

Les travertins de Coal River Springs : physico-chimie des eaux
The Travertines of Coal River Springs: Physico-Chemistry of the Waters.

Die Travertine von Coal River Springs: physikalische Chemie der Wasser.

Marie-Anne Geurts and Anne Watelet

Volume 48, Number 3, 1994

Les travertins
Travertines

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/033008ar>
DOI: <https://doi.org/10.7202/033008ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (print)
1492-143X (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Geurts, M.-A. & Watelet, A. (1994). Les travertins de Coal River Springs : physico-chimie des eaux. *Géographie physique et Quaternaire*, 48(3), 275–283. <https://doi.org/10.7202/033008ar>

Article abstract

The travertines of the Ecological Reserve of Coal River Springs (SE Yukon) are developing along two creeks. This study examines the southern creek's original direction - a direction that has been reestablished by Park Yukon a few years ago. The study presents results of 384 physico-chemical analysis made in the field between June the 18th and July the 10th, 1992. It also includes the results of 8 water samples analyzed by spectrometry (ICP-AES). Results reveal that a temperature increase is not responsible for the precipitation. But, rather, a degassing effect may be invoked. Corroborating evidence is found in the pH increase. The ionic saturation with respect to calcite is reached at the source basin and increases along the creek. The ionic saturation maxima with respect to calcite, aragonite, and dolomite are located on the principal site of dams and basins. Downstream dams were in the process of filling and they had not yet experienced overflow in 1992. The water percolates from one basin to the other and disappears in the deposit. At the exsurgence, there is a sharp ionic decrease as pH decreases; this indicates that precipitation occurs without a complete dehydration of the CO₂, and also that the dams are in a cementing stage.

LES TRAVERTINS DE COAL RIVER SPRINGS: PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

Marie-Anne GEURTS et Anne WATELET, Département de géographie, Université d'Ottawa et Centre géoscientifique d'Ottawa-Carleton, 165, rue Waller, Ottawa, Ontario K1N 6N5; Département de géographie, Université d'Ottawa.

RÉSUMÉ Les travertins de la réserve écologique de Coal River Springs (SE du Yukon) sont en formation le long de deux ruisseaux. Cette étude s'attache au ruisseau sud dont le trajet a été rétabli par les autorités du parc Yukon. Elle présente les résultats de 384 analyses physico-chimiques effectuées sur le terrain entre le 18 juin et le 10 juillet 1992, ainsi que les résultats de l'analyse de 8 échantillons d'eau analysés au spectromètre (ICP-AES). Ce n'est pas une augmentation de température qui est responsable de la précipitation mais bien un dégazage qui se traduit par l'augmentation du pH. La saturation ionique vis-à-vis de la calcite est atteinte dès le bassin de la source et s'élève le long du cours d'eau. Le maximum de saturation ionique vis-à-vis de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite se situe sur le site principal des barrages et des bassins. Les bassins d'aval étaient en cours de remplissage et ne débordaient pas encore en 1992. L'eau percole d'un bassin à l'autre et se perd dans le dépôt. À l'exurgence on constate une perte ionique importante, ainsi qu'une baisse du pH, ce qui indique qu'il y a eu précipitation sans déshydratation complète du CO₂, et que les barrages sont en cours de cimentation.

ABSTRACT *The travertines of Coal River Springs: Physico-chemistry of the waters.* The travertines of the Ecological Reserve of Coal River Springs (SE Yukon) are developing along two creeks. This study examines the southern creek's original direction — a direction that has been reestablished by Park Yukon a few years ago. The study presents results of 384 physico-chemical analysis made in the field between June the 18th and July the 10th, 1992. It also includes the results of 8 water samples analyzed by spectrometry (ICP-AES). Results reveal that a temperature increase is not responsible for the precipitation. But, rather, a degasing effect may be invoked. Corroborating evidence is found in the pH increase. The ionic saturation with respect to calcite is reached at the source basin and increases along the creek. The ionic saturation maxima with respect to calcite, aragonite, and dolomite are located on the principal site of dams and basins. Downstream dams were in the process of filling and they had not yet experienced overflow in 1992. The water percolates from one basin to the other and disappears in the deposit. At the exurgence, there is a sharp ionic decrease as pH decreases; this indicates that precipitation occurs without a complete dehydration of the CO₂, and also that the dams are in a cementing stage.

ZUSAMMENFASSUNG *Die Travertine von Coal River Springs: physikalische Chemie der Wasser.* Die Travertine der ökologischen Reserve von Coal River Springs (Südosten Yukons) bilden sich längs von zwei Fließchen. Diese Studie betrifft das südliche Fließchen, dessen ursprünglicher Lauf von der Yukon-Parkverwaltung wiederhergestellt wurde. Die Studie berichtet über die Ergebnisse von 384 physikalisch-chemischen Analysen, die an Ort und Stelle zwischen dem 18. Juni und dem 10. Juli 92 durchgeführt wurden, sowie über die Ergebnisse von 8 mit dem Spektrometer analysierten Wasserproben (ICP-AES). Nicht ein Temperaturanstieg ist für die Ausscheidung verantwortlich, sondern vielmehr eine Entgasung, die sich in der Zunahme des pH ausdrückt. Die Ionen-Sättigung gegenüber dem Kalkspat ist schon am Quellbecken erreicht und nimmt entlang des Wasserlaufs zu. Das Maximum der Ionen-Sättigung, was Kalkspat, Aragonit und Dolomit betrifft, befindet sich am Hauptsitz der Dämme und Becken. Die flussabwärts gelegenen Becken befanden sich im Prozeß der Auffüllung und liefen 1992 noch nicht über. Das Wasser sickert von einem Becken zum anderen und verliert sich in der Ablagerung. An der Austrittsstelle stellt man einen bedeutenden Ionen-Verlust fest sowie ein Sinken des pH, was bedeutet, daß die Ausscheidung ohne komplette Deshydratation des CO₂ stattgefunden hat, und daß die Dämme sich im Prozeß der Verkittung befinden.

INTRODUCTION

Dans un géosystème karstique, les travertins sont des indicateurs géochimiques de la karstification. Selon Vaudour (1984), leur construction reflète non seulement les données lithologiques, biochimiques et pédologiques, mais elle intègre aussi les influences de la topographie et de la tectonique. En effet, cette dernière peut modifier des niveaux de base et provoquer des phénomènes hydrothermaux. C'est le cas des travertins de Coal River Springs, au sud est du Yukon (fig. 1) décrits par Geurts *et al.* (1992) et générés par les sources hydrothermales (Brandon, 1965; Southern et Halstead, 1973).

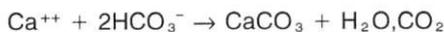
L'étude des paramètres physico-chimiques permet de vérifier l'état de saturation des eaux par rapport au minéral néoformé et de comprendre la localisation des dépôts dans un bassin hydrographique (Geurts, 1976a, b, c; Herman et Lorah, 1987, 1988; Lorah et Herman, 1988a, b; Chafetz *et al.*, 1991). Par ailleurs, si la précipitation maximale des travertins semble reliée au domaine et au climat méditerranéen, ceci n'exclut ni la part des phénomènes tectoniques et hydrothermaux dans ce domaine (exemples: les travertins du Latium, Turi, 1986, ou les travertins de Skoura dans le bassin de Ouarzazate au Maroc, Akdim, 1991), ni la précipitation de la calcite dans des conditions nettement plus froides, voire d'engel (Ek et Pissart, 1965; Swett, 1974; Ford, 1981; Adolphe, 1987; Adolphe et Loubière, 1987; Clark et Lauriol, 1992).

Les travertins de Coal River Springs (site sud), formés dans un ruisseau dont les sources livrent des eaux tièdes (12-13°C), pourraient être reliés au réchauffement de l'eau durant l'été puisque les eaux s'écoulent sur un versant exposé au sud ouest (Davies *et al.*, 1983).

Si cette hypothèse est à priori plausible, elle n'a cependant pas été vérifiée et il apparaît nécessaire d'examiner cette question pour comprendre la genèse de ces dépôts. C'est donc l'objet premier de cet article. Par ailleurs, puisqu'il s'agit d'un site où les autorités du parc Yukon sont intervenues pour régénérer le géosystème des barrages et des bassins, il s'agit d'examiner si les qualités physico-chimiques des eaux sont actuellement adéquates à cette régénération et quel est le lieu dominant et actuel de celle-ci si elle se produit.

FONDEMENTS THÉORIQUES

Le travertin est essentiellement constitué de carbonate de calcium. Sa précipitation peut survenir dans une eau riche en calcium quand un seuil de saturation est dépassé. Hormis le processus de précipitation décrit par Clark et Fontes (1990) pour des eaux hyperalcalines, la formation du travertin s'effectue à un pH variant entre 7 et 8,5 suivant la formule suivante :



La réaction ci-dessus montre que la précipitation à partir des bicarbonates et du calcium libère du CO₂ dans l'eau. La teneur en CO₂ hydraté s'accroît, ce qui a pour effet de diminuer temporairement le pH. Ce processus a été vérifié expérimentalement par Roque (1964). En effet, l'évasion du CO₂

ne peut se faire qu'après sa déshydratation et c'est avec cette évaporation du CO₂ que se produit postérieurement l'augmentation du pH. Or le dégazage de l'eau peut être dû 1) à une augmentation de la température qui a pour effet de diminuer la solubilité du CO₂ dans l'eau, ou 2) au déséquilibre entre les pressions de CO₂ à l'interface eau-air (la turbulence de l'eau favorise le dégazage), et 3) à l'absorption du CO₂ par la végétation aquatique. Dans certaines circonstances la précipitation s'arrête aussitôt entamée (cas d'une baisse du pH); dans d'autres, par contre, elle se poursuit et le travertin ainsi formé est plus massif (Geurts, 1976a, b, c). Cette deuxième possibilité est conforme au principe de Le Châtelier (Harris, 1987) qui indique qu'une réaction chimique est forcée dans le sens des produits si l'un de ceux-ci diminue (cas où le CO₂ s'échappe). Donc, comme les trois processus ci-dessus peuvent varier dans l'espace et dans le temps pour un même cours d'eau, il faut considérer la précipitation comme résultante ponctuelle du bilan des trois processus, pour autant que les teneurs en calcium et en bicarbonate soient suffisantes.

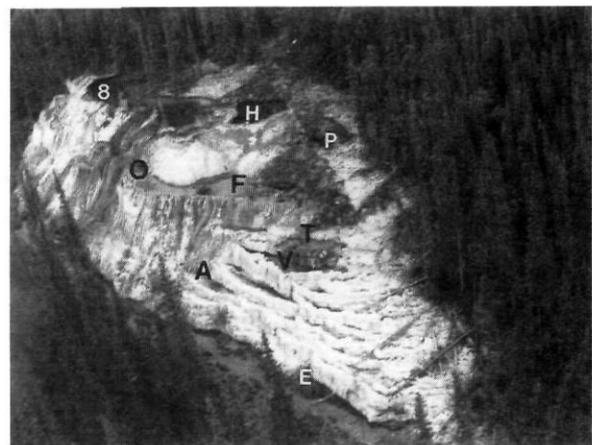


FIGURE 1. Carte de localisation et photographie des travertins (site sud). 8 : bassin en forme de 8; H : bassin hexagonal, P : bassin des plates-formes, F : bassin F, O : bassin des ondes, T : bassin du tronç, V : bassin des vases, A : bassin A, E : exurgence.

Location map and picture of travertine (south site).

MÉTHODOLOGIE

Un profil longitudinal du cours d'eau a été réalisé au clinomètre et au décimètre afin de pouvoir localiser les sites de mesure et prélèvement des échantillons d'eau. Entre le 18 juin et le 10 juillet 1992, les auteures ont procédé huit fois à un suivi des mesures du pH et de la température ainsi qu'au prélèvement des échantillons destinés aux mesures du titre alcalin complet et de la dureté totale, dureté calcique et dureté magnésienne. Toutes ces analyses ont été réalisées sur le terrain, en moins de cinq heures après le prélèvement. L'utilisation du Pa/Kps (produit des activités ioniques / constante du produit de solubilité; voir notamment Geurts, 1976, 1988) a permis d'avoir une première estimation de l'état de saturation de l'eau sur le terrain. Puisqu'il n'est pas tenu compte de tous les ions majeurs, les résultats sont donc sujets à modifications après des analyses plus complètes au laboratoire. Si Pa/Kps > 1, l'eau est sursaturée et donc la précipitation de la calcite peut se produire.

Par ailleurs, ne possédant qu'un équipement d'analyse très limité sur le terrain, un prélèvement d'eau a été réalisé le 11 juillet avec une seringue munie d'un filtre de 0,45mm afin d'analyser le contenu en ions majeurs par des analyses (ICP-AES) au spectromètre du Centre géoscientifique d'Ottawa-Carleton. Les résultats obtenus par cette deuxième méthode, ont été traités par le programme Watspec (Wigley, 1977) afin de calculer le Si_c , c'est-à-dire le *degree of saturation index* vis-à-vis de la calcite. Le programme livre aussi l'information concernant le degré de saturation vis-à-vis de l'aragonite, de la dolomie, du gypse et d'autres minéraux.

Si le $Si_c < 0$, l'eau est sous-saturée et si le $Si_c > 0$, l'eau est sursaturée. Le Si_c serait en fait le logarithme vulgaire du Pa/Kps si ce dernier tenait compte de tous les ions majeurs qui interviennent dans le calcul du Pa.

TECHNIQUES

Sur le terrain, la température a été mesurée à même l'eau du ruisseau avec un thermomètre de pêcheur, couvert d'une gaine de plastique. La précision de mesure est de $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

Le pH a été mesuré avec un pH-mètre portatif Fisher scientifique à une électrode combinée. La mesure peut-y être lue au 0,01 de l'unité, et la précision est de $\pm 0,05$ unité.

L'alcalinité a été mesurée par titration à l'acide chlorhydrique (0,02 M) des ions CO_3^- , OH^- , et surtout HCO_3^- majoritaires au pH qui concerne ce ruisseau. La titration a été réalisée avec une burette de 25 ml, la précision de mesure est de $\pm 0,05$ ml. La titration a été suivie au pH-mètre, préalablement calibré avec une solution tampon de pH 4. Le pH auquel la titration était complétée se situait à 4,18 et l'erreur de mesure était de 12 mg/l de CaCO_3 , soit environ 2,5 %. L'alcalinité peut être exprimée en mg/l de CaCO_3 ou en mg/l d' HCO_3^- . Les deux modes d'expression seront utilisés dans ce texte.

La dureté totale a été déterminée par une titration colorimétrique ou dosage complexométrique par l'EDTA à 0,01 M avec une pastille d'indicateur coloré. La dureté totale a été mesurée en premier lieu, puis la dureté calcique, et la dureté magnésienne a été déterminée par différence. La titration a

été faite à l'aide d'une burette de 25 ml, avec laquelle l'erreur de lecture peut atteindre $\pm 0,05$ ml, soit environ 10 mg/l de CaCO_3 , soit environ 10 %. Pour obtenir les meilleurs résultats on doit ajouter quelques gouttes d'ammoniaque à la solution à titrer, ce qui a fait défaut sur le terrain. Les analyses ont été faites en ajoutant un tampon à pH 10 mais les résultats obtenus resteront incertains pour les duretés.

RÉSULTATS DES ANALYSES DE TERRAIN

La température

La température a été mesurée onze fois aux sites 8,7,6,5,4,3,2,1 identifiés sur la figure 2. La température moyenne à la source est de $13,00^\circ\text{C}$ et l'écart type est de $\pm 0,39$. La moyenne la plus élevée a été observée à l'exsurgence où elle atteint $13,09^\circ\text{C}$ avec un écart type de $\pm 0,26$ ainsi qu'au point 7 dans le bassin du tronc avec les mêmes valeurs. La température varie si peu le long du cours d'eau qu'il est difficile d'attribuer à l'augmentation de la température la cause de la précipitation des travertins et de la construction des barrages.

Le pH

Le pH a été mesuré onze fois aux mêmes sites et de façon moins fréquentes à d'autres endroits le long du cours d'eau. Les résultats moyens ont été reportés sur la figure 2. À la source, l'écart type est de $\pm 0,03$ et à l'exsurgence de $\pm 0,02$. L'écart type maximal $\pm 0,08$ a été obtenu au bassin du tronc et au site 3 dans les cascates. On constate une augmentation du pH depuis la source (7,34) jusque dans le bassin F (8,12). Le bassin du tronc garde une valeur élevée de 8,04 et après le parcours souterrain l'eau de l'exsurgence a un pH de 7,64 comparable à celui du ruisseau en amont de la zone où la tufière est très active dans les cascates.

L'alcalinité

L'alcalinité a été mesurée huit fois aux sites de la figure 2. Les résultats sont reportés à la figure 3. Ils sont très stables et les écarts types ne s'élèvent pas à plus de 1,30 % de la valeur du site. L'alcalinité est maximale à l'amont (point 2) avec une valeur de 572,7 mg/l de CaCO_3 et un écart type de $\pm 7,28$. Elle baisse lentement jusqu'au bassin du tronc où la valeur est de 565,5 mg/l de CaCO_3 et l'écart type de $\pm 6,97$. L'alcalinité à l'exsurgence est de 513,4 mg/l de CaCO_3 avec un écart type de $\pm 5,76$. Une valeur très basse de 478 mg/l obtenue lors de la première analyse a été éliminée du calcul de la moyenne à l'exsurgence, car il s'agit peut être d'une erreur de manipulation.

Selon Rose (1983), une baisse de l'alcalinité montre inconditionnellement la précipitation. Or, l'alcalinité baisse faiblement depuis la source jusqu'au bassin du tronc, mais elle chute à l'exsurgence. La précipitation peut se réaliser à même le bassin du tronc ou dans un autre bassin (en voie de remplissage en 1992) ou dans le parcours souterrain. En effet, dans la zone où les bassins ne sont pas encore remplis, l'eau percole à travers les barrages. Par ailleurs, en 1989, lors d'une étude exploratoire, la première auteure avait déjà constaté une chute de l'alcalinité et du pH à l'exsurgence. Le phénomène s'est donc poursuivi.

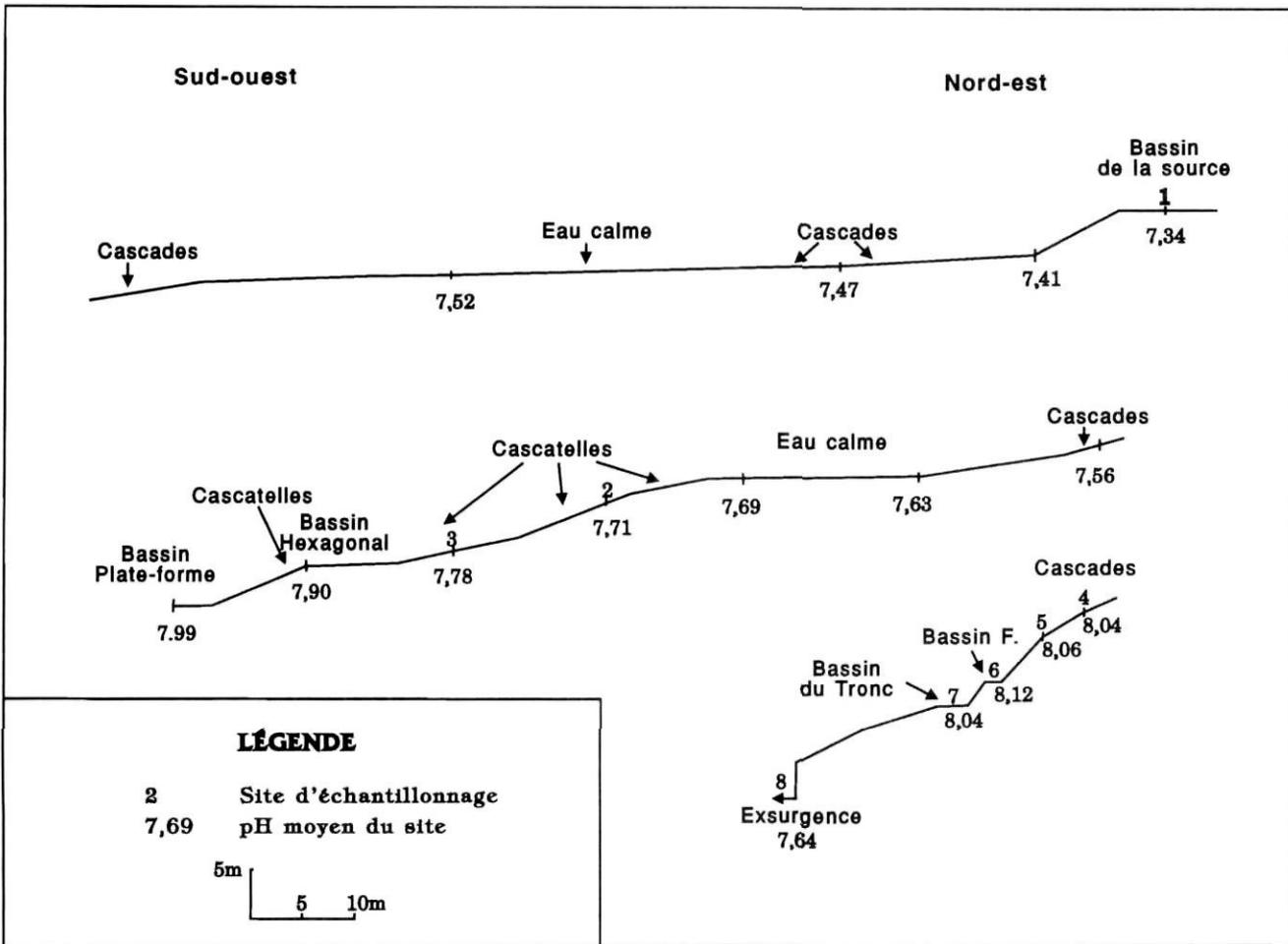


FIGURE 2. Profil en long du ruisseau indiquant les sites d'échantillonnage et de mesure du pH.

Long profile of the creek showing the sampling and pH measurement sites.

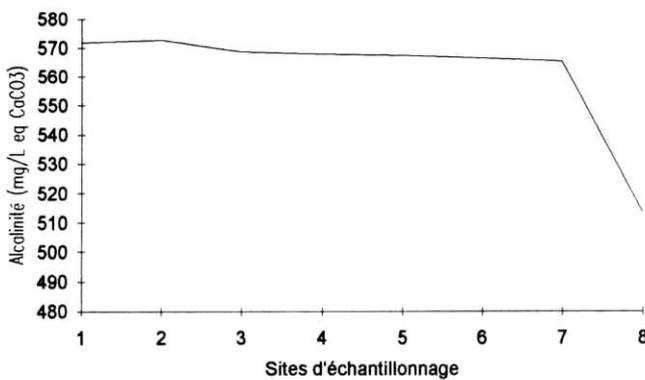


FIGURE 3. Alcalinité sur le terrain.

Alkalinity on the field.

Les duretés

La dureté totale et la dureté calcique ont été mesurées six fois aux mêmes sites que l'alcalinité. La dureté magnésienne a été obtenue par différence des deux premières. Les résultats sont exprimés en mg/l de calcium et en mg/l de magnésium (tabl. I). Les mesures ne sont pas stables et les diffé-

rences de l'écart type à la moyenne atteignent 53 % pour la dureté calcique et 55,07 % pour la dureté magnésienne. Les auteures accordent peu de confiance aux résultats de ces mesures puisqu'elles ont été réalisées à un pH insuffisamment basique.

Le Pa/Kps

Le tableau I livre la moyenne du Pa/Kps à chaque endroit où l'ensemble des observations a été recueilli (six fois). Cette valeur varie de 0,36 à 1,87 et la différence de l'écart-type à la moyenne est au maximum de 44,39 %. Les résultats doivent être pris avec réserve en raison des problèmes survenus à l'analyse des duretés.

Conclusions des analyses de terrain

Les analyses montrent que la température du cours d'eau varie fort peu d'amont en aval et qu'il est donc improbable que l'augmentation de température, telle que proposée antérieurement, soit l'élément physique responsable de la précipitation. Cependant la tiédeur de l'eau favorise la saturation. Par ailleurs, les analyses ont montré une augmentation du pH le long du cours d'eau avec une variation particulièrement marquée dans les cascates qui précèdent les bassins, où le pH atteint ses valeurs maximales.

TABLEAU I

Analyses physico-chimiques du terrain et du laboratoire

Terrain, données moyennes

Site	Temp. °C	pH	[HCO ₃ ⁻] mg/L	[Ca ⁺⁺] mg/L	[Mg ⁺⁺] mg/L	Pa/Kps
source 1	13,00	7,33	348,7	12,88	12,31	0,36
2	12,69	7,71	349,4	11,48	12,62	0,85
3	12,75	7,78	346,9	11,96	10,27	0,97
4	12,75	8,04	346,4	11,72	10,54	1,99
5	12,80	8,06	343,9	11,60	11,88	1,89
6	13,00	8,12	345,6	12,08	8,64	1,96
7	12,80	8,04	345,0	14,64	7,37	1,65
exsurgence 8	13,10	7,64	310,5	11,11	5,45	0,44

Laboratoire

Site	Temp. °C	pH	[HCO ₃ ⁻] mg/L	[Ca ⁺⁺] mg/L	[Mg ⁺⁺] mg/L	Si _c
source 1	13,00	7,32	351,4	83,63	17,49	0,16
2	13,00	7,72	355,0	85,14	17,80	0,53
3	13,00	7,80	341,6	82,02	17,30	0,55
4	13,00	8,06	348,2	71,19	17,48	0,76
5	13,00	8,08	351,4	78,85	17,03	0,81
6	13,00	8,09	351,4	70,97	17,03	0,84
7	12,50	8,08	338,4	77,22	17,75	0,80
exsurgence 8	13,00	7,64	312,6	77,24	18,24	0,42

Ce phénomène a déjà été mis en évidence par Coûteaux (1969) pour les crons de Belgique ainsi que par Geurts (1975) pour les travertins de fond de vallée. Il a été observé aussi par Chafetz *et al.* (1991) pour des sources chaudes du Colorado. Elles montrent aussi globalement une diminution de la dureté et de l'alcalinité particulièrement entre le bassin du tronc et l'exsurgence.

RÉSULTATS DES ANALYSES DE LABORATOIRE

Le pH et l'alcalinité

Les analyses du pH et de l'alcalinité, sans donner des résultats identiques à ceux obtenus sur le terrain, donnent cependant les mêmes tendances générales (fig. 4a et b, et tabl. I). Le pH augmente de la source jusqu'aux bassins et à l'exsurgence, il est beaucoup plus bas. Ceci traduit donc une augmentation de la concentration en ions hydrogènes dans l'eau durant son parcours souterrain. Par ailleurs, on constate une perte globale de 38,8 mg/l d'HCO₃⁻ depuis la source jusqu'à l'exsurgence et 25,8 mg/l dans le parcours souterrain.

Les indices de saturation

Les calculs des indices de saturation issus des analyses géochimiques montrent que :

- 1) les eaux sont sursaturées vis-à-vis de la calcite (Si_c) depuis la source jusqu'à l'exsurgence et, que la sursaturation est maximale dans la partie principale du site dans le bassin F. Le Si_c chute dans le parcours souterrain (fig. 5a).
- 2) les eaux sont sursaturées vis-à-vis de l'aragonite (Si_{ar}) et que le long du cours d'eau l'évolution du Si_{ar} présente une

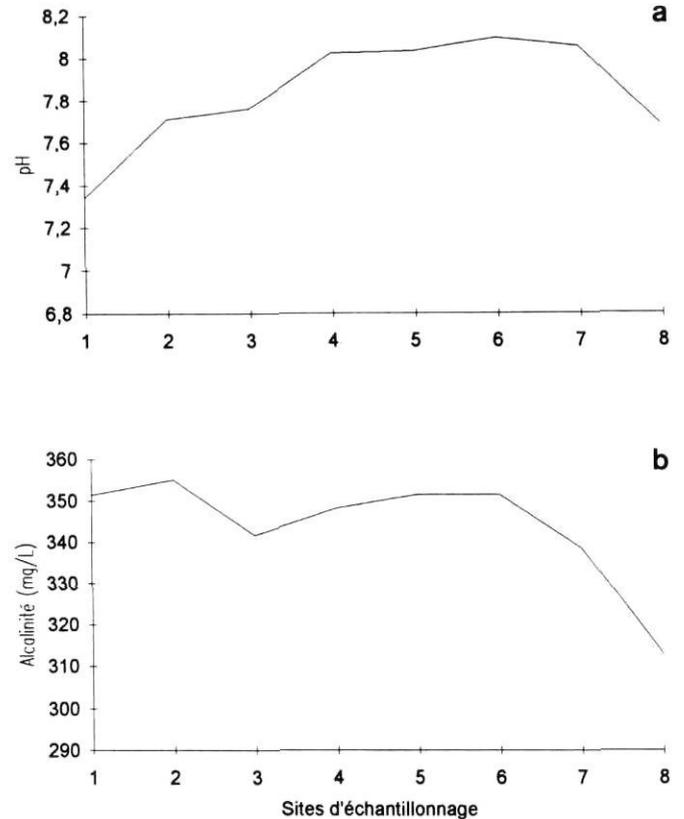


FIGURE 4. a) Le pH au laboratoire, b) alcalinité au laboratoire. a) Laboratory pH, b) laboratory alkalinity.

courbe parallèle à celle du Si_c avec pour seule nuance une valeur moins élevée et une sous-saturation à la source (fig. 5a).

3) les eaux du ruisseau sont sursaturées vis-à-vis de la dolomite (Si_d), que la courbe du Si_d a la même allure que les deux courbes précédentes, mais que la sursaturation n'est pas atteinte à la source (fig. 5b).

4) les eaux restent presque constamment sous-saturées vis-à-vis de la magnésite (fig. 5b).

5) les ions sulfates sont présents (3,2 à 23,5 mg/l), mais les eaux sont sous-saturées vis-à-vis du gypse (Si_g) et vis-à-vis de l'anhydrite (Si_{an}) (fig. 5c). Les deux indices montrent une courbe croissante jusqu'au site 3; ensuite on constate des fluctuations entre les sites 4,5,7, et 8. Il faut préciser ici que le bassin du tronc (site 7) reçoit la majorité de ses eaux à partir du site 5 du ruisseau et que les valeurs du Si_g et du Si_{an} sont proches de celles obtenues au site 5. On constate une forte diminution de ces deux indices dans le bassin F (site 6); elle correspond à une baisse de la concentration des ions SO₄⁻. Cette baisse en sulfate pourrait être liée aux conditions particulières dans lesquelles le bassin F se trouvait en 1992. En effet, le bassin était vide en 1988 et se remplissait en 1989. En juillet 1992, le bassin était rempli et se vidangeait vers le nord (vers le bassin O, voir fig. 1) avec quelques suintements vers le sud et les mousses commençaient à peine à pousser au sommet du barrage. L'écosystème était donc seulement en cours de régénération. Cependant, il est

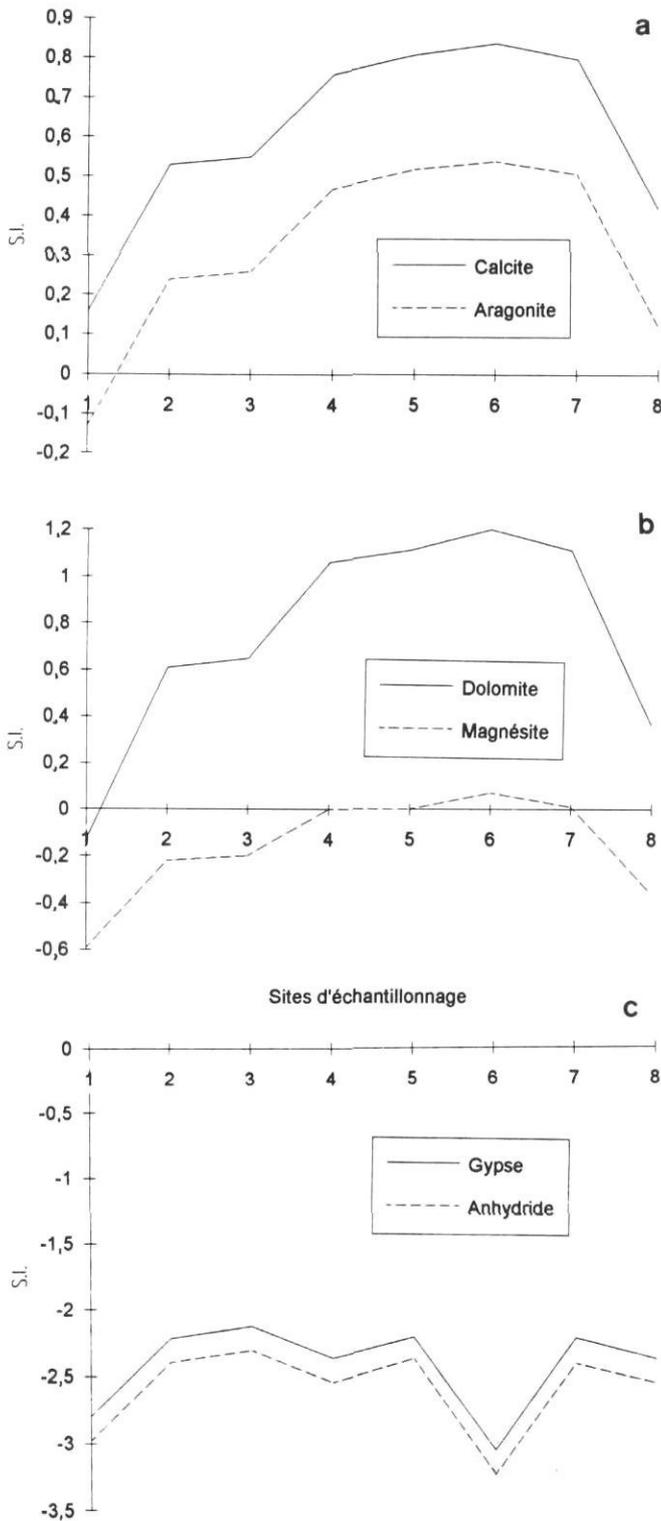


FIGURE 5. a) Les indices de saturation [*saturation indexes* (Si)] vis-à-vis de la calcite (Si_c) et vis-à-vis de l'aragonite (Si_{ar}), b) les indices de saturations vis-à-vis de la dolomite (Si_d) et vis-à-vis de la magnésite (Si_{ma}), c) les indices de saturation vis-à-vis du gypse (Si_g) et vis-à-vis de l'anhydrite (Si_{an}).

a) *The saturation indexes with respect to calcite (Si_c) and aragonite (Si_{ar}), b) The saturation indexes with respect to dolomite (Si_d) and with respect to magnesite (Si_{ma}), c) The saturation indexes with respect to gypsum (Si_g) and with respect to anhydrite (Si_{an}).*

prématuré de tirer des conclusions concernant cette baisse puisque nous ne possédons actuellement que cette seule observation. Enfin, les teneurs en sulfate que nous avons observées sont comparables à celles qui ont été obtenues par Crandall et Sadler-Brown (1976), ainsi que celles obtenues par le ministère des Affaires indiennes et du Nord en 1985 (communication personnelle de monsieur McRay).

La pression partielle théorique de CO_2

Le chiffre du $pPCO_2$ (terme qui désigne $-Log PCO_2$, selon Wigley, 1977) augmente depuis la source jusqu'aux sites 6 et 7 et il chute à l'exurgence (fig. 6a). La pression partielle de CO_2 (PCO_2) correspond à la phase gazeuse avec laquelle l'échantillon d'eau est supposé en équilibre; elle se calcule de la façon suivante :

$$PCO_2 = \frac{a_{HCO_3^-} \cdot a_{H^+}}{K_1(T) \cdot K_{CO_2}(T)}$$

équation dans laquelle $a_{HCO_3^-}$ et a_{H^+} sont les activités ioniques, $K_1(T)$ est la première constante de dissociation de H_2CO_3 et $K_{CO_2}(T)$ est la constante de la loi de Henry pour le CO_2 (Herman et Lorah, 1987), et ces dernières dépendent de la température qui, dans le cas du ruisseau analysé, ne varie guère. Par conséquent, il n'est pas étonnant que la PCO_2 qui combine les observations de l'alcalinité et du pH montre :

1) que le long du cours d'eau on assiste à un dégazage par brassage cinétique et seulement à une légère perte des ions alcalins,

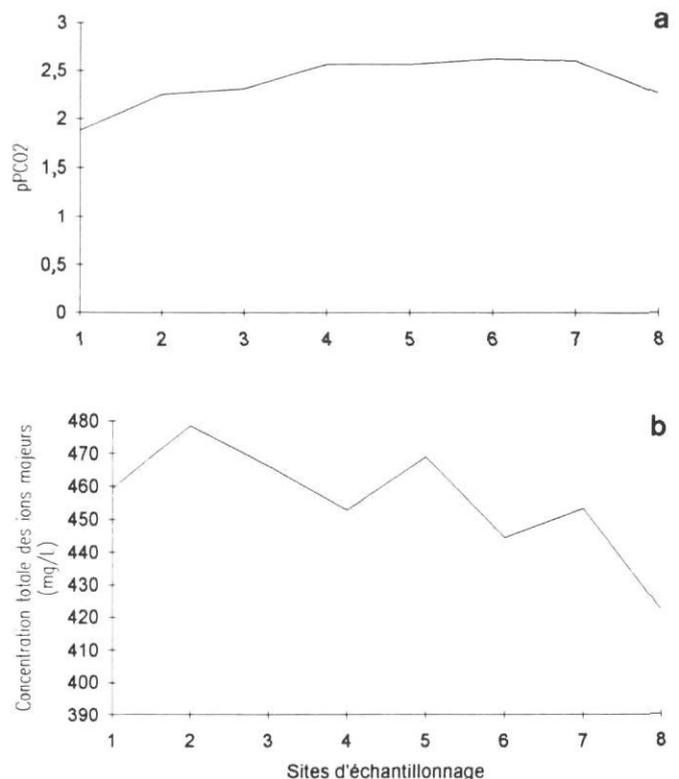


FIGURE 6. a) Le $pPCO_2$, b) Concentration totale des ions majeurs.

a) *The $pPCO_2$ values, b) Total concentration of major ions.*

2) que la pression partielle de CO_2 est minimale dans le bassin F, alors que l'alcalinité y est très élevée, ce qui représente des conditions chimiques excellentes pour la précipitation,

3) que la pression partielle de CO_2 a diminué dans le bassin du tronc par rapport aux cascades qui l'ont précédé, ce qui indique un dégazage également, et

4) que la pression partielle de CO_2 est réaugmentée au niveau de l'exsurgence. Or, il y a eu baisse de l'alcalinité,

donc il y a eu précipitation dans le parcours souterrain, mais en même temps diminution du pH. Par conséquent, la déshydratation du CO_2 y est incomplète.

Évaluation de la minéralisation

L'eau de la source est minéralisée à 459 ppm (incluant HCO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^- , Na^+ et K^+) et chute jusqu'à 420 ppm (tabl. II et fig. 6b). On note que Na^+ se maintient entre 1,16 et 1,10 mg/l, K^+ entre 0,77 et 0,59 mg/l, Si entre 3,05 et 2,87 mg/l et S se maintient entre 7,89 et 7,47 mg/l. On

TABLEAU II

Analyses spectrométriques des ions de la source à l'exsurgence

Site	HCO_3^- mg/L	Ca^{++} mg/L	Mg^{++} mg/L	SO_4^- mg/L	S mg/L	Si mg/L	Na^{++} mg/L	Balance ionique %
source 1	351,4	83,63	17,49	5,0	7,82	2,87	1,15	0,92
2	355,0	85,14	17,80	18,6	7,89	2,97	1,14	-1,10
3	341,6	82,02	17,30	23,5	7,80	2,95	1,15	1,84
4	348,2	71,19	17,48	14,1	7,48	2,90	1,12	8,92
5	351,4	78,85	17,03	19,9	7,50	2,79	1,10	6,94
6	351,4	70,97	217,03	3,2	7,47	3,05	1,10	7,77
7	338,4	77,22	17,75	18,4	7,82	2,92	1,16	5,01
exsurgence 8	312,6	77,24	18,24	12,4	7,62	2,87	1,13	0,42

Site	K+ mg/L	NO_3 mg/L	NO_2 mg/L	Sr mg/L	Br- mg/L	Cl- mg/L	F- mg/L
source 1	0,68	<0,5	<0,2	0,101	<0,1	<0,1	<0,1
2	0,77	<0,5	<0,2	0,104	<0,1	<0,1	<0,1
3	0,70	<0,5	<0,2	0,103	<0,1	<0,1	<0,1
4	0,69	<0,5	<0,2	0,101	<0,1	<0,1	<0,1
5	0,75	<0,5	<0,2	0,098	<0,1	<0,1	<0,1
6	0,64	<0,5	<0,2	0,098	<0,1	<0,1	<0,1
7	0,59	<0,5	<0,2	0,102	<0,1	<0,1	<0,1
exsurgence 8	0,60	<0,5	<0,2	0,104	<0,1	<0,1	<0,1

Site	Na mg/L	P mg/L	Pb mg/L	Ni	Zn mg/L	Li mg/L	Al mg/L
source 1	0,079	<0,05	<0,03	<0,010	0,026	0,008	<0,008
2	0,080	<0,05	<0,03	<0,010	0,011	0,010	<0,008
3	0,080	<0,05	<0,03	<0,010	0,010	<0,005	<0,008
4	0,077	<0,05	<0,03	<0,010	<0,004	0,008	<0,008
5	0,076	<0,05	<0,03	<0,010	0,013	0,006	<0,008
6	0,078	<0,05	<0,03	<0,010	0,005	0,008	<0,008
7	0,078	<0,05	<0,03	<0,010	<0,004	<0,005	<0,008
exsurgence 8	0,082	<0,05	<0,03	<0,010	<0,004	0,009	<0,008

Site	Co mg/L	Cr mg/L	Fe mg/L	B	Cu mg/L	Mn mg/L	Be mg/L
source 1	<0,005	<0,005	<0,005	0,004	<0,004	<0,003	<0,002
2	<0,005	<0,005	<0,005	0,006	<0,004	<0,003	<0,002
3	<0,005	<0,005	<0,005	0,004	<0,004	<0,003	<0,002
4	0,007	<0,005	<0,005	0,003	<0,004	<0,003	<0,002
5	<0,005	0,008	<0,005	0,002	<0,006	<0,003	<0,002
6	0,008	<0,005	<0,005	0,002	<0,004	0,003	<0,002
7	<0,005	<0,005	<0,005	0,009	<0,004	<0,003	<0,002
exsurgence 8	0,006	0,006	0,005	0,014	<0,004	<0,003	<0,002

remarque que les teneurs en sodium sont faibles. Le chlore, le fluor et le fer sont présents en teneurs négligeables et ils n'ont pas été inclus dans la somme des ions.

Conclusions des analyses de laboratoires

Les analyses de laboratoire ont ajouté des informations pertinentes à la compréhension de la physico-chimie de ce géosystème.

Premièrement le fait que l'eau soit sursaturée vis-à-vis de la calcite depuis le bassin des sources explique la localisation des premières incrustations carbonatées qui sont observables au pied du déversoir (anthropique) de ce bassin. Ceci n'était pas explicable avec les seules analyses effectuées sur le terrain. Par ailleurs, la sursaturation est maximale dans les sites 4,5,6,7, sur la zone principale du massif, là où se développent les phytohermes. La balance ionique y est la moins équilibrée et la pression partielle de CO₂ la plus basse. C'est dans ces sites que la topographie accidentée engendre plus de turbulence et donc une augmentation du brassage et du dégazage de l'eau.

Deuxièmement, la sursaturation vis-à-vis de l'aragonite, de la dolomite et, en certains sites, de la magnésite, ainsi que la chute des indices de saturation respectifs à l'exsurgence incitent à chercher ces minéraux dans le travertin.

Troisièmement, la présence des ions sulfates susceptibles de produire du gypse ou de l'anhydrite est également mise en évidence, mais la variation de concentration ne peut pas encore être expliquée, et les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de ces minéraux.

Quatrièmement, la perte des ions bicarbonates s'effectue déjà dans les cascades avant le bassin hexagonal. La tufière y est active actuellement. Il n'y a pas d'indice certain montrant que la précipitation s'effectue actuellement aux points 4,5,6. Par contre, il y a une perte évidente des ions bicarbonates, soit entre le point 5 (bas de cascade) et le bassin du tronc et entre le bassin du tronc et l'exsurgence. On constate que 66 % des pertes en ions bicarbonates s'effectuent le long du cours souterrain de l'eau. On peut donc en déduire que ce géosystème, en cours de régénération, cimente actuellement la porosité interne de ses barrages.

Enfin, la part en ions sodium et potassium et en silice est très faible. Il est donc probable que ces eaux hydrothermales soient fort peu en contact avec des produits d'altération de basaltes alcalins (cas décrits par Clark *et al.*, 1989, pour les travertins du Mount Edziza en Colombie-Britannique).

CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude montrent que le géosystème des travertins de Coal River possède actuellement les propriétés physico-chimiques nécessaires à sa régénération : à savoir un dégazage rapide de l'eau dès le bassin des sources et une sursaturation croissante vis-à-vis de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite, le long du cours d'eau, jusqu'à l'ensemble des grands phytohermes. Actuellement, on constate aussi que les pertes ioniques se réalisent majoritairement dans le parcours souterrain du cours d'eau, c'est-à-dire à travers la porosité des barrages. On peut donc en déduire

que le géosystème cimente ses pores, ses fissures, voire ses conduits karstiques, c'est-à-dire qu'il se consolide au moins depuis 1989. Enfin, les analyses ont montré une faible quantité d'éléments pouvant être en relation avec des roches basaltiques. Ceci confirme donc que les eaux sont actuellement fortement reliées aux eaux météoriques comme la première analyse isotopique l'avait montré (Geurts *et al.*, 1992). Cette information est utile pour la compréhension de la stratigraphie et de la chronologie isotopique qui suivra dans un troisième article consacré à la réserve écologique de Coal River Springs.

REMERCIEMENTS

Les auteures remercient monsieur John Loop qui a effectué les analyses au spectromètre, mesdames Monique Frappier et Xiaoping Shen pour les deux premiers dessins. Le voyage sur le terrain a été financé par l'Université d'Ottawa et par la Société royale canadienne de géographie. La deuxième auteure a reçu une bourse d'été du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada et du Programme de formation scientifique dans le Nord du ministère des Affaires indiennes et du Nord canadien. L'expédition sur le terrain a bénéficié de l'organisation matérielle du Service des parcs du Yukon. Nous remercions spécialement monsieur F.A. McRae, qui nous a donné accès à une documentation antérieure à la nôtre. Messieurs Pierre Pagé et Ian Clark ont eu l'amabilité de bien vouloir critiquer notre manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Adolphe, J.P., 1987. Exoscopie comparée de cryoségrégations calciques et de cristallisations carbonatées biogènes, p. 227-233. *In* M. Pécsi et H.M. French (édit.), *Loess and Periglacial Phenomena*. Akademia Kiadó, Budapest.
- Adolphe, J.P. et Loubière, J.F., 1987. Études préliminaires des calcins du nord-est du Groenland, p. 275-283. *In* M. Pécsi et H.M. French (édit.), *Loess and Periglacial Phenomena*. Akademia Kiadó, Budapest.
- Akdim, B., 1991. Genèse des carbonates terrestres dans la dépression de Quarzazate (Maroc méridional). Thèse de doctorat, Département de géographie, Université d'Ottawa, 245 p.
- Brandon, L.V., 1965. Groundwater Hydrology and Water Supply in the District of Mackenzie, Yukon Territory, and Adjoining Parts of British Columbia. Geological Survey of Canada, Ottawa. Paper 64-39 : 102 p.
- Chafetz, H.S., Rush, P.F. et Utech, N.M., 1991. Microenvironmental controls on the mineralogy and habit of CaCO₃ precipitates : An example from an active travertine system. *Sedimentology*, 38 : 107-126.
- Clark, I.D., Fritz P. et Souther, J.G. 1989. Geochemistry and isotope hydrogeology of Mount Edziza — Mess Creek geothermal area. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26 : 1160-1171.
- Clark, I.D. et Fontes, J.-C., 1990. Paleoclimatic reconstruction in northern Oman based on carbonates from hyperalkaline groundwaters. *Quaternary Research* 33 : 320-336.
- Clark, I.D. et Lauriol B., 1992. Kinetic enrichment of stable isotopes in cryogenic calcites. *Chemical Geology (Isotopes Geosciences Section)*, 102 : 217-228.
- Crandall, J.T. et Sadler-Brown, T.L., 1976. Data on Geothermal Areas : Yukon, Northwest Territories and Northernmost British Columbia. Department of Supply and Services, contract 1505-0136.
- Coûteaux, M., 1969. Formation et chronologie des tufs calcaires du Luxembourg Belgo-Grand Ducal. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 3 : 167-183.

- Davies, D., Kennedy, C.E. et McKenna, K., 1983. Coal River Springs Preliminary Biophysical Inventory. Land Planning Branch, Department of Renewable Resources, Government of Yukon, 78 p.
- Ek, C. et Pissart, A., 1965. Dépôt de carbonate de calcium par congélation et teneur en bicarbonate des eaux résiduelles. Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, 260(9) : 929-932.
- Ford, M., 1981. Les travertins de Samdo (Himalaya du Népal) : un exemple de concrétionnement carbonaté en haute altitude, p. 79-88. In Formations carbonatées externes, tufs et travertins. Actes du colloque organisé par l'Association des géographes français, Paris, 9 mai 1981.
- Geurts, M.-A., 1975. Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique. Dissertation doctorale, Université catholique de Louvain, 192 p. et 66 p. d'annexes.
- 1976a. Formation des travertins de fond de vallée sous climat tempéré océanique. Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, 282, série D : 275-276.
- 1976b. Genèse et âge des travertins de fond de vallée en Belgique. Actes du 94^e Congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences (0904), 9 p.
- 1976c. Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique. Acta Geographica Lovaniensa, 66 p.
- 1988. De l'aéropalynologie aux paléocirculations atmosphériques : cas des travertins holocènes. Géographie physique et Quaternaire, 42(1) : 97-99.
- Geurts, M.-A., Frappier, M. et Tsien, H.H., 1992. Morphologie des barrages de travertin de Coal River Springs, sud-est du Territoire du Yukon. Géographie physique et Quaternaire, 46(2) : 221-232.
- Harris, D.C., 1987. Quantitative Chemical Analysis. 2^e éd., W.H. Freeman & Co., New York, 818 p.
- Herman, J.S. et Lorah, M.M., 1987. CO₂ outgassing and calcite precipitation in Falling Spring Creek, Virginia, U.S.A. Chemical Geology, 62 : 251-262.
- 1988. Calcite precipitation rates in the field. Measurement and prediction for a travertine-depositing stream. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52 : 2347-2355.
- Lorah, M.M. et Herman, J.S., 1988. The chemical evolution of a travertine depositing stream : Geochemical processes and mass transfer reactions. Water Resources Research, 24 (9) : 1541-1552.
- Rose, L., 1983. Alkalinity, its meaning and measurement. Cave Science, 10 (1) : 21-29.
- Roque, H., 1964. Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique - eau - carbonate. Annales de spéléologie, 19 : 255-484.
- Souther, J.G. et Halstead, E.C., 1973. Mineral and thermal waters of Canada. Energy, Mines and Resources, Ottawa, Paper 73-18 : 225-256.
- Swett, K., 1974. Calcrete crust in an Arctic permafrost environment. American Journal of Science, 274 : 1059-1063.
- Turi, B., 1986. Stable isotope geochemistry of travertines p. 207-238. In P. Fritz P. et J.-C. Fontes, édit., Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier, Amsterdam.
- Vaudour, J., 1984. Les travertins de piedmont : contribution à l'étude des géosystèmes karstiques méditerranéens, p. 349-362. In Montagnes et Piedmont, R.G.P.S.O., Toulouse.
- Wigley, T.M.L., 1977. A computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions. British Geomorphological Research Group. Technical Bulletin 20, 49 p.