CHIMIE ET ECOLOGIE DE LA VEGETATION DE COURS D'EAU EN FRANCE A FORTES TENEURS EN ZINC. 1. MASSIF CENTRAL

par P. J. SAY¹ et B. A. WHITTON¹

L'étude porte sur la chimie et le phytobenthos de cours d'eau à proximité de divers apports en zinc et en plomb : une mine désaffectée à Planioles, près de Figeac, un complexe minier en activité près de Largentière, un ancien complexe minier et une fonderie fermée près de Villemagne, une importante fonderie en activité et les usines associées à Viviez près de Decazeville. Sur les douze stations étudiées, dix présentent des teneurs élevées en Zn, et en quelques cas en Cd et en Pb. Les stations situées à proximité de fonderies de zinc présentent les teneurs les plus élevées pour tous les métaux. L'augmentation des teneurs métalliques conduit à une diminution de la flore mais d'autres facteurs peuvent également jouer un rôle. Une station paraît être le siège des plus fortes teneurs en Zn ($3\,840\text{ mg l}^{-1}$) et en Cd (345 mg l^{-1}) jamais recensés pour lesquelles des organismes photosynthétiques sont présents. Les trois espèces récoltées sont : *Hormidium rivulare*, *Hormidium flaccidum* et *Pinnularia subcapitata*.

Chemistry and plant ecology of zinc-rich streams in France. 1. Massif Central.

An account is given of the chemistry and phytobenthos of streams in the vicinity of : an old, derelict lead mine at Planioles, near Figeac ; an active lead/zinc mine complex near Largentière ; an old lead/zinc mine complex and derelict smelter at Villemagne ; a large active zinc smelter and associated factories at Viviez, near Decazeville. Of the twelve sites studied ten had elevated levels of Zn, and in some cases of Cd and Pb. Sites within the vicinity of the zinc smelter carried the highest levels of all metals. Increased metal levels led to a reduction in the flora but at some sites the possible role of other variables is discussed. One site provides what is apparently the highest level of Zn (3840 mg l^{-1}) and Cd (345 mg l^{-1}) anywhere in the literature at which photosynthetic organisms are present. The three species found were : *Hormidium rivulare*, *Hormidium flaccidum* and *Pinnularia subcapitata*.

INTRODUCTION

Les dépôts miniers terrestres riches en métaux lourds abritent des peuplements végétaux souvent nettement distincts de ceux des régions voisines et, au moins pour l'Europe centrale et occidentale, on dispose d'indications générales sur ce sujet (Ernst 1974). Par exemple, les dépôts riches en zinc et en plomb des Pyrénées françaises ont été

1. Department of Botany. University of Durham, South Road, Durham DH1 3 LE, England.

groupés par Ernst (1966) dans l'*Armerietum muelleri*, ainsi dénommé à cause de l'endémique *Armeria maritima* var. *muelleri*. On connaît moins bien la flore et la biologie des végétaux des milieux aquatiques riches en métaux lourds, quoiqu'une première généralisation ait été tentée (Whitton 1980). La flore de cours d'eau riches en zinc a été détaillée en trois stations : le Riou Mort près de Decazeville, France (Say 1978), un ruisseau des Pennines au N.-E. de l'Angleterre (Say et Whitton 1981) et un complexe d'infiltrations et de mares dans l'Old Lead Belt du Missouri (Whitton, Gale et Wixson 1981). Des listes de ruisseaux à forte teneur en métaux lourds en Europe de l'Ouest sont incluses dans des études sur la tolérance au zinc d'*Hormidium* (Say, Diaz et Whitton 1977) et *Stigeoclonium* (Harding et Whitton 1976).

Des minerais riches en plomb et/ou en zinc ont été exploités en de nombreuses régions françaises. La carte métallogénique d'Europe, par exemple, montre 60 emplacements : 9 en Bretagne, 2 en Normandie, 30 dans le Massif Central et aires adjacentes de l'Ouest et du Sud-Ouest, 8 dans les Alpes, 4 en Provence. Le présent article est le premier d'une série de trois sur les cours d'eau drainant quelques-unes de ces régions. Il porte sur trois régions minières du Massif Central et de son bord Sud-Ouest, ainsi que sur des eaux influencées par des infiltrations provenant de l'énorme décharge de fonderie de Viviez.

1. — METHODES

1.1. Programme

Il a été procédé à un examen de toutes les stations pendant la première semaine de juillet 1978. (D'autres observations ont été faites en des périodes différentes mais seules celles de juillet 1978 sont données ici). Des tronçons de 10 m de long ont été sélectionnés pour des études détaillées de l'eau, du sédiment et du phytobenthos. Des numéros de code leur ont été attribués, par ex. 3010-98 (Say, Diaz et Whitton 1977, Holmes et Whitton 1981) mais, dans cet article, référence est faite aux tronçons étudiés par les lettres A, B, etc...

1.2. Echantillonnage et analyse de l'eau

La température, le pH et l'alcalinité totale ont été mesurés sur le terrain. L'eau pour l'analyse des métaux a été prélevée dans des récipients en polyéthylène et laissée pendant 5 minutes pour permettre la sédimentation des grandes particules en suspension. Puis, 50 ml de la partie supérieure était prélevé dans une bouteille en pyrex lavée à l'acide. Deux gouttes de HNO_3 étaient ensuite ajoutées à la bouteille. L'eau pour l'analyse des anions a été filtrée à travers du

TABLEAU I. — Stations étudiées. Les indices utilisés pour le ruisseau et la zone de 10 m ("stream-reach") correspondent aux données et spécimens conservés à Durham.

Site	Nom/Région	"Stream-reach"	Grid	Ref.	Long.	Lat.	Altitude	Environnement
A	Riou Mort	3010-98	5893	2536	44°34'	2°12' E	180	en aval du complexe industriel de Decazeville-Viviez, en amont de sa confluence avec le Lot (voir Say 1978)
B	Ruisseau de Banal	3029-80	5918	2496	44°32'	2°13' E	200	en aval du bassin de dépôt vaseux de la fonderie (voir Say 1978)
C	Near zinc smelter, Viviez	3028-50	5912	2497	44°32'	2°13' E	200	ce ruisseau draine la base des décharges de la fonderie
D	Near zinc smelter, Viviez	3026-01	5912	2498	44°32'	2°13' E	240	l'eau d'infiltration des décharges de la fonderie
E	Planioles, near Figeac	3012-01	5752	2603	44°38'	2° 1' E	300	l'eau d'infiltration des décharges d'une ancienne mine de plomb
F	Ruisseau de Breuil, near Largentière	3017-30			44°60'	4°30' E	210	ce ruisseau naît aux environs d'un marécage riche en zinc en aval de la mine de SMMP
G	Largentière	3019-99			44°60'	4°30' E	220	ce ruisseau draine le puits de mine de SMMP, en amont de sa confluence avec le Lande
H	Villemagne	3020-01	6881	2033	49° 2'	3°26' E	900	l'eau émerge d'une conduite qui draine probablement un petit réservoir ; il se jette dans le 3023
I	Villemagne	3021-01	6881	2033	49° 2'	3°26' E	900	l'eau d'infiltration des décharges de la mine, elle passe à côté de la route
J	Villemagne	3022-02	6880	2033	49° 2'	3°26' E	890	l'eau d'infiltration des décharges de la mine
K	Villemagne	3023-01	6880	2033	49° 2'	3°26' E	890	le ruisseau qui draine le puits de mine principal de l'ancienne mine de plomb ; affluent du Trévezel
L	Villemagne	3024-01	6880	2033	49° 2'	3°26' E	890	l'eau d'infiltration des décharges de la mine ; elle forme une petite cascade

verre aggloméré (Sinta n° 2) dans différentes bouteilles en polyéthylène de 250 ml. Ces dernières étaient placées en glacière, gelées au laboratoire et dégelées juste avant l'analyse. Les mesures de métaux ont été faites en utilisant un spectrophotomètre à absorption atomique Pye - Unicam ou Perkin Elmer 403. Les anions ont été déterminés en utilisant les méthodes données par Holmes et Whitton (1981).

1.3. Analyse des sédiments

Les échantillons de sédiments du fond du ruisseau et fixés aux bryophytes ont été séchés à poids constant à 105 °C. Lorsqu'ils étaient fixés aux bryophytes, les sédiments étaient enlevés à la pince, puis placés dans un flacon lavé à l'acide. 50 mg de l'échantillon sec était pesé, placé dans un tube à ébullition et dissous dans 5 ml de HNO_3 . La dissolution était achevée dans un four Tecam à 150 °C pendant 30 minutes. L'échantillon était porté à 25 ml avec de l'eau déionisée et analysée par spectrophotométrie d'absorption atomique. Pour comparaison, les échantillons étaient aussi analysés par diffraction aux rayons X pour connaître leur composition minérale.

1.4. Echantillonnage du phytobenthos

Les prélèvements ont été faits dans le but d'obtenir non seulement une liste floristique complète mais aussi une estimation approchée des proportions relatives de chaque espèce. Sur le terrain ont été estimées les quantités relatives d'espèces reconnaissables macroscopiquement telles que mousses et hépatiques ainsi que les communautés algales physionomiquement distinctes. Un mélange des diverses communautés a été conservé dans des proportions à peu près semblables à celles existant dans le cours d'eau. En plus, un minimum de six endroits, d'environ 1 cm² de surface ont été prélevés en chaque tronçon, chacun comprenant au moins un type de communauté algale visuellement distincte. L'information de ces divers échantillons a ensuite été combinée pour affecter chaque espèce dans l'une des classes suivantes : 5 (très abondante), 4 (abondante), 3 (fréquente), 2 (accidentelle), 1 (rare).

Pour chaque échantillon, une partie a été conservée vivante et une autre au formol à 3 %. Le matériel vivant a été transporté dans des bouteilles thermos réfrigérées et stockées au laboratoire à 8 °C et 500 lux jusqu'à ce que l'étude microscopique soit terminée. Toutes les mentions de diatomées concernent des cellules munies de chloroplastes typiques au moment de la récolte même si les frustules étaient nettoyées ultérieurement pour aider à la détermination.

Les bryophytes submergées ont été traitées de la même manière que les algues sur la même échelle d'abondance. Par ailleurs, les espèces

partiellement submergées ou riveraines (Holmes et Whitton 1977) ont été mentionnées sur la base présence - absence.

2. — RESULTATS

Des teneurs élevées en zinc, ainsi souvent qu'en d'autres métaux lourds ont été observées en chaque zone étudiée, dans l'eau (Tableau II) et dans les sédiments (Tableaux III et IV). Des différences ont été cependant notées sur le nombre de végétaux photosynthétiques : de 2 (station A) à 39 (station E). Le détail des observations est indiqué ci-dessous.

2.1. Région de Viviez-Decazeville (station A-D)

Ces stations sont voisines d'une grande fonderie en activité et d'usines associées (*fig. 1*), décrites par Say (1978). Les très fortes concentrations de zinc à la station A (Tableau II) résultent de l'entrée du Riou Viou, qui reçoit les rejets de la fonderie. Ces rejets ainsi

FIG. 1. — Ville de Viviez : vue de la fonderie de zinc : au fond, la vallée du Riou Mort.

que ceux d'autres industries chimiques causent aussi de très fortes concentrations en Cu, Cd et Pb en cette station. La rivière transporte une très forte charge de solides en suspension. L'analyse par diffrac-

TABLEAU II. — Paramètres chimiques de l'eau des stations A-L : concentrations des éléments en mg l⁻¹.

Site	Temp. (°C)	pH	Alcalinité totale (m-équiv. l ⁻¹)	Na	K	Mg	Ca	Al	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Ag	Cd	Pb	PO ₄ -P	NO ₃ -N	Cl	Si	SO ₄ -S	F		
A	19.0	6.6		10.6	3.5	17.2	52.8	0.21	1.46	1.23	0.02	0.01	0.135	20.0	0.005	0.76	2.35								
B	13.0	8.1		49.5	32.5	262	196		5.0	0.4				4.8		0.10									
C	15.0	5.8		21.6	15.7	123	176		64.0	0.2			2.0	760		88.0									
D	22.0	5.0		71.3	85.0	445	163	54	325	3.37	2.52	3.64	5.0	3.840	0.015	345	0.68								
E	25.0	7.7	17.0	4.3	4.9	21.1	71.0	0.05	0.035	0.14	0.01	0.02	0.008	0.082	0.005	0.0003	0.003								
F	15.5	7.45	15.8	27.7	28.5	52.8	451	<	0.03	0.007	0.02	0.01	0.09	0.136	0.55	0.010	0.0009	0.005	0.04	0.40	18.4	5.35	28.4	1.10	
G	16.5	7.75	18.0	18.8	8.6	37.9	225	0.14	0.006	0.02	0.02	0.05	0.013	0.51	0.005	0.0007	0.034								
H	13.5	7.35	18.0	1.4	1.27	3.0	6.3	0.14	0.045	0.18	0.03	<	0.01	0.005	0.031	<	0.005	0.0004	0.018						
I	20.0	7.7		1.68	1.95	37.3	143	<	0.03	0.54	0.06	0.02	0.007	0.91	<	0.005	0.0058	0.046							
J	17.5	8.0	16.4	2.5	1.6	40.0	121	<	0.03	0.008	0.03	0.01	0.03	0.017	1.64	<	0.005	0.0015	0.40						
K	13.0	7.4	20.0	3.0	1.5	50.0	91.0	<	0.03	2.25	0.05	0.12	0.03	0.022	8.1	<	0.005	0.0080	0.048	0.01	0.06	0.5	2.15	84.0	0.18
L	10.0	8.1	10.8	1.7	0.92	37.0	92.1	<	0.03	0.018	0.04	0.05	0.04	0.007	1.24	<	0.005	0.0021	0.093						

tion en rayons X du dépôt solide en suspension sur le lit de la rivière révèle l'existence de grandes quantités de magnétite, zinc ferrite et mullite. Ce dernier est composé de déchets de haut fourneau. La station A en aval d'une centrale thermique qui rejette une grande quantité de déchets riche en solides en suspension provenant de la combustion du charbon et du coke dans les hauts fourneaux. L'analyse par fluorescence en rayons X a montré la présence de Fe, Zn et Ba comme éléments majeurs, Sr et Cd comme éléments mineurs et Zr, Pb, Rb, Cu et Mn en traces.

Quoique la rivière paraisse sans vie, l'examen microscopique a révélé la présence de deux espèces d'algues (Tableau VI) et les cultures ont montré que toutes deux étaient très résistantes au zinc, suggérant qu'elles peuvent être un constituant de la flore en place à cette station.

Au contraire de A, la station B possède un courant végétal avec 14 espèces présentes (Tableau VI) même si les teneurs en zinc dans l'eau sont encore relativement fortes (Tableau II). La station est située à 300 m en aval d'un bassin de décantation de divers déchets dus, en liaison avec la fonderie, à une usine de production de lithophone et autres produits de peinture. Les résidus liquides arrivent au cours d'eau à la faveur de diverses infiltrations. Immédiatement après les infiltrations un épais précipité blanc-crèmeux recouvre le fond du cours d'eau et la plante dominante, *Amblystegium riparium*. L'analyse par diffraction aux rayons X de ce précipité (Tableau V) révèle de grandes quantités de sulfate de baryum et d'hydrozincite. L'analyse par fluorescence montre la présence de Ba et Sr comme éléments majeurs et Zn, Pb et Sn comme éléments mineurs.

La station C est située sur un petit cours d'eau provenant du drainage des produits de déchets de la fonderie principale, tandis que la station D correspond aux infiltrations qui alimentent ce cours d'eau. Aux deux stations, les niveaux non seulement du zinc mais de la majorité des métaux lourds analysés à la fois dans l'eau (Tableau II) et les sédiments (Tableaux III, IV) étaient très élevés. L'analyse par diffraction aux rayons X adhérant aux mousses *Pohlia* sp. montre que la ferrite de zinc domine (Tableau V), ce qui traduit les teneurs élevées en Zn et Fe dans les sédiments (Tableaux III, IV). L'analyse par fluorescence aux rayons X des sédiments de la station C confirme la présence de Zn et de Fe comme éléments majeurs, et montre aussi celle de Pb, As et Ba comme éléments intermédiaires, Ca comme éléments mineurs et Sn, Ag, Sr et Rb comme éléments en traces. Bien que les teneurs en zinc et en plusieurs autres métaux soient beaucoup plus élevées dans l'eau de D que de C (Tableau II), la couverture végétale est beaucoup plus fournie en D. Mais cette couverture comprend seulement trois espèces (Tableau V).

FIG. 2. — Mine de Planioles ; dépôts avec des zones humides au premier plan ; 3012-01 en arrière-plan.

2.2. Planioles (station E)

Les dépôts provenant de cette mine de plomb abandonnée sont surtout constitués de dolomite. Ils sont dépourvus de végétation (*fig. 2*), mais les zones humides à l'Est du dépôt possèdent une couverture végétale. Un ruisseau principal draine la décharge et plusieurs autres infiltrations conduisent à des mares et parfois à un marécage. L'enrichissement en zinc du cours d'eau est modéré (Tableau II), mais quelques mares montrent des valeurs plus élevées, jusqu'à $0,29 \text{ mg.l}^{-1}$ de Zn. La comparaison des mesures à 8 et 14 GMT montrent une diminution

TABLEAU III. — Composition ($\mu\text{g g}^{-1}$) des sédiments aux stations A - I et K.

Site	Ca	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Ag	Cd	Pb
A	9940	1910	48900	54.3	10.8	250	7280	2.7	111	532
B	7510	3010	20800	33	27	40	3870	< 3	36	180
C	920	3620	85000	87	45	4160	59600	148	700	18000
D	2040	4190	25400	71	70	292	46900	< 3	399	1440
E	71900	719	15900	31	40	57	7740	< 3	21	525
F	19100	1860	4320	37	< 20	702	1460	< 3	14	725
G	95500	879	11400	50	40	92	13000	< 3	20	1490
H	27600	769	16000	17	< 20	362	20800	< 25	115	21200
I	83500	1420	21600	25	30	342	45900	29	105	19100
K	14300	209	9120	21	30	222	14900	10	145	5090

du zinc filtrable ainsi qu'une augmentation de l'alcalinité totale et quelquefois aussi du Ph, indiquant qu'un cycle nyctéméral de zinc aqueux peut exister. La flore du cours d'eau est beaucoup plus riche que celle de toute autre station étudiée (Tableau VI).

2.3. Largentière (stations F, G et Rivière La Ligne)

Il s'agit d'une usine en activité, avec un bassin de décantation et une aire adjacente marécageuse dominée par *Typha latifolia*. La plupart des échantillons d'eau du voisinage présentent des teneurs élevées en zinc. Les deux stations choisies pour étude sont sur le ruisseau qui draine apparemment la zone marécageuse (F) et sur un ruisseau (G). Les eaux des deux stations sont fortement calcaires et ont des teneurs semblables en zinc ; F diffère de G par des teneurs plus fortes en Ni et beaucoup plus fortes en Cu (Tableau II). F est aussi probablement contaminée légèrement par des effluents d'égouts. Quoique les deux stations soient recouvertes de filaments (F : 50 % et G : 90 %) les flores sont dissemblables. F n'abrite que 4 espèces tandis que G en abrite au moins 16 ; *Stigeoclonium tenue* et *Ulothrix moniliformis* dominant en F, tandis que *Mougeotia* sp. $\leq 8 \mu\text{m}$ domine en G.

Des contrôles de pollution par le zinc ont aussi été faits sur la rivière La Ligne, en utilisant un test colorimétrique. Les premières traces de zinc apparaissent au-dessous d'un effluent 100 m en amont du premier pont de Largentière. Beaucoup de roches sont recouvertes d'une couche superficielle blanche, indiquant une pollution métallique de l'eau. De petites dépressions dans les roches de cette zone ont une couleur rouge due aux algues *Haematococcus pluvialis*.

2.4. Villemagne (stations H, I, J, K, L)

Il s'agit d'une mine désaffectée et d'une fonderie indiquée sur la carte Michelin au 200 000^e. Le dépôt au début de la vallée est très érodé et les matériaux disséminés sur une zone étendue. Cinq stations ont été choisies dont l'une (H) s'est révélée être non polluée et chimiquement différente (Tableaux II et V). Les quatre autres stations présentent toutes des teneurs élevées en zinc. L'analyse par fluorescence aux rayons X des sédiments de la station J montre que les éléments majeurs sont Zn, Fe et Ba, avec Pb, Sr, Cu et Mn comme éléments en traces.

Deux des stations sont dominées par des algues bleu-vertes (*Plectonema gracillimum*, *Schizothrix* sp), une par une diatomée (*Achnanthes microcephala*) et une à la fois par un algue verte (*Hormidium rivulare*) et une moussée (*Cratoneuron filicinum*). La couverture végétale est visible en I, J et L, mais rare en K ($< 0,1$ % de la surface). Cependant, *Schizothrix* sp. $> 2 \leq 4 \mu\text{m}$ devient nettement visible dans une

TABLEAU IV. — Composition ($\mu\text{g g}^{-1}$) des sédiments fixés aux bryophytes aux stations B, C, E, J et K.

Species	Description des stations	Ca	Al	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Ag	Cd	Ba	Pb
<i>Amblystegium riparium</i>	fixé sur les roches B couvertes de précipité blanc	89500	1230	4320	10180	92.5	61.7	27.0	17600	—	94.9	86400	54.0
<i>Pohlia</i> sp.	fixé sur les C rejets de la fonderie	791	15830	3780	99800	80.3	40.1	5330	48700	148	751	2860	20000
<i>Cratoneuron filicinum</i> + <i>C. commutatum</i>	fixé sur les E rejets de la mine	305500	5550	69.4	5550	—	—	194	1870	—	—	—	1110
<i>Dicranella varia</i> + <i>Cratoneuron filicinum</i>	fixé sur les J rejets de la mine	87700	6870	2210	31800	69.7	59.8	358	57800	33.8	97.6	9960	21500
<i>Cratoneuron filicinum</i>	fixé sur les K rejets de la mine	96600	9590	1120	20000	62.7	25.0	119	105300	3.7	61.4	5010	2060

TABLEAU V. — Composition minérale des sédiments fixés aux bryophytes aux stations B, C, E, J et K.

Espèce	Station	Minéral	Composition du sédiment.	
			Observations minéralogiques	
<i>Amblystegium riparium</i>	B	sulphate de baryum hydrozincite	Minéral dominant ; épais précipité blanc couvrant le fond du cours d'eau. Minéral secondaire de zinc formé par coprécipitation en milieu alcalin.	
	C	ferrite/ferrate de zinc ($ZnFe_2O_4$) quartz feldspath plagioclase	Minéraux dominants ; minéraux communs dans les rejets de fonderie de zinc. Gangue habituellement associée aux minéraux de plomb et de zinc. Commun à la fois dans les roches métamorphiques et dans les roches sédimentaires comme granules détritiques.	
<i>Pohlia sp.</i>		béudantite ($PbFe_3(A_2O_4)(SO_4)(OH)_6$) illite/kaolinite	Rare minéral de plomb associé à des gîtes de plomb et de zinc. Composants des argiles associés aux sols couvrant des zones de rejets de fonderie.	
<i>Cratoneuron filicinum</i>	E	dolomite quartz calcite	Minéral dominant dû à la dégradation du substrat rocheux. De la dégradation du substrat rocheux. De la dégradation du substrat rocheux.	
	J	quartz dolomite barytine sphalerite ferrite/ferrate de zinc	Minéral dominant : probablement comme gangue minérale des gîtes de plomb/zinc et de la dégradation du substrat rocheux. De la dégradation du substrat rocheux. Gangue habituellement associée au minéral de gîtes de plomb/zinc. De la dégradation des gîtes. De rejets de fonderie.	
<i>Cratoneuron filicinum</i>	K	quartz dolomite ferrite/ferrate de zinc calcite kaolinite/illite	Dominant comme gangue de minéral et de la dégradation de substrat rocheux. De la dégradation de substrat rocheux. De rejets de la fonderie. De la dégradation de substrat rocheux. De la dégradation de substrat rocheux.	

TABLEAU VI. — Espèces recensées submergées dans les stations A-D, FL. Les nombres sont les valeurs d'abondance (échelle 1-5 : voir texte).

	A	B	C	D	F	G	H	I	J	K	L
<i>Chamaesiphon polonicus</i> (Rostaf.) Hansg.							2				
<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	5										
<i>Phormidium</i> sp. $> 2 \leq 4 \mu\text{m}$						1					
<i>Plectonema gracillimum</i> (Zopf) Hansg.							2		5	1	2
<i>Schizothrix</i> sp. $> 2 \leq 4 \mu\text{m}$										5	
<i>Euglena mutabilis</i> Schmitz										1	
<i>Tribonema</i> sp. $> 8 \mu\text{m}$		4									
<i>Achnanthes lanceolata</i> Bréb.						2					
<i>A. microcephala</i> Kütz.					2	2		2	5	4	3
<i>A. minutissima</i> Kütz.		3						2			
<i>Ceratoneis arcus</i> Kütz.								5			
<i>C. arcus</i> Kütz. var. <i>amphioxys</i> Rabenh.	2										
<i>Cymbella cesatii</i> (Rabenh.) Grunow						3					
<i>C. microcephala</i> Grun.						3			1	3	
<i>C. ventricosa</i> Kütz.						1		1			
<i>Diatoma hiemale</i> (Lyngb.) Heiberg.								4			
<i>Fragilaria amphicephala</i>						4					
<i>Gomphonema parvulum</i> Kütz.		2				2		1			
<i>Navicula cryptocephala</i> Kütz.		2									
<i>N. minima</i> Grunow		2									
<i>N. tantula</i> Hustedt	2										
<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow.						2					
<i>N. fonticola</i> Grunow						2					
<i>N. palea</i> (Kütz.) W. Smith		2									
<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenb.										1	
<i>P. microstauron</i> (Ehrenb.) Cleve						1					
<i>P. subcapitata</i> Gregory		1	3	2							
<i>P. tenuis</i> Greg.									3	3	1
<i>P. viridis</i> (Nitzsch) Ehrenb. var. <i>sudetica</i> (Hilse) Hust.	2										
<i>Surirella ovata</i> Kütz.		2				1		1	2		
<i>Surirella</i> sp.						3					
<i>Synedra rumpens</i> Kütz.								1			
<i>S. ulna</i> (Nitzsch) Ehrenb.		1				1					
<i>Mougeotia</i> sp. $\leq 8 \mu\text{m}$						5					
<i>Staurastrum</i> sp.								4			
<i>Hormidium flaccidum</i> A. Braun			2	2							
<i>H. rivulare</i> Kütz.		2	5	5							5
<i>Microthamnion strictissimum</i> Rabenh.										1	
<i>Stigeoclonium tenue</i> Kütz.	4				5						
<i>Ulothrix moniliformis</i> Kütz.					5		5				
<i>Amblystegium riparium</i> (Hedw.) Br. Eur.	5										
<i>Cratoneuron filicinum</i> (Hedw.) Spruce									3		5
<i>Dicronella varia</i> (Hedw.) Schimp.									2		
<i>Pohlia</i> sp.			3								
<i>protonema</i>			4								1
<i>Equisetum arvense</i>					3	4					

TABLEAU VII. — Espèces recensées submergées dans la station E. Les nombres sont les valeurs d'abondance (échelle 1-5 : voir texte).

<i>Chroococcus</i> sp. $> 8 \leq 6 \mu\text{m}$	1
<i>Calothrix parietina</i> Thuret	1
<i>Hyella fontana</i> Huber et Jadin	1
<i>Lyngbya aestuarii</i> Liebmann	1
<i>Cryptomonas erosa</i> Ehrenb.	1
<i>Tribonema</i> sp. $> 8 \mu\text{m}$	4
<i>Achnanthes lanceolata</i>	1
<i>A. minutissima</i> Kütz./ <i>A. microcephala</i>	3
<i>Amphipleura pellucida</i> Kütz.	1
<i>Amphora ovalis</i> Kütz.	1
<i>A. perpusilla</i> Grunw.	1
<i>Cymbella cesatii</i>	1
<i>C. parva</i> (W. Smith) Cleve	1
<i>C. ventricosa</i>	1
<i>Denticula tenuis</i> Kütz.	1
<i>Eunotia arcus</i> Ehrenb.	1
<i>E. gracilis</i> (Ehrenb.) Rabenh.	1
<i>Meridion circulare</i> Ag.	1
<i>Navicula cryptocephala</i>	1
<i>N. radiosa</i> Kütz.	1
<i>Nitzschia amphibia</i>	1
<i>N. linearis</i> W. Smith	1
<i>Pinnularia</i> sp.	2
<i>Surirella ovata</i> Kütz.	1
<i>Synedra ulna</i> (Nitzsch) Ehrenb.	1
<i>Closterium strigosum</i> Bréb.	2
<i>Closterium</i> sp.	1
<i>Cosmarium botrytis</i> (Bory) Menegh.	2
<i>C. punctulatum</i> Bréb.	1
<i>Staurostrum punctulatum</i> Bréb.	1
<i>Scenedesmus obliquus</i> (Turp.) Kütz.	1
<i>Gongrosira debaryana</i> Babenh.	1
<i>Oedogonium</i> msp. $> 8 \leq 12 \mu\text{m}$	1
<i>Cratoneuron commutatum</i>	3
<i>C. filicinum</i> (Hedw.) Spruce	3
<i>Juncus</i> sp.	2
<i>Ranunculus repens</i> L.	1
<i>Rorippa nasturtium-aquaticum</i> (L.) Hayek	1
<i>Veronica anagallis-aquatica</i> L.	5

petite chute juste en aval du tronçon et une communauté développée de *Plectonema* et de mousses apparaît sur les bords du cours d'eau. Les mousses sont surtout sous formes de *Protonema* avec par endroits des pieds de *Dicranella* sp. aux feuilles différentes de celles de *D. varia* observées à la station J.

3. — DISCUSSION

L'étude de douze stations ne permet pas de généraliser, mais la présence de quelques espèces à des niveaux élevés de zinc et autres métaux lourds est conforme aux observations faites sur un large éventail de stations (Whitton et Diaz 1981). La réduction de la flore de la station A (Riou Mort) à seulement deux espèces ne peut cependant pas être attribuée aux teneurs élevées de zinc et métaux lourds associés tels que Cu, Cd et Pb car d'autres stations (par ex. Say et Whitton 1981) avec un niveau semblable de zinc (ainsi que de Cd et Pb) ont plus de vingt espèces. Il semble que l'action érosive d'une forte charge solide en suspension ($\bar{x} = 202 \text{ mg l}^{-1}$, voir Say 1978), l'atténuation de la lumière due à cette charge et le dépôt de cette suspension sur le lit du ruisseau constituent des facteurs importants de réduction de la flore. Les algues présentes ainsi que les deux espèces (*Achnanthes minutissima* et *Gomphonema parvulum*) trouvées dans l'étude de Say (1978) mais non dans le présent travail sont susceptibles de déplacements.

Le précipité riche en sulfate de baryum et en zinc sur le fond du cours d'eau à la station B est due à plusieurs réactions chimiques complexes. Les produits de déchets déversés dans le bac de décantation sont riches en carbonate de baryum et en oxyde de zinc. Le ruisseau du Banal au-dessus de ce bac est fortement calcaire et reçoit les eaux usées d'une mine de houille ainsi que des eaux d'égouts. Quand l'eau d'infiltration du bac arrive au cours d'eau, le carbonate de baryum soluble réagit avec les fortes teneurs en sulfates de l'eau venant de la mine et forme un précipité insoluble de sulfate de baryum. L'oxyde de zinc est aussi précipité en milieu alcalin. L'analyse de ce précipité qui recouvre complètement les mousses *Amblystegium riparium* (Tableau IV) montre de très fortes teneurs en Ba et en Zn. Contrairement au dépôt de la station A, ce précipité ne réduit pas l'importance de la flore et les trois organismes les plus abondants (Tableau VI) ne sont pas mobiles.

La station D fournit un exemple de ce qui paraît être la plus forte teneur en zinc et cadmium connue à laquelle vivent des organismes photosynthétiques. Une couverture végétale se développe en effet dans cette station; il s'agit surtout d'*Hormidium rivulare*. Des souches

tolérantes de cette algue sont répandues dans des cours d'eau aux teneurs élevées en zinc (Say, Diaz et Whitton 1977) et on peut se demander si des teneurs en zinc interdisant le développement de ces souches existent dans la nature. La raison de l'existence d'une couche algale importante en D n'est pas claire. L'influence du broutage et du parasitisme sont probablement atténués sous de telles conditions, de sorte que même un organisme à croissance lente peut atteindre une biomasse élevée ; il n'y a cependant pas de données sur les taux de croissance. Les diatomées récoltées aux stations C et D, *Pinnularia subcapitata*, ont été aussi récoltées dans des tronçons atteignant les plus fortes teneurs en zinc dans le cours d'eau (Say et Whitton 1981).

A la station C, *Pohlia* sp. se développe fixée au sédiment riche en ferrite de zinc (Tableau IV) en présence de fortes teneurs en Cu, Ag, Cd et Pb, métaux abondants à la fois dans le sédiment et dans l'eau.

Des algues vertes filamenteuses sont présentes en sept stations. Les quatre genres concernés (*Hormidium*, *Mougeotia*, *Stigeoclonium*, *Ulothrix*) sont ceux observés en plusieurs autres stations riches en métaux lourds ; ils produisent tous des souches tolérantes au zinc. Inversement, la station B est la seule station riche en métaux lourds que nous connaissions avec un développement abondant de *Tribonema*. Les matériaux organiques rejetés par égouts en amont de la station favorisent probablement la présence de cette algue.

L'abondance de la flore trouvée à la station E (Tableau VII) est en partie due à la nature calcaire de l'eau et à la dominance du calcium et minéraux liés au calcium dans les sédiments (Tableaux IV, V) réduisant la solubilité et la toxicité du zinc présent.

Aux stations J et K *Dicranella varia* et *Cratoneuron filicinum* ont été trouvées fixées aux sédiments riches en Zn, Cd et Pb (Tableau V), quoique le minéral principal soit la dolomite. La présence de ces mousses peut être favorisée par la réduction du potentiel toxique de zinc par le calcaire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs ont eu l'occasion de visiter la région de Viviez - Decazeville dans le cadre du contrat 074-74-1 ENV. UK du Programme de Recherche Ecologique de la C.E.E. Les premières observations les ont convaincu de l'intérêt de cette région. P. J. Say a ensuite étudié les stations en 1976-78 au Laboratoire d'Hydrobiologie, Université Paul-Sabatier, Toulouse, grâce à un financement obtenu dans le cadre des échanges entre la Royal Society (Londres) et le C.N.R.S.

B. A. Whitton a également travaillé dans ce Laboratoire en juin et juillet 1978 et les deux auteurs remercient H. Décamps et les autres membres de l'équipe pour leur accueil. Les auteurs remercient également tous ceux qui les ont aidés, en particulier : M^{lle} C. Mur pour les analyses chimiques à Toulouse et K. Rakos et Mrs D. M. Richards pour leur aide à Durham ; R. G. Hardy et D. L. Schofield (Durham) ont conduit les études de diffraction en rayons X.

TRAVAUX CITÉS

- ERNST (W.). 1974. — Schwermetallvegetation der Erde (= *Geobotanica Selecta* V). 194 pp. Gustav Fischer, Stuttgart.
- HARDING (J. P. C.) and WHITTON (B. A.). 1976. — Resistance to zinc of *Stigeoclonium tenue* in the field and the laboratory. *Br. phycol. J.*, 11 : 417-426.
- HOLMES (N. T. H.) and WHITTON (B. A.). 1977. — The macrophyte vegetation of the River Tees in 1975 : observed and predicted changes. *Freshwat. Biol.*, 7 : 43-60.
- HOLMES (N. T. H.) and WHITTON (B. A.). 1981. — Phytobenthos of the River Tees and its tributaries. *Freshwat. Biol.*, 11 : 139-168.
- SAY (P. J.). 1978. — Le Riou Mort, affluent du Lot pollué par des métaux lourds. 1. Etude préliminaire de la chimie et des algues benthiques. *Annls Limnol.*, 14 : 113-131.
- SAY (P. J.), DIAZ (B. M.) and WHITTON (B. A.). 1977. — Influence of zinc on lotic plants. I. Tolerance of *Hormidium* species to zinc. *Freshwat. Biol.*, 7 : 357-376.
- SAY (P. J.) and WHITTON (B. A.). 1980. Changes in flora down a stream showing a zinc gradient. *Hydrobiologia*, 76 : 255-262.
- WHITTON (B. A.), GALE (N. L.) et WIXSON (B. G.). 1981. — Chemistry and plant ecology of zinc-rich wastes dominated by blue-green algae. *Hydrobiologia*, 83 : 331-341.
- WHITTON (B. A.). 1980. — Zinc and plants in rivers and streams. In J. O. Nriagu (ed.) *Zinc in the Environment. II : Health Effects*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane and Toronto.
- WHITTON (B. A.) and DIAZ (B. M.). 1981. — Influence of environmental factors on photosynthetic species composition in highly acidic waters. *Verh. int. Verein. theor. angew. Limnol.*, 21 : 1459-1465.