

Acidification des eaux de surface sous l'influence des précipitations acides : rôle de la végétation et du substratum, conséquences pour les populations de truites. Le cas des ruisseaux des Vosges

Anne PROBST, Jean-Charles MASSABUAU, Jean-Luc PROBST et Bertrand FRITZ

Résumé – L'étendue de l'acidification des ruisseaux des Vosges a été étudiée. L'influence des précipitations atmosphériques acides, accentuée par la présence de résineux et de roches mères pauvres en minéraux altérables, a provoqué l'acidification de certains ruisseaux. L'acidité ($\text{pH} < 5.6$) et les teneurs élevées en aluminium dissous ($> 200 \text{ ppb}$) constituent des facteurs limitants à la présence de truites dans ces ruisseaux.

Streamwater acidification in relation to acid precipitations: vegetation and bedrock influences, consequences for trout populations. The Vosges massif case study

Abstract – The extent of stream acidification has been assessed in the Vosges massif. The influence of atmospheric acid precipitations, particularly enhanced under spruce forest and on a bedrock poor in base cation, has led to some stream acidification. The field survey illustrates the influence of acidity ($\text{pH} < 5.6$) and high levels of dissolved aluminium content ($> 200 \text{ ppb}$) on trout presence.

Abridged English Version – Like other countries in the northern hemisphere [1], France and particularly its north eastern area – *i. e.* the Vosges mountains – has not been spared the effects of acid atmospheric inputs on oligotrophic surface waters draining sensitive granitic bedrock ([2], [3]). Recently hydrochemical investigations have been set up for research on the phenomenon of forest decline [4]. Previous investigations [5] have indicated the existence of acidified and fishless streams in this massif. We present an overview performed in 1988-1989 about the acidification state of streams in this area.

To avoid an exhaustive survey, streams were selected after an inquiry to the local angling associations about streams where trout could be claimed to have disappeared during the past 15 years without obvious local pollution. Taking into account environmental factors (bedrock, vegetation) and human activity, 39 streams were selected. Streamwaters have been twice sampled under two contrasted hydrological conditions [autumn low water (period 1) and spring snow-melting (period 2)]. Trout were counted by electrical fishing (period 1).

Ternary Piper's diagram allowed to separate the different streams (*Fig. 1 a et b*) into 5 groups discriminated by their chemical composition (using both cations and anions). In one group, ten streams have completely lost their buffering capacity and are acidic with a high proportion of ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) in the cationic charge. Another group is composed of streams which are characterized by very low alkalinity and near neutral pH value (5.6), *i. e.* low buffering capacity: aluminium remains important in the cationic charge. A third group is made up by weakly buffered streams where strong acid anions are still dominant but where aluminium is absent. Finally, two other groups are composed of alkaline streams, very well or well buffered (8 streams). These latter are representative of the natural chemical composition of streams that drain such granites ([2], [6]). It is important to note that among the 39 streams sampled, 11 are really acid and 21 are losing all buffering capacity during snow-melting: these 21 solutions are not well buffered and are very sensitive to the influence

Note présentée par Georges MILLOT.

of acid atmospheric input. The 11 acid streams are located on the western side of the Vosges (Fig. 2).

A clear relationship has been indicated between the lack of trout and the stream acidification (Fig. 3). The presence of trout appears to be limited by a pH value lower than # 5.6 and by Al concentration higher than 180-200 ppb, as already observed [7]. The maximum Al concentration reaches 475 ppb during low water flow and 800 ppb during snow-melt [Table]. These values are distinctly higher than EEC tolerance limit for drinking water. As in the Vosges massif, waters are much harnessed for drinking water supplies, this problem is serious enough to be pointed out.

Moreover, considering environmental factors (vegetation and bedrock), we noticed that acidified streams are always those draining spruce-forested catchments. This is probably a consequence of the enhanced acid occult inputs filtered by the conifers ([4], [8]). However, the reciprocity is not true, indicating that the acidification is also related to such other factors as poorly alkaline soils and bedrocks. Acidified streams are generally draining sandstone or granite with biotite which are poor in base cations. The TDS indicate that the streamwaters affected by acidification are very diluted and poorly buffered solutions. The most alkaline streams are draining amphibole granites. The impact of acid atmospheric inputs on soils which are already acid and poor in exchangeable bases (podzolic series), and on sensitive bedrocks, has certainly led to stream acidification and hence to trout disappearance. We have now clearly determined this relationship in 15 fishless streams. In France, up to now, such a problem is known only in the Vosges massif.

I. HISTORIQUE. — Depuis plus de 15 ans, de nombreux pays de l'hémisphère Nord ont souffert de l'acidification des eaux de surface sous l'influence des retombées atmosphériques acides [1], en particulier dans les zones où le substratum géologique drainé neutralise mal ces apports acides (granites, grès). En France, l'existence de pluies acides sur le massif vosgien a été révélée en 1978 [2]. Puis l'importance de ces apports et l'incidence d'une pluie acide sur le chimisme des eaux de ruisseau d'un petit bassin sur pelouse (le Ringelbach) ont été évalués ([2], [3]).

Depuis 1985, devant la grave extension du dépérissement des forêts dans l'Est de la France, une étude hydrochimique est en cours dans un autre bassin versant granitique et forestier des Vosges (le Strengbach) pour estimer l'effet de cette pollution sur le système eau-sol-forêt [4]. Enfin, l'existence de ruisseaux acides sans truites dans les Vosges a été mise en évidence en 1987 [5].

II. ÉTUDE DE L'ACIDIFICATION DANS LE MASSIF DES VOSGES. — 1. *Méthode d'étude.* — Pour apprécier l'étendue de l'acidification, dans l'ensemble du massif des Vosges, sans se disperser dans un inventaire exhaustif, 39 ruisseaux ont été sélectionnés. Le choix a été effectué d'une part après consultation des associations de pêche locales sur l'éventuelle disparition de truite depuis 15 à 20 ans, sans cause de pollution locale, et d'autre part, après étude de l'environnement des bassins versants drainés (végétation, roche mère, pollution anthropique éventuelle). Les analyses d'hydrochimie ont été réalisées selon des protocoles adaptés aux solutions diluées [9]. Des comptages de truites (*Salmo trutta fario*) par pêche électrique ont été effectuées sur des tronçons de 50 m de ruisseau (tableau).

2. *Hydrochimie des ruisseaux des Vosges.* — Deux campagnes de prélèvements ont été menées sur ces 39 ruisseaux : en basses eaux d'automne 1988 (période 1) et en hautes

caux de printemps 1989 (fonte des neiges : période 2). Les différences de chimisme des ruisseaux sont mises en évidence grâce aux diagrammes ternaires de Piper (*fig. 1 a* et *1 b*). La figure *1 a* représente le diagramme des cations pour la période 2 de printemps; la figure *1 b* donne le diagramme des anions pour la période 1 d'automne. Sur la figure *1 a*, deux groupes de ruisseaux (A et B) se distinguent clairement par leurs compositions cationiques atypiques caractérisées par leur richesse en ions Al^{3+} et H^+ : de 20 à 50 % de la charge cationique pour l'un des groupes (composé de 11 ruisseaux) et de 7 à 18 % pour le second (comportant 8 ruisseaux). Les 3 autres groupes (C, D, E) présentent moins de 5 % de cations acides : on évolue ainsi d'une composition cationique équilibrée entre monovalents et bivalents vers un chimisme à tendance calco-magnésienne marquée (plus de 80 % de Ca et Mg). Le chimisme alcalin des 3 derniers groupes reflète la composition chimique naturelle ([2], [7]) des eaux drainant les roches silicatées des Vosges (granites et grès). Pour les anions (*fig. 1 b*), on peut distinguer en étiage un groupe de ruisseaux alcalins typiques (E'), où l'alcalinité représente plus de 50 % de la charge anionique et un autre groupe de ruisseaux (D') relativement bien tamponnés ($HCO_3^- \approx 30$ à 40 % de la charge en anions). En fonte des neiges, ces deux groupes gardent une alcalinité supérieure à 25 % de la charge anionique, à une exception près. Un troisième groupe (C') est caractérisé par un pouvoir tampon très faible qui devient nul en fonte des neiges avec, soit dominance des sulfates, soit équilibre entre acides forts monovalents et bivalents. Certains de ces ruisseaux ont une alcalinité représentant encore, en étiage, autour de 20 à 25 % de la charge anionique. Enfin, tous les ruisseaux restants (A' et B') sont caractérisés par un chimisme atypique pour des eaux sur granite ou sur grès : les uns (B') ont un pH proche de la neutralité (5,6) et une alcalinité inférieure à 10 % de la charge en anions, les autres (A') ont perdu leur pouvoir tampon et sont caractérisés par une acidité dominante exprimée soit sous la forme d'acides forts bivalents, soit en proportion équivalente d'acides forts bivalents et monovalents. En fonte des neiges, ils perdent quasiment toute leur alcalinité. Finalement sur les 39 ruisseaux étudiés, 21 accusent une perte marquée de leur faible alcalinité d'étiage par l'apport important d'eaux météoriques acides. La situation de ces ruisseaux est donc très précaire et leur composition chimique actuelle très fragile.

En fonction des caractéristiques chimiques précédentes, nous avons classé ces ruisseaux en 5 groupes (*fig. 2*) : alcalins typiques; alcalins relativement bien tamponnés; faiblement tamponnés; très faiblement tamponnés, à la limite de la neutralité; acides.

III. INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT. — *Végétation, sols et roche mère.* — L'influence de la végétation est nette, mais non exclusive. Les ruisseaux acides drainent tous des bassins couverts de résineux (tableau), conformément à ce qui a été observé par ailleurs ([8], [6] et [4]), mais la réciproque n'est pas toujours vraie. La fixation efficace des polluants atmosphériques par les forêts de résineux, due au filtrage des aérosols par leur feuillage persistant, est l'un des principaux facteurs responsables de l'acidification des sols. Dans les Vosges, la présence de sols à tendance naturelle acide (série podzolique) a certainement prédisposé à l'acidification des eaux de surface par l'apport, particulièrement accentué sous les forêts d'épicéas, de solutions météoriques acides. De plus, des réactions biogéochimiques internes aux bassins drainés, comme la nitrification, peuvent également jouer un rôle dans l'acidification des sols comme cela a été suggéré pour la Forêt Noire [10]. L'acidification des sols entraîne en effet la désaturation de leur complexe d'échange, au profit de Al^{3+} et H^+ [4] : c'est ce phénomène qui serait l'une des causes

TABLEAU

Caractéristiques chimiques et environnementales des ruisseaux échantillonnés dans les Vosges.

Chemical and environmental characteristics of the sampled streams in the Vosges Massif.

N° et Nom de ruisseau	pH		Al (ppb)		Alcal.+H ⁺		TDS (mg/l)		Nombre* truites	Couvert végétal	Type de roche
	min	max	min	max	1	2	1	2			
1 Schoenthal	-	6.12	22	-	20	-	44.5	-	6	E-H	(1)
2 Hoellenbach	4.86	5.99	68	305	18	0	54.7	60.7	0	E	(1)
3 Zorn blanche	6.21	6.62	9	23	59	19	38.3	37.4	9	E	(1)
4 Mossig	4.65	4.70	475	530	0	0	27.5	29.4	0	E-T	(1)
5 Chanson Combelle	5.77	6.08	25	66	26	20	36.5	35.0	13	Pr-F	(1)
6 Bousson	5.98	6.34	12	29	30	14	35.5	34.0	15	E	(1)
7 Chevaux	5.07	5.89	27	221	17	1	32.6	32.5	0	E	(1)
8 Sarre Blanche	6.94	7.26	15	16	279	110	59.7	46.1	21	H-E	(2)
9 Marteau	7.29	7.39	10	10	478	257	70.8	55.5	20	E-H	(3)
10 Grand Bras	4.86	6.60	7	853	47	0	30.8	27.6	0	E-T	(1)
11 Gentil Sapin	6.87	7.36	8	56	314	88	53.2	35.8	0	E-T	(1)
12 Osières	6.50	6.64	7	13	155	68	43.1	37.9	-	E	(4)
13 Strengbach	6.41	6.81	14	50	56	34	36.7	37.1	21	E	(5)
14 Surcenord	6.45	6.72	36	38	90	65	31.9	26.6	8	Pr	(6)
15 Corbeline	6.21	7.00	45	122	107	26	39.3	34.3	21	E	(7)
16 Haut Benifaing	5.60	6.57	63	270	71	5	35.2	27.5	0	E	(7)
17 Fréland	5.96	6.01	49	50	26	26	37.3	35.9	0	E	(5)
18 Chaufour	4.43	4.56	410	570	1	0	25.3	22.2	0	F-E	(8)
19 Vologne	6.57	6.69	19	34	90	68	33.3	31.6	2	F-T	(8)
20 Vologne	6.54	6.96	2	18	122	118	35.0	34.2	-	-	-
21 Ringelbach	6.87	7.39	2	11	428	135	56.0	31.5	0	Pr-F	(1,8)
22 Le Cellet	4.57	4.67	440	820	1	0	22.7	23.2	0	F-E	(8)
23 Cleurie	4.77	5.06	400	510	3	0	24.1	24.2	0	F-E	(8)
24 Fauchon	5.00	5.50	179	390	3	0	21.7	22.1	0	Pr-E	(8)
25 Fouchot	4.97	5.27	192	610	5	1	29.2	28.8	0	E	(1,8,5)
26 Fouchot	5.19	6.39	23	333	45	1	34.5	31.6	-	-	-
27 Grand Clos	5.58	6.17	52	165	22	3	22.6	21.2	P	Pr-F	(9)
28 Machey	5.11	6.20	73	208	31	0	17.0	18.4	0	F-T	(8)
29 Kruth	6.77	6.93	23	23	110	62	30.8	39.2	13	F	(10)
30 Kruth "Clinique"	5.30	5.67	93	165	12	0	17.7	22.6	-	F	-
31 Rouge Rupt	4.87	5.40	177	375	6	0	19.6	19.7	0	F-E	(8)
32 Grand Rupt	6.53	7.09	38	58	76	35	27.2	23.6	14	E	(11)
33 Grand Rupt	4.98	5.12	300	510	14	0	21.7	20.9	0	E	(11)
34 Ventron	5.01	5.46	132	300	10	0	20.6	19.5	0	F	(8)
35 Vinterges	5.32	6.40	109	140	39	3	22.9	18.9	P	F-T	(8)
36 Morbieu	4.82	4.93	375	610	2	0	22.5	22.3	0	E-F	(10)
37 Wasserfall	6.82	7.15	18	32	172	80	25.7	17.9	P	F-E	(12)
38 Firtig	7.45	7.62	7	9	518	271	59.8	39.4	25	F	(12)
39 Xoulces	5.42	6.72	76	194	113	9	30.2	18.4	60	-	-

Alcalinité+H⁺ : en µeq/l; TDS : Total des sels dissous; 1 : Étiage; 2 : Fonte des neiges; P : Présence; F : Épicéa; H : Hêtre; T : Tourbière; F : Forêt; Pr : Prairie; (1) : Grès; (2) : Grès + Rhyolite; (3) : Grès + Brèches siliceuses; (4) : Gneiss à sillimanite; (5) : Granite à 2 micas; (6) : Granito-Gneiss; (7) : Granite à Feldspath K; (8) : Granite à biotite; (9) : Granite à amphibole + muscovite + biotite; (10) : Granite du Bramond; (11) : Granite du Ventron + du Bramond à biotite et actinote; (12) : Granite à amphiboles.

* Capturées par pêche électrique sur un échantillon de 50 m de ruisseau.

Alkalinity+H⁺ : in µeq/l; TDS: Total dissolved salts; 1: low water flow period; 2: snow-melting; P: Presence; E: Spruce; H: Beech; T: Peat bog; F: Forest; Pr: Grassland; (1): Sandstone; (2): Sandstone + Rhyolite; (3): Sandstone + siliceous breccias; (4): Sillimanite gneiss; (5): Binary granite; (6): Granito-Gneiss; (7): K Feldspar granite; (8): Biotite granite; (9): amphibole + muscovite + biotite granite; (10): Bramond granite; (11): Ventron + Bramond granite with biotite and actinote; (12): Amphibole granite.

* Caught using electrical fishing in a 50 m stream sample.

du dépérissement forestier actuel [11]. La neutralisation des eaux ne peut alors s'effectuer que grâce à l'altération de la roche mère.

En ce qui concerne les relations avec le substratum, les ruisseaux les plus acides drainent, pour la plupart, des grès qui sont pauvres en bases avec 85 % de quartz, ou des granites riches en quartz comme les granites en biotite. En passant de l'étiage à la fonte des neiges, le chimisme de ces ruisseaux est le plus affecté : la charge totale dissoute est généralement très faible et la perte d'alcalinité importante. Par contre, les ruisseaux les plus alcalins drainent des granites à amphiboles, assez riches en plagioclases qui libèrent des cations par altération.

IV. INFLUENCE SUR LES POPULATIONS DE TRUITES. — Sur les 39 ruisseaux étudiés, 18 sont dépeuplés. Pour 15 d'entre eux, cette absence de truites correspond à des eaux dont le pH atteint une valeur inférieure à la valeur seuil de neutralité des eaux naturelles (*fig. 3*), en présence de CO_2 atmosphérique ($\text{pH} \approx 5,6$). La zone hachurée illustre le fait qu'il n'existe pas de valeur seuil absolue à 5,6. La baisse du pH en dessous de 5,6 entraîne une mise en solution de l'aluminium. Le nombre de truites pêchées montre (*fig. 3*) qu'aux alentours de 180 à 200 ppb d'Al dissous, le seuil de tolérance est atteint, conformément aux observations précédemment rapportées [7]. Les basses valeurs de pH et les concentrations élevées en aluminium dissous sont les facteurs clés qui déterminent la mortalité des truites [12]. Cependant, les différentes formes de l'aluminium doivent être déterminées pour définir des seuils de toxicité réels, vis-à-vis des organismes vivants. Ce seuil critique d'aluminium coïncide également avec le seuil de tolérance admis par la C.E.E. pour la consommation en eau potable. Il faut noter ici que l'on peut atteindre pour certains ruisseaux, des concentrations en aluminium total dissous de 475 ppb en étiage et de 850 ppb en fonte des neiges. Ces valeurs restent cependant inférieures aux concentrations mesurées en Forêt Noire, en période de fonte des neiges (plus de 1 000 ppb) [13]. Ce problème est à souligner en raison des nombreux captages d'eau potable dans les Vosges.

VI. CONCLUSIONS. — L'étude de la composition chimique des ruisseaux menée dans l'ensemble du massif des Vosges, a permis de mettre en évidence les points suivants :

1. Sous l'influence des précipitations atmosphériques acides, 15 ruisseaux sur les 39 analysés sont acides ($\text{pH} < 5,6$) et présentent un chimisme atypique, dominé par les cations acides (H^+ , Al^{3+}) et les anions d'acides forts (SO_4^{2-} , NO_3^-).

2. Deux facteurs de l'environnement ont une influence sur l'acidification de ces ruisseaux : les forêts de résineux qui captent en toutes saisons les polluants atmosphériques et les roches mères silicatées pauvres en bases ou en minéraux altérables (grès et granites à biotite) qui neutralisent mal les solutions météoriques acides.

3. Deux seuils de toxicité sont bien mis en évidence vis-à-vis des truites. Celles-ci sont présentes dans les ruisseaux où le pH est supérieur à 5,4-5,6 et la concentration en aluminium dissous inférieure à 200 ppb.

4. Dans les Vosges, le fragile système « forêt de résineux-sol acide-roches silicatées pauvres » a été perturbé sous l'influence des précipitations atmosphériques acides. La perte du pouvoir tampon des sols et l'inaptitude de certaines roches à neutraliser ces apports météoriques, ont contribué à l'acidification de certains ruisseaux avec perte de leur population de truites. Ce déséquilibre géochimique serait aussi l'une des causes fondamentales du dépérissement forestier.

Ces recherches ont été financées par l'Agence financière de Bassin Rhin-Meuse (A.F.B.R.M.) et le Groupement universitaire de Recherches sur l'Environnement (G.U.R.E.N.) de l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg. Nous remercions le Conseil supérieur de la Pêche, et les Fédérations départementales de Pêche et de Pisciculture du Bas-Rhin, du Haut-Rhin, de Meurthe-et-Moselle et des Vosges pour leur participation.

Note remise le 5 juin 1990, acceptée le 21 juin 1990.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. F. WRIGHT et M. JOHANNESSEN, *In* D. DRABLOS et A. TOLLAN éd., Oslo, *Impact of Acid Precipitation*, S.N.S.F. project, A, Norway, 1980, p. 250-251.
- [2] G. BOURRIE, *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg, 52, 1978, 174 p.
- [3] B. FRITZ, J. C. MASSABUAU et B. AMBROISE, *Ass. Int. Hydrol. Sc.*, Publ. n° 150, 1984, p. 249-261.
- [4] A. PROBST, E. DAMBRINE, D. VIVILLE et B. FRITZ, *J. of Hydrology*, 116, 1990 (sous presse).
- [5] J.-C. MASSABUAU, B. FRITZ et B. BURTIN, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 305, série III, 1987, p. 121-124.
- [6] A. PROBST, B. FRITZ, B. AMBROISE et D. VIVILLE, *Proc. Vancouver Symp., Ass. Int. Hydrol. Sc.*, Publ. n° 167, 1987, p. 109-120.
- [7] H. LEIVESTAD, I. P. MUNIZ et B. O. ROSSELAND, *In* D. DRABLOS et A. TOLLAN éd., Oslo, *Ecological Impact of Acid Precipitation*, S.N.S.F. project, A, Norway, 1980, p. 318-319.
- [8] M. HORNUNG, B. REYNOLDS, P. A. STEVENS et C. NEAL, *Proc. Vancouver Symp., Ass. Int. Hydrol. Sc.*, Publ. n° 167, 1987, p. 65-74.
- [9] G. KREMPP, Notes techniques 19, Institut de Géologie, Strasbourg, France, 1988, 79 p.
- [10] K. H. FEGER et G. BRAHMER, *Water, Air and Soil Pollution*, 31, 1986, p. 257-265.
- [11] M. BONNEAU, *Rev. Forest. Franç.*, XVI, (5), 1989, p. 367-385.
- [12] B. O. ROSSELAND, *Water, Air and Soil Pollution*, 30, 1986, p. 451-460.
- [13] R. SCHOEN, *Water, Air and Soil Pollution*, 31, 1986, p. 187-195.

A. P., J.-L. P. et B. F. : Centre de Géochimie de la Surface, C.N.R.S.,
1, rue Blessig, 67084, Strasbourg Cedex;

J.-C. M. : Laboratoire de Neurobiologie et Physiologie comparées,
C.N.R.S., Université de Bordeaux-I, place du Docteur-Peyneau, 33120 Arcachon.

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Diagrammes de Piper représentant la composition chimique des eaux des ruisseaux des Vosges en période de fonte des neiges pour les cations (a) et en période d'étiage pour les anions (b). Les zones en hachures représentent les regroupements de ruisseaux.

Fig. 1. — Piper's diagram showing the chemical composition of the Vosges streamwaters during snow-melting for cations (a) and during low water flow for anions (b). Hatched areas represent the different groups of streams.

Fig. 2. — Carte de l'état d'acidification des ruisseaux échantillonnés dans le massif vosgien. Parfois, un même ruisseau a été classé dans deux groupes voisins. Le n° 39 est la confluence des 27 et 31.

Fig. 2. — Map of the stream acidification state in the Vosges Massif. One stream may be allocated to two neighbouring groups. The No. 39 is the confluence of Nos. 27 and 31.

Fig. 3. — Relation entre pH et teneur en aluminium total dissous dans les eaux de ruisseaux des Vosges, pour les deux périodes de prélèvements. Les ronds noirs représentent les ruisseaux sans truites; les ronds blancs, les ruisseaux peuplés : on a indiqué le nombre de truites pêchées sur 50 m de ruisseau (« p » signifie présence); en hachuré les seuils de toxicité apparents.

Fig. 3. — Relationship between pH and total dissolved aluminium concentration in the Vosges streamwaters, for both sampling periods. The closed circles indicate fishless streams; the open ones, the trout streams; the number of trout, present along a 50 m stream sample is indicated ("p" means presence); the hatched areas represent apparent toxic levels.

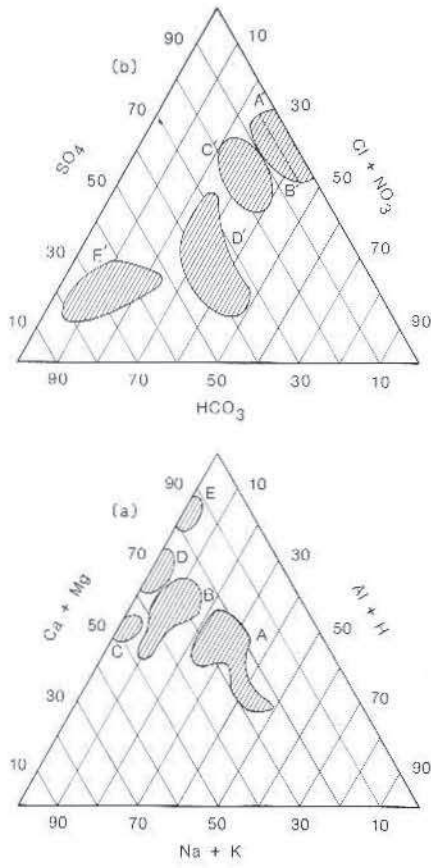


Fig. 1

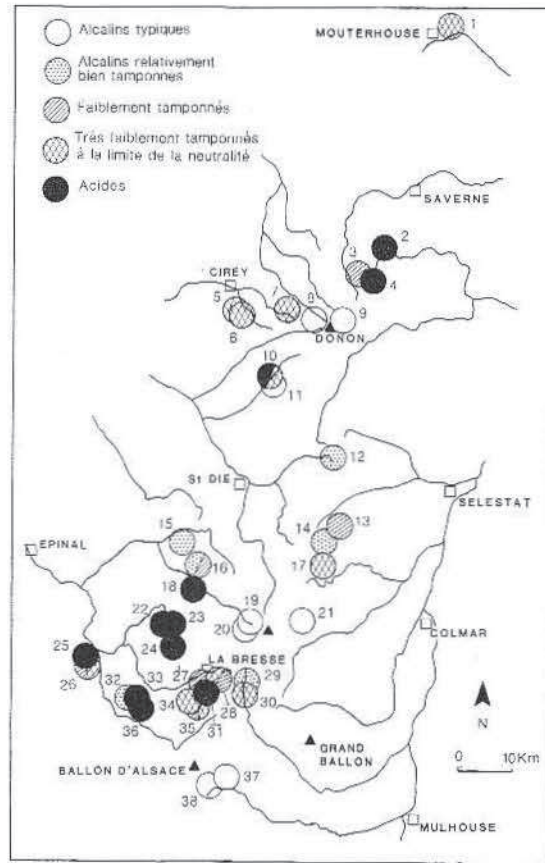


Fig. 2

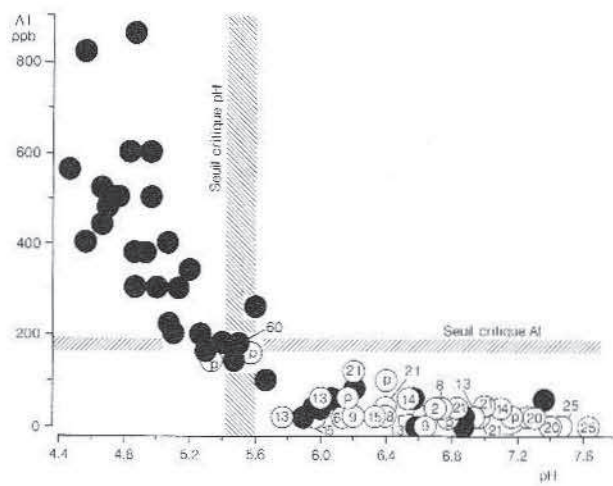


Fig. 3