To establish a reagent blank, the sample is split after the addition of the AluVer 3 and Bleaching 3 Reagent is added to one-half of the split sample to bleach out the color of the aluminum aluminon.



**EDTA Titration and Calmagite Colorimetric Methods**

**Introduction**

Hardness in water is caused by dissolved minerals, primarily divalent cations including calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), iron ( $\text{Fe}^{2+}$ ), strontium ( $\text{Sr}^{2+}$ ), zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) and manganese ( $\text{Mn}^{2+}$ ). Calcium and magnesium ions usually are the only ions present in significant concentrations; therefore, hardness generally is considered to be a measure of the calcium and magnesium content of water. It should be understood that when other cations contributing to hardness are present in significant amounts they should be accounted for.

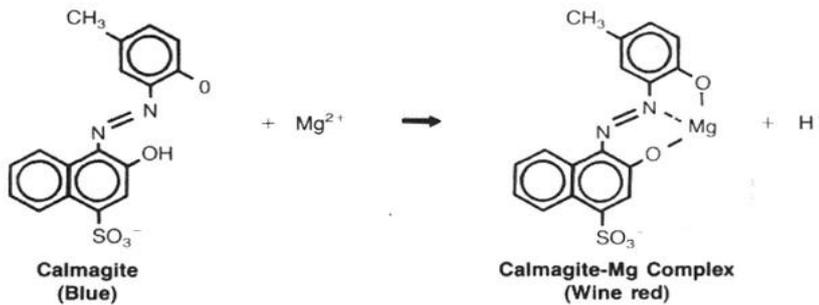
**Titration Methods**

Hardness in water can be determined quickly by titration and the use of color indicators. By proper choice of pH, total hardness ( $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ ) or the portion contributed by calcium and magnesium individually can be measured. The traditional test for hardness involves pH adjustment to 10.1 with an ammonium buffer, addition of Eriochrome Black T indicator [1-(1-hydroxy-2-naphthylazo)-6-nitro-2-naphthol-4-sulfonic acid] and then titration with  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  (ethylenediaminetetraacetic acid, disodium salt) solution.

**EDTA-Ethylenediaminetetraacetic Acid**



Some other indicators are more stable and give a faster reaction and more distinct end point than Eriochrome Black T. One of the best is calmagite, 1-(1-hydroxyl-4-methyl-2-phenylazo)-2-naphthol-4 sulfonic acid which is used in Hach total hardness tests.



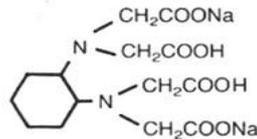
**Colorimetric Method**

The Colorimetric Method is for low level measurement of hardness. One benefit is that the interference of some metals with the Titration Methods will be rendered inconsequential when diluting the sample to bring it into the range of this test. Calmagite indicator and two chelating agents, EGTA and EDTA, are used in the test.

**Chemical Reactions: Total Hardness**

Several solutions including digital titrator cartridges are described in the following section for titrating prepared water samples containing calmagite indicator. TitraVer<sup>®</sup> Hardness Titrant, 0.020 N EDTA, is the most widely used. Other strengths of TitraVer Hardness Titrant are available for titrating high hardness samples. HexaVer<sup>™</sup> Hardness Titrant also is available. HexaVer is CDTA (cyclohexanediaminetetraacetic acid, disodium salt). It gives slightly sharper end points and can tolerate higher levels of iron interference than TitraVer.

**CDTA, disodium salt**



Calmagite indicator is available in special formulations as ManVer<sup>®</sup> and UniVer<sup>®</sup>. The ManVer formulations of calmagite have been specially prepared to enhance stability and they are free from most interferences. Interferences caused by metal ions such as copper or iron can be removed or masked by the use of magnesium salt of CDTA. It is effective yet

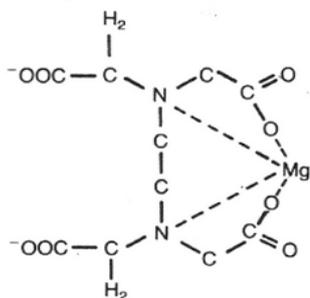
## HARDNESS, continued

safe to use. Cyanide compounds also may be used to overcome interferences. Their use is avoided where possible because of the hazards.

The reaction of calmagite is pH-dependent; it has been determined that a pH of 10.1 is ideal. Ammonia buffers have been used traditionally; however, they have a strong odor. Hach methods use Hardness 1 Buffer (2-amino-2-methyl-1-propanol) which is stable, safe to use and has a less objectionable odor.

The sequence of analysis in the hardness tests is: pH adjustment and addition of inhibitors followed by formation of the  $Mg^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  complexes with calmagite. The calcium forms a weak complex with calmagite at this pH. The solution is titrated with TitraVer (EDTA) or HexaVer (CDTA). The titrant first complexes any calcium, then magnesium. Color change from wine red to blue is an indication that all calcium and magnesium have been removed from the calmagite and complexed with the titrant.

### Magnesium Complexed with TitraVer



Expression of results of the hardness titration is mg/L as  $CaCO_3$ . The reaction of TitraVer with  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  is a 1:1 ratio.

## Chemical Reactions:

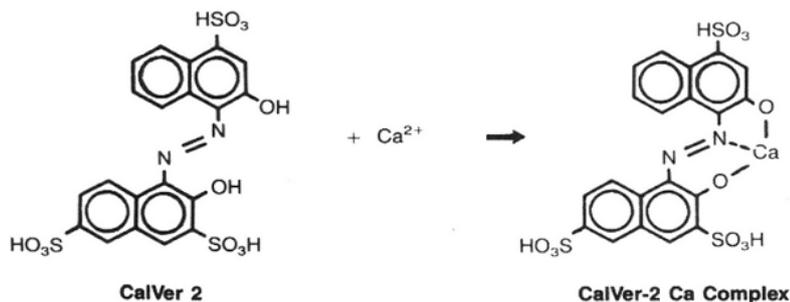
### Calcium Hardness

The test for calcium hardness is very similar to the total hardness test. Traditionally it has used murexide indicator (ammonium purpurate) or Eriochrome Blue-Black R indicator followed by titration with EDTA. CalVer<sup>®</sup> 2 Calcium Indicator has been developed by Hach to replace these indicators. CalVer 2, hydroxy naphthol blue, is more sensitive and has a sharper end point color change.

CalVer 2 Calcium Indicator forms a red-violet complex with calcium and changes to pure blue when TitraVer removes calcium from the complex. The pH is elevated to at least 13 to precipitate magnesium. A few drops of Magnesium Standard Solution may be added to the reaction to sharpen the end point color change. This may seem inconsistent because magnesium is caused to precipitate by the elevated pH. The added magnesium is chelated preferentially by the dye. However, the quantity of chelated magnesium is very small; thus any error caused by addition of magnesium is negligible.

pH adjustment is accomplished by addition of potassium hydroxide prior to addition of CalVer 2. Potassium cyanide also may be added to complex interfering metals prior to addition of CalVer2.

Calcium hardness and total hardness may be determined sequentially using the same sample. After the calcium hardness is determined the sample pH can be adjusted downward, using sulfuric acid. Then Hardness Buffer 1 and ManVer 2 are added and titration with TitraVer is resumed. This procedure can not be used if potassium cyanide has been used in determining calcium hardness! The addition of sulfuric acid would then cause deadly hydrogen cyanide gas to evolve.



## HARDNESS, continued

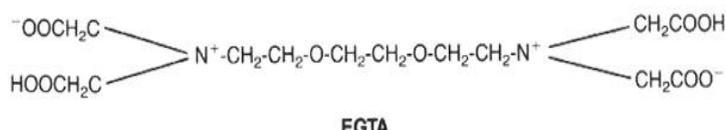
### Chemical Reactions: Colorimetric Method

Calmagite, contained in Calcium and Magnesium Indicator Solution, is added to a sample and the pH is elevated to about 12.5—using a buffer. Adding calmagite prior to pH adjustment prevents the calcium and magnesium precipitation that ordinarily would occur at this elevated pH. The sample is then split into three equal portions.

EDTA is added to the first portion to sequester calcium and magnesium, thus breaking the Ca- and Mg-calmagite complexes. This solution is used as a zero reference blank to standardize the spectrophotometer.

EGTA, ethyleneglycol-bis (2-aminoethylether)-N,N,N',N'-tetraacetic acid, is added to the second sample portion. EGTA selectively chelates calcium under conditions of the test. Thus, only absorbance due to the Mg-calmagite complex remains to be measured. The result is expressed as mg/L Mg as CaCO<sub>3</sub>. After measurement, the spectrophotometer is adjusted to read "zero" on this portion.

Absorbance of the third sample portion (containing no chelant) is measured to determine mg/L Ca as CaCO<sub>3</sub>. Absorbance due to magnesium in the sample was compensated for by adjusting the spectrophotometer to a reading of zero after measurement of the second sample portion.



## IRON

For water and seawater

### 1,10-Phenanthroline, FerroZine, TPTZ and Titration Methods

#### Introduction

Natural waters contain variable but minor amounts of iron despite its universal distribution and abundance. Iron in ground waters normally is present in the ferrous (Fe<sup>2+</sup>) or soluble state, which oxidizes easily to ferric (Fe<sup>3+</sup>) iron on exposure to air. Iron can enter a water system by leaching natural deposits and from iron-bearing industrial waters, effluents from pickling operations or acidic mine drainage.

Iron in domestic water supply systems stains laundry and porcelain, causing more of a nuisance than a potential health hazard. Taste thresholds of iron in water, 0.1 mg/L Fe<sup>2+</sup> and 0.2 mg/L Fe<sup>3+</sup>, result in a bitter or astringent taste. Water used in industrial processes usually must contain less than 0.2 mg/L of total iron.

Three methods of colorimetric iron analysis are used in Hach procedures. The 1,10-Phenanthroline Method is the best-known test for iron. The Fe<sup>2+</sup> procedure uses Ferrous Iron Reagent Powder containing 1,10-Phenanthroline as an indicator. Total iron measurement uses FerroVer<sup>®</sup> Iron Reagent, 1,10-Phenanthroline combined with a reducing agent, to convert all but very resistant forms of iron present in the sample to Fe<sup>2+</sup>.

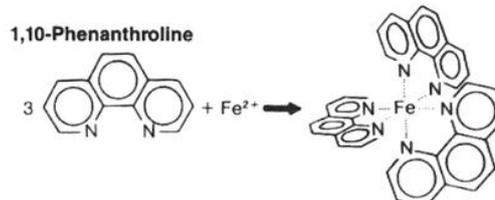
The FerroZine<sup>®</sup> Method for total iron is more than twice as sensitive as the 1,10-Phenanthroline Method. Researchers at Hach have patented a process to manufacture high purity FerroZine in economical quantities. FerroZine Iron Reagent, ideal for iron measurement, is highly specific for iron, forms an intensely colored complex with iron and performs in a pH range from 3 to 7.5. The FerroZine Method requires boiling to dissolve rust.

The TPTZ Method for total iron has advantages of simplicity, sensitivity and freedom from common interferences. Iron in the sample, including precipitated or suspended iron such as rust, is converted to Fe<sup>2+</sup> by a reducing agent. A highly colored Fe<sup>2+</sup>-TPTZ complex is formed.

Hach Methods also include a high-range titration procedure utilizing sulfosalicylic acid as an indicator and EDTA as the titrant.

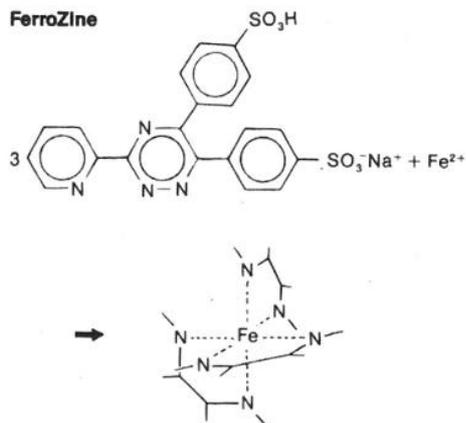
#### Chemical Reaction: 1,10-Phenanthroline Method

1,10-Phenanthroline, contained in Ferrous Iron Reagent Powder, reacts with Fe<sup>2+</sup> to form a characteristic orange-colored complex. The intensity of color development is directly proportional to the amount of Fe<sup>2+</sup> in the sample. Total iron also can be determined by use of FerroVer Iron Reagent. (When Environmental Protection Agency reporting is necessary, digestion of the sample also is required.)

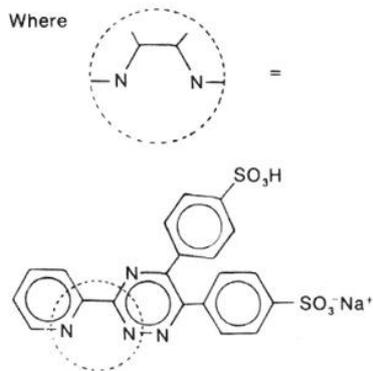


**Chemical Reaction: FerroZine Method**

Very low concentrations of iron can be determined using an ultrasensitive iron indicator, FerroZine Iron Reagent, 3-(2-pyridyl)-5, 6-bis(4-phenylsulfonic acid)-1,2,4-triazine, monosodium salt. FerroZine Iron Reagent also can be used to analyze samples containing magnetite (black iron oxide) or ferrites. The test is performed by adding a solution of FerroZine Iron Reagent to the water sample; the sample is buffered to a pH of 3.5 and a purple-colored complex directly proportional to the iron concentration is formed, resulting in an accurate analysis. A reducing agent is included to convert any Fe<sup>3+</sup> to Fe<sup>2+</sup> which forms the complex.



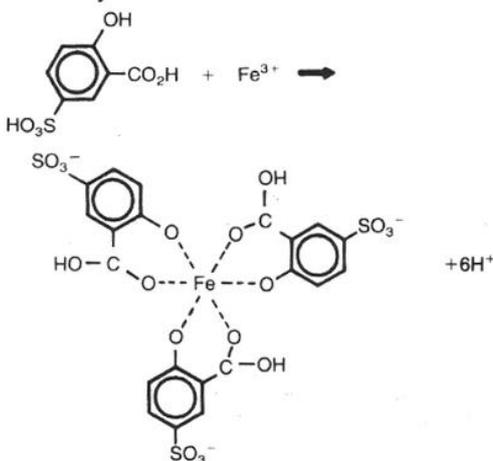
Where



**Chemical Reaction: Titration Method**

The Titration Method is intended for high iron concentrations such as oil-field water determinations. In this method the iron present in the sample is oxidized to Fe<sup>3+</sup> by an oxidizing agent. The Fe<sup>3+</sup> is then detected with sulfosalicylic acid, which forms a wine red complex with Fe<sup>3+</sup>. The solution is titrated with Titraver (EDTA) to a colorless to yellow end point. A buffer is added to stabilize the Fe<sup>3+</sup>.

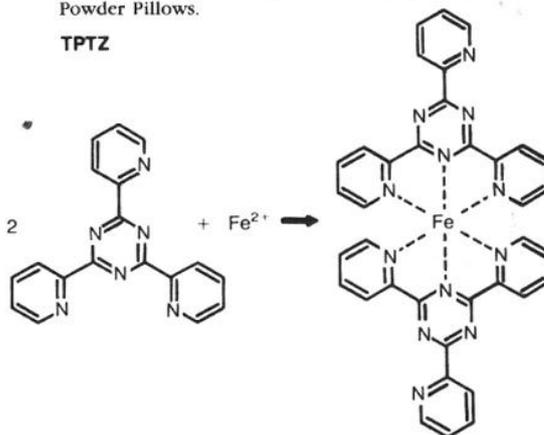
**Sulfosalicylic Acid**



**Chemical Reaction: TPTZ Method**

TPTZ, 2,4,6-tripyridyl-s-triazine, reacts with Fe<sup>2+</sup> to form a deep blue-purple color. Reducing agents are added to convert iron in the sample to the Fe<sup>2+</sup> form. TPTZ, reducing agents and pH buffers are combined in a single reagent, TPTZ Iron Reagent Powder Pillows.

**TPTZ**



**SPADNS and Ion-Specific Electrode Methods**

**Introduction**

Fluoride occurs naturally in some ground waters, and a 1-mg/L level normally is maintained in public drinking water supplies for the prevention of dental caries. Excessive amounts of fluoride cause mottling, an objectionable discoloration of tooth enamel. For this reason a permissible level in drinking water has been established by the USEPA in accordance with the Safe Drinking Water Act.

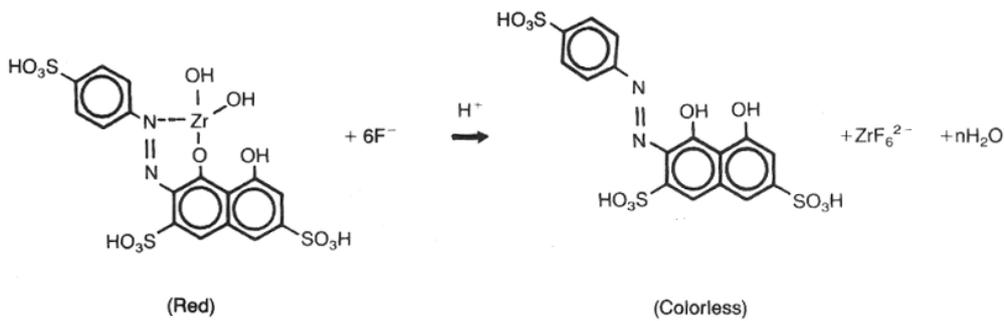
**Chemical Reaction: SPADNS Method**

The fluoride analysis involves the reaction of fluoride with a dark red, zirconium-dye complex. Fluoride combines with part of the zirconium to form a colorless zirconium-fluoride complex with the net effect of bleaching the color. Measurement of the decrease in color intensity provides an accurate determination of the fluoride concentration. The SPADNS Method is the preferable colorimetric method due to its rapid reaction with fluoride and the stability of the SPADNS reagent.

**Method of Analysis:**

**Ion-Selective Electrode Method**

The Ion-Selective Electrode Method requires a Hach One ISE Meter and an electrode system consisting of a silver/silver chloride reference electrode and a standard fluoride ion-selective electrode. Fluoride measurement is accomplished when a voltage potential is established across the lanthanum fluoride crystal on the end of the electrode in direct proportion to the fluoride concentration of the sample. The meter is calibrated with fluoride standards bracketing the expected range. The concentration may be read directly from the meter. A total ionic strength adjustment buffer (TISAB) is used to eliminate interferences in the test, adjust the pH to an optimum value and introduce sufficient sodium chloride to mask variations in ionic strength. TISAB reagent uses sodium 1,2-cyclohexanediaminetetraacetic acid (CDTA) for chelation of interfering metals such as  $Al^{3+}$  and  $Fe^{3+}$ , as well as other complexing and buffering agents.



## Cadmium Reduction Method

### Introduction

Nitrate represents the most completely oxidized state of nitrogen commonly found in water. Nitrate-forming bacteria convert nitrites into nitrates under aerobic conditions and lightning converts large amounts of atmospheric nitrogen (N<sub>2</sub>) directly to nitrates. Many granular commercial fertilizers contain nitrogen in the form of nitrates.

High levels of nitrate in water may indicate biological wastes in the final stages of stabilization or run-off from heavily fertilized fields. Nitrate-rich effluents discharged into receiving waters can degrade water quality by encouraging excessive growth of algae. Drinking waters containing excessive amounts of nitrates can cause infant methemoglobinemia (blue babies). For this reason, a maximum concentration level in drinking water has been established by the USEPA in accordance with the Safe Drinking Water Act.

The method of analysis used in the high range test is a modification of the Cadmium Reduction Method using gentisic acid in place of 1-naphthylamine. All the necessary reagents have been combined into a single stable powder called NitraVer® 5 Nitrate Reagent.

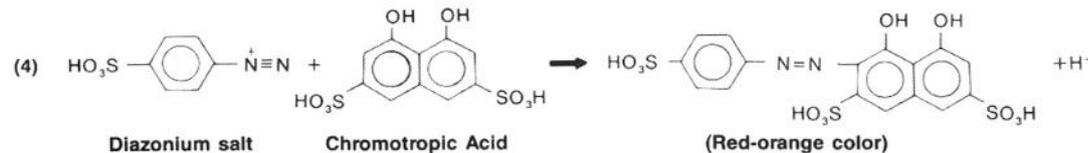
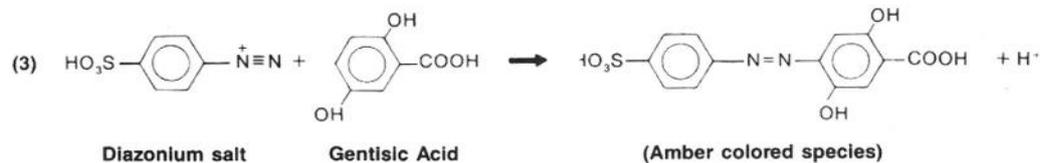
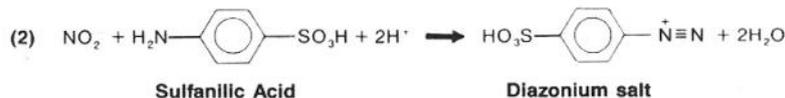
The low range nitrate test also is a modification of the Cadmium Reduction Method using a very sensitive chromotropic acid indicator. Both methods register nitrates and nitrite nitrogen.

### Chemical Reactions: High Range

In the high range test, cadmium metal is used to reduce nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) to nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) (reaction 1). Next, the nitrite ions react in an acidic medium with sulfanilic acid to form an intermediate diazonium salt (reaction 2) which, when coupled with gentisic acid (reaction 3), forms an amber-colored compound. Color intensity of the compound is in direct proportion to the nitrate concentration of the water sample.

### Chemical Reactions: Low Range

In the low range nitrate test, cadmium metal is used to reduce the nitrates to nitrites. The cadmium is provided in NitraVer 6 Reagent Powder Pillows. Nitrite ions react with sulfanilic acid to produce an intermediate diazonium salt, as in the high range test. The diazonium salt then forms a red-orange colored complex with chromotropic acid in direct proportion to nitrate concentration in the sample (reaction 4). In the low range test the sulfanilic acid and chromotropic acid are contained in NitriVer® 3 Reagent Powder Pillows.



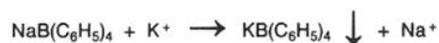
**Tetraphenylborate Method****Introduction**

Potassium, one of the most abundant elements, is found in many minerals. Soils contain approximately one to four percent potassium. Concentration of potassium in most drinking water is usually less than 20 mg/L; occasionally brines may contain more than 100 mg/L. The greatest areas of interest in measurement of potassium levels probably are medicine and agriculture, due to the importance of potassium as a mineral for plants and animals. Potassium salts, particularly potash, are common in fertilizers.

The Tetraphenylborate Method for determination of potassium in water is accurate, rapid and inexpensive. In the reaction, a precipitate is formed and the resulting increase in turbidity is measured. All necessary reagents are packaged in three powder pillows to provide reagent stability, convenience and accuracy.

**Chemical Reactions**

Potassium combines with sodium tetraphenylborate to form potassium tetraphenylborate, a white precipitate. The precipitate remains in suspension in samples with low concentrations of potassium, thus causing an increase in turbidity.



The sodium tetraphenylborate is contained in Potassium 3 Reagent Powder Pillows. Ammonium salts, magnesium and calcium interfere with the precipitation. Potassium 1 Reagent Powder Pillows and Potassium 2 Reagent Powder Pillows prevent these interferences.

# PHOSPHORUS

For water, wastewater and seawater

## Amino Acid, Ascorbic Acid and Molybdovanadate Methods

### Introduction

Phosphorus occurs in natural water and wastewaters almost solely as phosphate. Phosphates may enter water from agricultural run-off and biological and industrial wastes. They may be added to water in municipal and industrial water treatment processes to control corrosion. A certain amount of phosphate is essential for most plants and animals, but too much phosphate in water can contribute to eutrophication, especially when large amounts of nitrogen also are present.

Phosphorus generally can be classified as orthophosphate, condensed phosphate or organically bound phosphate. Condensed phosphates are formed by dehydrating the orthophosphate radical; they include metaphosphate, pyrophosphate and polyphosphate. The only form of phosphate determined directly is orthophosphate; other forms require pretreatment for conversion to orthophosphate for analysis. When no pretreatment is used, phosphate analyses determine "reactive" phosphorus. Reactive phosphorus essentially is a measure of orthophosphate plus a small fraction of condensed phosphate that may have been hydrolyzed during the test.

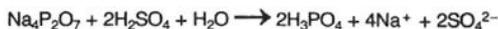
Hach offers high and low range tests for reactive phosphorus. High range tests can be completed with the Amino Acid Method or the Molybdovanadate Method. The Molybdovanadate Method uses a single reagent and has a faster reaction than the Amino Acid Method. Both methods have a broad range and are free from most interferences. Low range tests use the Ascorbic Acid Method.

Condensed phosphates plus orthophosphate can be determined by acid hydrolysis, using sulfuric acid, followed by the reactive phosphorus test for the appropriate range. A small amount of organically bound phosphorus also will be included in this measurement. The results of the test are reported as acid-hydrolyzable phosphorus. Total phosphorus (orthophosphate, condensed, and organically bound) can be determined by acid oxidation with persulfate, followed by the reactive phosphorus test. Organically bound phosphate then can be determined by subtracting the acid-hydrolyzable phosphorus.

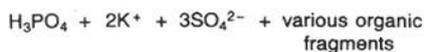
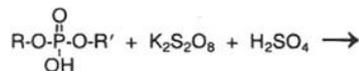
### Chemical Reactions: Pretreatment Steps

Reactions for pretreatment to determine acid-hydrolyzable and total phosphorus are illustrated below:

Example—Acid hydrolysis of pyrophosphate



Example—Potassium persulfate oxidation of organically bound phosphorus compounds:



R and R' represent various organic groups.

### Chemical Reactions:

#### Amino Acid and Ascorbic Acid Method

Reactive phosphorus is determined in essentially two steps for either the Ascorbic Acid Method (low range) or the Amino Acid Method (high range). The first step involves reaction of orthophosphate with molybdate in acid solution to form a yellow-colored phosphomolybdate complex:

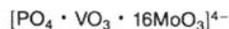


The phosphomolybdate complex is then reduced by either an amino acid or ascorbic acid, causing a characteristic molybdenum blue species. Various structures for the molybdenum blue species have been suggested in the literature. For example, see Killeffer, D.H., *Molybdenum Compounds—Their Chemistry and Technology*, Interscience Publishers, 1952.

All reagents for the Ascorbic Acid Method are contained in PhosVer® 3 Reagent Powder Pillows. Reagents for the Amino Acid Method are contained in Amino Acid Reagent Solution and Molybdate Reagent Solution.

#### Chemical Reaction: Molybdovanadate Method

Reactive phosphorus combines with molybdate in an acid medium to form a phosphomolybdate complex. Vanadium, contained in Molybdovanadate Reagent, reacts with the complex to form vanadomolybdophosphoric acid. Intensity of the resulting yellow color is proportional to the concentration of reactive phosphorus. One possible formula for the complex is suggested below. The exact structure is not known.



## SILICA

For water and seawater

### Silicomolybdate/Heteropoly Blue Method

#### Introduction

Silicon is the second most abundant element in nature. Accordingly, it is not surprising that most waters contain compounds of silicon, usually as silica ( $\text{SiO}_2$ ) or silicates ( $\text{SiO}_4^{4-}$  and  $\text{SiO}_3^{2-}$ ). Silica concentration in water commonly is less than 30 mg/L, although concentrations greater than 100 mg/L are not unusual and concentrations exceeding 1000 mg/L are possible in brines and brackish water.

Silica and silicates are added to water for a number of uses, such as water conditioners, detergents and corrosion inhibitors. However, silica in water can cause significant problems for industries, primarily in boiler and turbine applications. High pressures and high temperatures cause silica deposits on tubes of boilers and heat exchangers. These glassy deposits lower the efficiency of heat transfer and lead to premature failure. Silica deposits on steam turbine blades decrease efficiency and necessitate costly downtime for cleaning. Silica levels must be kept below 0.005 mg/L in very high pressure applications.

Measuring silica in water is useful when efficiency of demineralizers (used in boiler feedwater treatment) is monitored. Testing for silica (one of the first impurities detected when the exchange capacity of a demineralizer is exhausted) provides a sensitive check of demineralizer performance.

Analytical procedures for silica include the Silicomolybdate Method for high range measurement and the Heteropoly Blue Method for low range measurement. The Heteropoly Blue Method is an extension of the Silicomolybdate Method to increase sensitivity.

#### Chemical Reactions:

##### High and Low Ranges

The Silicomolybdate Method involves the reaction of molybdate ion with silica and phosphate under acid conditions to form a yellow color. Citric acid is added to destroy the phosphomolybdic acid complex (the yellow color formed due to phosphate) but not the silicomolybdic acid complex. For large amounts of silica the remaining yellow color is intense enough to be read directly. For low concentrations, an amino acid reducing agent is used to convert the faint yellow color to a dark heteropoly blue species. The color formed is directly proportional to the amount of silica present in the original sample; a colorimetric measurement of this intensity provides an accurate means of determining the silica concentration. Some forms of silica will not react with ammonium molybdate and must be digested with sodium bicarbonate to be converted to a reactive form.

Silicic acid reacts with water and hydrates as follows:



This hydrated silicic acid reacts with molybdate in the presence of acids to form silicomolybdic acid.



Silicomolybdic acid

This silicomolybdic acid is then reduced to a dark blue color by an amino acid for low concentrations.

## SULFATE

For water, seawater and oil-field water

### Turbidimetric Method

#### Introduction

Sulfate occurs in natural waters in a wide range of concentrations. Mine waters and industrial effluents frequently contain large amounts of sulfate from pyrite oxidation and the use of sulfuric acid.

Because of sulfate's cathartic action, a secondary maximum contaminant level has been established by the USEPA in accordance with the Safe Drinking Water Act. The taste threshold of magnesium sulfate is 400 to 600 mg/L and for calcium sulfate is 250 to 800 mg/L. Sulfate may be either beneficial or detrimental in water used for manufacturing and domestic supply. The presence of sulfate is advantageous in producing desired flavors in the brewing industry. In domestic water systems, sulfates do not appear to cause any increased corrosion on brass fittings but concentrations above 200 mg/L do increase the amount of lead dissolved from lead pipes.

Sulfate determination is important in oil field applications where two or more waters are mixed. High concentrations of sulfate along with barium, calcium and strontium can form insoluble scales.

The procedure for determining sulfate is a modification of the Barium Sulfate Turbidimetric Method. A single dry powder reagent called SulfaVer® 4 Sulfate Reagent will cause a milky precipitate to form if sulfate is present. The amount of turbidity formed is proportional to the amount of sulfate present.

#### Chemical Reaction

Sulfate is determined by its quantitative precipitation with barium chloride. Because the finely divided barium sulfate turbidity formed is proportional to the amount of sulfate in the sample, a photometric reading enables the sulfate concentration to be determined accurately.





## Table des Matières

<b>AVANT-PROPOS - REMERCIEMENTS .....</b>	<b>1</b>
<b>PHENOMENES KARSTIQUES EN ROCHES SILICATEES NON CARBONATEES- CAS DES GRES, DES MICASCHISTES, DES GNEISS ET DES GRANITES EN AFRIQUE SAHELIEENNE ET EQUATORIALE .....</b>	<b>5</b>
<b>I. INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>II. ETAT DES CONNAISSANCES DES KARSTS OU DES PHENOMENES ASSIMILES AU KARST EN ROCHES NON CARBONATEES.....</b>	<b>6</b>
II.1 INTRODUCTION .....	6
II.2 FORMES ASSIMILABLES AU KARST DANS LES GRES (NON CARBONATES) ET LES QUARTZITES .....	6
2.1 Localisation.....	6
2.2 Mécanismes de formation proposés .....	11
II.3 FORMES ASSIMILABLES AU KARST DANS LES GRANITES .....	13
3.1 Localisation.....	13
3.2 Mécanismes de formation proposés .....	16
II.4 FORMES ASSIMILABLES AU KARST OBSERVEES DANS LES GNEISS ET LES SCHISTES .....	18
4.1 Localisation.....	18
4.2 Mécanismes de formation proposés .....	21
II.5 LES BASES DU PROBLEME .....	21
<b>III. ETAT DE LA QUESTION SUR LES DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES DU SILICIUM, DE L'ALUMINIUM ET DU FER.....</b>	<b>23</b>
III.1 INTRODUCTION .....	23
III.2 HYDROLYSE DES SILICATES.....	23
III.3 DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES GENERALES SUR LA SILICE.....	25
III.4 SOLUBILITE DE L'ALUMINE .....	29
III.5 SOLUBILITE DU FER.....	30
III.6 COMPARAISON DES SOLUBILITES DE LA SILICE, DE L'ALUMINIUM ET DU FER.....	31
III.7 INFLUENCE DES GAZ ET DES ACIDES ISSUS DE LA DECOMPOSITION DE LA MATIERE ORGANIQUE SUR LA SOLUBILITE DE LA SILICE, DE L'ALUMINIUM ET DU FER.....	32
III.8 ROLES DES MICRO-ORGANISMES DANS L'ALTERATION DES ROCHES EN PROFONDEUR – ETAT DES CONNAISSANCES.....	39
8.1 Introduction.....	39
8.2 Localisations des micro-organismes .....	39
8.3 Propriétés des micro-organismes .....	41

<b>IV. KARSTS NON-CARBONATES AU NIGER OCCIDENTAL.....</b>	<b>43</b>
IV.1 INTRODUCTION .....	44
IV.2 LE MILIEU PHYSIQUE - GEOMORPHOLOGIE ET GEOLOGIE DE LA REGION DE NIAMEY .....	44
2.1 Structuration du socle.....	47
2.2 Dépôt d'une couverture récente .....	48
2.3 Fracturation des dépôts sédimentaires, déformations et soutirages.....	49
2.4 Positionnement des grottes de la région de Niamey .....	51
IV.3 FORMES AU SOMMET DU CONTINENTAL TERMINAL ET SOUS CUIRASSE LATERITIQUE .....	51
3.1 Dépressions au sommet du Continental terminal .....	51
3.1.1 Caractéristiques des dépressions du Niger oriental .....	55
3.1.2 Comparaison avec les dépressions du Niger occidental - Discussion.....	56
3.2 Grottes au sommet du Continental terminal .....	61
3.2.1 La grotte de Karey Gorou .....	61
A. Contexte géomorphologique .....	61
B. Description des conduits .....	64
C. Observations morphologiques .....	65
D. Discussion .....	65
3.2.2 Grotte de Kahé .....	66
3.2.3 Chenal d'écoulement au sein de la cuirasse sommitale du Continental terminal .....	67
3.3 Karst au sein du Continental terminal - l'exemple de la grotte de Diffa Doga .....	69
3.3.1 Contexte géomorphologique.....	69
3.3.2 Description des conduits.....	73
3.3.3 Observations sédimentologiques et hydrologiques.....	75
3.3.4 Discussion .....	75
3.4 Karst au niveau de la discordance Continental terminal/socle .....	76
3.4.1 Contexte géomorphologique.....	76
3.4.2 Description des conduits et aspects hydrologiques.....	77
IV.4 KARST AU SEIN DE LA LITHOMARGE ET DANS LE SOCLE .....	78
4.1 La grotte de Lossa- grotte dans des granitoïdes .....	78
4.2 La grotte de Guéssédoundou – grotte dans des métagabbros .....	78
4.2.1 Contexte géomorphologique.....	78
4.2.2 Observations lithologiques et hydrologiques .....	80
4.2.3 Discussion .....	81
4.3 Autres observations au niveau du socle .....	81
4.3.1 L'effondrement de Guiddéré .....	81
4.3.2 Incident de forage .....	85
IV.5 ANOMALIES DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE .....	85
IV.6 CARACTERISTIQUES DES GROTTES DU NIGER OCCIDENTAL .....	86
6.1 Contexte lithologique et contrôle tectonique du drainage dans la région de Niamey.....	87

6.2 Dimensions et morphologie des cavités.....	87
6.3 Transferts de matières et processus impliqués .....	88
6.3.1 La suffosion.....	88
6.3.2 Suffosion au Niger occidental.....	90
6.3.3 Phénomènes de dissolution au sein du Continental terminal, dans la lithomarge et dans le socle .....	91
IV.7 MISE EN PLACE DES FORMES AU NIGER OCCIDENTAL ET INCIDENCE SUR LA GEOMORPHOLOGIE DU NIGER OCCIDENTAL .....	97
<b>V. MICRO-ANALYSES PAR M.E.B. ET RAYONS X DE SPELEOTHEMES EN PROVENANCE DU NIGER ORIENTAL .....</b>	<b>101</b>
V.1 INTRODUCTION - LE MILIEU PHYSIQUE .....	101
V.2 MATERIELS ET METHODES.....	102
V.3 RESULTATS.....	103
3.1 Observations morphologiques .....	103
3.2 Micro-analyse aux rayons X.....	107
3.3 Diffraction aux rayons X .....	112
3.4 Discussion .....	112
<b>VI. CONCLUSION GENERALE SUR LES FORMES DU NIGER.....</b>	<b>115</b>
<b>VII. KARSTS OU FORMES ASSOCIEES AU KARST EN ROCHES NON CARBONATEES AU CAMEROUN MERIDIONAL .....</b>	<b>117</b>
VII.1 INTRODUCTION.....	117
VII.2 CONTEXTES GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE GENERAL .....	117
VII.3 GROTTES AU SEIN D'UNE COUVERTURE LATERITIQUE, LE CAS DE MBILIBEKON.....	120
3.1 Contexte géomorphologique .....	120
3.2 Description de la grotte .....	120
3.3 Discussion .....	122
VII.4 MORPHOLOGIES ASSIMILABLES AU KARST DANS DES GNEISS – L'EXEMPLE DES GROTTES DE MFOULA .....	124
4.1 Contexte géomorphologique .....	124
4.2 Description des sites.....	125
4.3 Géologie et géomorphologie des grottes de Mfoula .....	127
4.3.1 La grotte de Mfoula .....	127
4.3.2 La grotte de Mbasbekon .....	131
4.3.3 La grotte d'Angoula .....	135
4.4 Discussion .....	138
4.4.1 Grotte de Mfoula.....	138
4.4.2 Grotte de Mbasbekon.....	142
4.4.3 Grotte d'Angoula .....	142
4.5 Conclusion .....	143

4.6	<i>Analyses d'aiguilles siliceuses en terrain gneissique</i>	144
4.6.1	Introduction	144
4.6.2	Matériel et méthode	146
4.6.3	Résultats	146
4.6.4	Discussion	150
VII.5	KARSTS DANS LES MICASCHISTES - L'EXEMPLE DES GROTTES D'AKOK BEKOE	151
5.1	<i>Contextes géologique et géomorphologique</i>	151
5.2	<i>Le site de Nga Fouda</i>	153
5.3	<i>Le site de Ndikon</i>	156
5.4	<i>Les grottes d'Akok Essama</i>	160
5.5	<i>La grotte d'Akok Essingan</i>	160
5.6	<i>La grotte d'Akok Bekoé</i>	163
5.7	<i>Origine des formes - Discussion</i>	163
VII.6	KARSTS DANS LES GRANITES - LES EXEMPLES D'AKO AKAS ET DE MEZESSE	169
6.1	<i>Le site d'Ako Akas</i>	169
6.1.1	Morphologie et géologie générale	169
6.1.2	Formes de surface	170
6.1.3	Autres observations	172
6.2	<i>Le site de Mezesse</i>	175
6.2.1	Morphologie et géologie générales	175
6.2.2	Formes karstiques de surface	177
6.3	<i>Origines des formes de surface des sites d'Ako Akas et de Mezesse</i>	178
6.4	<i>Forme karstique de profondeur - La grotte de Mezesse -</i>	179
6.4.1	Analyse géomorphologique de la grotte de Mezesse	179
6.4.2	Analyses de concrétions coralloïdes de la grotte de Mezesse	186
A.	Introduction	186
B.	Matériel et méthodes	186
C.	Observations	187
D.	Formation des concrétions	197
E.	Vitesse de concrétionnement et âge des concrétions	200
F.	Modèle de formation de la grotte de Mezesse	201
6.5	<i>Chaos granitique - exemple de la grotte troglodyte dans la zone de Mezesse</i>	202
6.6	<i>Conclusion</i>	204
VII.7	CONCLUSIONS SUR LES FORMES DU CAMEROUN MERIDIONAL	205
<b>VIII.</b>	<b>TERMINOLOGIE ET CLASSIFICATIONS</b>	<b>206</b>
VIII.1	TERMINOLOGIE KARSTIQUE - ACCEPTION DES TERMES	206
VIII.2	PSEUDOKARST	208
VIII.3	PRINCIPALES CLASSIFICATIONS	209

VIII.6 DISCUSSION - PROPOSITION DE DEFINITION ET DE CLASSIFICATION .....	212
<b>IX. PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS GENERALES.....</b>	<b>219</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>221</b>
<b>ANNEXE I -ANALYSES DES EAUX AU CAMEROUN .....</b>	<b>245</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>259</b>

---