

ACCUMULATION DES IONS ALUMINIUM PAR DES ALGUES DULCAQUICOLES SOUMISES A LA POLLUTION ACIDE

Reçu le 22/05/2000 - Accepté le 06/02/2002

Résumé

Une étude expérimentale est réalisée sur des algues provenant de lacs et ruisseaux vosgiens (France) atteints par les pluies acides afin de mieux comprendre leur comportement à l'égard de la toxicité des eaux acidifiées et particulièrement l'effet des ions aluminium.

Un net appauvrissement de la flore algale des sites pollués est démontré. Les ions aluminium, solubilisés par les baisses du pH, sont concentrés par les espèces expérimentées. Cependant, la toxicité des eaux acidifiées reste à prouver.

Mots clés: *Algues dulçaquicoles, Vosges, Toxicité, Aluminium.*

Abstract

An experimental study is carried out on algae collected from Vosgean lakes and streams (France), reached by acid rains in order to better understand their behaviour in regard to the toxicity of the acidified water and particularly, the effects of aluminium ions.

A clear impoverishment of the algal flora on the polluted sites is showed. The aluminium ions, which are solubilized by the pH falls are concentrated by the tested species. However, the toxicity of the water remains to be proved.

Key words: *Fresh water algae, Vosges, Toxicity, Aluminium.*

A. DEHBI-ZEBBOUDJ

Laboratoire d'Algologie
Département de Biologie
des Organismes et des Populations
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Université A. Mira
Béjaïa, Algérie

G. GIRAUD

Laboratoire des Biomembranes
et Surfaces Cellulaires Végétales
Ecole Normale Supérieure de Paris
Paris, France

Les formes naturelles de l'aluminium dans les roches et les sols sont variables. On peut ainsi rencontrer des silicates, des aluns, des oxydes, etc. Ces composés aluminés subissent normalement une altération dans le sol. Toutefois, le processus en est modifié par les pluies acides qui, selon Wellburn [1], font que l'hydroxyde d'aluminium devienne plus disponible dans les particules des roches et des sols. Ce fait est important, et les ions Al^{+3} et l'hydroxyde d'aluminium sont mis en cause dans la toxicité des eaux acides.

Chez l'homme, l'aluminium peut provoquer la destruction des cellules cérébrales ou myocardiques (encéphalopathie ou cardiomyopathie), la destruction des cellules hépatiques, l'anémie et la décalcification osseuse aboutissant à des fractures spontanées [2].

Le massif vosgien, situé au Nord de la France (Fig.1-a), est actuellement le seul à recevoir des pluies fortement acides, avec un pH de l'ordre de 4,80 [3,4].

La toxicité des eaux vis-à-vis des poissons est liée au pH. Elle intervient par altération du fonctionnement des épithéliums branchiaux qui entraîne des troubles de l'ionorégulation et de l'état acide-base. Cependant, le pH seul n'explique pas l'absence de ces organismes [3]. La disparition des micro algues, producteurs primaires, pourrait également en être la cause. Ces micro-organismes sont, en effet, très sensibles aux variations de pH. Entre 1986 et 1987, une étude des variations qualitatives et quantitatives des peuplements algaux des Vosges a été réalisée [5]. Elle a montré un net appauvrissement de la flore des milieux atteints par la pollution acide.

Par ailleurs, certaines algues ont la propriété de concentrer dans leur cytoplasme ou dans des vacuoles spécialisées, certaines substances présentes dans le milieu ambiant. Ceci est le cas, entre autres, des ions

ملخص

تمت التجارب على طحالب جابت من منطقة الفوج (فرنسا) و التي تعاني من التلوث بأمطار الحمضية لفهم تجاوبها مع هذه السمية.

إنخفاض ملحوظ في عدد هذه الطحالب تم إثباته في هذه المحطات الطبيعية المصابة إلى جانب تركيزها لأيونات الألومنيوم المنحلة بسبب إنخفاض pH لكن سمية هذه المياه لم يتم إثباتها بعد.

الكلمات المفتاحية: طحالب المياه العذبة، الفوج (فرنسا)، سمية، الألومنيوم.

Paramètres	A			B		
	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Médiane
pH (laboratoire)	4,19	0,26	4,22	4,17	0,09	4,21
Résistivité à 20 °C (kΩ/cm)	30,82	15,53	26,50	31,75	5,31	33,00
H ⁺	0,076	0,049	0,060	0,069	0,011	0,062
NH ₄ ⁺	0,026	0,028	0,016	-	-	-
Na ⁺	0,017	0,018	0,014	0,028	0,009	0,027
K ⁺	0,003	0,002	0,003	0,002	0,001	0,002
Mg ⁺²	0,003	0,003	0,002	0,003	0,001	0,002
Ca ⁺²	0,008	0,008	0,006	0,013	0,006	0,011
Σcations (meq./l)	0,144	0,010	-	0,031	0,024	-
(Alcalinité) + (H ⁺)	0,024	0,016	0,019	0,012	0,007	0,011
Cl ⁻	0,020	0,021	0,014	0,052	0,013	0,046
NO ₃ ⁻	0,026	0,031	0,017	0,044	0,012	0,041
SO ₄ ⁻²	0,047	0,026	0,042	0,023	0,005	0,023
Σanions (meq./l)	0,164	0,106	-	0,154	0,032	-
H ₄ SiO ₄	0,000	-	-	<0,001	-	-

Tableau 1:

Composition chimique moyenne des précipitations dans les Vosges [4].
A : Eaux de pluie (Mars 1973);
B : Eaux de neige (Juin 1973 et Juillet 1974).

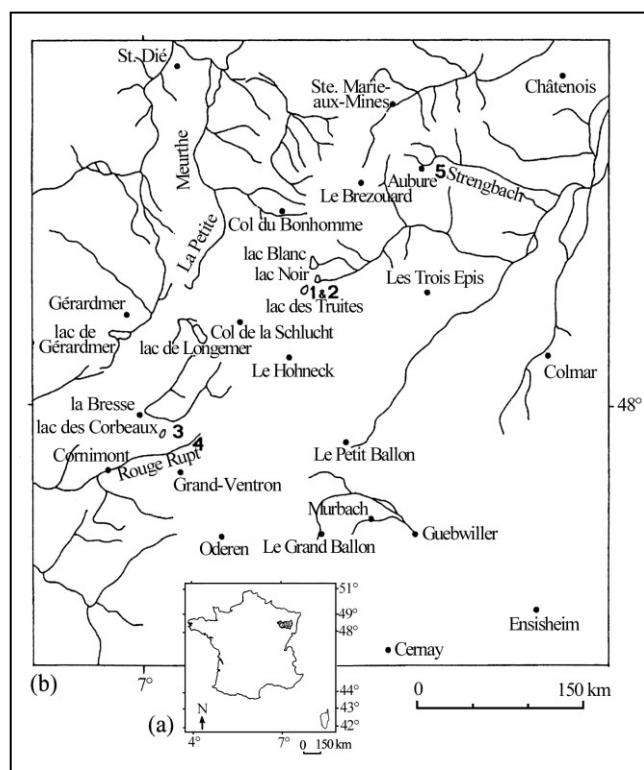


Figure 1: (a) Situation géographique du massif vosgien (France). (b) Localisation des lieux de récoltes; 1 : tourbière du Forlet; 2 : Lac des Truites; 3 : Lac des Corbeaux; 4 : Ruisseau du Rouge Rupt; 5 : Bassin d'Aubure.

aluminium solubilisés par les baisses du pH. Dans cette optique, nous avons entrepris une recherche expérimentale en vue de déterminer les limites de résistance à l'acidité des taxons les plus représentatifs et leur capacité à accumuler ces ions.

MATERIELS ET METHODES

Les études expérimentales ont été pratiquées sur deux Chlorophycées d'eau douce, soit *Scenedesmus crassus*

Chodat (Pl. 1-a) [6] et *Chlorhormidium flaccidum* var. *lubricum* Chodat (Pl. 1-b). Nous avons débuté ces études sur la première, disponible dans l'algothèque du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris. C'est une Chlorococcale formée de 4 cellules fusiformes réunies en un cénobe linéaire qui pousse facilement en culture. La deuxième espèce est formée de filaments donnant un aspect soyeux aux cultures. Les cultures âgées sont formées de filaments plus courts et facilement dissociables. Cette algue est récoltée dans le ruisseau du Rouge Rupt (Cornimont) (fig.1), affluent de la Moselotte et sous-affluent de la Moselle. Il est à 647 m d'altitude et a une longueur de 9100 m. La vitesse moyenne du courant atteint 50 cm/s en surface et 15 cm/s en profondeur. La pente est de 6.26 % et le dénivelé de 750 m.

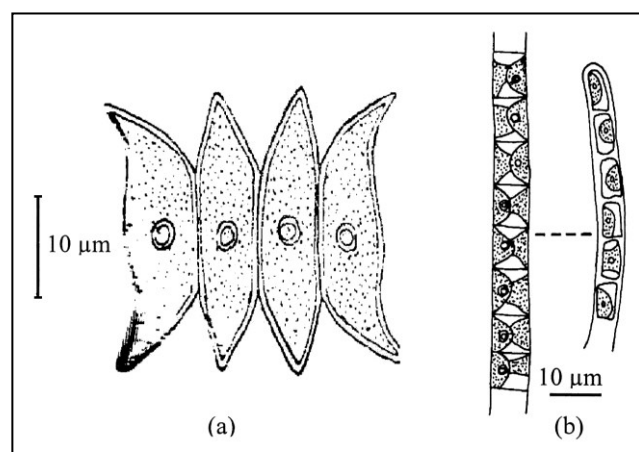


Planche 1: (a) *Scenedesmus crassus* Chodat. Dessin scanné à partir de [6]; (b) *Chlorhormidium flaccidum* var. *lubricum* chodat.

Du point de vue physico-chimique, le pH des eaux varie de 4,70 à 6,20. Ces eaux sont bien oxygénées et faiblement minéralisées comme la plupart des cours d'eau de montagnes [7]. La capacité de neutralisation est très faible, voire nulle à certaines périodes de l'année (mai 1986 et juin 1987). Parmi les cations majeurs, on trouve le Sodium et le Calcium (Tab.1).

Les anions sont représentés par les sulfates, les chlorures et les nitrates. Les valeurs mesurées pour les ions aluminium sont aux alentours de 300 µg/l, ce qui dépasse les normes retenues pour un maximum de 200 µg/l.

Conditions de culture

L'algue *Chlorhormidium flaccidum* est ensemencée dans des boîtes de pétri. Après quelques jours d'exposition à la lumière, l'examen microscopique a révélé la présence de filaments denses de cette espèce, ainsi que de nombreuses cellules d'autres algues. Des filaments ont été isolés pour avoir des cultures mono spécifiques de *Chlorhormidium*. Cette dernière est ensemencée dans le milieu L + C auquel sont rajoutés 13 g d'Algar. Le milieu utilisé est celui de Czurdae modifié par Lefevre en 1936 [5] et dont la composition est donnée dans le tableau 2. Le milieu Moyse (Tab.3) convient mieux aux cultures de *Scenedesmus*.

Eléments	Concentrations (L + C)	Concentrations (S ₂ T ₂)
KNO ₃	200 mg	100 mg
K ₂ HPO ₄	40 mg	40 mg
MgSO ₄ ·7H ₂ O	30 mg	30 mg
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	100 mg	100 mg
Extrait de terre	10 ml	40 ml
Extrait de mousses	5 ml	20 ml
FeCl ₃ ·6H ₂ O	1 goutte	traces
Eau bidistillée	1000 ml	1000 ml

Tableau 2: Composition des milieux de culture utilisés pour l'étude expérimentale des algues.

Solutions	Eléments	Concentrations
Macro éléments	KNO ₃	5g/l
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	2,5 g/l
	KH ₂ PO ₄	1,25 g/l
	EDTA	0,0044 g/l
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,003 g/l
	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0,03 g/l
Oligo-éléments A	H ₃ BO ₃	2,86 mg/l
	MnSO ₄ ·H ₂ O	1,55 mg/l
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,22 mg/l
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,079 mg/l
Oligo-éléments B	(NH ₃) ₆ MO ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	128,8 mg/l
	NH ₄ VO ₃	22,96 mg/l
	K ₂ SO ₄ Cr ₂ (SO ₄) ₃ ·24H ₂ O	96 mg/l
	NiSO ₄ ·7H ₂ O	47,85 mg/l
	Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	49,38 mg/l
	Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O	17,94 mg/l
	Ti(SO ₄) ₃	40 mg/l

Tableau 3: Composition du milieu de culture Moyse (On ajoute à la solution de macroéléments 1ml de la solution A concentrée 1000 fois, puis 1 ml de la solution B concentrée 1000 fois pour 1 litre de milieu. On utilise ce milieu dilué au 1/10, le pH étant de 5.50).

Les algues sont cultivées sur milieu Moyse dilué au 1/10, à une température de 18 ± 1°C, avec une photopériode

L/D : 12/12, et un éclairage de 43 ± µE/m².s assuré par une rampe de 3 tubes fluorescents.

Les repiquages sont effectués tous les 5 jours, dans les conditions stériles, avant la fin de la phase exponentielle déterminée par les courbes de croissance. Les comptages sont effectués à l'aide d'une cellule de Thoma. Après homogénéisation des cultures, les prélèvements sont dilués au 2/25. Les résultats proviennent de la moyenne de 4 mesures par lot. Les mesures sont pratiquées toutes les 24 heures.

Pour maintenir le pH dans une gamme de concentration en ions H⁺ assez élevée, nous avons tamponné le milieu avec de l'acide acétique-acétate de sodium. La composition et les quantités permettant l'ajustement du pH pendant les expérimentations sont représentées dans le tableau 4.

Solution A x (ml)	Solution B y (ml)	pH de la solution stock (x + y)
46,3	3,7	3,6
44,0	6,0	3,8
41,0	9,0	4,0
36,8	13,2	4,2
30,05	9,5	4,4
25,5	24,5	4,6
20,0	30,0	4,8
14,8	35,2	5,0
10,5	39,5	5,2
8,8	41,2	5,4
4,8	45,2	5,6

Tableau 4: Composition du tampon acide acétique-acétate de sodium (Solution Stock).

- A- Solution de CH₃ COOH 0,2 M (11,55 ml/1000 ml)
 - B- Solution de Na 0,2 M (16,4g de C₂H₂O₂Na ou 27,2g de C₂H₃O₂Na, 3H₂O dans 1000 ml).
- A (x ml) + B (y ml) dilués à 100 ml.

Conditions d'expérimentation

Les deux algues sont cultivées dans des erlenmeyers en verre de 500 ml. Pour obtenir des concentrations anormalement élevées d'ions aluminium, nous avons rajouté aux milieux de culture du sulfate d'aluminium, à des concentrations variant de 0,005 à 0,200 g/l.

Afin de suivre la croissance des algues en milieu concentré en ions aluminium, les mesures pour *Scenedesmus crassus*, algue cénobiale, ont été effectuées par comptage (cellule de Thoma) alors que pour *Chlorhormidium flaccidum*, algue filamenteuse, ce sont les poids secs terminaux, obtenus en fin de culture au bout de 3 mois, qui ont été utilisés. Les cultures de 3 à 4 mg permettent d'obtenir des poids secs terminaux de 37 mg, soit 0,15 g/l.

La souche *Scenedesmus crassus* est ensemencée dans des flacons en verre sur le milieu Moyse auquel ont été rajoutés soit 0,01 g/l, soit 0.05g/l de sulfate d'aluminium.

Chlorhormidium flaccidum var. *lubricum* est mise en culture dans des flacons en verre sur le milieu S2T2 (Tab. 2). La concentration de sulfate d'aluminium utilisée pour suivre la croissance est de 0,05 g/l.

Au cours de notre expérimentation, il nous est rapidement apparu qu'il n'était pas possible de reproduire

les conditions physico-chimiques des eaux courantes du Rouge Rupt. D'une part, la faible minéralisation ne permet pas de réaliser des cultures à croissance détectable dans un temps inférieur à trois mois. D'autre part, les milieux de culture sont assez peu tamponnés, ce qui provoque l'élévation du pH au cours de la croissance des algues. Ces milieux de culture ont été choisis pour la qualité de leurs ions vis-à-vis des besoins nutritifs mais non pour l'obtention d'un milieu tampon. Ceci apporterait des substances pouvant interférer avec celles déjà présentes et perturber la croissance.

Pour détecter la présence d'ions aluminium dans les cellules algales et mesurer leur accumulation, nous avons utilisés trois méthodes :

- La première consiste à évaluer, à l'aide d'un spectrophotomètre à absorption atomique, sur un culot de cellules (3-4 mg), la quantité d'ions présents.

- La deuxième permet, à l'aide d'un microscope électronique à transmission, de situer les ions aluminium dans les cellules algales sur des coupes ultra fines. Les algues sont fixées au préalable à la glutaraldéhyde à 2% puis traitées au tétrahydroxyde d'osmium à 1%, à 4°C. Après rinçages successifs et déshydratation, les inclusions sont faites dans l'araldite.

- La troisième, plus précise, permet d'estimer l'importance des quantités d'ions présents dans les cellules. Elle fait appel au microscope électronique à transmission couplé à un spectrographe à rayons X (Microsonde électronique Camebax).

Les paramètres de la microsonde sont fixés comme suit :

Tension d'accélération : 45 kV; courant du faisceau sur l'échantillon : 150 nA; diamètre du faisceau sur l'échantillon : 1 μm . L'aluminium est caractérisé par la raie $K\alpha$ (cristal TAP).

La teneur en ions est proportionnelle au nombre de coups enregistrés par seconde (cps/s).

Le lot d'algues destinées à être examinées à la microsonde n'a pas subi de post-fixation osmique, car aucune autre substance ne doit perturber la détection des ions aluminium.

RESULTATS

Après plusieurs séries d'expériences, l'étude est réalisée sur 5 erlenmeyers en verre de 250 ml. L'ensemencement est effectué de façon homogène par des parties aliquotes d'un même inoculum de *Scenedesmus crassus* à raison de 2300 cellules/ mm^3 .

Un premier flacon Témoin T1 contient le milieu Moysse à pH initial de 5,50, tandis qu'un deuxième flacon témoin T2 contient le même milieu auquel nous avons rajouté le tampon acétate, de même pH. Les trois autres flacons A, B, C ont été ajustés aux pH 4,50, 3,70 et 3,10. Les évolutions de ce paramètre ont été mesurées au pH-mètre pendant quelques jours avant la stérilisation des cultures (Tab.5). Les valeurs obtenues indiquent une évolution importante du pH; le tampon acétate devient donc rapidement inefficace.

Les flacons A et B ont une alcalinisation identique de leur contenu alors que le flacon C ne montre aucun changement. Une autre série d'expériences, avec réajustement du pH

tous les 7 jours, effectuée précédemment, a montré qu'au pH 3,30, les algues étaient décolorées et apparaissaient mortes sous microscope.

Dates	T1	T2	A	B	C
05/05/88	5,50	5,50	4,50	3,70	3,10
16/05/88	7,50	8	6,20	6,30	3,10
24/05/88	9,60	10	8,50	8,50	3,10

Tableau 5: Evolution expérimentale du pH des cultures de *Scenedesmus crassus* Chodat.

Par ailleurs, nous avons suivi le comportement de *Scenedesmus* en présence d'ions aluminium. A la concentration de 0,01 g/l, la croissance des algues est meilleure par rapport au témoin. Les algues du témoin se développent de façon identique à celles dont le milieu contient 0,005 g/l de sulfate d'aluminium.

De plus, ayant effectué des essais supplémentaires sur les cultures témoins, il est apparu qu'elles contiennent déjà une concentration non négligeable d'ions aluminium. Nous avons pensé que les concentrations d'ions utilisées (0,005 et 0,01g/l) étaient insuffisantes pour que les algues aient une réaction détectable, notamment au spectrophotomètre. La concentration de sulfate d'aluminium a donc été augmentée à 0,1 g/l. Les courbes de la figure 2 montrent une croissance légèrement inférieure à celle du témoin.

Des observations faites au spectrophotomètre sur une culture menée parallèlement, mais avec 0,2 g/l de sulfate d'aluminium, ont montré un faible effet des ions aluminium sur la croissance des algues. En comparant la croissance des deux cultures témoins (Fig. 2 et 3), nous constatons que leur croissance est sensiblement identique.

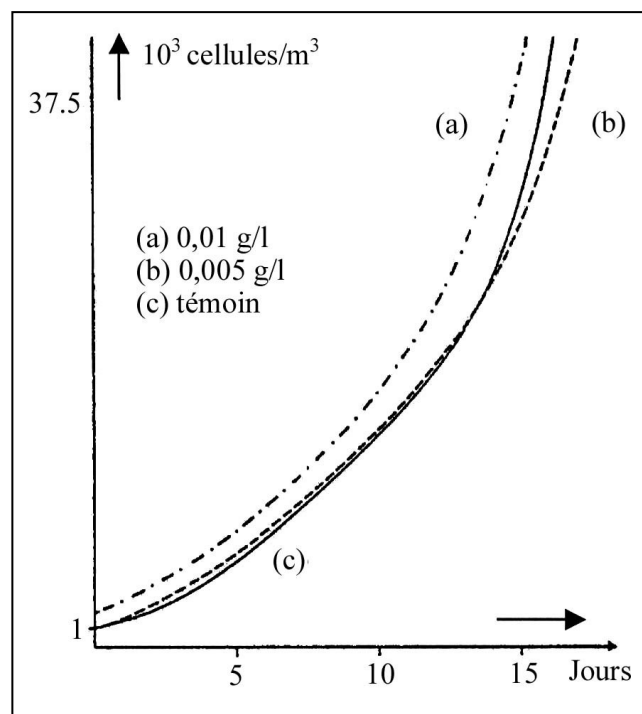


Figure 2: Courbes de croissance de *Scenedesmus crassus* en présence de sulfates d'aluminium (0,1 g/l).

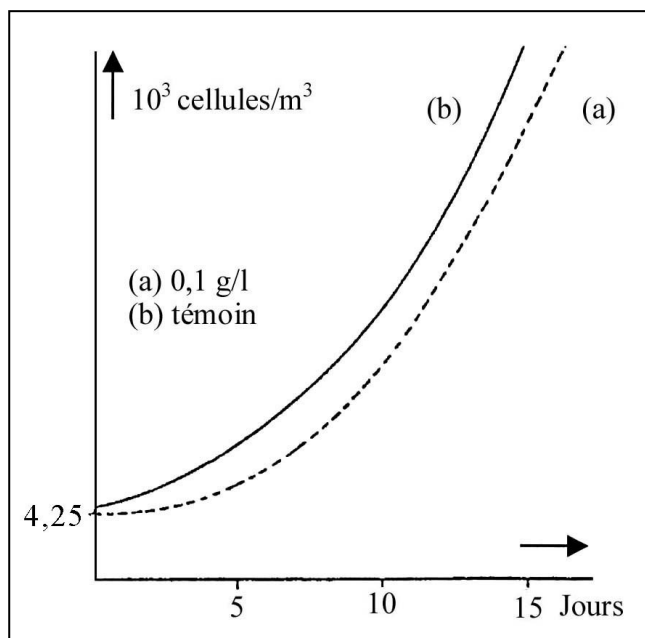


Figure 3: Courbes de croissance de *Scenedesmus* en présence de sulfates d'aluminium (0,005 g/l).

La concentration de sulfate d'aluminium utilisée pour suivre la croissance de *Chlorhormidium* est de 0,05 g/l. Les valeurs expérimentales obtenues sont regroupées dans le tableau 6.

	Poids sec (250 g/250 ml)	Al (en % par rapport au poids sec)
Cultures témoins	0,037	0,43
Lot expérimental	0,021	1,62

Tableau 6: Valeurs expérimentales d'ions aluminium accumulés par *Chlorhormidium flaccidum* var. *lubricum* Chodat.

Bien que la croissance de cette algue soit réduite d'environ 50% par rapport aux cultures témoins, elles demeurent appréciables. L'effet des ions aluminium reste modéré.

En outre, on constate que *Chlorhormidium* présente, tout comme *Scenedesmus*, une certaine accumulation des ions aluminium.

Les dosages ont montré que l'accumulation de ces ions par les algues est certaine mais où se localisent-ils ? Les coupes ultrafines non contrastées de *Scenedesmus crassus* (nous n'avons utilisé aucun contrastant pour éviter toute interférence avec les ions étudiés ici) ont permis de détecter la présence d'éléments lourds dans des vésicules denses. La planche 2 laisse apercevoir des zones sombres correspondant à la présence d'aluminium, mais il n'est pas certain que ces inclusions soient dues uniquement à la présence des ions aluminium. Il semble que d'autres éléments s'accumulent dans ces mêmes sites comme le phosphore que l'on rencontre fréquemment dans les algues du genre *Chlorella* sous forme de poly phosphates, ainsi que de la silice et du calcium, décelés parallèlement, par spectrophotométrie.

En outre, des analyses chimiques par spectrographie aux rayons X, sur des coupes non contrastées, laissent apparaître des ions accumulés dans des vésicules à aspect dense. La détection, dans les mêmes sites, indique une présence très faible d'ions calcium. Par contre, une analyse effectuée pour le phosphore et la silice montre que ces éléments sont présents à des doses relativement élevées. En un même point, on note 60 cps/s pour l'aluminium, 40 cps/s pour le phosphore et 25 cps/s pour la silice, le calcium n'étant pas détecté (Fig.4).

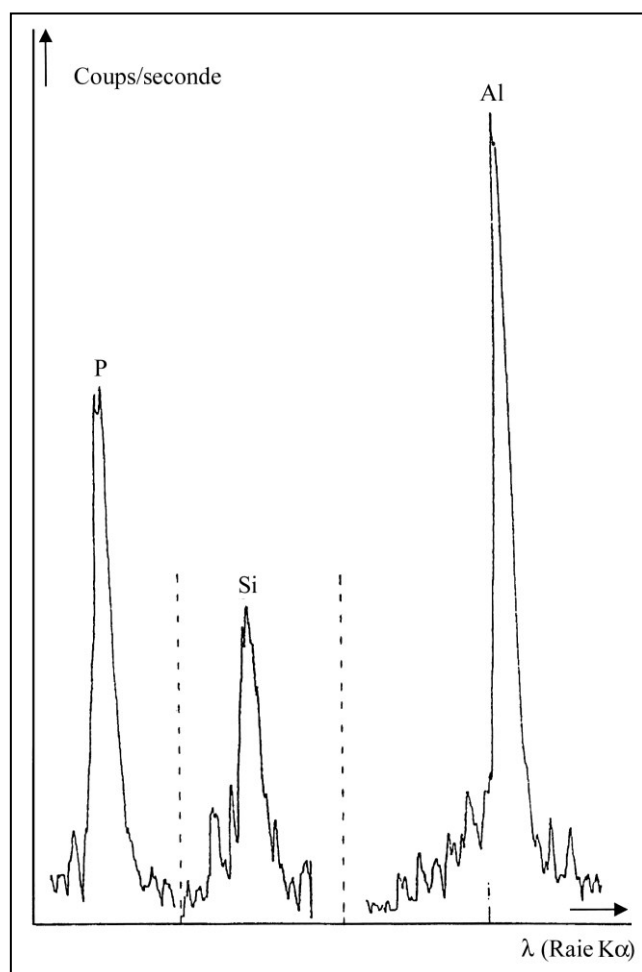


Figure 4: Détection de l'aluminium, du phosphore et de la silice par spectrographie aux rayons X dans les cellules de *Scenedesmus crassus*.

L'examen des coupes d'algues témoins n'a pas révélé la présence d'aluminium, alors que sur le même site dense, nous avons pu voir que le phosphore et la silice sont équivalents au cas précédent, et que le calcium est faiblement représenté (5 cps/s).

DISCUSSIONS

Des altérations multiples et diverses se rapportant aux algues ont été signalées à travers le monde par plusieurs auteurs dont Keller & al.[8] et Schindler [9], faisant suite aux chutes de pH dans les eaux des lacs et des cours d'eau et aux changements biologiques et chimiques qui en résultent.

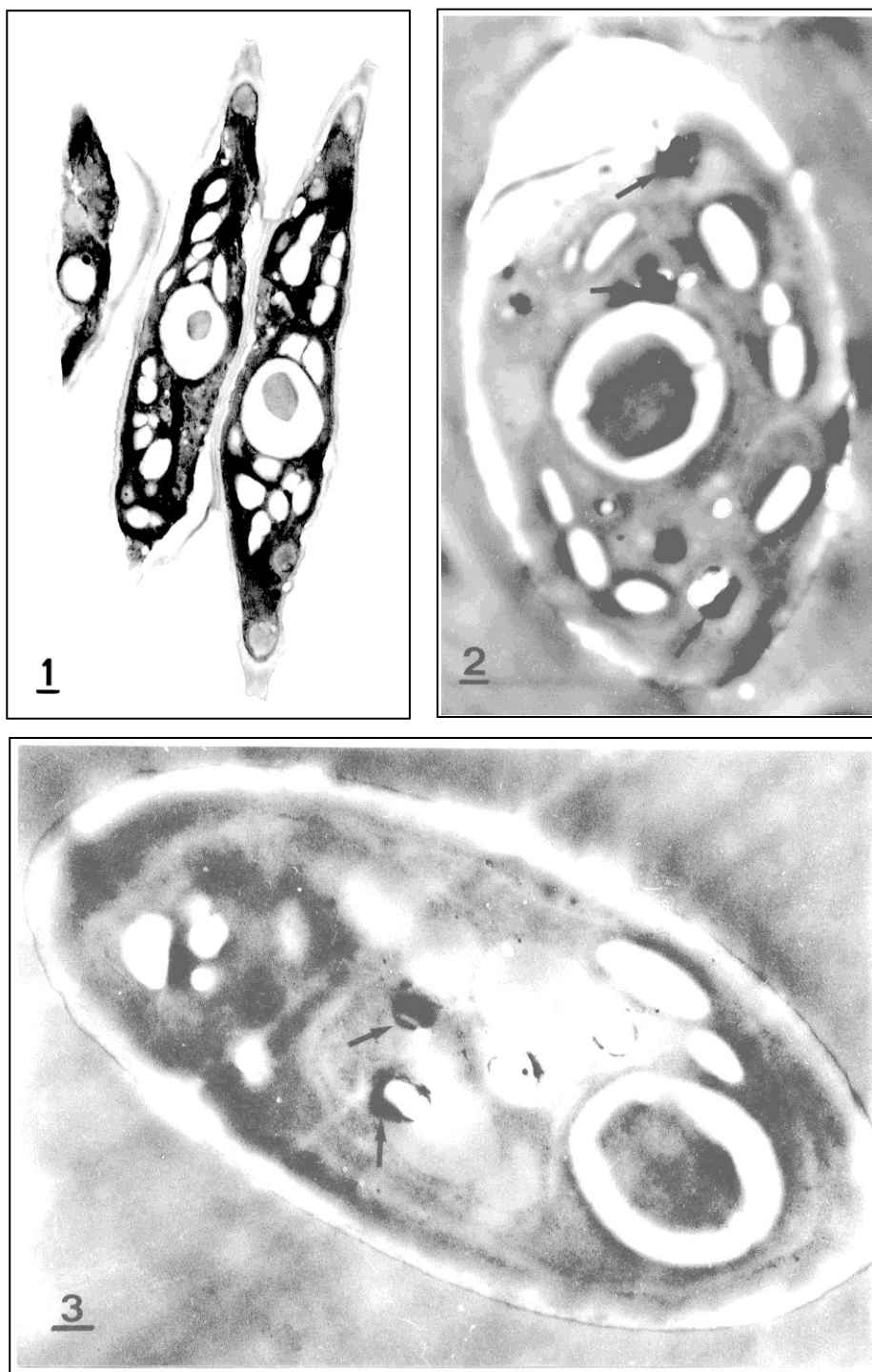


Planche 2: Détection des ions aluminium dans les cellules de *Scenedesmus crassus* au microscope électronique à transmission:

1- cellules témoins,

2 et 3- cellules présentant des accumulations d'aluminium, signalées par les flèches.

De toute évidence, les milieux étudiés ici sont acidifiés ; des travaux récents l'ont confirmé [10], leur pH pouvant atteindre 5 et même moins, cette valeur étant la limite déterminant une eau altérée par les pluies acides [11]. Cependant, ces valeurs ne semblent pas beaucoup affecter les algues qui continuent à se développer dans le milieu naturel. Ainsi, nos analyses qualitatives et quantitatives ont

faites sur les végétaux supérieurs ont montré que les systèmes racinaires étaient peu sensibles à la présence de l'ions aluminium dans le sol, notamment sous forme de sulfates [17]. Par ailleurs, Zhao et al. [18] ont déterminé l'action antagoniste des ions Al^{+3} et Ca^{+2} , le calcium pouvant atténuer l'effet toxique de l'aluminium, lequel altère la structure des membranes lipidiques. Dans les eaux

montré la persistance et l'abondance, dans ces deux sites, de certaines espèces de Diatomophycées (*Eunotia exigua*, *Pinnularia viridis*, etc.) mais aussi de Chlorophycées (*Crucigenia fenestrata*, *Scenedesmus ecornis*, etc.), de Dinophycées (*Peridinium inconspicuum*) et de Chrysophycées (*Bitrichia chodatii*). De façon globale, ces algues semblent supporter les pH acides des milieux vosgiens (entre 4,60 et 6,90).

Des études faites sur des algues du sol montrent par contre que beaucoup d'espèces ne sont pas tolérantes vis-à-vis des pH inférieurs à 5 telles que les Cyanophycées et les Diatomophycées, tandis que certaines Chlorophycées ont la possibilité de croître dans des milieux fortement acides [12, 13].

L'évolution des pH au cours des cultures algales est une donnée classique déjà citée par Pringsheim [14], Burlew [15] et Venkataraman [16]. Ces auteurs ont signalé que ce phénomène est en relation étroite avec la source d'azote utilisée. L'alcalinisation est en partie due à la présence de nitrates alors que les ions ammonium, beaucoup mieux assimilés par les algues, font baisser le pH.

Les expériences réalisées pour comprendre l'effet des bas pH l'ont été sur des milieux de culture relativement concentrés, ceci ne correspondant en rien au cas des milieux oligotrophes que constituent nos stations d'étude (lac des Corbeaux et ruisseau du Rouge Rupt). Toutefois, nous avons montré que les cultures de *Scenedesmus crassus* n'étaient pas perturbées par un pH de 3,70 mais qu'en-dessous d'un pH de 3,50, les cultures étaient détruites.

Concernant les effets des ions aluminium, de nombreuses études

vosgiennes étudiées ici, les concentrations en ions calcium sont assez faibles (0,025 à 0,040 m.mol/l) et insuffisantes pour équilibrer celles des ions aluminium, beaucoup plus fortes (132 et 308 µg/l).

Chez les algues, la tolérance à l'ion aluminium a déjà été étudiée par Foy et Guerloff [19] qui ont montré que *Chlorella pyrenoidosa* avait, en plus de la possibilité de faire augmenter le pH de 4,60 à 7,80, une grande tolérance vis-à-vis de concentrations importantes d'ions aluminium (1,5 à 6g/l).

CONCLUSION

Nos résultats montrent que les ions aluminium sont absorbés par les algues *Chlorohormidium* et *Scenedesmus*, même lorsqu'ils sont en faibles quantités dans les milieux de culture. La présence de l'aluminium dans les milieux carencés peut s'expliquer soit par son introduction avec l'inoculum, soit par l'eau utilisée pour les milieux de culture et qui est distillée dans des récipients en verre.

Les résultats obtenus montrent assez clairement que *Scenedesmus crassus*, tout comme *Chlorohormidium flaccidum* var. *lubricum*, sont capables de concentrer de forts pourcentages d'ions aluminium (0,92 et 1,62%) en comparaison avec les cultures témoins. Les dosages à l'aide de la microsonde semblent probants et confirment les analyses faites par le spectrophotomètre à absorption atomique. Ces analyses ont montré qu'il y avait, parallèlement à l'ion aluminium, d'autres éléments à savoir le phosphore, la silice et très peu de calcium. La présence conjointe des trois éléments Al, P et Si peut laisser penser que des complexes se forment dans les lieux d'accumulation.

Quant à l'effet de l'aluminium sur la croissance des algues cultivées, il est difficile d'affirmer si les différences indiquées par les courbes de croissance sont significatives. Le problème est de savoir si le même phénomène se produit dans la nature. Les concentrations utilisées dans l'expérimentation sont beaucoup plus faibles, mais nous avons remarqué que cela n'empêchait pas la pénétration des ions aluminium dans les cellules algales. L'hypothèse que l'on peut avancer est que l'aluminium, dissous dans les eaux étudiées, peut être capté par les algues qui y vivent sans être la cause majeure d'une quelconque toxicité. Il est donc difficile de la considérer comme un facteur de sélection des espèces qu'on rencontre. En effet, les algues subissent des perturbations certaines au niveau de la structure des populations, suite à la présence des ions aluminium ; cependant, d'autres facteurs sont susceptibles d'intervenir dans les différents comportements de ces organismes par rapport aux pluies acides.

REFERENCES

- [1]- Wellburn A., "Air pollution and acid rains. The biological impact", Wiley & Sons, Inc. New York, 274p.
- [2]- Galle P. (1986), "La toxicité de l'aluminium", *La Recherche*, 179, (1988), pp. 766-775.
- [3]- Massabuau J.C., "Pluies acides et Physiologie des animaux aquatiques", *Bull. Soc. Ecophysiol.*, 10 (2) (1985), pp. 59-74.
- [4]- Bourrié G., "Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré; application aux granites des Vosges et de la Margeride", *Sci. Geol. Mém.*, 52, 174, (1978), p. 11.
- [5]- Dehbi-Zebboudj A., "Les algues dulçaquicoles des Vosges et les pluies acides", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, (1989), 233 p.
- [6]- Bourrelly P., "Les algues d'eau douce", Tome 1, Algues vertes, Complément à la 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} édition, Boubée Ed., Paris, (1988), 182p.
- [7]- Pierre J.F., "Etude hydrobiologique d'un ruisseau de Ravines (Vosges)", *Bull. Soc. Bot. France*, 177, (1970), pp. 89-96.
- [8]- Keller W., Gunn J., Conroy N., "Acidification impacts on lakes in the Sudbury, Ontario, Canada area", *In* Drablos D. & Tollan A., Proc. Int. Conf. Impact Acid Precip., Norway, SNSF Project, (1980), p. 228-229.
- [9]- Schindler D.W., "Experimental acidification of a hole lake: A test of the oligotrophication hypothesis", *In* Drablos D. & Tollan A. (Ed.), Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip., Norway, SNSF Project, (1980), p. 370-374.
- [10]- Massabuau J.C., Fritz B., Burtin B., "Mise en évidence de ruisseaux acides (pH<5) dans les Vosges", *C.R. Acad. Sci. Paris*, série 3 (305), (1987) p. 121-124.
- [11]- Wright R.F., Henriksen N., "Chemistry of small Norwegian lakes, with special reference to acid precipitation", *Limnol. Oceanogr.*, 23 (3), (1978), p. 487-498.
- [12]- Lund J.W.G., "Soil algae. In Physiology and biochemistry of algae (Lewin, R.A.)", Acad. Press, London, (1962), p. 759-770.
- [13]- Shubert L.E., "Algae as ecological indicators", Acad. Press Inc., London, (1984).
- [14]- Pringsheim E.G., "Pure cultures of algae, their preparation and maintenance", Cambridge, Univ. Press, (1949), 119 p.
- [15]- Burlew J.S., "Algal culture from laboratory to pilot plant", Washington, Carnegie Institution of Washington Publication, (1953), 375 p.
- [16]- Venkataraman G.S., "The cultivation of algae", I.C.A.R., New Dehli, (1969), 319 p.
- [17]- Kinraide T.B., Parker D.R., "Non phytotoxicity of the aluminium ion, $AlSO_4$ ", *Physiol. Pl.*, (Copenhagen), 71, (1987), p. 207-212.
- [18]- Zhao X.J., Sucoff E., Stadelmann E.J., Al^{+3} and Ca^{+2} alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* roots cortex cells", *Pl. Physiol.*, (Copenhagen), 83, (1987), p. 159-162.
- [19]- Foy C., Guerloff G.C., "Response of *Chlorella pyrenoidosa* to aluminium and low pH", *J. Phycol.*, 8, (1972), p. 268-271.

□