



HAL
open science

État des recherches sur l'hydrologie, l'hydrochimie et la travertinisation actuelle dans le bassin supérieur de l'Argens (Var)

Claude Martin, Jacques Covo, Jean Mazet, André Delgiovine

► **To cite this version:**

Claude Martin, Jacques Covo, Jean Mazet, André Delgiovine. État des recherches sur l'hydrologie, l'hydrochimie et la travertinisation actuelle dans le bassin supérieur de l'Argens (Var). *Études de Géographie Physique*, 1991, XX, pp.47-60. hal-00443082

HAL Id: hal-00443082

<https://hal.science/hal-00443082>

Submitted on 28 Dec 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉTAT DES RECHERCHES SUR L'HYDROLOGIE, L'HYDROCHIMIE ET LA TRAVERTINISATION ACTUELLE DANS LE BASSIN SUPÉRIEUR DE L'ARGENS (VAR)

par C. MARTIN *

avec la collaboration technique de J. COVO, J. MAZET et A. DELGIOVINE *

RÉSUMÉ : Les observations hydrologiques et hydrochimiques effectuées de septembre 1986 à août 1990 dans la haute vallée de l'Argens n'ont pas encore toutes été dépouillées. Parmi les résultats acquis, les plus intéressants concernent la travertinisation actuelle. La construction d'édifices travertineux bénéficie de la sursaturation des eaux des ruisseaux par rapport à la calcite. Les teneurs en carbone-13 des travertins indiquent que la précipitation des carbonates est d'origine physico-chimique. Cependant la pollution des eaux freine le développement du phénomène.

MOTS CLÉS: Composition chimique des eaux, précipitation des carbonates, Basse Provence calcaire.

ABSTRACT : Hydrological and hydrochemical measures carried out in the upper part of the Argens valley between September 1986 and August 1990 are not now all analysed. The most interesting established results concern actual settling deposition of travertine. This phenomenon is promoted by water supersaturation in reference to the calcite. ^{13}C contents of travertines show that calcium carbonate precipitation has a physico-chemical cause. However stream water pollution limits deposit process.

KEY WORDS : Water chemical composition, calcium carbonate precipitation, calcareous Basse Provence.

I - INTRODUCTION

Le bassin de l'Argens, dans sa partie supérieure, en amont de Châteauvert, constitue l'un des terrains d'activité privilégiés de l'URA 903. Les recherches hydrologiques et hydrochimiques les plus poussées ont été conduites de septembre 1986 à août 1990. Dans le cadre de cette étude, plus de 600 échantillons d'eau ont été analysés. Les prélèvements ont été effectués dans des flacons en polyéthylène bouchés sous l'eau. Les échantillons ont été transportés et conservés au froid.

Les manipulations au laboratoire, ont toujours débuté le lendemain des prélèvements. Elles ont porté sur la détermination du pH et de la conductivité, les dosages du calcium, du magnésium et du calcium complexé (par complexométrie), du sodium et du potassium (par photométrie de flamme), du TAC - exprimé en ions bicarbonates - et des ions chlorures (par volumétrie), de la silice, des ions nitrates et des ions orthophosphates (par colorimétrie). Certaines mesures ont été effectuées avant que les échantillons soient filtrés, après une courte période de décantation : pH, conductivité, teneurs en ions HCO_3^- et en alcalino-terreux. La bonne stabilité de la composition chimique des eaux entre le prélèvement et la détermination des paramètres dont la valeur est liée aux équilibres calco-carboniques, a été plusieurs fois vérifiée en comparant les conductivités mesurées sur le terrain et au laboratoire.

La plupart des eaux étudiées, notamment celles de l'Argens, n'ont pas montré de modification sensible à cet égard. Pour les plus instables, celles des ruisseaux des Mennes et des Rigouards, la conductivité a diminué de 15 à 20 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$ en 24 heures (ce qui représente 2 à 4 % de la valeur initiale).

Les pH d'équilibre des eaux par rapport à la calcite (pHé), les dpH (pH mesuré - pHé), les teneurs en CO_2 et les pCO_2 équilibrantes, ont été déterminés à l'aide d'un programme de calcul tenant compte de la force ionique des solutions, de la présence des produits complexants décelés par les dosages et de l'influence des ions appareillés MgHCO_3^+ , CaSO_4^0 , KHCO_3^0 et NaHCO_3^0 (cf. H. ROQUES, 1964, 1972 ; A. AMINOT, 1975 ; et M. BAKALOWICZ, 1980). Toutes les données recueillies (jaugeages, enregistrements limnigraphiques, analyses d'eau, etc.) n'ont pas encore été traitées. Notre propos se limitera donc à présenter les principaux résultats disponibles.

* U.R.A. 903 du CNRS, Institut de Géographie, 29 Avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence, Cédex France.

II - RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE ET COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX

L'Argens naît au pied du plateau calcaire et dolomitique des Selves. Les principales émergences sont la Source d'Argens, la source de la Meyronne et la zone sourceuse de Sceaux (Fig. 1).



FIGURE 1 - Présentation du terrain d'étude

● : point de prélèvement avec limnigraphe.

La Source d'Argens apparaît, à 270 m d'altitude, près du contact entre les terrains jurassiques du plateau des Selves, à l'Ouest, et le Trias recouvert de Miocène, à l'Est. Elle présente un débit moyen de l'ordre de 500 l/s. En crue, les débits peuvent dépasser 5 m³/s. En revanche, l'écoulement est très faible lors des étiages des années sèches (à peine 20 l/s pendant une grande partie de l'année 1989-90). Cependant plusieurs griffons se trouvent en aval du limnigraphe géré par le SRAE : 60 l/s environ échappent ainsi aux mesures. Les analyses bactériologiques effectuées pour l'alimentation en eau des villages de Seillons et de Brue-Auriac, mettent en évidence la présence de nombreux streptocoques fécaux. Celle-ci résulte de la pollution de la nappe karstique par les rejets d'eaux souillées des quelques fermes disséminées sur le plateau des Selves et, peut-être aussi, du village d'Ollières. Les eaux sont typiquement bicarbonatées-calciques (Tab. I). La dissolution des dolomies se traduit

néanmoins par des teneurs en magnésium proches de 20 mg/l à l'étiage. La Source d'Argens est homotherme : les températures mesurées de septembre 1986 à septembre 1990 varient entre 14,2 et 15,5 °C. Ces valeurs sont nettement supérieures à la température moyenne de l'air sur la zone d'alimentation de la source (11-12 °C). Les eaux effectuent donc un parcours souterrain très profond.

TABLEAU I - Caractères physico-chimiques des eaux de la Source d'Argens et de la source de la Meyronne (Teneurs exprimées en mg/l).

	Source d'Argens			Source de la Meyronne		
	23/11/1987	18/1/1988	6/6/1988	23/11/1987	18/1/1988	6/6/1988
Qi (l/s)	400	2 030	415	-	-	-
T°C	15,0	14,2	14,8	14,1	13,7	14,5
pH	7,05	7,03	7,04	7,06	7,04	7,03
Cond.	606	622	631	601	623	648
SiO ₂	5,7	5,0	5,8	5,3	4,8	5,5
Ca ²⁺	123	127	125	123	127	124
Mg ²⁺	7,5	6,8	11,3	7,0	6,8	13,3
K ⁺	0,39	0,33	0,46	0,27	0,28	0,35
Na ⁺	3,5	3,4	3,9	3,2	3,3	4,0
TAC - HCO ₃ ⁻	385	392	409	384	392	419
Cl ⁻	6,9	5,9	7,2	6,3	5,6	7,5
SO ₄ ²⁻	14,0	13,3	16,0	12,4	15,7	15,1
NO ₃ ⁻	2,6	2,3	1,5	2,3	1,7	1,6
PO ₄ ³⁻	0,12	0,05	0,04	0,07	0,05	0,04
Ca c	2,2	1,2	4,8	1,8	3,0	4,8
pHé	7,02	7,00	7,03	7,03	7,02	7,04
dpH	+ 0,03	+ 0,03	+ 0,01	+ 0,03	+ 0,02	- 0,01
CO ₂	57,7	62,9	61,7	57,4	61,2	65,0
pCO ₂ (%)	2,87	3,06	3,05	2,78	2,93	3,19

Qi : débit instantané . T : température de l'eau . Cond. : conductivité à 25 °C (μS/cm/cm²) .
 Ca c : calcium complexé . pHé : pH d'équilibre par rapport à la calcite . dpH : pH - pHé .
 pCO₂ : pression partielle en CO₂ de la phase gazeuse équilibrante (en % d'atmosphère) .

La source de la Meyronne (à 290 m d'altitude) est une source temporaire fonctionnant pour des débits à la station limnigraphique de la Source d'Argens supérieurs à 350 l/s. En crue, la source de la Meyronne évacue parfois plusieurs m³/s. La composition chimique des eaux de cette source diffère légèrement de celle des eaux de la Source d'Argens (Tab. I). Elles sont en outre un peu plus froides. Il n'y a donc pas équivalence rigoureuse entre les deux bassins d'alimentation ; mais il est possible, sinon vraisemblable, que la source de la Meyronne soit alimentée par une partie du bassin d'alimentation de la Source d'Argens.

La zone sourceuse de Sceaux, vers 270 m d'altitude, est située à quatre kilomètres à l'Est du plateau des Selves. Les eaux sourdent de terrains jurassiques. Elles présentent également un faciès bicarbonaté-calcique (Tab. II). Les teneurs en ions nitrates témoignent d'une pollution non négligeable. Les causes possibles de cette pollution ne manquent pas, à commencer par la présence, dans le secteur, d'un élevage porcin. Il semble, enfin, que le débit des sourcins ne subisse pas de variations brutales. On se trouve donc à l'exutoire d'un système peu karstifié (plaine de Saint-Maximin) ou au débouché de la partie aval peu karstifiée d'un système plus étendu et plus complexe.

TABLEAU II - Caractères physico-chimiques des eaux d'un sourcin de la zone de Sceaux (exemple du 27 février 1988). (Teneurs en mg/l).

T°C	pH	Cond.	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	TAC-HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
12,4	7,08	637	4,8	118	15,4	0,36	3,8	395	7,6	16,9	5,6	0,03

T et Cond. : voir Tableau I.

Les pCO_2 des eaux des sources d'Argens, de la Meyronne et de Sceaux se placent parmi les plus fortes relevées en Basse Provence (J. MUDRY, 1987 ; Ph. MARTIN, 1991).

En aval de la Source d'Argens, les eaux traversent un marécage où elles se chargent de matière organique en suspension. Elles sont ensuite grossies par la Meyronne, alimentée notamment par la source de la Meyronne, le ruisseau des Fontaines et la zone sourceuse de Sceaux. Le réseau de la Meyronne reçoit les rejets des stations d'épuration de Saint-Maximin et de Seillons. En aval de la confluence, les eaux restent troubles ; elles ne sont vraiment claires que par quelques journées très froides d'hiver. En période de pluies abondantes, l'érosion pluviale des terres cultivées fournit des particules en suspension. Sur la période 1987-90, la turbidité spécifique maximale, relevée le 10 novembre 1987, a atteint 123 mg/l (pour un débit de 4,6 m³/s). Le 17 janvier 1988, le limnigraphe de la station SRAE du Clos d'Auran a enregistré une hauteur d'eau de 4,10 m ; ce qui, d'après la courbe de tarage disponible correspond à un débit supérieur à 40 m³/s. En revanche, au cours de l'hiver 1989-90, l'écoulement est tombé en dessous de 120 l/s. Le plus faible débit jaugé par le SRAE s'élève à 42 l/s (été 1979, en période d'arrosage).

Après la chute du Tombereau, l'Argens reçoit le Cauron. Celui-ci naît dans le massif calcaire de la Sainte Baume, près de Nans-les-Pins. Mais la composition chimique de ses eaux est très vite marquée par l'influence du Trias, riche en lentilles de gypse. Une part importante de son alimentation est fournie, au niveau de Bras, par la source des Gours- Bénits. Celle-ci assure d'ailleurs la quasi-totalité de l'écoulement en période d'étiage, car le ruisseau est alors à sec en amont de Bras. Près de la confluence avec l'Argens, le débit avoisine 100 l/s lors des étiages les plus sévères (automne 1990). Les eaux du Cauron sont bicarbonatées-sulfatées-calciques (Tab. III). Pendant les crues, la composition chimique des eaux subit une forte dilution du fait du ruissellement superficiel sur les parcelles cultivées. Dans le même temps, les eaux se chargent en particules fines (concentration mesurée maximale : 289 mg/l le 10 novembre 1987, pour un débit de 4,0 m³/s). La réponse de

TABLEAU III - Valeurs extrêmes des paramètres physico-chimiques dans les eaux prélevées aux points d'observation principaux (septembre 1986-septembre 1989 ; près de 40 séries de prélèvements). (teneurs en mg/l).

	Source d'Argens	Clos d'Auran	Cauron	Argens amont Eau salée	Eau salée	Argens à Châteauevert
T°C	14,2 - 15,5	8,8 - 17,1	8,5 - 18,0	10,1 - 18,0	4,9 - 21,3	7,8 - 18,9
pH	6,87 - 7,18	7,47 - 7,98	7,72 - 8,23	7,44 - 8,24	7,97 - 8,77	7,77 - 8,28
Cond.	527 - 664	397 - 661	354 - 797	676 - 4132	631 - 4808	769 - 4132
SiO ₂	5,0 - 7,0	4,8 - 8,2	4,6 - 9,1	4,5 - 8,2	3,6 - 7,8	4,3 - 9,1
Ca ²⁺	110 - 131	89,5 - 130	58,7 - 142	101 - 193	62,5 - 162	91,3 - 183
Mg ²⁺	5,0 - 20,4	7,0 - 19,7	7,3 - 24,3	9,7 - 38,7	10,7 - 44,3	11,6 - 40,4
K ⁺	0,3 - 1,4	0,5 - 2,6	1,1 - 3,6	2,2 - 24,8	5,9 - 37,5	3,2 - 26,3
Na ⁺	2,7 - 6,8	3,5 - 8,7	4,2 - 6,6	32,3 - 673	52,9 - 839	45,2 - 686
TAC	352 - 414	280 - 405	160 - 373	280 - 400	173 - 360	238 - 366
Cl ⁻	5,4 - 11,0	7,3 - 15,9	8,7 - 14,7	54,1 - 1011	82,5 - 1266	80,0 - 1021
SO ₄ ²⁻	11,6 - 22,3	15,4 - 27,4	37,6 - 153	43,8 - 363	64,0 - 316	61,5 - 348
NO ₃ ⁻ #	0,9 - 5,0	2,7 - 6,1	3,2 - 9,8	2,5 - 5,2	0,6 - 5,7	2,2 - 4,3
PO ₄ ³⁻ §	0,01 - 0,12	0,03 - 0,66	0,05 - 0,45	0,03 - 0,28	0,11 - 0,56	0,03 - 0,30
Ca c *	0,0 - 13,6	0,6 - 28,2	0,8 - 36,9	1,6 - 33,8	0,2 - 28,6	2,1 - >33
pHé	6,99 - 7,18	7,04 - 7,35	7,19 - 7,81	7,29 - 7,66	7,41 - 7,87	7,34 - >7,65
CO ₂	48,0 - 89,5	6,9 - 20,2	3,4 - 6,6	3,0 - 15,5	0,8 - 4,2	2,9 - 7,7
pCO ₂ (%)	2,38 - 4,42	0,33 - 0,94	0,16 - 0,32	0,16 - 0,79	0,04 - 0,18	0,14 - 0,39

T, Cond., Ca c, pHé, pCO₂ : voir Tableau I. TAC : titre alcalimétrique complet, exprimé en HCO₃⁻.

: à partir de février 1987. § : à partir de mars 1987. * : à partir de septembre 1987.

SiO₂ : les valeurs présentées antérieurement (C.MARTIN, 1988) ont été corrigées après vérification des étalons.

l'écoulement aux précipitations est d'ailleurs assez brutale. Le fonctionnement de la station d'épuration de Bras a été sensiblement amélioré en 1988, et les eaux ne sont plus rendues turbides par ses rejets. Le lit du Cauron est envahi par une végétation aquatique extrêmement dense. En avril 1987, puis en mars-avril 1988, le fond du ruisseau et les plantes aquatiques ont été recouverts d'un voile brunâtre constitué de minces filaments algaires. Ce phénomène s'est accompagné d'une diminution sensible de la teneur des eaux en silice. Ainsi, entre le 16 mars et le 2 avril 1987, la teneur en cet élément est passée de 7,6 à 5,4 mg/l, avec des débits de 380-390 l/s environ.

L'Argens est ensuite rejoint par le ruisseau de Font-Taillade (pollué par Brue-Auriac) et par celui des Rigouards. Cependant, jusqu'à la source salée des Eaux Claires, très abondante, la composition chimique des eaux ne subit que peu de modifications (Tab. IV). Notons qu'au début de l'automne 1990, l'Argens a totalement tari un peu en aval du pont de Montaud.

TABLEAU IV - Variations des caractères physico-chimiques des eaux de l'Argens entre la source et Châteauvert (prélèvements des 30 mars et 2 avril 1986). (Teneurs en mg/l).

	T°C	pH	Cond.	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	TAC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
A	14,9	7,08	606	6,6	118	12,4	0,48	4,1	383	8	17,8	1,6	0,03
B	10,9	7,78	641	6,2	118	14,1	1	6,8	385	11,2	23,6	4,2	0,32
C	10,8	8,14	654	6,1	121	15,1	1	6,8	379	11,3	41,3	4,3	0,3
D	10,2	8,28	639	5,3	120	14,2	1	6,7	368	11,4	41,8	3,6	0,1
E	10,3	8,33	649	5,5	120	14,1	1,1	6,7	361	11,8	48,5	3,9	0,11
F	10,9	7,88	1905	6,2	144	24,2	10,6	264	334	417	187	3,2	0,07
G	10,7	8,11	2398	5,4	144	26,0	13,4	331	335	521	198	3,0	0,11

T et Cond. : voir Tableau I. TAC : voir Tableau III.
 A : Source d'Argens. B : entre Meyronne et Cauron. C : en aval du Cauron. D : Montaud.
 E : en amont des Eaux Claires. F : entre Eaux Claires et Eaux Salées. G : Châteauvert

En amont de Châteauvert, l'Argens conflue encore avec l'Eau Salée. Ce ruisseau écoule des eaux très riches en sodium et en ions chlorures (Tab. III). Comme le Cauron, l'Eau Salée réagit assez brutalement aux précipitations. Lors des crues, les eaux transportent des quantités importantes de particules en suspension (737 mg/l le 10 novembre 1987, pour un débit de 5,4 m³/s). Les débits d'étiage restent voisins de 200 l/s.

A Châteauvert, l'Argens possède un bassin versant apparent de 485 km². Le SRAE y a jaugé un débit de 43 m³/s (pour une hauteur d'eau à l'échelle limnimétrique de 2,5 m). Le 17 janvier 1978, le limnigraphe a enregistré une hauteur d'eau de 4,48 m ; ce qui correspond à un débit calculé de l'ordre de 160-170 m³/s. Lors des étiages les plus sévères, le débit descend à 500-600 l/s.

III - RECHERCHES SUR LA TRAVERTINISATION ACTUELLE

Dans un travail précédent (C. MARTIN, 1988), nous avons déjà apporté beaucoup d'éléments d'interprétation. Nous avons particulièrement souligné :

- le fait que des teneurs en ions chlorures très élevées n'empêchent pas la travertinisation (Eau Salée en amont de Barjols).
- la présence, dans les eaux, de produits complexant le calcium. La nature de ces produits nous est inconnue. Il ne semble pas, en tout cas, qu'ils soient généralement en quantité suffisante pour entraver la précipitation des carbonates.
- l'influence de la pollution des eaux, qui bloque toute travertinisation sur le ruisseau de Font-Taillade et sur l'Eau Salée en aval de Barjols. Contrairement à l'opinion émise par J. CASANOVA (1986), les ions PO₄³⁻ ne jouent pas un rôle notable dans ce cas. Comme les ions NO₃⁻, ils attestent simplement une pollution dont certains autres éléments peuvent bloquer la travertinisation.
- l'inhibition actuelle de la précipitation physico-chimique des carbonates par rapport aux équilibres calculés.

- l'importance de l'agitation des eaux, qui (même en dehors de toute variation possible du pH) favorise la germination des cristaux de calcite.

Le long de l'Argens, des édifices travertineux imposants, d'âge holocène, se succèdent depuis l'accumulation du Clos d'Auran (en amont du barrage travertineux du Tombereau) et le secteur de Montaud (J. NICOD, 1986, 1988). Le fonctionnement de la travertinisation actuelle a donné lieu aux investigations suivantes:

1. Localisation des dépôts actuels

La travertinisation actuelle débute, de façon très discrète, au niveau des petites cascades situées immédiatement en amont de la chute du Tombereau. Cette chute montre elle-même quelques concrétionnements actifs. Mais la tendance est à l'incision.

Le tableau V, sur l'évolution du pH et de la conductivité des eaux le long de l'Argens, fait ressortir l'augmentation progressive du pH jusqu'à la confluence avec le Cauron. Dans le secteur du Clos d'Auran, les pH sont compris entre 7,47 (en crue) et 7,98. Les dpH sont largement positifs (+ 0,1 à + 0,8) ; les valeurs sont généralement supérieures à + 0,5. Cependant les dpH sont actuellement insuffisants pour déterminer une précipitation abondante des carbonates. Dans le secteur du Tombereau, l'agitation des eaux provoque à la fois une augmentation du pH et une accélération des réactions chimiques. Les dpH dépassent vraisemblablement l'unité. La travertinisation n'en reste pas moins très modeste.

TABLEAU V - pH et conductivité des eaux le 19 décembre 1988

	pH	Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$
Source d'Argens	7,00	623
Argens amont Meyronne	7,59	629
Meyronne amont Argens	7,88	639
Argens aval Meyronne	7,74	638
Argens Clos d'Auran	7,87	636
Argens amont Tombereau (cascades)	8,05	634
Argens aval Tombereau	8,20	632
Cauron Pont de l'Avocade	8,02	763
Argens aval Cauron (Prés de la Cadette)	8,12	686
Argens Pont de Montaud	8,36	670
Argens amont Eaux Claires	8,42	654
Argens amont Eau Salée	7,63	2648
Eau Salée	8,32	3782
Argens à Châteuvert	7,92	2938

Cond. : conductivité à 25°C.

En aval du Cauron, le pH diminue légèrement. Mais le dpH atteint encore + 0,86. Aux alentours des prés de la Cadette, la travertinisation actuelle est très faible. Elle se développe vers l'aval, en liaison avec l'agitation de l'eau et l'augmentation du pH, en particulier dans le secteur des cascades et des chutes du Queirol et de Montaud.

En aval des chutes de Montaud, la pente du thalweg est beaucoup plus faible (4 m par km, contre 15 m par km dans le secteur précédent). Les encroûtements sont modestes.

La source des Eaux Claires provoque une diminution du pH des eaux de l'Argens. Bien que les dpH redeviennent très vite supérieurs à + 0,50, la travertinisation cesse complètement. La confluence avec l'Eau Salée (sur laquelle il n'y a aucune construction travertineuse en aval de Barjols) renforce encore cette évolution.

2. Les conditions de la travertinisation entre les Prés de la Cadette et le Pont de Montaud

Pour 9 séries de prélèvements effectués à partir du 19 décembre 1988 au 20 novembre 1989, les moyennes des pH et des conductivités mesurés s'établissent ainsi :

	Prés de la Cadette	Pont de Montaud
pH	8,15	8,41
Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$)	695	675

Entre les deux points d'observation, les pH augmentent très nettement. La diminution des valeurs de la conductivité, ainsi que des teneurs en calcium et en ions bicarbonates (Tab. VI), peut difficilement être attribuée sans réticence à la seule travertinisation, car des apports d'eaux très différentes de celles de l'Argens aux Prés de la Cadette peuvent également être envisagés.

TABLEAU VI - Caractères physico-chimiques des eaux de l'Argens aux Prés de la Cadette et au Pont de Montaud (6 séries de prélèvements entre le 19 décembre 1988 et le 20 novembre 1989).
(Teneurs exprimées en mg/l).

	Prés de la Cadette		Pont de Montaud	
	Moyenne	Extrêmes	Moyenne	Extrêmes
T°C	13,0	7,7 - 17,7	12,6	5,2 - 20,1
pH	8,14	8,06 - 8,21	8,38	8,26 - 8,45
Cond.	685	638 - 736	664	612 - 716
SiO ₂	7,7	6,7 - 9,7	7,1	6,5 - 7,8
Ca ²⁺	127	125 - 129	124	122 - 127
Mg ²⁺	17,1	11,3 - 21,3	16,4	10,4 - 20,6
K ⁺	1,5	0,94 - 1,8	1,6	0,99 - 1,9
Na ⁺	6,6	4,3 - 8,9	6,5	4,5 - 7,6
TAC - HCO ₃ ⁻	377	371 - 386	367	358 - 374
Cl ⁻	11,4	8,5 - 13,9	11,4	8,9 - 13,4
SO ₄ ⁻⁻	71,5	31,9 - 101	70,5	31,5 - 99
NO ₃ ⁻	5,9	3,4 - 7,4	5,3	3,4 - 6,4
PO ₄ ³⁻	0,56	0,11 - 1,1	0,43	0,07 - 0,84
Ca c	3,2	0,7 - 7,6	3,5	0,3 - 7,6
pHé	7,18	7,10 - 7,26	7,21	7,14 - 7,31
dpH	+ 0,97	0,82 - 1,06	+ 1,17	0,96 - 1,30
CO ₂	4,7	3,7 - 5,8	2,8	1,9 - 3,9
pCO ₂ (%)	0,22	0,19 - 0,26	0,13	0,11 - 0,15

T : température de l'eau . Cond. : conductivité à 25 °C ($\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$) .
Ca c : calcium complexé . pHé : pH d'équilibre par rapport à la calcite . dpH : pH - pHé .
pCO₂ : pression partielle en CO₂ de la phase gazeuse équilibrante (en % d'atmosphère) .

Le secteur de Montaud a donné lieu aux analyses les plus nombreuses. En amont immédiat du pont de la D 34, entre août 1988 et juillet 1990 (24 prélèvements), les pH oscillent entre 8,15 et 8,62 (moyenne = 8,40) et les dpH entre + 0,84 et + 1,42 (moyenne = + 1,17 ; trois valeurs seulement sont inférieures à + 1,00).

Afin d'obtenir des mesures sur la travertinisation actuelle, nous avons disposé, dans le secteur de Montaud, une série de tubes en plastique de 10 cm de longueur et de 1,5 cm de diamètre extérieur, maintenus dans l'eau par un fil de fer attaché à une branche ou à un piquet. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau VII. Les encroûtements observés, inférieurs à 2,5 mm chaque année, apparaissent modestes en comparaison des valeurs fournies par des plaquettes-témoins placées dans le lit de l'Huveaune, en amont de Saint-Zacharie, en 1986 et 1987 (J. MAZET, 1988). L'épaisseur de l'incrustation avait atteint, dans ce cas, jusqu'à 8 mm par mois.

Deux petits cours d'eau qui construisent actuellement des travertins, les ruisseaux des Rigouards (affluent de l'Argens) et des Mennes (affluent de l'Eau Salée), ont fait l'objet d'observations complémentaires (Fig. 2). Les recherches ont porté sur deux années extrêmement sèches : 1988-89 et 1989-90. Le ruisseau des Rigouards a tari au cours de l'été 1989 et il est resté à sec la majeure partie de l'année 1990. Le ruisseau des Mennes a tari au niveau du point d'observation aval au cours de l'été 1990. Les résultats des analyses chimiques des eaux sont résumés dans le tableau VIII.

TABLEAU VII - Mesure des encroûtements sur tubes en plastique dans le secteur de Montaud en 1988-89 (19 décembre 1988 - 5 septembre 1989) et 1989-90 (5 septembre 1989 - 8 octobre 1990).

Station		Remarques	Encroûtements (mm)	
			1988 - 89	1989 - 90
Amont du pont, rive gauche	Tube 1	Sous petite chute	0,9	0,2 *
	Tube 2	Sur fond peu profond	1,3	0,2 *
	Tube 3	Sous petite chute	0,8	<0,4 *
1 ^{er} barrage en aval du pont	Tube 4	Rive gauche	Perdu	<0,2
	Tube 5	Rive droite, peu d'eau	<0,3 *	0,1 *
	Tube 6	Rive droite, peu d'eau	0,4	<0,2 *
	Tube 10	Centre, sommet barrage	Non placé	2,5
Amont de la chute	Tube 7	Centre, haut fond	1,8	Perdu
	Tube 8	Centre, haut fond	<1,0 *	Perdu
	Tube 9	Rive gauche	1,6	Perdu

* : tube hors de l'eau lors du retrait .

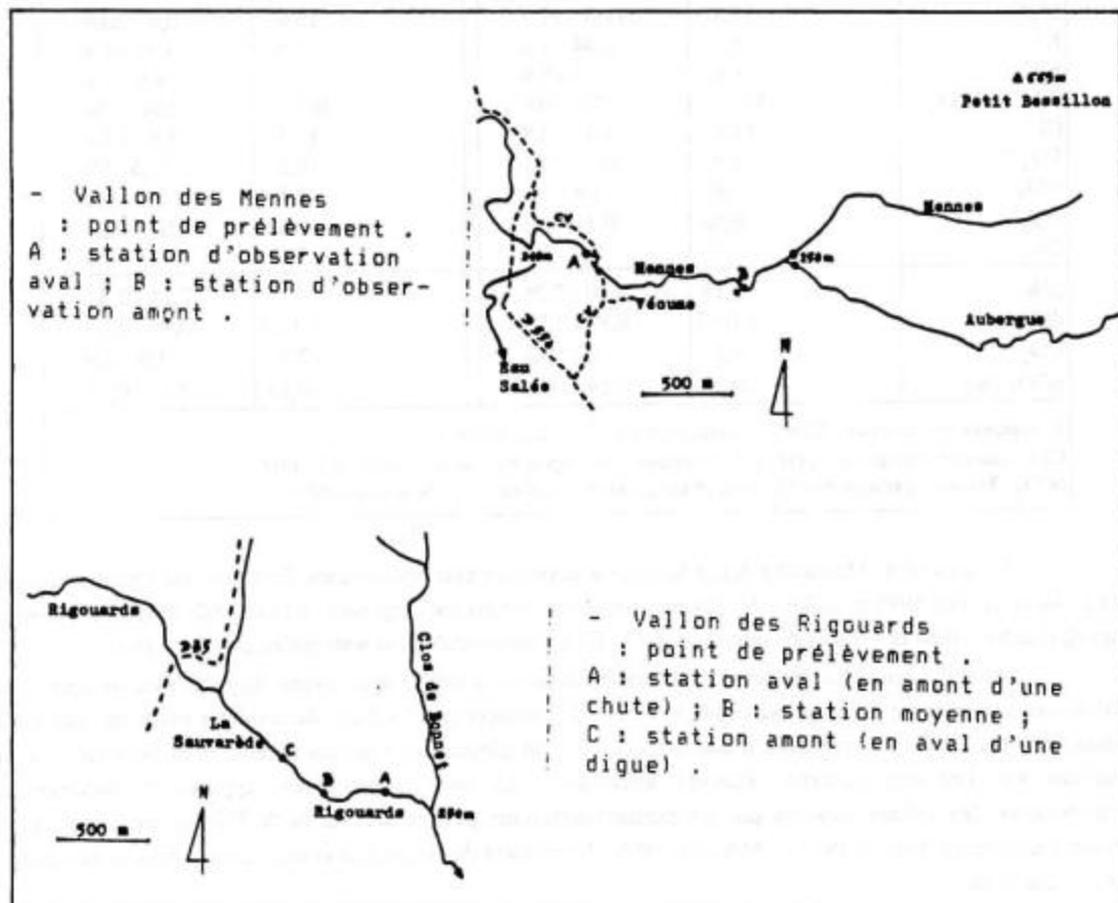


FIGURE 2 - Vallon des Mennes et des Rigouards.

Tableau VIII - Vallons des Mennes et des Rigouards : valeurs extrêmes des paramètres physico-chimiques dans les eaux prélevées aux points d'observation principaux (89 échantillons, pour 23 séries de prélèvements) . (Teneurs en mg/l).

	Mennes (09/88 - 07/90)		Rigouards (09/88 - 05/90)		
	Amont	Aval	Amont	Cours moyen	Aval
Qi (l/s)		<1,0 - 27,0			2,0 - 30,2
T°C	2,9 - 17,3	0,6 - 20,3	1,2 - 17,8	0,0 - 18,4	1,1 - 18,0
pH	8,00 - 8,28	8,06 - 8,38	7,95 - 8,14	7,70 - 8,25	7,38 - 8,11
Cond.	602 - 773	659 - 817	645 - 698	543 - 698	640 - 705
SiO ₂	6,4 - 10,2	6,3 - 10,5	5,1 - 7,5	5,7 - 7,3	5,7 - 8,9
Ca ²⁺	99,4 - 122	110 - 134	117 - 135	96,2 - 129	115 - 131
Mg ²⁺	21,6 - 35,5	25,5 - 34,0	12,4 - 15,1	11,7 - 18,0	10,5 - 16,3
K ⁺	0,68 - 1,2	0,85 - 1,7	0,63 - 0,95	0,70 - 1,5	0,73 - 1,7
Na ⁺	3,4 - 4,2	3,7 - 4,5	4,4 - 5,2	3,8 - 5,1	4,2 - 5,1
TAC - HCO ₃ ⁻	298 - 325	277 - 314	287 - 335	255 - 318	300 - 330
Cl ⁻	6,3 - 8,8	6,5 - 9,0	9,8 - 15,3	7,8 - 15,8	10,1 - 14,5
SO ₄ ⁻⁻	93,5 - 191	128 - 218	67 - 124	67 - 127	95 - 118
NO ₃ ⁻	0,0 - 0,64	0,0 - 0,94	1,0 - 3,5	0,46 - 3,6	0,0 - 3,6
PO ₄ ³⁻	0,04 - 0,34	0,03 - 0,18	0,02 - 0,21	0,03 - 0,11	0,03 - 0,11
Ca c	0,0 - 3,2	0,3 - 14,8	1,6 - 10,4	0,0 - 12,0	1,2 - 10,8
pHé	7,30 - 7,49	7,31 - 7,55	7,17 - 7,44	7,24 - 7,53	7,14 - 7,44
dpH	0,67 - 0,96	0,62 - 1,07	0,53 - 0,91	0,35 - 0,94	0,24 - 0,83
CO ₂	2,7 - 5,6	1,7 - 5,0	3,2 - 7,0	2,2 - 9,3	3,9 - 21,0
pCO ₂ (%)	0,13 - 0,25	0,09 - 0,20	0,17 - 0,26	0,12 - 0,47	0,13 - 1,19

Qi : débit instantané . T : température de l'eau . Cond. : conductivité à 25 °C (μS/cm/cm²) .
 Ca c : calcium complexé . pHé : pH d'équilibre par rapport à la calcite . dpH : pH - pHé .
 pCO₂ : pression partielle en CO₂ de la phase gazeuse équilibrante (en % d'atmosphère) .

En octobre 1988, des plaquettes de calcaire préalablement pesées (diamètre = 7,2 ; épaisseur = 1 cm ; surface totale = 104 cm²) ont été placées dans de petites fosses creusées dans les travertins au fond du lit des ruisseaux des Mennes et des Rigouards. A la fin du cycle hydrologique, le poids du carbonate de calcium accumulé sur les plaquettes encore en place a été déterminé par pesée après passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures (Tableau IX). Certes, les valeurs obtenues n'ont rien d'exceptionnel (J. MAZET, 1988), mais elles dénotent une bonne capacité à la travertinisation. Les sommets des barrages, et plus encore les secteurs où l'eau est très agitée (Mennes aval), sont les plus favorables à la précipitation. En 1989-90, l'étude a été prolongée par la mise en place dans le ruisseau des Mennes de tubes en plastique. Du 12 septembre 1989 au 8 octobre 1990, l'épaisseur des dépôts est restée faible :

Station amont	Station aval
1,1 mm	0,5 mm
0,5 mm	0,7 mm

Les observations de terrain sur l'évolution des barrages travertineux ont montré que, dans les vallons des Mennes et des Rigouards, l'année 1988-89 n'a pas été favorable aux constructions, bien au contraire. La seule crue violente, celle du 14 octobre 1988, a arraché beaucoup de brindilles et de feuilles fortement incrustées durant le printemps et l'été de l'année précédente. Un tel phénomène est d'ailleurs banal, et nous avons déjà observé, sur le ruisseau des Rigouards, cette alternance de dépôt et d'érosion entre le printemps et l'automne 1987. Mais en 1988-89, aucune incrustation visuellement décelable ne s'est produite. En effet, les conditions hydrologiques n'ont pas permis l'accumulation de débris végétaux susceptibles de servir de support à de nouveaux dépôts. De plus, l'indigence de l'écoulement et sa concentration fréquente dans quelques chenaux, ont rendu non fonctionnels de nombreux barrages. En 1989-90, la modestie ou l'arrêt des écoulements ont empêché la reprise des incrustations.

TABLEAU IX - Vallons des Mennes et des Rigouards : mesure des encroûtements sur plaquettes témoins.

M amont	M aval	R amont	R moyen		R aval
28/11/88 12/09/89	08/10/88 12/09/89	08/10/88 12/09/89	08/10/88 12/09/89	08/10/88 12/09/89	28/11/88 12/09/89
Sommet barrage	Cascade, eau très agitée	Zone plane, eau courante	Zone plane, peu profonde	Sommet barrage	Zone plane, amont cascade
6,2 g	15,3 g	3,7 g	1,7 g	4,3 g *	1,7 g *

M : ruisseau des Mennes . R : ruisseau des Rigouards . * : plaquette hors de l'eau lors du retrait

3. L'inhibition actuelle de la précipitation physico-chimique des carbonates

Des expériences de conservation, portant sur trois séries d'échantillons d'eau prélevés en 1989-1990 dans l'Argens à Montaud (Tab. X), ont confirmé les résultats obtenus antérieurement (C. MARTIN, 1988).

Ce tableau met en évidence des comportements assez différents d'un échantillon à l'autre. Cependant la diminution des teneurs en calcium reste faible (< 21 mg/l), alors que les dpH sont encore très élevés à la fin des expériences. Il y a donc inhibition de la précipitation physico-chimique des carbonates. Elle est certainement en relation avec la pollution des eaux. Cette situation, que nous avons également rencontrée sur le Cauron et l'Eau Salée (C. MARTIN, 1988), ne se retrouve pas avec la même acuité dans les vallons des Mennes et des Rigouards (Tab. XI) où les dpH apparaissent pourtant relativement faibles (< + 0,9). Les pertes, souvent déjà très sensibles dans les flacons pleins, atteignent jusqu'à 46 mg/l dans les flacons aux 3/5, avec une valeur moyenne de 28 mg/l.

Nous pensons que l'inhibition de la précipitation physico-chimique des carbonates est en relation avec la pollution des eaux, des éléments minéraux ou organiques non dosés pouvant déplacer les équilibres calco-carboniques. M. BAKALOWICZ (1988) met en doute cette interprétation des essais de conservation des eaux. Il préfère invoquer un état prolongé de déséquilibre (métastabilité) sans intervention d'agent inhibiteur. Cet état est susceptible de se produire pour des dpH inférieurs à + 0,50 ; voire même à + 1,00 en l'absence de germes de cristallisation. Pour les eaux prélevées au Pont de Montaud, cette suggestion ne saurait tenir : les eaux, qui ont déjà effectué un très long parcours entrecoupé de chutes et de cascades, présentent des dpH supérieurs à + 1,00 et nourrissent des encroûtements. La métastabilité des eaux dans le secteur des Prés de la Cadette, comme la modestie de la travertinisation actuelle au niveau de Montaud, ne peuvent s'expliquer sans faire appel à l'hypothèse d'un mécanisme inhibiteur.

TABLEAU X - Expériences de conservation sur des eaux prélevées au Pont de Montaud (flacons de 500 ml ; 1 mois sans agitation à la température ambiante : 20-22 °C)

	Situation initiale				Situation finale					
	pH	pHé	Ca ²⁺	Ca c	Flacons pleins (500ml)			Flacons aux 3/5		
	pH	pHé	Ca ²⁺	Ca c	pH	pHé	Ca ²⁺	pH	pHé	Ca ²⁺
13/02/89	8,5	7,3	121	0	8,2	7,1	121	8,1	7,1	112
29/05/89	8,5	7,2	127	7,6	7,9	7,2	115	7,9	7,2	106
15/01/90	8,5	7,4	127	1,6	8,4	7,1	127	8,4	7,1	127

pHé : pH d'équilibre par rapport à la calcite . Ca²⁺ : calcium total . Ca c : calcium complexé .
Les teneurs sont exprimées en mg/l .

4. Les données isotopiques

Les isotopes stables ¹³C et ¹⁸O ont été analysés par le Laboratoire de Géologie Dynamique de l'Université de Paris VI (Tab. XII). Les déterminations ont porté, d'une part, sur des travertins, et, d'autre part, sur des précipités de bicarbonates dissous obtenus sur le terrain par adjonction aux échantillons d'eau d'un excès de BaCl₂ à pH 12.

Les teneurs en carbone-13 indiquent que la travertinisation actuelle est de type physico-chimique. En effet, toute contribution bio-chimique directe se traduirait par un appauvrissement en carbone-13 par rapport aux précipités de bicarbonates dissous. Or, en tenant compte du fait que lors de la précipitation des carbonates, ceux-ci s'enrichissent en ¹³C de 1,5 ‰ par rapport aux bicarbonates, il apparaît que les bicarbonates correspondant

TABLEAU XI - Expériences de conservation sur des eaux des ruisseaux des Mennes (M) et des Rigouards (R) (flacons de 500 ml ; 1 mois sans agitation à la température ambiante : 20-22 °C)

		Situation initiale			Situation finale			
		pH	pHé	Ca ²⁺	Flacons pleins		Flacons aux 3/5	
					pH	Ca ²⁺	pH	Ca ²⁺
03/10/88	M aval	8,2	7,3	134		123		115
	R aval	7,9	7,3	116		115		112
14/11/88	M amont	8,1	7,4	122	7,6	109	7,7	98
	M aval	8,2	7,4	127	7,6	116	7,7	105
	R amont	8,0	7,3	128	7,6	114	7,6	99
	R aval	8,0	7,3	126	7,5	114	7,6	95
30/01/89	M amont	8,2	7,5	117	7,8	107	7,6	91
	M aval	8,2	7,5	129	7,7	117	7,6	110
	R amont	8,0	7,4	126	7,5	112	7,7	94
	R aval	8,0	7,4	126	7,5	112	7,6	95
10/04/89	M amont	8,2	7,4	109	7,7	101	7,8	85
	M aval	8,2	7,4	120	7,7	113	7,9	91
	R amont	8,0	7,2	135	7,5	119	7,6	103
	R moyen	8,1	7,2	128	7,5	116	7,6	102
	R aval	8,0	7,3	126	7,5	114	7,7	90
05/06/89	R amont	8,1	7,3	135	7,5	117	7,7	89
	R aval	8,1	7,3	126	7,5	110	7,7	88

pHé : pH d'équilibre par rapport à la calcite . . . Les teneurs sont exprimées en mg/l .

aux travertins possédaient un $\delta^{13}\text{C}$ (- 10,1 à - 12,2 ‰ PDB) très proche ou légèrement supérieur à celui des bicarbonates dissous (- 12,2 à - 12,4 ‰ PDB). Les bicarbonates dissous dans les eaux de la Source d'Argens sont relativement pauvres en carbone-13 (- 14,5 ‰ PDB), ce qui dénote un apport important de CO_2 biogénique. Mais il est vrai que le bassin d'alimentation de la source est en très grande partie boisé.

Les résultats présentés par J. CASANOVA (1981) ($\delta^{13}\text{C}$ de travertins du bassin de l'Argens = - 9,3 à - 8,8 ‰) vont également dans le sens d'une interprétation physico-chimique de la travertinisation. Le choix de l'option biologique effectué par cet auteur résulte d'une non prise en considération des apports de CO_2 biogénique au niveau des sols et d'une absence d'analyses sur les bicarbonates dissous.

Les teneurs en oxygène-18 ont une signification beaucoup moins claire, mais ne contredisent pas l'interprétation physico-chimique de la travertinisation (cf. J. CASANOVA et D. NURY, 1989). De plus, il apparaît que les bicarbonates des eaux de la Source d'Argens ont un $\delta^{18}\text{O}$ beaucoup plus faible que ceux des eaux de l'Argens à Montaud. L'altitude du bassin d'alimentation de la source (450-500 m ; alors que Montaud est à 225 m d'altitude) pourrait rendre compte d'une partie au moins de cette différence (le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations décroît de 0,50 ‰ pour une diminution de 1°C - P. FRITZ et J.C. FONTES, 1980). Des analyses complémentaires seraient nécessaires.

De nombreux auteurs ont étudié expérimentalement le rôle de la microflore et des bactéries dans la précipitation des carbonates (J. ADOLPHE, 1981 ; C. CAUDWELL, 1987 ; S. CASTANIER *et al.*, 1989 ; etc). Certes, le milieu naturel, surtout dans une rivière affectée d'un fort courant, a peu de points communs avec une éprouvette. Mais certains mécanismes biologiques ne favorisent-ils pas la travertinisation ? Dans l'état actuel des connaissances, nous restons extrêmement prudent : dans le bassin de l'Argens, la travertinisation est avant tout un phénomène physico-chimique ; la contribution biologique aux encroûtements n'est pas évidente, sauf à travers le rôle de support plus ou moins privilégié que tiennent certains végétaux. Sans rejeter *a priori* l'importance des influences biologiques (C. MARTIN, 1988), nous serions donc intéressé à savoir dans quelle mesure une intervention biologique non discernable par les dosages du carbone-13 des travertins, pourrait influencer sur la

TABLEAU XII - Données isotopiques sur les travertins et les eaux (prélèvements effectués fin mars 1989).

	$\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ PDB
HCO_3^- Montaud (eaux)	- 12,2	- 7,7
Travertins actuels Montaud	- 10,3	- 6,7
Travertins holocènes Tombereau	- 8,9	- 6,4
HCO_3^- Source d'Argens (eaux)	- 14,5	- 10,5
HCO_3^- Mennes amont (eaux)	- 12,4	- 9,7
Travertins Mennes amont	- 9,6	- 6,4
Travertins Mennes aval	- 8,6	- 6,0
HCO_3^- Rigouards aval (eaux)	- 12,6	- 8,9
Travertins Rigouards moyen	- 10,1	- 5,6
Travertins Rigouards aval	- 9,7	- 5,5
PDB : standard de référence pour les carbonates .		

précipitation des carbonates, son déclenchement et sa localisation. Une modification des caractères physico-chimiques des eaux à l'interface entre le milieu liquide et les tapis algo-bactériens ne constituerait-elle pas l'un des facteurs de la travertinisation ?

5 . Le problème du calcium complexé

Les teneurs en calcium complexé sont obtenues par un double dosage volumétrique au complexon III de la somme calcium + magnésium (C. MARTIN et J. COVO, 1988) :

- un dosage après adjonction à l'eau de CDTA (produit commercialisé par la société HACH, à base de sel magnésien et sodique de l'acide cyclohexanediaminotétracétique, qui élimine l'influence d'éléments parasites) ;

- et un dosage sans CDTA, avec un écoulement assez rapide du réactif.

Selon nous, la différence entre les volumes de complexon utilisés pour les deux dosages fournit la teneur en calcium se trouvant sous une forme complexée. Au printemps et en été, les teneurs en calcium complexé dépassent parfois 30-40 mg/l dans certaines eaux. Bien sûr l'une des origines possibles du calcium considéré comme complexé pourrait en fait consister dans la dissolution de microparticules de calcite par le CDTA (M. BAKALOWICZ, communication personnelle). Cependant les observations réalisées sur le bassin de l'Argens n'appuient pas cette hypothèse (présence de plus de 20 mg/l de calcium complexé dans des eaux à l'équilibre avec la calcite ; abondance de ce produit dans des échantillons soumis à des expériences de conservation n'ayant pas provoqué une précipitation notable de calcium ; modestie des teneurs en calcium complexé obtenues sur des eaux légèrement turbides non filtrées). Cependant, il nous a semblé utile de procéder à une expérience de filtration sur des eaux riches en calcium complexé (Tab. XIII). Les résultats obtenus après filtration sur membrane (diamètre des pores = 0,45 μm) montrent que la filtration provoque un début de précipitation des carbonates. Mais les différences entre les teneurs en calcium mesurées avant et après filtration restent très faibles (0 à 2 mg/l, pour des teneurs en calcium complexé comprises entre 14 et 24 mg/l). Le calcium complexé n'intervient donc pas dans des particules d'un diamètre supérieur à 0,45 μm . L'instabilité du virage lors des dosages après filtration appelle une autre remarque : la formation de calcite naissante se traduit au niveau des résultats analytiques ; or nous n'avons jamais noté d'instabilité du virage lors du dosage du calcium sur des eaux non filtrées, et l'augmentation au printemps des teneurs en calcium complexé ne s'est jamais accompagnée d'une diminution des teneurs en calcium total. Le calcium complexé n'entre donc pas dans la constitution de microparticules de calcite.

Les teneurs en calcium complexé ne sauraient non plus s'expliquer par la formation d'ions appareillés CaSO_4° . En effet, elles ne sont pas liées aux teneurs en ions sulfates (voir le tableau III). Leur augmentation au printemps, puis leur diminution brutale en automne (C. MARTIN, 1988), donnent à penser que les fluctuations de la richesse des eaux en éléments complexants est en relation avec une activité biologique.

TABLEAU XIII - Expériences de filtration sur des eaux renfermant du calcium complexé (prélèvements du 3 juillet 1989).

Lieu de prélèvement	Ca^{2+} initial	Ca c	Ca^{2+} final	Virage instable à
Cauron - Pont de l'Avocado	139	14,0	139	137
Argens - en amont de l'Eau Salée	176	23,2	174	172
Argens - à Châteauevert	183	22,8	182	181
Ca^{2+} : calcium total . Ca c : calcium complexé .			Les teneurs sont exprimées en mg/l).	

IV - CONCLUSION

Dans l'attente d'un traitement exhaustif des données permettant de préciser le fonctionnement hydrogéologique de la Source d'Argens, de définir le comportement hydrologique du bassin de l'Argens en amont de Châteauevert et de quantifier les flux de produits dissous, les investigations présentées ci-dessus aboutissent à des conclusions surtout intéressantes en matière de travertinisation actuelle :

- D'une part, la précipitation physico-chimique des carbonates subit actuellement une inhibition très nette dans les eaux de l'Argens. Les dpH sont souvent supérieurs à + 1,0. Mais il faut qu'une agitation violente active les réactions chimiques pour qu'une travertinisation abondante se produise. Encore noté-on, au niveau des cascades les plus hautes, que la tendance actuelle est au recul. D'après les expériences de conservation d'échantillons, les eaux des ruisseaux des Mennes et des Rigouards ont une capacité à travertiniser supérieure à celle des eaux de l'Argens. Les dpH y dépassent pourtant rarement + 0,8. L'inhibition de la précipitation physico-chimique des carbonates est donc ici moins sensible.

- D'autre part, les dosages des isotopes ^{13}C et ^{18}O montrent que les travertins ont une origine physico-chimique. Cette observation ne nous conduit pas à réfuter l'intervention d'influences biologiques ; mais il faut bien admettre qu'elle est encore loin d'être clairement démontrée.

Remerciements : Nous sommes reconnaissants au S.R.A.E. de l'aide précieuse qu'il nous a apportée. Nous remercions également J. COVO, qui a effectué une partie des analyses d'eau, J. MAZET, qui a supervisé la mise en place des plaquettes-témoins, et A. DELGIOVINE, qui a bien voulu se charger de leur pesée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADOLPHE J. - 1981. *Observations et expérimentations géomicrobiologiques et physico-chimiques des concrétionnements carbonatés continentaux actuels et fossiles*. Thèse Doctorat Etat, Paris VI, 339 p.
- AMINOT A. - 1975. Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. 4. Le pH : aspect théorique et interprétation géochimique. *Ann. Spéléol.*, t. 30 n° 2, p. 267-272.
- BAKALOWICZ M. - 1980. Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O-Carbonate. *Actes du colloque "Cristallisation, déformation et dissolution des carbonates"*, Bordeaux, 17-18 novembre 1980, p. 11-23.
- BAKALOWICZ M. - 1988. La formation des travertins : aspects géochimiques. Essai de synthèse et discussion. *Travaux de l'U.A. 903*, n° XVII, rapport de l'ATP-PIREN "Edifices travertineux et histoire de l'environnement dans le Midi de la France", p. 261-268.
- CASANOVA J. - 1981. *Etude d'un milieu stromatolitique continental. Les travertins plio-pleistocènes du Var (France)*. Thèse Doctorat 3^{ème} Cycle, Aix-Marseille II, 136 p.
- CASANOVA J. - 1986. Perte du pouvoir encroûtant des cyanophycées constructrices de travertins liée à la pollution : exemple de l'Huveaune (Var). Actes de la table ronde "Travertins l.s. et évolution des paysages holocènes dans le domaine méditerranéen", Aix-en-Provence, 5-6 novembre 1985. *Méditerranée*, t. V, n° 3, p.179.
- CASANOVA J. et NURY D. - 1989. Biosédimentologie des stromatolites fluvio-lacustres du fossé oligocène de Marseille. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), t. V, n° 6, p. 1173-1184.
- CASTANIER S., MAURIN A. et PERTHUISOT J.P. - 1989. Production bactérienne expérimentale de corpuscules carbonatés, sphéroïdaux à structure fibro-radiale. Réflexion sur la définition des ooides. *Bull. Soc. Géol. France*, 8^{ème} Sér., t. V, n° 3, p. 589-595.
- CAUDWELL C. - 1987. Etude expérimentale de la formation de micrite et de sparite dans les stromatolites d'eau douce à Rivularia. *Bull. Soc. Géol. France*, 8^{ème} Sér., t. III, n° 2, p. 299-306.
- FRITZ P. et FONTES J.C. - 1980. *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Elsevier Sc., Amsterdam, 545 p.
- MARTIN C. - 1988. Composition chimique des eaux et travertins actuels dans le bassin supérieur de l'Argens (Var). *Travaux de l'U.A. 903*, n° XVII, rapport de l'ATP-PIREN "Edifices travertineux et histoire de l'environnement dans le Midi de la France", p. 163-178.
- MARTIN C. et COVO J. - 1988. Méthode de détermination de la teneur en calcium complexé mise en oeuvre par l'U.A. 903. *Travaux de l'U.A. 903*, n° XVII, rapport de l'ATP-PIREN "Edifices travertineux et histoire de l'environnement dans le Midi de la France", p. 163-178.
- MARTIN Ph. - 1991. *Hydromorphologie des géosystèmes karstiques des versants nord et ouest de la Sainte Baume (B. du Rh., Var ; France)*. Thèse de l'Université d'Aix-Marseille II, 412 p.
- MUDRY J. - 1987. *Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés*. Thèse Doctorat Etat. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie, Mémoire n° 4, 381 p.
- MAZET J. - 1988. Contribution à l'étude des tufs-barrages de la haute vallée de l'Huveaune. *Travaux de l'U.A. 903*, n° XVII, rapport de l'ATP-PIREN "Edifices travertineux et histoire de l'environnement dans le Midi de la France", p. 201-208.
- NICOD J. - 1988. Barrages de travertins, marais et aménagements dans la haute vallée de l'Argens (Var). *Travaux de l'U.A. 903*, n° XVII, rapport de l'ATP-PIREN "Edifices travertineux et histoire de l'environnement dans le Midi de la France", p. 73-87.
- ROQUES H. - 1964. Contribution à l'étude statistique et cinétique des systèmes gaz-eau-carbonate. *Ann. Spéléol.*, t. 19, n° 2, p. 255-484.
- ROQUES H. - 1972. Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux naturelles. *Ann. Spéléol.*, t. 24, n° 3, p. 79-92.