

Étude des relations entre les caractéristiques
terrestres des bassins versants et la qualité
de l'eau des 35 lacs du réseau TADPA

Rapport scientifique No 277

pour

Environnement Canada

par

M. Lachance

F. Buteau

INRS-Eau

Décembre 1989

RÉSUMÉ

Des données sur la physiographie, la météorologie, la végétation, la géologie, la chimie des sols, la granulométrie des sols et la minéralogie des sols de 35 bassins versants du Bouclier Canadien ont été recueillies par Environnement Canada direction générale des terres au cours des années 1984-86. Les lacs drainant ces bassins versants font partie du réseau TADPA-Québec opéré par Environnement Canada direction générale des eaux intérieures depuis 1983 pour la surveillance de l'acidification des milieux aquatiques.

La présente étude comprend deux parties essentielles. Dans la première partie, on examine les interrelations entre les variables de qualité de l'eau et les variables du milieu terrestre et on identifie les caractéristiques terrestres les plus explicatives de la qualité de l'eau. On montre en particulier que les variables décrivant la physiographie (en particulier l'altitude), la météorologie (précipitation et sulfates atmosphériques), l'hydrologie (débit spécifique) et la végétation (présence de feuillus ou résineux) ont un grand pouvoir explicatif de la minéralisation des eaux. La chimie des sols des horizons organiques (BF et BHF) joue également un rôle très important dans l'explication des variations spatiales de la minéralisation des eaux. En ce qui concerne les variables de granulométrie et de minéralogie des sols, on ne trouve pas de relations très apparentes avec la qualité de l'eau à l'exception d'une certaine relation avec la présence de limon et d'épidote.

Dans la seconde partie de l'étude, on développe et élabore un modèle de régression permettant d'expliquer les variations de l'alcalinité et du pH à partir d'un certain nombre de variables clés caractéristiques du bassin versant. La qualité de la prédiction est généralement bonne (de l'ordre de 0,65) compte tenu de la variabilité naturelle intrinsèque au phénomène. Ce modèle est prometteur pour expliquer, sur des territoires plus vastes, la sensibilité à l'acidification de milieux aquatiques menacés d'acidification.

TABLE DES MATIÈRES

	<u>PAGE</u>
RÉSUMÉ.....	i
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX (ANNEXE).....	vii
1. INTRODUCTION.....	1
2. MÉTHODES.....	2
2.1 DONNÉES.....	2
2.1.1 Variables de qualité de l'eau.....	2
2.1.2 Variables biophysiques.....	2
2.1.3 Variables décrivant la chimie des sols.....	4
2.1.4 Variables décrivant la granulométrie des sols.....	5
2.1.5 Variables décrivant la minéralogie des sols.....	6
2.1.6 Variables décrivant la géologie des bassins versants.....	7
2.2 MÉTHODES STATISTIQUES.....	8
2.2.1 Interrelations entre variables.....	8
2.2.2 Modèle de régression.....	9
3. ÉTUDE DES INTERRELATIONS ENTRE VARIABLES.....	11
3.1 VARIABLES DE QUALITÉ DE L'EAU.....	12
3.2 VARIABLES BIOPHYSIQUES.....	15
3.2.1 Interrelations entre variables biophysiques.....	15
3.2.2 Relations variables biophysiques - variables de qualité.....	
de l'eau.....	15
3.3 VARIABLES DE CHIMIE DES SOLS.....	21
3.3.1 Comparaison entre les horizons de sols.....	21
3.3.2 Interrelations entre variables de chimie des sols.....	22

3.3.3 Relations variables de chimie des sols - variables de.....	
qualité de l'eau.....	22
3.4 VARIABLES DE GRANULOMÉTRIE DES SOLS.....	27
3.4.1 Comparaison entre les horizons de sols.....	27
3.4.2 Interrelations entre variables de granulométrie des sols.....	28
3.4.3 Relations variables de granulométrie des sols -.....	
variables de qualité de l'eau.....	28
3.5 VARIABLES DE MINÉRALOGIE DES SOLS.....	32
3.5.1 Interrelations entre variables de minéralogie des sols.....	32
3.5.2 Relations variables de qualité de l'eau - variables.....	
de minéralogie des sols.....	32
3.6 SYNTHÈSE DES INTERRELATIONS.....	36
4. MODÈLE DE RÉGRESSION.....	39
4.1 CHOIX DES VARIABLES.....	40
4.2 TABLEAUX DE CONTINGENCE.....	41
4.3 RÉSULTATS DE L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES.....	43
4.4 RÉSULTATS DE LA RÉGRESSION SUR LES FACTEURS DE L'AFC.....	47
5. CONCLUSION.....	49
6. BIBLIOGRAPHIE.....	51
ANNEXE A.1.....	55
ANNEXE A.2.....	62

LISTE DES TABLEAUX

	<u>PAGE</u>
2.1 Description des variables biophysiques considérées.....	3
3.1 Corrélation entre variables de qualité de l'eau.....	13
3.2 Corrélation entre variables biophysiques.....	16
3.3 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables biophysiques.....	17
3.4 Corrélation entre variables de chimie des sols (horizon BF+BHF).....	23
3.5 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables de chimie des sols (horizon BF+BHF).....	24
3.6 Corrélation entre variables de granulométrie des sols (horizon BF+BHF)	29
3.7 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables de granulométrie des sols (horizon BF+BHF).....	30
3.8 Corrélation entre variables de minéralogie des sols.....	33
3.9 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables de minéralogie des sols.....	34
4.1 Bornes de la classe intermédiaire des variables explicatives.....	42
4.2 Tableaux de contingence obtenus en croisant les modalités de l'alcalinité avec celles des variables du milieu terrestre.....	44
4.3 Paramètres de la régression multiple usuelle sur l'alcalinité et le pH pour différents scénarios.....	48

LISTE DES FIGURES

	<u>PAGE</u>
3.1 Plan factoriel montrant les projections des variables de qualité de... l'eau.....	14
3.2 Projection des variables biophysiques dans l'espace factoriel..... déterminé par la projection des variables de qualité de l'eau.....	19
3.3 Projection des variables de chimie des sols (horizon BF+BHF) dans..... l'espace factoriel déterminé par la projection des variables de..... qualité de l'eau.....	26
3.4 Projection des variables de granulométrie des sols (horizon BF+BHF)... dans l'espace factoriel déterminé par la projection des variables de.. qualité de l'eau.....	31
3.5 Projection des variables de minéralogie des sols dans l'espace facto- riel déterminé par la projection des variables de qualité de l'eau....	35
3.6 ACP sur l'ensemble des variables considérées: a) variables biophysi- ques, b) variables de chimie des sols, c) variables de granulométrie des sols, d) variables de minéralogie des sols, e) variables de..... chimie de l'eau (en points supplémentaires).....	37
4.1 Représentation du plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical)..... montrant la relation de certaines variables du milieu terrestre avec.. l'alcalinité de l'eau dans les lacs.....	45
4.2 Représentation du plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical)..... montrant la relation de certaines variables du milieu terrestre avec.. l'alcalinité de l'eau dans les lacs.....	46

LISTE DES TABLEAUX (ANNEXE)

	<u>PAGE</u>
A.1 Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et... les variables de chimie des sols pour différents horizons.....	55
A.2 Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et... les variables de granulométrie des sols pour différents horizons.....	62

1. INTRODUCTION

Devant l'immensité du territoire menacée par les précipitations acides dans l'est de l'Amérique du Nord, on a senti le besoin de disposer d'un outil de gestion permettant d'évaluer la sensibilité à l'acidification au niveau de l'écosystème aquatique (Cowell *et al.*, 1981; Altshuller et McBean, 1980). On a assisté d'abord à l'établissement d'échelles de sensibilité basées principalement sur un seul facteur. Par exemple, on a évalué individuellement l'influence de la géologie (Shilts *et al.*, 1981; Hendrey *et al.*, 1980; Norton, 1980), des matériaux de surface (Shilts *et al.*, 1981) des sols (McFee, 1980; Wang et Coote, 1980) et de la végétation (Klopatek *et al.*, 1980; Robitaille, 1980).

Par la suite, les efforts de recherche ont porté plutôt sur l'intégration de l'ensemble des facteurs du milieu terrestre à l'établissement d'une échelle valable de vulnérabilité écologique (États-Unis - Canada, 1983; Environnement Canada, 1988). Dans cette optique, des études plus spécifiques ont été amorcées récemment dans le but d'identifier des relations entre la qualité physico-chimique du milieu aquatique et l'ensemble des caractéristiques biophysiques des bassins versants (Roberts *et al.*, 1982; Rapp *et al.*, 1985; Loucks *et al.*, 1986; Hunsaker *et al.*, 1986; Lachance et Gamache, 1985). L'approche généralement retenue a consisté à examiner les corrélations paramétriques ou non paramétriques entre chaque paire de variables et à identifier celles qui sont les plus significatives et pour lesquelles une relation de cause à effet est probable. Pour certaines études, notamment celle de Hunsaker *et al.* (1986) dans l'État de New-York, de Rapp *et al.* (1985) dans l'État du Minnesota et celle de Roberts *et al.* (1982) en Suède, on a construit un modèle de régression linéaire multiple permettant de prédire certaines variables physico-chimiques à partir de caractéristiques du bassin versant.

La présente étude, effectuée pour le ministère de l'Environnement du Canada, s'inscrit dans le même contexte de recherche que celui des études précédentes. Cette étude a pour objectif d'identifier des caractéristiques terrestres qui expliquent la qualité de l'eau des 35 bassins versants du réseau TADPA-Québec et d'élaborer un modèle de régression permettant éventuellement de déterminer la qualité de l'eau sur d'autres lacs du territoire.

2. MÉTHODES

2.1 DONNÉES

Les données considérées dans cette étude se répartissent en deux ensembles de données: les données décrivant la qualité physico-chimique des lacs et celles décrivant les caractéristiques du territoire. Les variables décrivant le territoire ont été regroupées en cinq classes: les variables biophysiques (physiographie, végétation, météorologie), la chimie des sols, la granulométrie des sols, la minéralogie des sols et la géologie des bassins versants.

2.1.1 Variables de qualité de l'eau

Les variables physico-chimiques considérées sont celles mesurées sur les 35 lacs du réseau TADPA-Québec et décrites par Haemmerli (1988). Ces variables sont le pH, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, l'azote ammoniacal, l'alcalinité totale, l'alcalinité Gran, les sulfates par colorimétrie, les sulfates par chromatographie ionique, les chlorures, les nitrates, la silice, le carbone organique dissous, le carbone inorganique dissous, la conductivité, l'aluminium, le manganèse et le fer. Le réseau TADPA-Québec est en opération depuis 1983 et comprenait lors de l'étude 12 stations temporelles (échantillonnées six fois par année) et 23 stations spatiales (échantillonnées deux fois par année). Les valeurs médianes, calculées pour chacune des stations, ont été retenues pour cet ensemble de données.

2.1.2 Variables biophysiques

Les variables biophysiques considérées comprennent un ensemble de variables décrivant la végétation, la physiographie et la météorologie des bassins versants. La description de ces variables et l'origine des données sont fournies au tableau 2.1. La plupart de ces données proviennent, soit de l'inventaire réalisé par Environnement Canada, direction des terres, soit du résultat d'un calcul. Le choix des variables retenues est justifié par la disponibilité et la pertinence des

données, ainsi que par la présence d'une gamme de variation raisonnable sur l'ensemble des 35 bassins versants considérés.

Tableau 2.1 Description des variables biophysiques considérées

Variabiles	code	origine
Superficie de résineux (%)	AR	Banque D.T.
Superficie de feuillus (%)	AF	Banque D.T.
Superficie d'arbustes (%)	ARBUST	Banque D.T.
Altitude du lac (m)	ALTL	Banque D.T.
Altitude max. du bassin versant (m)	ALTM	Banque D.T.
Superficie tot. du bassin versant (km ²)	SBT	Banque D.T.
Superficie du lac (km ²)	SL	Banque D.T.
Profondeur max. du lac	PROF	Dir des eaux intérieures
Précipitation annuelle moyenne (mm)	PRECIP	Banque D.T.
Superficie du bassin versant (km ²)	SB	Banque D.T.
Rapport SB / SL	RSBSL	Banque D.T.
Débit spécifique annuel moyen (l/s-km ²)	ECOUL	Env. Qué., service eaux de surf.
Volume du lac (m ³)	VL	SL*PROF/2
Temps de séjour des eaux du lac (mois)	TR	VL/ECOUL*SBT
Pente du bassin	PENTE	(ALTL-ALTM)/(Kc* \sqrt{SBT})
Dépôt humide de SO ₄ en 1982-83 (kg/ha-an)	DSO4	Paradis (1985) et extrapolation
Conc. de SO ₄ dans précip. 1982-83 (µg/L)	CSO4	Grimard (1984) et extrapolation
Rapport DSO4 / ECOUL	MSO4E	DSO4/ECOUL

- Banque D.T.: Données fournies par Environnement Canada direction des terres
et compilées par Daniel Gamache

- Kc: indice de compacité du bassin = périmètre / $2\sqrt{\pi*SBT}$

2.1.3 Variables décrivant la chimie des sols

L'origine de ces données provient d'un échantillonnage des sols effectué par Environnement Canada, direction des terres, sur les 35 bassins versants. En général, trois carottes de sols étaient prélevées à des endroits jugés représentatifs du bassin versant. Une attention spéciale était apportée à l'échantillonnage des horizons B, BC et C sur chacun des sites, même si ce n'était pas toujours possible en raison de l'absence d'horizons bien définies. Les carottes de sols ont été subdivisées en un nombre variable de sous-échantillons (généralement entre trois et quatre). Après analyse en laboratoire, les échantillons de sols ont été réassignés à des horizons sur la base de leurs teneurs en certains éléments (notamment le carbone organique, le fer et l'aluminium).

Les sols prélevés appartiennent à quelques exceptions près à l'ordre podzolique soit ferro-humique, soit humo-ferrique. Parmi les échantillons prélevés, on retrouve majoritairement sur chacun des bassins versants la présence de l'horizon BF; les horizons BHF, BC et C sont présents sur 19, 29 et 26 bassins versants respectivement. On retrouve également deux échantillons de l'horizon A.

Les variables chimiques mesurées sur les échantillons de sol sont les suivantes:

variables	code
pH mesuré dans l'eau (unités de pH)	PHH20
pH mesuré dans le chlorure de calcium (unités de pH)	PHCALC2
Capacité d'échange ionique (méq/100g)	CEC
Calcium échangeable (méq/100g)	CA
Magnésium échangeable (méq/100g)	MG
Potassium échangeable (méq/100g)	K
Sodium échangeable (méq/100g)	NA
Carbone organique (%)	CARBORG
Carbonate de calcium (%)	CARBCAL

Fer extractible au pyrophosphate de sodium (%)	FE
Aluminium extractible au pyrophosphate de sodium (%)	AL
Soufre total (%)	STOTAL
Sulfate extractible au phosphate ($\mu\text{g/ml}$)	SULFATEP
Somme des cations (m \acute{e} q/100g)	SCATIONS
Indice de saturation en bases	SATBASES

Les donn \acute{e} es relatives \grave{a} ces variables ont \acute{e} t \acute{e} list \acute{e} es par King et Hart (1988).

Pour les fins de l' \acute{e} tude, on a regroup \acute{e} les \acute{e} chantillons selon les horizons suivants:

- (1) l'horizon BF comprenant les \acute{e} chantillons des horizons BF et BFJ;
- (2) l'horizon BHF comprenant les \acute{e} chantillons de l'horizon BHF;
- (3) l'horizon d \acute{e} nomm \acute{e} e BF+BHF comprenant les \acute{e} chantillons des horizons BF, BFJ et BHF;
- (4) l'horizon BC comprenant les \acute{e} chantillons de l'horizon BC;
- (5) l'horizon C comprenant les \acute{e} chantillons de l'horizon C;
- (6) l'horizon d \acute{e} nomm \acute{e} e BC+C comprenant les \acute{e} chantillons des horizons BC et C.

On a calcul \acute{e} ensuite, pour chacun de ces horizons, la moyenne arithm \acute{e} tique des valeurs des variables chimiques. Cette moyenne est calcul \acute{e} e sur l'ensemble des \acute{e} chantillons pr \acute{e} lev \acute{e} s sur un bassin versant. On fait l'hypoth \acute{e} se que ces valeurs moyennes sont repr \acute{e} sentatives du bassin versant. Cependant, cette hypoth \acute{e} se doit \acute{e} tre accept \acute{e} e avec restriction car, pour certains horizons, on ne dispose parfois que d'un seul \acute{e} chantillon par bassin versant.

2.1.4 Variables d \acute{e} crivant la granulom \acute{e} trie des sols

Sur chacun des \acute{e} chantillons d \acute{e} crits \grave{a} la section pr \acute{e} c \acute{e} dente (Section 2.1.3), on dispose \acute{e} galement de la mesure de la granulom \acute{e} trie. Les variables d \acute{e} crivant la granulom \acute{e} trie sont les suivantes:

variables	code
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 16,0 mm, mais non sur un tamis de 2,0 mm;	GRAVIER
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 2,0 mm, mais non sur un tamis de 0,05 mm;	SABLE
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 2,0 mm, mais non sur un tamis de 1,0 mm;	STG
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 1,0 mm, mais non sur un tamis de 0,5 mm;	SG
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 0,5 mm, mais non sur un tamis de 0,25 mm;	SM
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 0,25 mm, mais non sur un tamis de 0,1 mm;	SF
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 0,1 mm, mais non sur un tamis de 0,05 mm;	STF
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 0,05 mm, mais non sur un tamis de 0,0025 mm;	LIMON
Pourcentage de sol passant à travers un tamis de 0,0025.	ARGILE

Les données relatives à ces variables ont été listées par King et Hart (1988).

De la même manière que pour la chimie des sols, les données obtenues pour la granulométrie ont été regroupées selon les horizons BF, BHF, BF+BHF, BC, C et BC+C.

2.1.5 Variables décrivant la minéralogie des sols

La minéralogie des sols a été déterminée par Environnement Canada sur un échantillon par bassin versant. L'échantillon de sol utilisé pour cette détermination était un sous-échantillon provenant des horizons BC et C parmi ceux qui ont servi pour la mesure de la chimie et de la granulométrie. Pour les fins de

l'étude, on fait encore l'hypothèse que cet échantillon est représentatif de l'ensemble du bassin versant.

Les variables de minéralogie mesurées sur les échantillons de sol sont les suivantes:

variables	code
Pourcentage en poids de minéraux légers de densité <2,96	MINL
Pourcentage en poids de quartz	QTZ
Pourcentage en poids de feldspath potassique	KFELD
Pourcentage en poids de plagioclase	PLAG
Pourcentage en poids de hyperstène	HYPST
Pourcentage en poids de magnétite	MT
Pourcentage en poids de grenat	GR
Pourcentage en poids d'épidote	EPID
Pourcentage en poids d'apatite	APAT
Pourcentage en poids de mica	MICA
Pourcentage en poids de zircon	ZIRC
Pourcentage en poids de minéraux opaques	OPAQ
Pourcentage en poids de minéraux lourds non identifiables	AUTRE

Les données relatives à ces variables ont été listées par King et Hart (1988).

2.1.6 Variables décrivant la géologie des bassins versants

La géologie des bassins versants a été décrite par Lachance et Gamache (1985). Par la suite, Bouchard (1987) a classé les roches en trois classes d'altérabilité: élevée, moyenne et faible, comprenant 14, 9 et 11 bassins versants respectivement. Un seul bassin versant (lac 502) avec la présence de roches carbonatées fait exception. Une analyse discriminante effectuée sur les données physico-chimiques des 35 lacs a confirmé la pertinence de cette classification (Lachance, résultats présentés par Bouchard, 1987).

2.2 MÉTHODES STATISTIQUES

Les méthodes statistiques utilisées visent à permettre d'atteindre les deux sous-objectifs de l'étude: étudier globalement les interrelations entre un grand nombre de variables de nature diverse et élaborer un modèle de régression entre deux groupes de variables.

2.2.1 Interrelations entre variables

Pour l'étude des relations entre variables, le coefficient de corrélation non-paramétrique de Spearman a été utilisé. L'emploi de ce coefficient présente certains avantages par rapport au coefficient paramétrique de Pearson habituellement utilisé. D'abord, il n'est pas nécessaire de s'assurer que les variables sont distribuées normalement puisqu'on calcule la corrélation à partir des valeurs codées en rang. En pratique, des écarts à la normalité sont souvent observés sur des variables de qualité. De plus, le coefficient non-paramétrique permet de détecter également les relations non-linéaires, ce qui n'est pas le cas avec le coefficient de Pearson.

Pour effectuer une synthèse des interrelations, on utilise l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP est appliquée sur le tableau des valeurs codées en rang de classement, ce qui revient à diagonaliser la matrice de corrélation de Spearman. L'étude de la position des variables dans l'espace des premiers axes factoriels permet de résumer l'ensemble des interrelations observées dans la matrice de corrélation de Spearman. En fait, chaque variable devrait être représentée par un vecteur reliant l'origine des axes et le point à l'intérieur d'un hyper-espace de rayon unitaire. Le coefficient de corrélation entre deux variables est égal au cosinus de l'angle formé par les vecteurs représentant les deux variables. Réaliser un bilan des coefficients de corrélation entre les variables revient à étudier les angles entre l'ensemble des vecteurs représentant les variables.

L'intérêt de l'utilisation d'une méthode multidimensionnelle telle que l'ACP réside dans le fait qu'on peut résumer dans un espace de dimension réduite

(généralement un plan bi-dimensionnel) l'ensemble de la variance contenue dans une matrice de dispersion. Puisqu'il s'agit d'une image approchée d'un nuage de points, il est nécessaire de pouvoir mesurer la qualité de représentation de chacun des points sur un plan factoriel. Pour une variable, sa qualité de représentation est le carré de la longueur de sa projection. Sur un plan, elle s'apprécie directement par sa proximité au cercle de rayon unitaire. On peut aussi considérer la longueur de la projection que devrait avoir une variable dans le cas où n variables sont projetées de façon équilibrée dans un espace à d dimensions. Cette projection équilibrée des variables a une longueur de $\sqrt{d/n}$ (Legendre et Legendre, 1984). On peut ainsi tracer un cercle de contribution équilibrée des variables comme référence pour juger de la qualité de la représentation des variables dans l'espace réduit.

Dans l'application de l'ACP, on fait largement appel à la technique de l'utilisation des variables supplémentaires. Les variables sont traitées comme des éléments supplémentaires en les projetant simplement sur les axes déterminés par les autres variables, qui sont dites actives. Cette technique permet de connaître les corrélations de n'importe quelle variable, même extérieure au domaine étudié, avec les composantes principales.

2.2.2 Modèle de régression

Pour le modèle de régression, on utilise l'approche présentée par Cazes (1980; 1983). Cette approche consiste à utiliser la régression multiple sur les facteurs obtenus d'une AFC sur un tableau croisant deux groupes de variables. La méthodologie peut être résumée de la façon suivante.

On utilise d'abord l'analyse des correspondances multiples qui est appelée ainsi lorsqu'elle est appliquée sur un tableau comportant des variables qualitatives, c'est-à-dire des variables comportant chacune plusieurs modalités de réponse.

Pour pouvoir utiliser la méthode avec des variables quantitatives, on procède d'abord à un codage binaire des données. Soit un tableau X_{IQ} de dimensions $I \times Q$,

comprenant en lignes les I observations (stations) et en colonnes les Q variables (variables de qualité de l'eau et variables décrivant les caractéristiques du territoire). Sur chaque variable q, on définit J_q classes (intervalles de variation), comprenant chacune un certain nombre d'observations. Chaque observation X_{iq} est codée 1 ou 0 selon que sa valeur appartient ou n'appartient pas à la classe. Le nouveau tableau codé k_{IJ} comprend maintenant I lignes correspondant aux I observations et J ($\sum J_q$) colonnes correspondant aux Q variables séparées en J_q modalités. Pour l'application présente, on peut choisir par exemple de définir trois classes équiprobables (nombre approximativement égal) par variable ($J_q = 3; q = 1, \dots, Q$). Le tableau considéré serait donc un tableau binaire (avec seulement des 0 ou des 1) qui comporte 35 lignes correspondant aux 35 bassins versants et J colonnes correspondant aux Q variables séparées en trois modalités.

La seconde étape consiste en l'obtention d'un tableau de contingence. À partir du tableau binaire k_{IJ} , on compte le nombre d'occurrences simultanées de la valeur 1 pour les modalités d'un ensemble de variables et pour celles d'un autre ensemble de variables. Si on croise chacune des Q variables entre elles, on obtient un tableau de contingence symétrique C_{JJ} appelé tableau de Burt. On peut aussi s'intéresser seulement au croisement d'un groupe K ($K \in Q$) de variables avec un groupe K' ($K' \in Q$) de variables; il s'agit alors d'un sous-tableau de Burt noté C_{LL} , comportant L lignes correspondant aux K variables séparées en J_q modalités et L' colonnes correspondant aux K' variables séparées en J_q modalités.

Appelons L l'ensemble des modalités de la variable à expliquer et L' l'ensemble des modalités des variables explicatives. L'analyse des correspondances du tableau C_{LL} , permet de décrire les liaisons entre la variable K à expliquer et les variables K' explicatives. Pour représenter les individus dans l'analyse, on adjoint au tableau C_{LL} , le tableau disjonctif complet (binaire) k_{IL} , en tableau supplémentaire. Le tableau des facteurs des points supplémentaires $F_{C_\alpha}(i)$ est calculé par une relation simple:

$$F_{C_\alpha}(i) = \left[\sum_{j'=1}^{L'} k_{ij'}, G_{C_\alpha}(j') \right] / K' \sqrt{\lambda_\alpha} \quad (1)$$

où K' est le nombre de variables explicatives;
 $\sqrt{\lambda_\alpha}$ est la valeur propre sur l'axe α ;
 $G_{C_\alpha}(j')$ est la coordonnée de la projection d'une colonne du tableau C_{LL} , sur l'axe factoriel α .

Ce tableau $F_{C_\alpha}(i)$ peut servir à établir une relation permettant de prévoir une variable y à partir d'un ensemble de variables explicatives. On fait alors une régression multiple usuelle sur les facteurs $F_{C_\alpha}(i)$. La relation obtenue peut s'exprimer de la façon suivante:

$$y(i) \approx b_0 + \sum_{\alpha=1}^{A'} [b_\alpha F_{C_\alpha}(i)] \quad (2)$$

où A' désigne l'ensemble des facteurs conservés.

Cette relation peut être utilisée pour prédire la valeur de y pour un élément s sur lequel seules sont connues les variables explicatives. En effet, il suffit de rajouter l'observation s en ligne supplémentaire à C_{LL} , de calculer les $F_{C_\alpha}(s)$ à partir de la relation (1) et de les insérer dans la relation (2) pour calculer $y(s)$.

3. ÉTUDE DES INTERRELATIONS ENTRE VARIABLES

L'étude des interrelations entre variables est effectuée en examinant d'abord la matrice des coefficients de corrélation de Spearman calculés entre chaque paire de variables. On effectue ensuite un bilan ou une synthèse des interrelations en procédant à une analyse en composantes principales sur la matrice des coefficients de corrélation. On débute par l'étude des interrelations entre variables de qualité de l'eau (Section 3.1). Chacun des groupes de variables caractérisant le bassin versant sont introduits successivement par la suite: variables biophysiques (Section 3.2), variables de chimie des sols (Section 3.3), variables de granulométrie des sols (Section 3.4) et variables de minéralogie des sols (Section 3.5).

3.1 VARIABLES DE QUALITÉ DE L'EAU

Les coefficients de corrélation entre chaque paire de variables de qualité de l'eau sont présentés au tableau 3.1. Un test de signification des coefficients est effectué pour $\alpha = 0,05$ et $0,01$. Dans ce calcul, on a inclus toutes les variables mesurées, même si certaines variables sont mesurées par deux méthodes analytiques différentes (alcalinité et sulfates). Les forts coefficients de corrélation observés entre les deux méthodes de mesure pour l'alcalinité (0,997) et les sulfates (0,980) montrent que pour cette interprétation, on peut prendre l'une ou l'autre mesure indifféremment. On a introduit une autre variable (Ca+Mg) en raison de son importance au niveau de l'interprétation de la minéralisation des eaux. On constate évidemment que cette variable est fortement corrélée avec le calcium et le magnésium.

L'interprétation de l'ensemble des coefficients de corrélation est simplifiée en examinant les projections des variables dans un espace factoriel réduit obtenu de l'application de l'ACP sur le tableau des valeurs codées en rang (Figure 3.1). Dans cette analyse, on n'a considéré qu'une seule variable pour l'alcalinité (Gran) et les sulfates (par chromatographie ionique). La variable Ca+Mg a été mise en variable supplémentaire.

Sur l'extrémité positive de l'axe 1, on retrouve un ensemble de variables reliées plus ou moins directement à la minéralisation des eaux (Ca, Mg, Ca+Mg, Cond., C. inorg., Alcalinité, SO_4 , pH) avec une forte composante. L'axe 1 s'interprète donc comme le résultat du phénomène de minéralisation des eaux. On observe en outre une relation inverse de ce groupe de variables de minéralisation avec l'aluminium, le manganèse et le fer, qui se projettent sur l'autre extrémité de l'axe 1. Cependant on constate que l'aluminium et le fer, par leur forte composante sur l'axe 2, sont également corrélés avec la couleur et le carbone dissous. La position de la couleur et du carbone dissous sur une des extrémités de l'axe 2 indique que cet axe est plutôt le résultat du phénomène relié à la présence de matière organique dans les eaux. En ce qui concerne les nitrates, la silice et l'azote ammoniacal, il faudrait considérer les axes 3, 4 et 5 pour mieux interpréter leur position.

Tableau 3.1 Corrélation entre variables de qualité de l'eau

	pH	Ca	Mg	Na	K	NH3	AlcT	AlcG
pH	1,000**							
Ca	0,970**	1,000**						
Mg	0,868**	0,885**	1,000**					
Na	0,420*	0,473**	0,583**	1,000**				
K	0,588**	0,627**	0,665**	0,432**	1,000**			
NH3	0,018	0,061	0,085	0,383*	0,118	1,000**		
AlcT	0,984**	0,977**	0,895**	0,465**	0,612**	0,002	1,000**	
AlcG	0,989**	0,976**	0,889**	0,459**	0,620**	-0,003	0,997**	1,000**
SO4CO	0,716**	0,791**	0,750**	0,346*	0,468**	0,208	0,707**	0,702**
SO4CI	0,759**	0,806**	0,758**	0,357*	0,443**	0,120	0,743**	0,741**
Cl	0,515**	0,594**	0,578**	0,485**	0,584**	0,383*	0,554**	0,544**
NO3	-0,146	-0,101	-0,117	0,175	0,081	0,310	-0,180	-0,163
SiO2	-0,168	-0,098	-0,044	0,406*	-0,139	0,302	-0,125	-0,133
Doc	-0,127	0,011	0,118	0,176	0,403*	0,317	-0,064	-0,078
Dic	0,948**	0,956**	0,880**	0,496**	0,633**	0,064	0,971**	0,966**
Coul.	-0,352*	-0,220	-0,066	0,153	0,221	0,379*	-0,303	-0,312
Cond.	0,952**	0,989**	0,911**	0,509**	0,620**	0,109	0,963**	0,961**
Al	-0,800**	-0,707**	-0,639**	-0,204	-0,303	0,159	-0,759**	-0,765**
Mn	-0,786**	-0,707**	-0,749**	-0,498**	-0,414*	-0,040	-0,752**	-0,754**
Fe	-0,775**	-0,693**	-0,540**	-0,159	-0,227	0,155	-0,719**	-0,729**
Ca+Mg	0,969**	0,996**	0,910**	0,483**	0,623**	0,066	0,978**	0,976**
	SO4CO	SO4CI	Cl	NO3	SiO2	Doc	Dic	Coul.
SO4CO	1,000**							
SO4CI	0,980**	1,000**						
Cl	0,456**	0,383*	1,000**					
NO3	-0,080	-0,139	0,120	1,000**				
SiO2	-0,140	-0,170	0,222	0,287	1,000**			
Doc	0,101	-0,005	0,489**	0,079	0,271	1,00**		
Dic	0,693**	0,710**	0,631**	-0,183	-0,098	0,044	1,000**	
Coul.	-0,060	-0,179	0,389*	0,231	0,305	0,914**	-0,183	1,000**
Cond.	0,827**	0,835**	0,616**	-0,118	-0,075	0,053	0,957**	-0,170
Al	-0,479**	-0,566**	-0,063	0,288	0,346*	0,503**	-0,682**	0,657**
Mn	-0,553**	-0,639**	-0,268	0,190	0,153	0,240	-0,723**	0,401*
Fe	-0,561**	-0,664**	-0,054	0,248	0,340*	0,608**	-0,639**	0,758**
Ca+Mg	0,807**	0,821**	0,601**	-0,133	-0,093	0,027	0,962**	-0,204
	Cond.	Al	Mn	Fe	Ca+Mg			
Cond.	1,000**							
Al	-0,676**	1,000**						
Mn	-0,721**	0,746**	1,000**					
Fe	-0,673**	0,831**	0,739**	1,000**				
Ca+Mg	0,995**	-0,708**	-0,726**	-0,685**	1,000**			

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.

* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

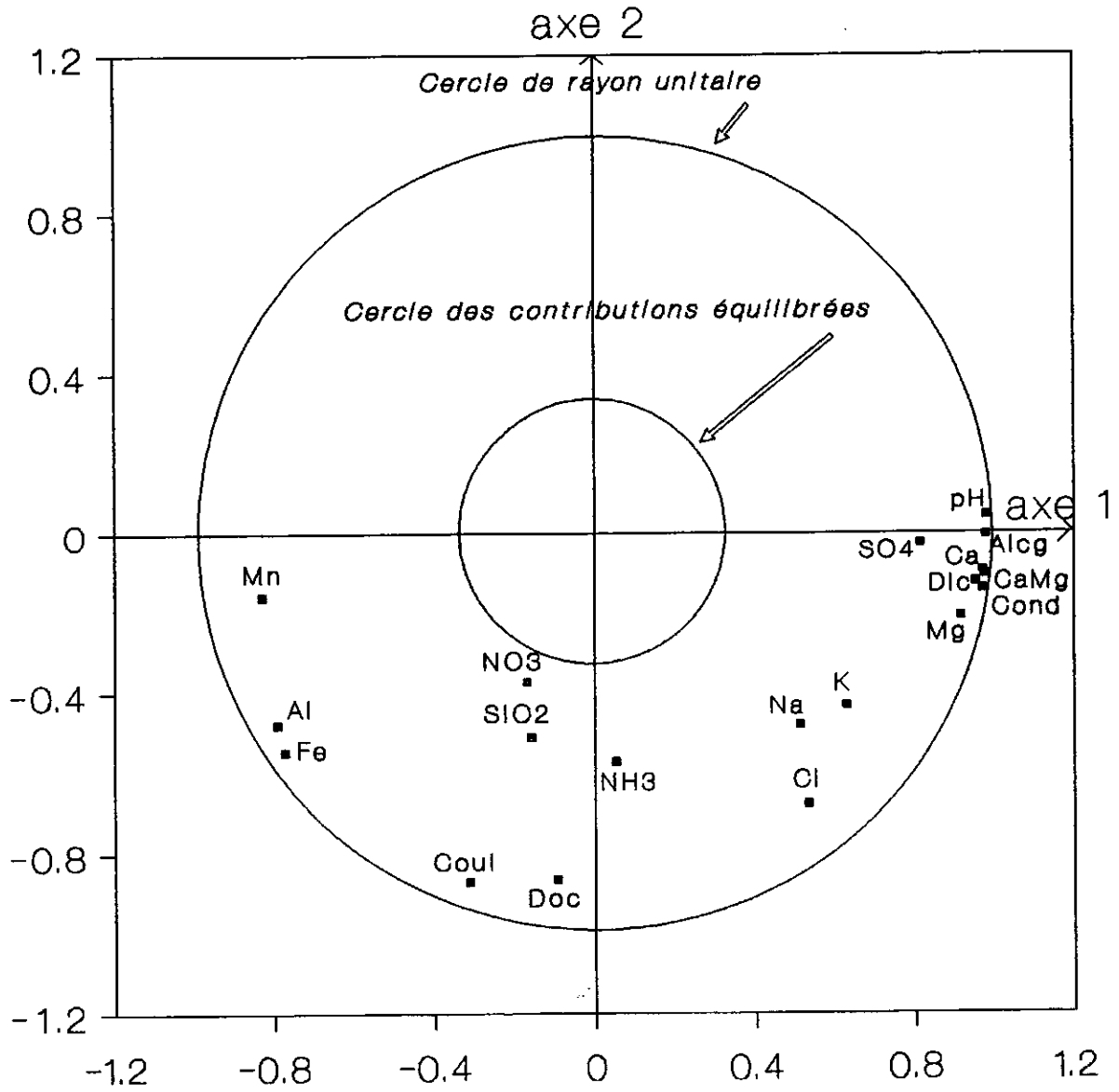


Figure 3.1 Plan factoriel montrant les projections des variables de qualité de l'eau

3.2 VARIABLES BIOPHYSIQUES

Les variables biophysiques considérées dans cette section ont été énumérées au tableau 2.1. L'analyse de ces variables est effectuée en deux étapes. On examine d'abord les interrelations entre variables biophysiques, puis on étudie les relations que ces variables ont avec les variables de qualité de l'eau.

3.2.1 Interrelations entre variables biophysiques

La corrélation de Spearman a été calculée entre chaque paire de variables biophysiques (Tableau 3.2). De forts coefficients de corrélation sont observés entre des variables redondantes telles que l'altitude du lac avec l'altitude maximale du lac, la précipitation avec l'écoulement, la superficie totale du bassin versant avec la superficie du bassin versant, le volume du lac avec la profondeur du lac etc. On note aussi la corrélation artificielle négative de la superficie de résineux avec celle de feuillus, qui est due au fait que les données sont exprimées en pourcentages de la superficie totale. Il est intéressant de noter qu'il existe une corrélation inverse entre le temps de séjour (TR) et le rapport RSBSL (superficie du bassin versant sur superficie du lac).

3.2.2 Relations variables biophysiques - variables de qualité de l'eau

Des coefficients de corrélation de Spearman ont été calculés entre chaque paire de variables biophysiques - variables de qualité de l'eau (Tableau 3.3). Pour permettre une meilleure synthèse des interrelations, on utilise l'ACP en portant les variables de qualité de l'eau en variables actives et les variables biophysiques en variables supplémentaires. En procédant de la sorte, on peut interpréter la position des variables biophysiques par rapport aux variables de qualité de l'eau tout en étant situé dans le même espace factoriel que celui obtenu précédemment avec seulement les variables de qualité de l'eau (Figure 3.2).

Tableau 3.2 Corrélation entre variables biophysiques

	AR	AF	ARBUST	ALTL	ALTM	SBT	SL	PROF
AR	1,000**							
AF	-0,826**	1,000**						
ARBUST	0,061	-0,014	1,000**					
ALTL	0,590**	-0,678**	0,010	1,000**				
ALTM	0,557**	-0,611**	-0,040	0,975**	1,000**			
SBT	-0,112	-0,079	0,044	0,099	0,162	1,000**		
SL	-0,259	-0,041	-0,166	0,004	-0,002	0,754**	1,000**	
PROF	-0,282	0,223	0,133	-0,414*	-0,446**	0,163	0,391*	1,000**
PRECIP	0,448**	-0,443**	-0,133	0,583**	0,562**	-0,026	-0,136	-0,315
SB	-0,045	-0,105	0,077	0,131	0,207	0,980**	0,666**	0,085
RSBSL	0,362*	-0,125	0,226	0,205	0,292	0,002	-0,550**	-0,564**
ECOUL	0,642**	-0,685**	0,004	0,793**	0,763**	0,132	0,004	-0,325
VL	-0,399*	0,178	0,047	-0,270	-0,307	0,454**	0,736**	0,870**
TR	-0,511**	0,379*	0,009	-0,518**	-0,567**	0,077	0,474**	0,886**
PENTE	0,108	-0,147	-0,098	0,260	0,401*	0,702**	0,339*	-0,101
DSO4	0,266	-0,310	-0,172	0,296	0,334	-0,184	-0,315	-0,196
CSO4	-0,683**	0,679**	-0,007	-0,751**	-0,735**	-0,103	0,045	0,403*
MSO4E	-0,482**	0,503**	-0,012	-0,583**	-0,531**	-0,196	-0,140	0,288
	PRECIP	SB	RSBSL	ECOUL	VL	TR	PENTE	DSO4
PRECIP	1,000**							
SB	-0,009	1,000**						
RSBSL	0,154	0,138	1,000**					
ECOUL	0,693**	0,145	0,191	1,000**				
VL	-0,274	0,357*	-0,709**	-0,261	1,000**			
TR	-0,477**	-0,027	-0,767**	-0,563**	0,878**	1,000**		
PENTE	0,036	0,757**	0,351*	0,244	0,032	-0,278	1,000**	
DSO4	0,395*	-0,160	0,262	0,181	-0,324	-0,291	0,171	1,000**
CSO4	-0,387*	-0,144	-0,238	-0,868**	0,330	0,586**	-0,349*	-0,119
MSO4E	-0,476**	-0,205	-0,058	-0,862**	0,146	0,442**	-0,140	0,269
	CSO4	MSO4E						
CSO4	1,000**							
MSO4E	0,797**	1,000**						

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.

* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

Tableau 3.3 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables biophysiques

	AR	AF	ARBUST	ALTL	ALTM	PENTE
pH	-0,563**	0,628**	-0,049	-0,742**	-0,676**	-0,179
Ca	-0,570**	0,662**	0,015	-0,739**	-0,662**	-0,118
Mg	-0,557**	0,636**	0,089	-0,676**	-0,591**	-0,045
Na	-0,137	0,376*	0,074	-0,274	-0,177	0,203
K	-0,363*	0,284	-0,185	-0,342*	-0,290	0,024
NH3	0,134	0,095	-0,008	0,014	0,073	-0,123
AlcG	-0,532**	0,598**	-0,046	-0,712**	-0,635**	-0,121
SO4	-0,615**	0,688**	-0,088	-0,799**	-0,740**	-0,127
Cl	-0,072	0,188	0,192	-0,267	-0,201	-0,054
NO3	0,039	-0,011	0,097	0,266	0,321	0,309
SiO2	0,317	-0,119	0,268	0,341*	0,388*	0,196
Doc	0,077	-0,022	0,215	0,044	0,083	0,082
Dic	-0,453**	0,578**	-0,024	-0,691**	-0,612**	-0,096
Coul.	0,121	-0,065	0,256	0,247	0,275	0,122
Cond.	-0,549**	0,657**	0,047	-0,743**	-0,666**	-0,109
Al	0,544**	-0,517**	0,173	0,669**	0,668**	0,296
Mn	0,418*	-0,493**	0,200	0,619**	0,558**	0,140
Fe	0,441**	-0,444**	0,217	0,645**	0,634**	0,204
Ca+Mg	-0,564**	0,660**	0,025	-0,744**	-0,668**	-0,123
	SBT	SB	SL	RSBSL	PROF	VL
pH	-0,173	-0,211	-0,107	-0,196	0,347*	0,206
Ca	-0,102	-0,124	-0,117	-0,066	0,312	0,167
Mg	-0,004	-0,002	-0,007	-0,060	0,229	0,190
Na	-0,088	-0,016	-0,337*	0,380*	-0,256	-0,357*
K	0,143	0,127	0,058	-0,008	-0,083	-0,010
NH3	-0,408*	-0,315	-0,552**	0,489**	-0,525**	-0,643**
AlcG	-0,135	-0,160	-0,095	-0,152	0,325	0,192
SO4	-0,021	-0,021	-0,001	-0,072	0,391*	0,275
Cl	-0,205	-0,159	-0,418*	0,415*	-0,211	-0,345*
NO3	0,098	0,125	-0,288	0,422*	-0,224	-0,306
SiO2	-0,135	-0,033	-0,492**	0,674**	-0,426*	-0,536**

Tableau 3.3 (suite) Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables biophysiques

	SBT	SB	SL	RSBSL	PROF	VL
Doc	0,153	0,213	-0,153	0,540**	-0,512**	-0,434**
Dic	-0,144	-0,160	-0,122	-0,062	0,222	0,086
Coul.	0,155	0,221	-0,160	0,582**	-0,590**	-0,487**
Cond.	-0,089	-0,101	-0,112	-0,026	0,288	0,154
Al	0,215	0,305	-0,126	0,561**	-0,502**	-0,413*
Mn	0,184	0,228	0,004	0,250	-0,239	-0,169
Fe	0,121	0,183	-0,097	0,439**	-0,562**	-0,440**
Ca+Mg	-0,100	-0,119	-0,104	-0,069	0,314	0,180
	PRECIP	ECOUL	DSO4	CSO4	MSO4E	TR
pH	-0,588**	-0,792**	0,001	0,695**	0,771**	0,484**
Ca	-0,577**	-0,791**	0,020	0,706**	0,791**	0,415*
Mg	-0,639**	-0,805**	-0,145	0,664**	0,712**	0,390*
Na	-0,346*	-0,318	-0,082	0,132	0,226	-0,224
K	-0,325	-0,428*	0,155	0,369*	0,451**	0,086
NH3	0,124	-0,104	0,168	0,172	0,167	-0,471**
AlcG	-0,603**	-0,772**	0,018	0,644**	0,759**	0,451**
SO4	-0,429*	-0,819**	-0,150	0,873**	0,729**	0,467**
Cl	-0,200	-0,451**	0,417*	0,363*	0,643**	-0,140
NO3	0,203	0,171	0,387*	-0,062	0,018	-0,343*
SiO2	0,204	0,290	0,107	-0,353*	-0,238	-0,632**
Doc	0,070	0,090	0,032	-0,095	-0,073	-0,502**
Dic	-0,562**	-0,751**	0,068	0,602**	0,748**	0,352*
Coul.	0,203	0,224	0,036	-0,181	-0,197	-0,576**
Cond.	-0,575**	-0,818**	-0,019	0,730**	0,798**	0,398*
Al	0,626**	0,692**	0,251	-0,601**	-0,569**	-0,683**
Mn	0,500**	0,636**	0,220	-0,545**	-0,497**	-0,400*
Fe	0,457**	0,659**	0,127	-0,626**	-0,568**	-0,647**
Ca+Mg	-0,590**	-0,812**	-0,010	0,718**	0,796**	0,428*

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.

* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

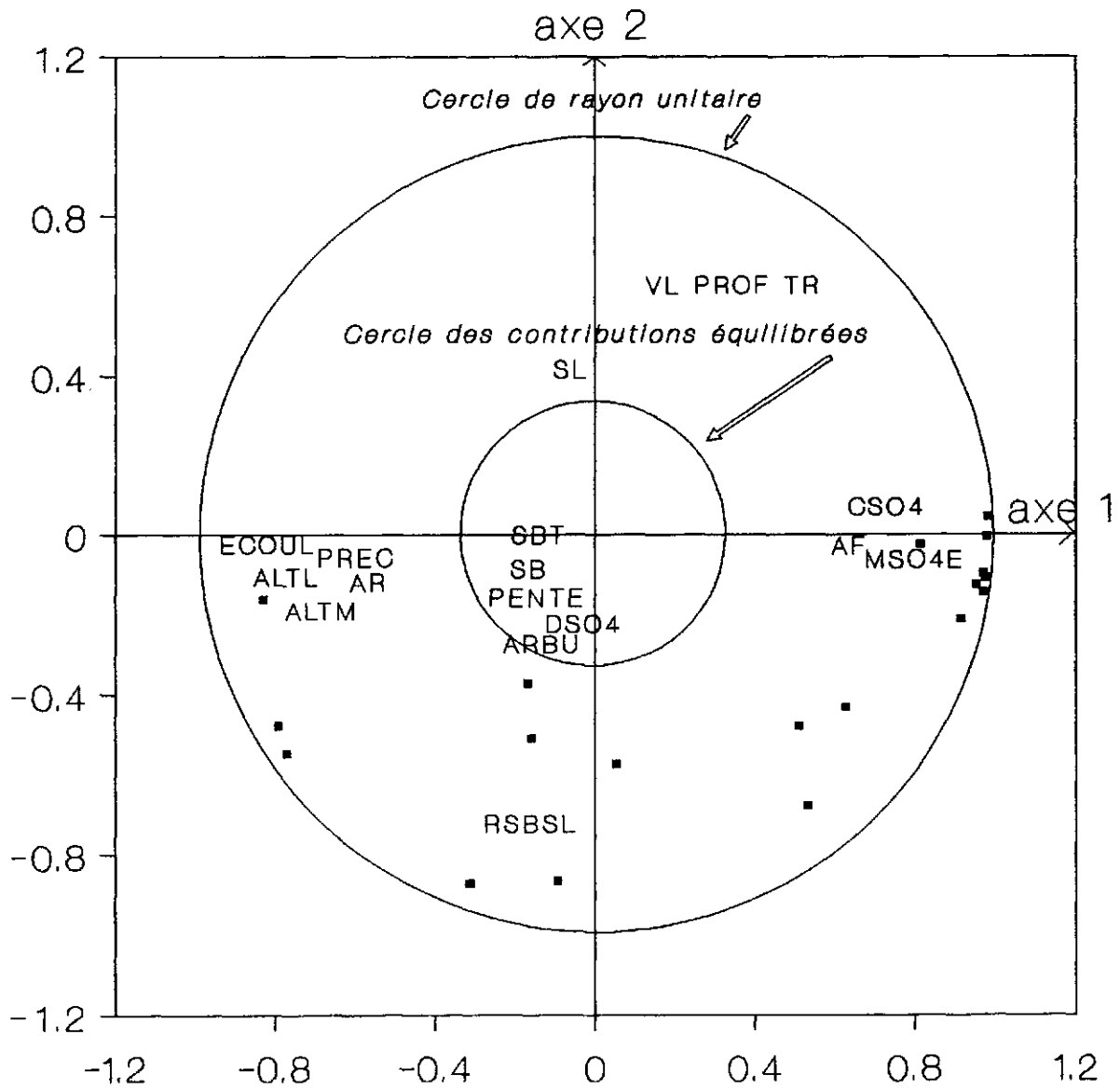


Figure 3.2 Projection des variables biophysiques dans l'espace factoriel déterminé par la projection des variables de qualité de l'eau

Les variables biophysiques les plus reliées aux variables de minéralisation ont de fortes composantes sur l'axe 1 (Figure 3.2). Sur l'extrémité positive de cet axe, on retrouve la superficie de feuillus (AF), la concentration de sulfates dans les précipitations (CSO4) et le rapport dépôt de sulfates sur débit spécifique (MSO4E) qui sont corrélés positivement avec l'ensemble des variables reliées à la minéralisation (Alcalinité, Ca, Mg, Cond., SO4, pH, Dic). Sur l'autre extrémité de l'axe, on observe la présence des variables altitude du lac (ALTL), altitude maximale du bassin (ALTM), écoulement (ECOUL), précipitation (PREC) et superficie de résineux (AR) qui sont corrélées négativement avec l'ensemble des variables de minéralisation. La présence de ces liaisons n'implique pas nécessairement une relation de cause à effet. Cependant ces liaisons permettent d'affirmer que sur la région d'étude, le gradient de l'altitude et celui de la précipitation sont reliés inversement à celui de la minéralisation, alors que le gradient des sulfates atmosphériques est dans le même sens que celui de la minéralisation. Quant à la présence de végétation, on constate que les résineux dominent les zones d'altitude élevée, de fortes précipitations et de faible minéralisation, alors que ce sont les feuillus qui dominent dans le cas inverse.

On a observé (cf Section 3.1) que l'aluminium, le manganèse et le fer, par leurs fortes composantes négatives sur l'axe 1, se comportaient à l'inverse des variables de minéralisation. On les retrouve donc reliés positivement avec l'altitude, la précipitation et la superficie de résineux et négativement avec la concentration de sulfates atmosphériques et la superficie de feuillus.

Les variables reliées à la géométrie du lac (profondeur PROF, superficie SL et volume VL du lac, temps de séjour TR des eaux du lac) sont opposées sur l'axe 2 au rapport RSBSL, ainsi qu'au carbone organique et à la couleur, traduisant la relation inverse de ces deux groupes de variables. Il semble donc que la teneur en matière organique des eaux diminue avec le volume du lac et le temps de séjour des eaux.

Les autres variables biophysiques considérées se situent à l'intérieur du cercle des contributions équilibrées. Il s'agit de la superficie des bassins versants (SBT et SB), des superficies d'arbustes (AR), du dépôt de sulfates (DSO4) et de la pente du bassin (PENTE). De façon générale, ces variables sont demeurées

et de la pente du bassin (PENDE). En ce qui concerne cette dernière variable, il faudrait plutôt parler d'indice de pente, car cette variable est calculée à partir du rapport entre la dénivellation totale et une estimation du diamètre équivalent du bassin (cf Tableau 2.1). De façon générale, ces variables sont demeurées mal représentées dans l'espace factoriel, même en considérant sept facteurs qui expliquaient plus de 94% de la variabilité totale du tableau des variables de qualité de l'eau. La faible qualité de représentation de ces variables biophysiques indique qu'elles n'ont donc pas de liens apparents avec les variables de qualité de l'eau considérées.

3.3 VARIABLES DE CHIMIE DES SOLS

Les variables de chimie des sols, considérées dans cette section, ont été énumérées à la section 2.1.3. Comme pour les variables biophysiques, l'analyse de ces variables est effectuée en examinant d'abord les interrelations entre variables de chimie de l'eau, puis en étudiant les relations que ces variables ont avec les variables de qualité de l'eau. Avant de procéder à cette analyse, on identifie d'abord un horizon de sol représentatif.

3.3.1 Comparaison entre les horizons de sols

Tel que décrit à la section 2.1.3, les échantillons de sol ont été regroupés selon les horizons BF, BHF, BF+BHF, BC, C et BC+C. Afin d'identifier l'importance relative de chacun de ces horizons comme facteurs explicatifs de la qualité de l'eau, on a calculé, pour chaque horizon, les coefficients de corrélation de Spearman entre les variables de chimie des sols et les variables de qualité de l'eau (Tableau A.1 de l'annexe A). Comme on a pu le constater, les coefficients de corrélation entre variables de chimie des sols et variables de qualité de l'eau sont plus élevés pour les horizons BHF et BF. C'est avec l'horizon BHF qu'on retrouve les plus forts coefficients de corrélation entre d'une part les variables de chimie des sols PHH20, PHCALC2, CA, MG, CEC, SCATIO et SATBASE et d'autre part le groupe des variables de minéralisation des eaux (Ca, Mg, Ca+Mg, pH, sulfates, Dic, alcalinité, conductivité) ainsi que l'aluminium, le manganèse et le fer. Un examen attentif du nombre d'échantillons obtenus pour chaque horizon a montré que les horizons BHF, BC

et C étaient plutôt mal représentés, sinon absents sur les bassins versants. Dans le cas de l'horizon BHF, on dispose de 34 échantillons au total répartis sur seulement 19 bassins versants. Le fait de regrouper des horizons (tels que BF+BHF, BC+C) peut entraîner une diminution du coefficient de corrélation, mais permet d'améliorer leur représentativité et de disposer pour ces horizons de mesures sur l'ensemble des bassins versants. Pour la suite de l'étude, on s'est limité à considérer seulement l'horizon BF+BHF sur lequel on obtenait des coefficients de corrélation un peu moins élevés que pour l'horizon BHF, mais plus représentatifs de la réalité.

3.3.2 Interrelations entre variables de chimie des sols

Au tableau 3.4, on présente les coefficients de corrélation de Spearman calculés entre variables de chimie des sols (horizon BF+BHF). Les variables de chimie des sols présentent une structure de corrélation semblable à celle obtenue avec les variables de qualité de l'eau. En effet, des coefficients de corrélation positifs sont observés entre CA, MG, SCATIONS, SATBASES, PHH2O, PHCALC2, NA et K; ce groupe de variables est relié inversement avec les variables FE, AL et CEC.

3.3.3 Relations variables de chimie des sols - variables de qualité de l'eau

Le tableau 3.5 comprend les coefficients de corrélation calculés entre variables de chimie des sols (horizon BF+BHF) et variables de qualité de l'eau. Pour effectuer la synthèse de ces interrelations, on a utilisé l'ACP, comme pour les variables biophysiques, en portant en variables actives les variables de qualité de l'eau et en variables supplémentaires les variables de chimie des sols (Figure 3.3).

Les plus fortes corrélations observées entre variables de chimie des sols et variables de qualité de l'eau sont obtenues entre les variables SATBASES, SCATIONS, CA, K, MG, PHH2O et PHCALC2 et les variables de minéralisation des eaux (Tableau 3.5). De façon étrange, la corrélation des variables FE et AL avec le fer et l'aluminium dans l'eau n'est pas significative. La capacité d'échange cationique (CEC) est la seule variable corrélée positivement avec l'aluminium et le manganèse dans l'eau.

Tableau 3.4 Corrélation entre variables de chimie des sols (horizon BF+BHF)

	PHH2O	PHCALC2	CEC	CA	MG	K	NA	CARBORG
PHH2O	1,000**							
PHCALC2	0,886**	1,000**						
CEC	-0,592**	-0,311	1,000**					
CA	0,479**	0,510**	-0,090	1,000**				
MG	0,141	0,162	0,017	0,504**	1,000**			
K	0,339*	0,147	-0,449**	0,389*	0,675**	1,000**		
NA	0,355*	0,083	-0,655**	0,142	0,517**	0,825**	1,000**	
CARBORG	-0,695**	-0,563**	0,801**	-0,086	-0,063	-0,276	-0,489**	1,000**
CARBCAL	0,166	0,031	-0,117	0,223	0,568**	0,564**	0,454**	-0,042
FE	-0,772**	-0,735**	0,557**	-0,211	0,016	-0,145	-0,277	0,744**
AL	-0,658**	-0,513**	0,533**	-0,490**	-0,270	-0,420*	-0,396*	0,565**
STOTAL	-0,174	0,094	0,589**	-0,015	-0,099	-0,378*	-0,620**	0,324
SULFATEP	0,081	0,007	-0,387*	-0,333	-0,344*	-0,131	0,130	-0,242
SCATIONS	0,414*	0,369*	-0,169	0,841**	0,808**	0,682**	0,480**	-0,119
SATBASES	0,614**	0,469**	-0,492**	0,758**	0,662**	0,808**	0,682**	-0,368*

	CARBCAL	FE	AL	STOTAL	SULFATEP	SCATIONS	SATBASES
CARBCAL	1,000**						
FE	-0,059	1,000**					
AL	-0,321	0,603**	1,000**				
STOTAL	-0,236	0,192	0,255	1,000**			
SULFATEP	-0,088	-0,185	0,129	-0,322	1,000**		
SCATIONS	0,475**	-0,132	-0,529**	-0,190	-0,269	1,000**	
SATBASES	0,443**	-0,368*	-0,592**	-0,361*	-0,154	0,878**	1,000**

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.
* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

Tableau 3.5 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables de chimie des sols (horizon BF+BHF)

	PHH2O	PHCALC2	CEC	CA	MG	K
pH	0,505**	0,413*	-0,333	0,711**	0,448**	0,551**
Ca	0,448**	0,373*	-0,297	0,695**	0,422*	0,515**
Mg	0,415*	0,367*	-0,315	0,675**	0,391*	0,465**
Na	0,142	0,153	-0,314	0,104	0,081	0,252
K	0,155	0,100	-0,156	0,407*	0,242	0,495**
NH3	-0,057	0,037	0,149	-0,038	0,352*	0,283
AlcG	0,473**	0,373*	-0,317	0,684**	0,405*	0,520**
SO4	0,369*	0,395*	-0,117	0,713**	0,266	0,289
Cl	0,100	0,061	-0,049	0,312	0,465**	0,549**
NO3	-0,250	-0,353*	0,006	-0,201	0,074	0,131
SiO2	-0,007	0,028	-0,153	-0,357*	-0,042	-0,063
Doc	-0,019	0,036	0,182	-0,005	0,025	0,071
Dic	0,431**	0,361*	-0,269	0,679**	0,409*	0,518**
Coul.	-0,199	-0,111	0,238	-0,151	0,053	0,024
Cond.	0,422*	0,373*	-0,251	0,699**	0,427*	0,498**
Al	-0,477**	-0,405*	0,416*	-0,608**	-0,248	-0,268
Mn	-0,408*	-0,382*	0,368*	-0,528**	-0,253	-0,403*
Fe	-0,378*	-0,319	0,293	-0,523**	-0,283	-0,335*
Ca+Mg	0,460**	0,397*	-0,290	0,705**	0,422*	0,507**

	NA	CARBORG	CARBCAL	FE	AL	STOTAL
pH	0,370*	-0,234	0,383*	-0,224	-0,360*	-0,047
Ca	0,321	-0,172	0,329	-0,200	-0,304	-0,057
Mg	0,313	-0,267	0,219	-0,204	-0,316	-0,045
Na	0,186	-0,332	-0,067	-0,220	-0,163	0,167
K	0,313	-0,073	0,121	-0,119	-0,154	-0,078
NH3	0,228	0,014	0,136	-0,139	0,011	0,290
AlcG	0,334	-0,209	0,352*	-0,199	-0,345*	-0,050
SO4	0,099	-0,013	0,247	-0,209	-0,257	0,097
Cl	0,375*	-0,085	0,228	-0,058	-0,093	-0,072
NO3	0,142	0,160	-0,163	0,272	0,083	0,060

Tableau 3.5 (suite) Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables de chimie des sols (horizon BF+BHF)

	NA	CARBORG	CARBCAL	FE	AL	STOTAL
SiO2	0,046	-0,319	-0,056	-0,149	-0,096	0,081
Doc	-0,034	0,023	-0,091	-0,017	0,071	0,026
Dic	0,320	-0,199	0,342*	-0,203	-0,319	-0,089
Coul.	-0,064	0,073	-0,167	0,063	0,126	0,031
Cond.	0,299	-0,150	0,310	-0,180	-0,273	-0,019
Al	-0,253	0,303	-0,216	0,313	0,312	0,092
Mn	-0,264	0,331	-0,237	0,176	0,266	-0,058
Fe	-0,263	0,144	-0,323	0,188	0,260	0,059
Ca+Mg	0,313	-0,186	0,328	-0,209	-0,298	-0,041
	SULFATEP	SCATIONS	SATBASES			
pH	-0,135	0,683**	0,725**			
Ca	-0,125	0,636**	0,695**			
Mg	-0,102	0,593**	0,630**			
Na	-0,095	0,068	0,234			
K	-0,272	0,370*	0,467**			
NH3	-0,130	0,068	0,103			
AlcG	-0,158	0,639**	0,686**			
SO4	-0,008	0,550**	0,572**			
Cl	-0,158	0,388*	0,441**			
NO3	-0,212	-0,067	-0,040			
SiO2	0,020	-0,308	-0,203			
Doc	-0,123	-0,093	-0,034			
Dic	-0,136	0,613**	0,672**			
Coul.	-0,112	-0,159	-0,132			
Cond.	-0,106	0,628**	0,683**			
Al	-0,087	-0,543**	-0,554**			
Mn	0,032	-0,441**	-0,508**			
Fe	-0,040	-0,540**	-0,559**			
Ca+Mg	-0,105	0,637**	0,695**			

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.

* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

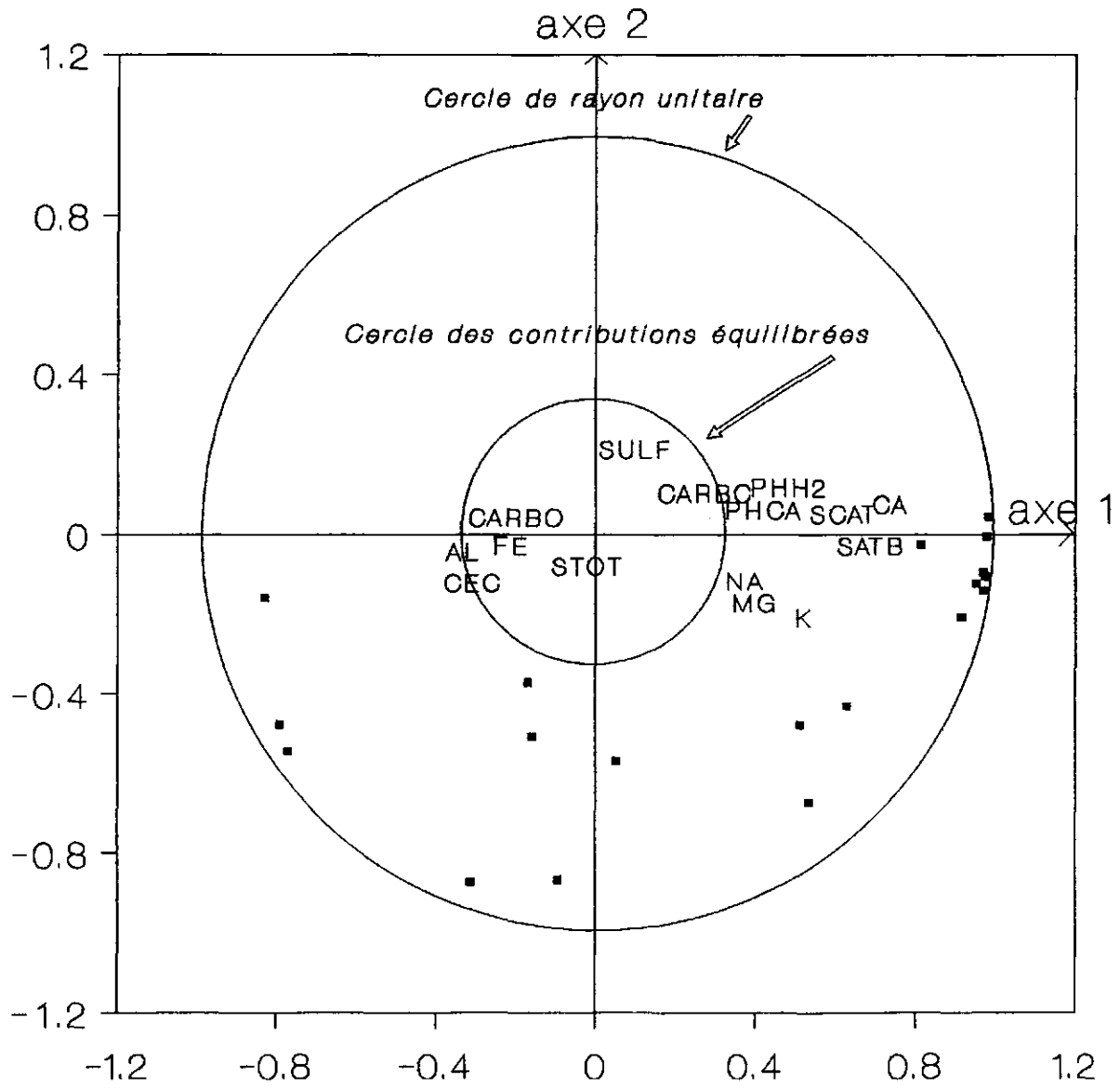


Figure 3.3 Projection des variables de chimie des sols (horizon BF+BHF) dans l'espace factoriel déterminé par la projection des variables de qualité de l'eau

L'examen de la position des variables de chimie des sols dans le plan factoriel (Figure 3.3) montre que ces variables tendent en général à se regrouper à l'origine des axes, indiquant une qualité de représentation plus faible que celle obtenue pour les variables biophysiques. On distingue un seul groupe de variables (CA, MG, SCATIONS, SATBASES, PHH2O, PHCALC2, NA et K) qui est situé à l'extérieur du cercle des contributions équilibrées. Ce groupe de variables a une composante positive sur l'axe 1, résultat de sa relation avec les variables de minéralisation des eaux. Quant aux variables FE, AL, CEC et CARBORG, qui ont de faibles corrélations négatives avec le premier groupe de variables de chimie de l'eau, on les retrouve du côté négatif de l'axe 1, à l'intérieur du cercle des contributions équilibrées. Le soufre (STOTAL) et les sulfates extractibles (SULFATEP) dans les sols sont situés près de l'origine des axes, résultat de leur faible corrélation avec les variables de qualité de l'eau.

3.4 VARIABLES DE GRANULOMÉTRIE DES SOLS

Les variables de granulométrie des sols, considérées dans cette section, ont été énumérées à la section 2.1.4. Comme pour les analyses précédentes, on examine en premier lieu les interrelations entre variables de granulométrie, puis on étudie les relations que ces variables ont avec les variables de qualité de l'eau. On effectue d'abord une comparaison des horizons de sols à partir des relations observées avec la qualité de l'eau.

3.4.1 Comparaison entre les horizons de sols

Les relations entre les variables de granulométrie des sols et les variables de qualité de l'eau ont été étudiées en suivant la même démarche que celle suivie dans la section précédente avec les variables de chimie des sols. On a calculé, pour chaque horizon, la corrélation de Spearman entre les variables de chimie de l'eau et les variables de granulométrie des sols. Ces coefficients sont présentés au tableau A.2 de l'annexe A. Comme pour la chimie des sols, l'examen de l'ensemble de ces coefficients de corrélation a montré certaines différences de comportement entre horizons. On voit, par exemple, que les coefficients de corrélation, quoique

faibles dans l'ensemble, sont plus élevés en général pour l'horizon BHF, spécialement entre les variables GRAVIER et ARGILE et l'ensemble des variables de minéralisation des eaux. Le fait de regrouper ensemble les données relatives aux horizons BF et BHF entraîne donc une diminution de la corrélation en ce qui concerne les variables GRAVIER et ARGILE, mais une augmentation de celle-ci en ce qui concerne la variable LIMON.

3.4.2 Interrelations entre variables de granulométrie des sols

On présente au tableau 3.6 la corrélation entre les variables de granulométrie en ce qui concerne l'horizon BF+BFH. Ce tableau de coefficients de corrélation est délicat à interpréter du fait que les données sont exprimées en pourcentages. Ainsi, on peut présumer que les corrélations entre la teneur en gravier et celle en sable ou limon ($\approx -0,5$), entre la teneur en sable et celle en limon ($-0,35$) sont fausses, l'augmentation de la proportion de l'une entraînant une diminution de la proportion de l'autre. Par contre, en ce qui concerne des variables à très faible teneur comme l'argile, cet effet provenant de la mesure en pourcentages doit être à peine perceptible.

3.4.3 Relations variables de granulométrie des sols - variables de qualité de l'eau

Le tableau 3.7 contient les coefficients de corrélation entre les variables de qualité de l'eau et les variables de granulométrie des sols pour l'horizon BF+BFH. Comme pour les deux sections précédentes, on utilise l'ACP pour effectuer une synthèse des interrelations (Figure 3.4). On constate que les teneurs en limon et en gravier sont corrélées (positivement pour LIMON et négativement pour GRAVIER) avec les variables de minéralisation des eaux. On les retrouve situés en opposition sur l'axe 1. La teneur en sable très fin (STF) est opposée sur l'axe 2 aux teneurs en sable grossier (SG) et sable très grossier (STG). Par leur position sur l'axe 2, ces variables apparaissent reliées à la couleur et au carbone dissous (négativement pour STF et positivement pour SG et STG). La relation est également relativement forte entre les variables fer, aluminium et manganèse de qualité de l'eau et les variables STG (positivement) et LIMON (négativement) de granulométrie.

Tableau 3.6 Corrélation entre variables de granulométrie des sols (horizon BF+BHF)

	GRAVIER	SABLE	STG	SG	SM	SF
GRAVIER	1,000**					
SABLE	-0,490**	1,000**				
STG	0,372*	0,210	1,000**			
SG	0,007	0,517**	0,848**	1,000**		
SM	-0,292	0,647**	0,275	0,615**	1,000**	
SF	-0,254	0,771**	-0,036	0,130	0,511**	1,000**
STF	-0,413*	-0,128	-0,680**	-0,645**	-0,578**	-0,187
LIMON	-0,524**	-0,350*	-0,680**	-0,576**	-0,317	-0,385*
ARGILE	0,128	-0,607**	-0,090	-0,186	-0,226	-0,536**
	STF	LIMON	ARGILE			
STF	1,000**					
LIMON	0,641**	1,000**				
ARGILE	0,050	0,237	1,000**			

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.
 * significativement différent de zéro au niveau de 5%.

Tableau 3.7 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables de granulométrie des sols (horizon BF+BHF)

	GRAVIER	SABLE	STG	SG	SM	SF	STF	LIMON	ARGILE
pH	-0,405*	0,021	-0,278	-0,113	0,181	0,046	-0,022	0,434**	-0,032
Ca	-0,414*	0,053	-0,270	-0,099	0,228	0,105	-0,070	0,404*	-0,032
Mg	-0,307	-0,078	-0,235	-0,080	0,203	-0,053	-0,090	0,416*	0,082
Na	0,005	-0,072	-0,063	-0,055	0,162	0,168	-0,261	0,052	0,109
K	-0,250	0,067	0,048	0,129	0,272	0,049	-0,261	0,007	-0,012
NH3	-0,181	0,042	0,166	0,249	0,249	0,014	-0,234	0,009	0,252
AlcT	-0,389*	0,021	-0,250	-0,102	0,192	0,062	-0,047	0,401*	-0,022
AlcG	-0,382*	0,021	-0,246	-0,103	0,180	0,064	-0,045	0,395*	-0,028
SO4CO	-0,473**	0,036	-0,311	-0,135	0,265	0,008	0,036	0,555**	-0,010
SO4CI	-0,470**	0,010	-0,364*	-0,203	0,215	0,004	0,092	0,606**	-0,047
Cl	-0,144	-0,038	0,077	0,150	0,257	0,037	-0,368*	-0,023	0,144
NO3	-0,112	0,142	0,178	0,183	0,014	0,093	0,006	-0,089	-0,034
SiO2	0,110	-0,124	0,060	-0,091	-0,264	0,138	-0,014	-0,048	0,174
Doc	-0,025	0,112	0,316	0,358*	0,312	0,081	-0,420*	-0,294	0,150
Dic	-0,383*	0,116	-0,174	-0,020	0,281	0,133	-0,141	0,297	-0,051
Coul.	0,139	0,061	0,370*	0,340*	0,212	0,058	-0,425*	-0,390*	0,163
Cond.	-0,406*	0,039	-0,257	-0,082	0,246	0,075	-0,088	0,422*	-0,016
Al	0,358*	0,017	0,487**	0,331	0,024	-0,010	-0,243	-0,530**	0,132
Mn	0,315	0,084	0,455**	0,289	-0,100	0,006	-0,109	-0,525**	0,013
Fe	0,320	0,029	0,402*	0,299	-0,004	0,007	-0,199	-0,518**	0,165
Ca+Mg	-0,399*	0,035	-0,263	-0,092	0,237	0,082	-0,085	0,416*	-0,024

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.

* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

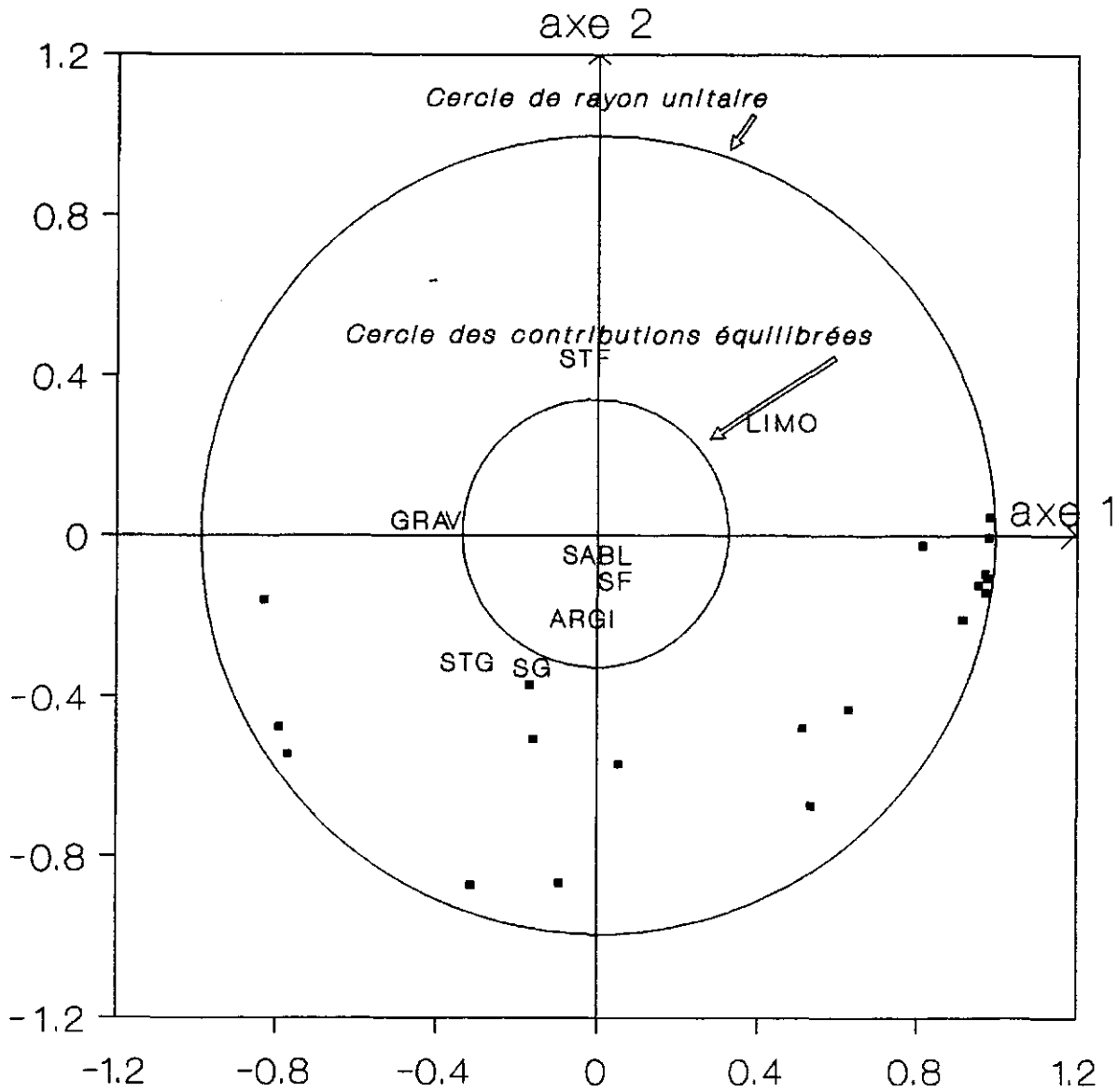


Figure 3.4 Projection des variables de granulométrie des sols (horizon BF+BHF) dans l'espace factoriel déterminé par la projection des variables de qualité de l'eau

3.5 VARIABLES DE MINÉRALOGIE DES SOLS

Les variables de minéralogie des sols, considérées dans cette section, ont été énumérées à la section 2.1.5. On suit la même démarche que pour les analyses précédentes. On examine d'abord les interrelations entre variables de minéralogie des sols, puis on étudie les relations que ces variables ont avec les variables de qualité de l'eau.

3.5.1 Interrelations entre variables de minéralogie des sols

On présente au tableau 3.8 les coefficients de corrélation de Spearman calculés entre chaque paire de variables décrivant la minéralogie des sols. Pour l'interprétation de ces coefficients de corrélation, on fait face au même problème que celui rencontré avec les variables de granulométrie à cause du fait que les données sont exprimées en pourcentages. Ainsi, la corrélation négative entre le quartz (QTZ) et les minéraux feldspath potassique (KFELD), plagioclase (PLAG), hyperstène (HYPST), grenat (GR) et apatite (APAT) est fort probablement artificielle en raison de l'abondance du quartz dans la minéralogie des sols. Une augmentation en pourcentage du quartz se traduit automatiquement par une diminution en pourcentage de ces autres minéraux relativement abondants. En ce qui concerne les éléments peu abondants, il est difficile de départager l'effet causé par la dépendance des données de la réalité.

3.5.2 Relations variables de qualité de l'eau - variables de minéralogie des sols

L'examen des coefficients de corrélation de Spearman, présentés au tableau 3.9, permet d'identifier les variables de minéralogie qui sont reliées aux variables de qualité de l'eau. Comme pour les analyses précédentes, on utilise l'ACP pour effectuer une synthèse de ces interrelations. La projection des variables de minéralogie dans le plan factoriel des axes 1 - 2 est présentée à la figure 3.5. De façon générale, on constate qu'à l'exception de l'épidote, les coefficients de corrélation sont relativement faibles, ce qui se traduit par une faible qualité de représentation dans le plan factoriel. On observe que les variables de minéralogie

Tableau 3.8 Corrélation entre variables de minéralogie des sols

	MINLG	QTZ	KFELD	PLAG	HYPST	MT	GR
MINLG	1,000**						
QTZ	0,262	1,000**					
KFELD	0,275	-0,675**	1,000**				
PLAG	-0,145	-0,362*	-0,201	1,000**			
HYPST	-0,628**	-0,518**	-0,000	0,515**	1,000**		
MT	-0,372*	-0,090	0,006	0,034	0,470**	1,000**	
GR	-0,625**	-0,362*	-0,220	0,404*	0,713**	0,203	1,000**
EPID	-0,532**	-0,034	-0,259	-0,044	0,011	-0,330	0,287
APAT	-0,491**	-0,459**	0,032	0,339*	0,803**	0,348*	0,687**
MICA	-0,115	0,112	-0,089	-0,304	-0,321	-0,389*	-0,192
ZIRC	0,154	0,433**	-0,129	-0,375*	-0,726**	-0,240	-0,518**
OPAQ	-0,028	0,205	-0,111	-0,379*	-0,550**	-0,534**	-0,407*
AUTRE	0,179	0,543**	-0,220	-0,451**	-0,718**	-0,386*	-0,577**

	EPID	APAT	MICA	ZIRC	OPAQ	AUTRE
EPID	1,000**					
APAT	0,055	1,000**				
MICA	0,361*	-0,257	1,000**			
ZIRC	0,239	-0,587**	0,378*	1,000**		
OPAQ	0,533**	-0,582**	0,564**	0,524**	1,000**	
AUTRE	0,276	-0,750**	0,382*	0,747**	0,694**	1,000**

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.

* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

Tableau 3.9 Corrélation entre variables de qualité de l'eau et variables de minéralogie des sols

	MINLG	QTZ	KFELD	PLAG	HYPST	MT	GR
pH	-0,430**	-0,001	-0,307	0,035	0,186	-0,403*	0,295
Ca	-0,423*	-0,006	-0,296	0,022	0,198	-0,401*	0,298
Mg	-0,519**	0,049	-0,413*	0,094	0,268	-0,274	0,455**
Na	-0,307	-0,003	-0,110	-0,050	0,201	0,121	0,261
K	-0,090	0,013	-0,081	-0,024	0,086	-0,451**	0,170
NH3	-0,032	-0,045	-0,126	0,153	0,226	0,102	0,295
AlcG	-0,442**	-0,018	-0,273	0,010	0,197	-0,388*	0,304
SO4CI	-0,346*	0,048	-0,402*	0,176	0,257	-0,329	0,413*
Cl	-0,243	-0,078	-0,177	0,004	0,196	-0,208	0,221
NO3	0,097	0,101	-0,037	0,031	-0,055	0,001	-0,319
SiO2	-0,051	-0,086	0,157	-0,121	0,085	0,324	-0,031
Doc	0,038	-0,163	0,052	0,234	0,211	0,006	0,177
Dic	-0,404*	-0,050	-0,245	0,030	0,220	-0,391*	0,336*
Coul.	0,059	-0,117	0,060	0,136	0,165	0,146	0,106
Cond.	-0,458**	0,001	-0,334*	0,048	0,233	-0,367*	0,376*
Al	0,306	-0,262	0,382*	0,071	0,015	0,265	-0,125
Mn	0,517**	0,015	0,322	-0,131	-0,253	0,160	-0,411*
Fe	0,264	-0,071	0,236	0,078	-0,002	0,398*	-0,204
Ca+Mg	-0,447**	0,008	-0,327	0,028	0,218	-0,376*	0,339*

	EPID	APAT	MICA	ZIRC	OPAQ	AUTRE
pH	0,676**	0,079	0,524**	-0,139	0,430*	0,077
Ca	0,656**	0,082	0,516**	-0,142	0,384*	0,086
Mg	0,727**	0,173	0,423*	-0,111	0,275	0,099
Na	0,327	0,000	0,201	-0,025	0,052	-0,072
K	0,490**	0,053	0,355*	-0,087	0,272	0,087
NH3	0,036	0,112	-0,181	-0,235	-0,098	-0,252
AlcG	0,671**	0,104	0,536**	-0,159	0,397*	0,068
SO4CI	0,550**	0,209	0,287	-0,142	0,178	0,030
Cl	0,377*	0,166	0,259	-0,149	0,216	-0,034
NO3	-0,012	-0,182	-0,141	0,221	0,147	0,186
SiO2	-0,050	0,079	-0,222	0,025	-0,202	-0,076
Doc	-0,006	0,168	-0,146	-0,181	-0,205	-0,198
Dic	0,643**	0,113	0,514**	-0,196	0,347*	0,006
Coul.	-0,132	0,150	-0,260	-0,102	-0,230	-0,192
Cond.	0,678**	0,131	0,477**	-0,138	0,326	0,052
Al	-0,492**	0,141	-0,461**	-0,016	-0,387*	-0,255
Mn	-0,687**	-0,147	-0,333	0,010	-0,277	-0,007
Fe	-0,470**	0,033	-0,421*	-0,011	-0,363*	-0,152
Ca+Mg	0,676**	0,113	0,503**	-0,149	0,360*	0,072

** significativement différent de zéro au niveau de 1%.

* significativement différent de zéro au niveau de 5%.

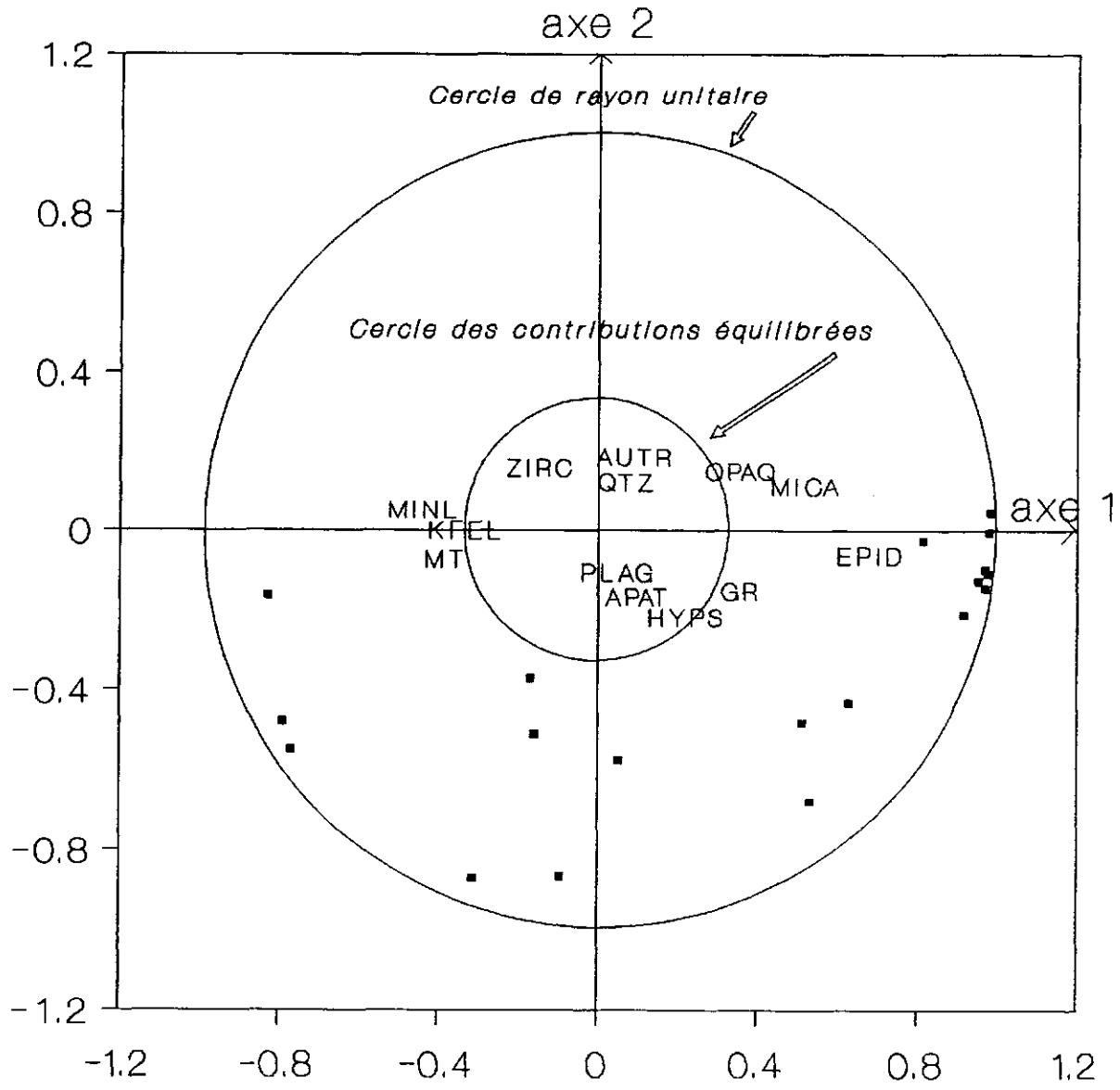


Figure 3.5 Projection des variables de minéralogie des sols dans l'espace factoriel déterminé par la projection des variables de qualité de l'eau

les plus corrélées positivement avec les variables de minéralisation des eaux (Ca, Mg, Alc. etc) sont dans l'ordre décroissant suivant: épidote > mica > minéraux opaques (OPAQ) > grenat. Ces dernières sont également plus ou moins corrélées négativement avec l'aluminium, le manganèse et le fer. Sur le plan factoriel, on retrouve ces quatre variables avec une composante positive sur l'axe 1 à proximité des variables de minéralisation des eaux. Du côté négatif de l'axe 1, on retrouve les minéraux légers (MINLG), la magnétite (MT) et le feldspath potassique (KFELD) dont la position dans le plan factoriel traduit un comportement inverse de celui des quatre autres variables de minéralogie.

Les six autres variables de minéralogie considérées dans cette section sont le quartz (QTZ), le plagioclase (PLAG), l'hyperstène (HYPST), l'apatite (APAT), le zircon (ZIRC) et les autres minéraux lourds non identifiables (AUTRE). Ces variables n'ont pas de relation apparente avec les variables de qualité de l'eau et ont par conséquent une faible qualité de représentation dans le plan factoriel. On les retrouve donc à l'intérieur du cercle des contributions équilibrées.

3.6 SYNTHÈSE DES INTERRELATIONS

Dans cette section, on effectue une synthèse des interrelations entre chacune des variables du milieu terrestre. Pour réaliser cette synthèse, on utilise encore l'ACP, mais en portant cette fois-ci toutes les variables du milieu terrestre en variables actives et les variables de qualité de l'eau en variables supplémentaires (Figure 3.6). On peut maintenant examiner comment se projettent les variables de qualité de l'eau dans un espace factoriel déterminé par les variables du milieu terrestre. De plus, l'analyse de la position des variables terrestres dans cet espace réduit permet de synthétiser l'ensemble des interrelations que ces variables ont entre elles. Afin de mieux comparer les groupes de variables entre eux, on représente séparément les groupes de variables suivants: les variables biophysiques (Figure 3.6a), les variables de chimie des sols (Figure 3.6b), les variables de granulométrie des sols (Figure 3.6c), les variables de minéralogie des sols (Figure 3.6d) et les variables de qualité de l'eau (Figure 3.6e).

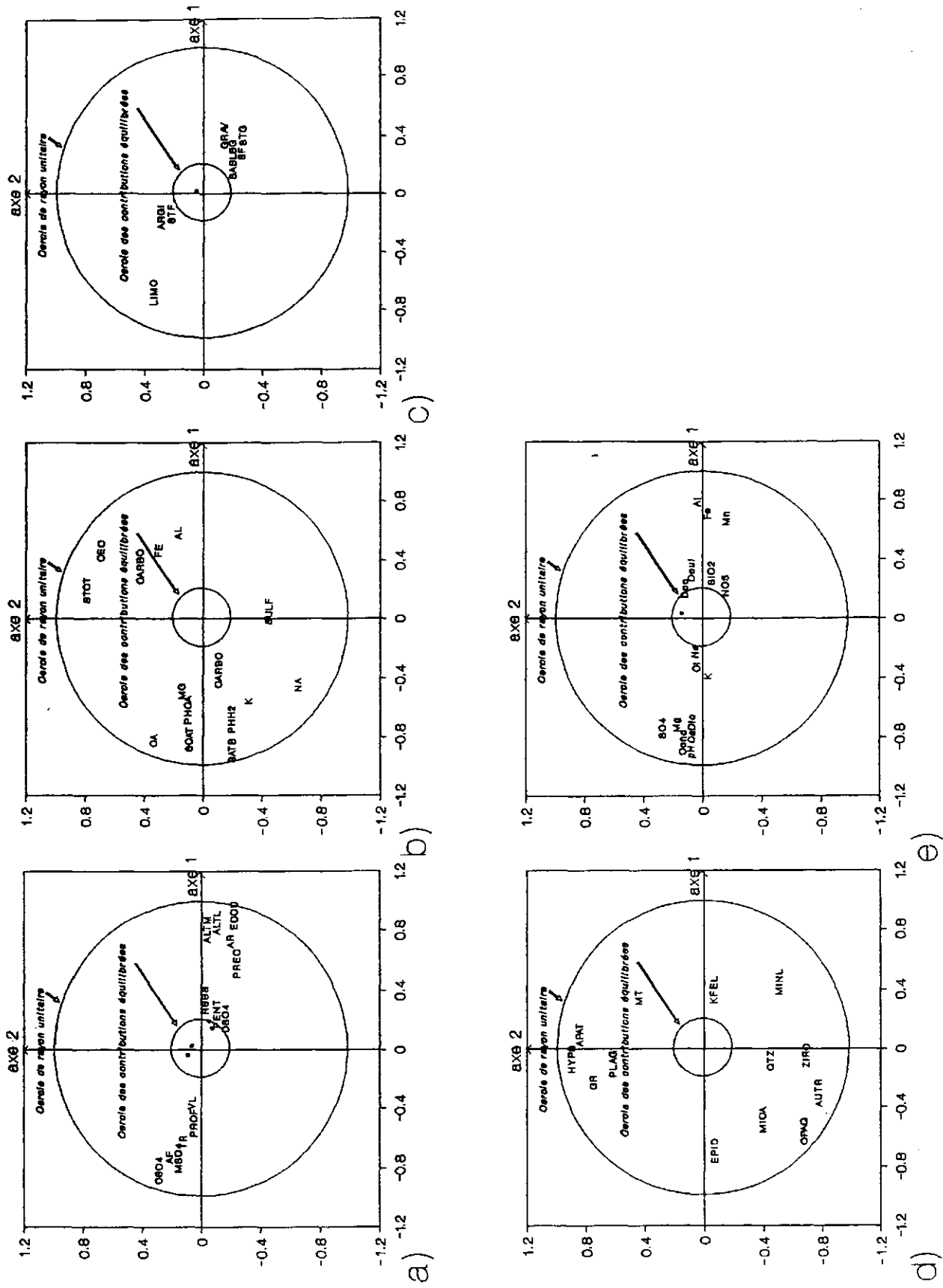


Figure 3.6 ACP sur l'ensemble des variables considérées: a) variables biophysiques, b) variables de chimie des sols, c) variables de granulométrie des sols, d) variables de minéralogie des sols, e) variables de chimie de l'eau (en points supplémentaires)

Tout d'abord, on constate que parmi les variables de qualité de l'eau (Figure 3.6e), ce sont les variables associées à la minéralisation (Ca, Mg, Alc, Dic, Cond., SO₄, pH) ainsi que le fer, l'aluminium et le manganèse qui sont les mieux représentés dans le plan factoriel 1-2. Sur l'axe 1, on retrouve donc encore le phénomène de minéralisation en opposition à celui de la présence de métaux lourds (Fe, Al, Mn) observé dans la première ACP (Figure 3.1) dans laquelle les variables de qualité de l'eau étaient actives. On constate également que l'ensemble des variables de qualité de l'eau n'ont pas de composantes importantes sur l'axe 2, indiquant que le phénomène associé à cet axe est complètement indépendant des processus de chimie des eaux. Un examen des résultats obtenus pour l'axe 3 (résultats non présentés) a montré que les variables suivantes (Coul., Doc, SiO₂, NH₃, Na, Cl) avaient de fortes composantes sur cet axe, indiquant que le phénomène associé à la présence de matière organique ressortait sur cet axe.

Par rapport à l'analyse précédente, le fait d'introduire les variables du milieu terrestre comme variables actives dans l'ACP permet de les examiner sous un autre angle. Les variables qui avaient de fortes composantes sur l'axe 1 dans l'analyse précédente se retrouvent encore avec de fortes composantes sur cet axe, indiquant que le phénomène associé à la minéralisation des eaux représente encore la tendance principale. On retrouve donc, avec de fortes composantes sur l'axe 1, les variables biophysiques ALTM, ALTL, ECOUL, PREC, AR, CSO₄, MSO₄, AF (Figure 3.6a), identifiées précédemment comme explicatives de la minéralisation des eaux (Figure 3.2). Également, on y retrouve les variables de chimie des sols telles que SCATIONS, SATBASES, CA, PHH₂O, PHCALC₂, K, MG (Figure 3.6b), ainsi que la présence de limon (Figure 3.6c) et d'épidote (Figure 3.6d).

Cette analyse a permis à certaines variables d'être mieux représentées et d'intervenir notamment sur l'axe 2. En effet, on y retrouve, avec de fortes composantes, l'ensemble des variables de minéralogie des sols (Figure 3.6d) et certaines variables de chimie des sols telles que SULFATEP et STOT (Figure 3.6b). Le fait de ne retrouver aucune variable de qualité de l'eau sur cet axe indique que ces variables du milieu terrestre n'ont pas de relation évidente avec la qualité de l'eau du moins en ce qui concerne la région d'étude.

Un examen plus poussé des résultats obtenus en ce qui concerne l'axe 3 (résultats non présentés) a montré que les variables reliées à la géométrie des lacs (SL, VL, PROF, TR, RSBSL) intervenaient principalement sur l'axe 3; leur position sur cet axe confirmerait la relation inverse observée entre d'une part la teneur en matière organique (couleur et carbone organique dans l'eau) et d'autre part la taille des lacs (profondeur, superficie, volume) et le temps de séjour des eaux (cf Section 3.2.2).

Pour conclure, on peut donc affirmer que les variables biophysiques reliées à la physiographie (altitude), à la météorologie (précipitation, débit spécifique et sulfates atmosphériques) et à la présence de végétation (feuillus ou résineux) sont des variables très importantes dans l'explication de la minéralisation des eaux et par conséquent de la sensibilité à l'acidification. Les variables de chimie des sols sont également très importantes, notamment la somme des cations, la saturation en bases, la capacité d'échange cationique, la teneur en calcium, en magnésium et en potassium. Lorsqu'il y a sur le bassin versant présence d'un horizon BHF, ces variables prendraient une importance encore plus grande. Par contre, en ce qui concerne les variables de granulométrie et de minéralogie des sols, on ne trouve pas de relation apparente avec la qualité de l'eau à l'exception d'une certaine relation observée avec la présence de limon et d'épidote. Il est possible que le fait de rapporter en pourcentages de poids les résultats de ces variables ne soit pas étranger à ces résultats.

4. MODÈLE DE RÉGRESSION

Dans ce chapitre, on présente l'essentiel des résultats d'un modèle de régression conduisant à prédire certaines variables de qualité de l'eau à partir d'un ensemble de caractéristiques du territoire considéré. Cette méthode utilisée a été décrite à la section 2.2.2. Il s'agit en fait d'une régression multiple usuelle appliquée sur les résultats d'une analyse factorielle des correspondances. On décrit d'abord les étapes préliminaires, soit le choix des variables, le codage binaire des variables, l'obtention de tableaux de contingence et l'analyse des correspondances de ces tableaux de contingence.

4.1 CHOIX DES VARIABLES

On considère deux ensembles de variables: les variables à expliquer et les variables explicatives. Bien qu'en principe la méthode puisse être appliquée sur n'importe laquelle des variables considérées dans cette étude, le choix des variables à expliquer a été limité à seulement quelques variables présentant un intérêt pour la prédiction sur d'autres bassins versants. On a donc retenu l'alcalinité de l'eau comme variable à expliquer en raison de l'importance de la connaissance de cette variable dans la détermination de la sensibilité d'un milieu aquatique à l'acidification par les précipitations. Afin de montrer la généralisation de cette méthode à n'importe quelle variable, on considère également le pH de l'eau comme variable à expliquer.

Les variables explicatives sont choisies parmi l'ensemble des variables décrivant les caractéristiques du territoire. Dans le choix des variables, on retient principalement celles pour lesquelles on a observé au chapitre précédent une relation significative avec les variables de qualité de l'eau. On est donc amené à considérer trois scénarios d'application du modèle de régression avec les groupes de variables suivants:

- 1- les variables biophysiques (Section 3.2.2), les variables de chimie des sols (Section 3.2.3) et la variable décrivant l'altérabilité de la roche en place en trois classes (Section 2.1.6);
- 2- les variables biophysiques et l'altérabilité de la roche en place (on élimine les variables de chimie des sols qui sont plus difficiles à mesurer);
- 3- l'altérabilité de la roche en place et un groupe réduit de variables biophysiques (on élimine les variables biophysiques qui ne présentent pas de relation évidente avec la minéralisation des eaux).

Pour les trois scénarios, on a éliminé la variable précipitation moyenne annuelle à cause du manque de résolution de la mesure de cette variable et conséquemment de l'impossibilité d'obtenir des classes équiprobables pour le calcul des tableaux de contingence (cf Section 4.2). Dans le scénario 3, on conserve les variables

suivantes: l'altérabilité de la roche en place (ALTR), l'altitude du lac (ALTL), l'altitude maximale du bassin versant (ALTM), la profondeur du lac (PROF), le rapport des superficies de bassin versant et de lac (RSBSL), le débit spécifique annuel moyen (ECOUL), le volume du lac (VL), le temps de séjour des eaux (TR), la pente du bassin (PENDE), la concentration de sulfates dans les précipitations (CSO4), le rapport $DSO_4/ECOUL$, la superficie de résineux et la superficie de feuillus.

En éliminant de façon successive les variables de chimie des sols et les variables biophysiques non-explicatives, on essaie donc de faire ressortir le pouvoir explicatif et l'intérêt du modèle de régression sur un nombre réduit de variables explicatives plus faciles à mesurer.

4.2 TABLEAUX DE CONTINGENCE

On procède d'abord à un codage binaire des variables quantitatives (cf Section 2.2.2). On définit sur chacune de ces variables un certain nombre de classes; on remplace la valeur observée par un 1 ou un 0 selon que celle-ci appartient ou n'appartient pas à la classe. Pour chacune des variables explicatives, on a retenu trois classes équiprobables. Les bornes utilisées pour définir la modalité 2 sont données au tableau 4.1. Pour les variables à expliquer (alcalinité et pH), on a retenu six classes équiprobables. En effet, il est préférable de définir un plus grand nombre de classes pour les variables à expliquer si on veut obtenir une bonne résolution dans la prédiction par le modèle de régression. Les bornes des classes de ces variables sont les suivantes:

classe	bornes des classes	
	alcalinité	pH
1	$\leq 0,71$	$\leq 5,80$
2	$>0,71$ et $\leq 1,92$	$>5,80$ et $\leq 6,30$
3	$>1,92$ et $\leq 5,17$	$>6,30$ et $\leq 6,70$
4	$>5,17$ et $\leq 8,97$	$>6,70$ et $\leq 6,90$
5	$>8,97$ et $\leq 13,76$	$>6,90$ et $\leq 7,20$
6	$>13,76$	$>7,20$

Tableau 4.1 Bornes de la classe intermédiaire des variables explicatives

ALT _L (m)	>330	≤480
ALT _M (m)	>420	≤585
SB _T (km ²)	>0,78	≤1,22
SL (km ²)	>0,09	≤0,17
PROF (m)	>9,0	≤19
SB (km ²)	>0,64	≤1,01
RSBSL	>4,59	≤7,59
ECOU (1/s-km ²)	>16	≤23
VL (m ³)	>0,51	≤1,64
TR (mois)	>11,1	≤31,3
PENTE	>58,6	≤93,0
DSO ₄ (kg/ha-an)	>23,0	≤27,0
CSO ₄ (μéq/L)	>39,0	≤50,0
MSO ₄ (μéq/L)	>73,3	≤97,0
AR (%)	>12,7	≤34,1
AF (%)	>41,5	≤61,1
ARBU (%)	>0,20	≤2,10
PHH ₂	>4,62	≤4,90
PHCA	>4,22	≤4,50
CEC (méq/100g)	>29,4	≤37,1
CA (méq/100g)	>0,19	≤0,55
MG (méq/100g)	>0,13	≤0,32
K (méq/100g)	>0,09	≤0,20
NA (méq/100g)	>0,04	≤0,06
CORG (%)	>2,45	≤3,35
CCAL (%)	>0,02	≤0,08
FE (%)	>5498	≤6938
AL (%)	>5205	≤6293
STOT (%)	>0,12	≤0,17
SULF (%)	>26,4	≤39,0
SCAT (méq/100g)	>0,58	≤1,02
SATB	>1,89	≤4,37

On effectue ensuite le calcul des tableaux de contingence croisant les modalités de la variable à expliquer avec les modalités des variables explicatives. Les tableaux de contingence obtenus avec l'alcalinité sont présentés au tableau 4.2. L'examen de ces tableaux fournit déjà une information sur le degré de liaison qui peut exister entre la variable à expliquer et les variables explicatives. Par exemple, on peut noter que 9 lacs d'altitude faible (ALTL 1) ont une alcalinité élevée (ALCL 5 et 6), que 5 lacs d'altitude intermédiaire (ALTL 2) ont une alcalinité intermédiaire (ALTL 3 et 4) et que 9 lacs d'altitude élevée (ALTL 3) ont une alcalinité faible (ALCL 1 et 2). La relation entre ces deux variables est donc très forte. Cependant, l'examen séparé de chacun de ces tableaux peut difficilement permettre d'obtenir une vue d'ensemble. L'AFC appliquée à l'ensemble de ces tableaux permet d'effectuer cette analyse globale des relations entre la variable à expliquer et les variables explicatives.

4.3 RÉSULTATS DE L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES

L'AFC a été appliquée sur les tableaux de contingence selon les trois scénarios d'application définis précédemment. En vertu des propriétés barycentriques de l'AFC, il revient au même d'analyser le tableau de contingence comprenant en lignes ou en colonnes les modalités des variables explicatives. Pour des raisons pratiques au niveau du calcul, on a donc choisi d'analyser le tableau de contingence comprenant en lignes les modalités des variables explicatives et en colonnes les six modalités de la variable à expliquer.

Une partie des résultats obtenus de l'AFC appliquée sur le tableau comprenant un nombre réduit de variables (scénario 3) est présentée sur les figures 4.1 et 4.2. Ces figures montrent la projection dans le plan factoriel 1-2 des points représentant les modalités de l'alcalinité et celles de chacune des variables explicatives. L'examen de chacun de ces graphiques permet de décrire la nature de la liaison entre l'alcalinité et les variables explicatives. Si on examine en particulier le graphique montrant les variables superficie de résineux et superficie de feuillus (figure 4.1 a), on trouve une proximité entre les points AR1, AF3 et ALC6, entre les

Tableau 4.2 Tableaux de contingence obtenus en croisant les modalités de l'alcalinité avec celles des variables du milieu terrestre

		ALC					
		1	2	3	4	5	6
ALTL	1	0	0	3	2	4	5
	2	1	2	3	2	2	0
	3	5	4	0	2	0	0
ALTM	1	0	0	3	1	4	4
	2	1	2	3	3	2	1
	3	5	4	0	2	0	0
SBT	1	0	3	2	2	2	3
	2	4	0	1	4	2	1
	3	2	3	3	0	2	1
SL	1	1	3	2	2	1	4
	2	4	2	0	3	2	0
	3	1	1	4	1	3	1
PROF	1	2	3	2	3	0	2
	2	3	2	2	2	2	1
	3	1	1	2	1	4	2
SB	1	0	3	2	2	2	3
	2	5	0	1	4	1	1
	3	1	3	3	0	3	1
RBSL	1	1	1	3	1	5	1
	2	2	3	2	3	0	2
	3	3	2	1	2	1	2
ECCU	1	0	0	2	2	3	5
	2	1	2	3	3	3	0
	3	5	4	1	1	0	0
VL	1	3	3	1	3	0	2
	2	2	2	2	2	3	1
	3	1	1	3	1	3	2
TR	1	3	3	1	3	0	2
	2	3	2	3	2	1	1
	3	0	1	2	1	5	2
PENT	1	1	2	3	2	2	2
	2	2	1	2	3	3	1
	3	3	3	1	1	1	2
DSO4	1	2	1	5	2	2	0
	2	2	1	1	2	3	4
	3	2	4	0	2	1	1
CSO4	1	4	5	1	3	0	0
	2	2	1	4	1	2	1
	3	0	0	1	2	4	4
MSO4	1	5	4	3	1	0	0
	2	1	2	2	3	3	0
	3	0	0	1	2	3	5
AR	1	1	1	1	3	2	4
	2	0	3	5	0	3	1
	3	5	2	0	3	1	0
AF	1	4	3	2	2	1	0
	2	2	2	3	1	3	1
	3	0	1	1	3	2	4
ARBU	1	1	3	2	3	1	2
	2	3	1	1	1	4	2
	3	2	2	3	2	1	1

		ALC					
		1	2	3	4	5	6
PHH2	1	4	2	0	2	4	0
	2	2	3	3	2	2	0
	3	0	1	3	2	0	5
PHCA	1	4	3	0	2	3	0
	2	2	2	3	3	2	1
	3	0	1	3	1	1	4
CEC	1	1	1	4	3	2	1
	2	0	3	0	2	4	3
	3	5	2	2	1	0	1
GA	1	5	2	1	3	1	0
	2	1	4	5	1	1	0
	3	0	0	0	2	4	5
MG	1	1	3	3	1	3	1
	2	4	3	2	3	0	0
	3	1	0	1	2	3	4
K	1	3	3	3	2	1	0
	2	3	2	2	1	2	2
	3	0	1	1	3	3	3
NA	1	2	4	3	2	1	0
	2	3	1	1	2	2	3
	3	1	1	2	2	3	2
CORG	1	1	3	3	3	0	2
	2	1	0	2	2	5	2
	3	4	3	1	1	1	1
CCAL	1	1	4	5	2	0	0
	2	3	2	0	2	5	0
	3	2	0	1	2	1	5
FE	1	0	2	4	2	1	3
	2	3	3	1	1	3	1
	3	3	1	1	3	2	1
AL	1	0	2	4	2	1	3
	2	3	2	0	2	3	2
	3	3	2	2	2	2	0
STOT	1	2	2	3	2	2	1
	2	3	1	1	2	2	3
	3	1	3	2	2	2	1
SULF	1	1	3	1	2	1	4
	2	3	2	4	1	2	0
	3	2	1	1	3	3	1
SCAT	1	3	3	2	2	2	0
	2	3	3	2	2	1	1
	3	0	0	2	2	3	4
SATB	1	5	3	1	2	1	0
	2	1	2	4	2	2	1
	3	0	1	1	2	3	4
ALTR	1	4	3	1	2	6	0
	2	1	1	3	2	0	4
	3	1	2	2	2	0	1

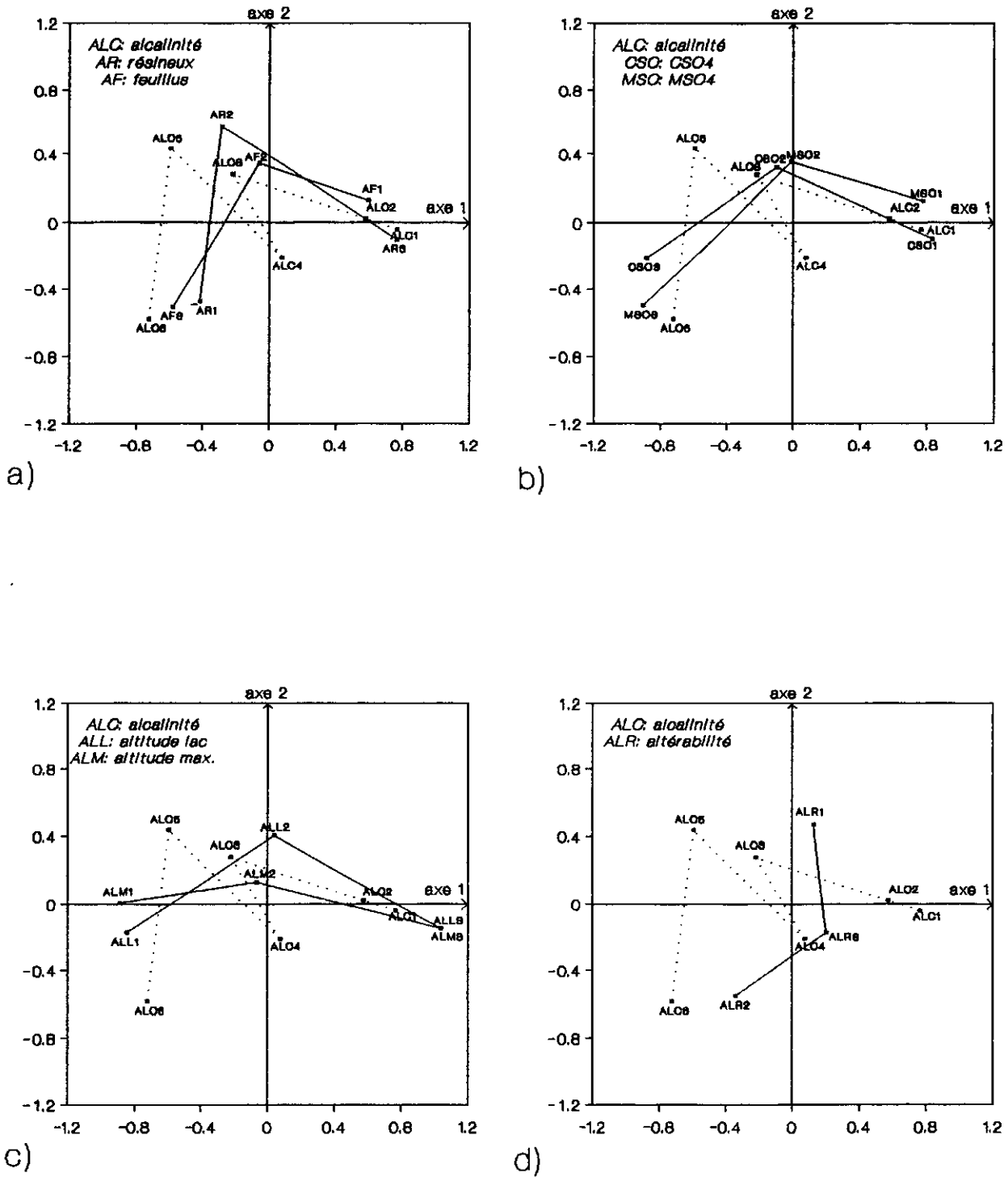


Figure 4.1 Représentation du plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical) montrant la relation de certaines variables du milieu terrestre avec l'alcalinité de l'eau dans les lacs

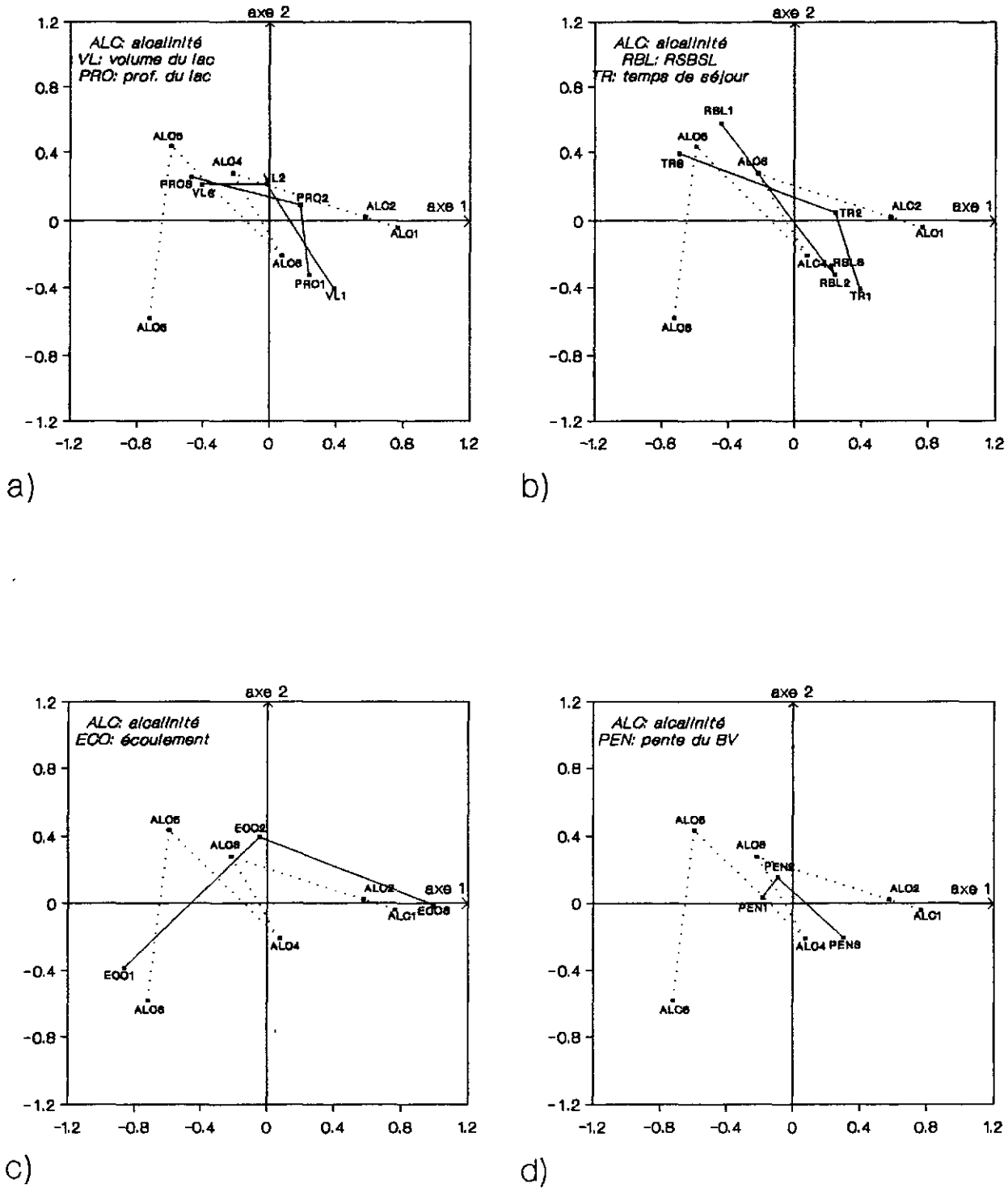


Figure 4.2 Représentation du plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical) montrant la relation de certaines variables du milieu terrestre avec l'alcalinité de l'eau dans les lacs

points AR2, AF2, ALC3 et ALC5, ainsi qu'entre les points AR3, AF1, ALC1 et ALC2. Cette proximité entre points est le résultat d'une fréquence plus grande que la valeur probable dans le tableau de contingence (cf Tableau 4.2). La force de la liaison se traduit donc par une similitude de parcours dans le plan factoriel. On peut de la sorte identifier les variables explicatives les plus pertinentes.

4.4 RÉSULTATS DE LA RÉGRESSION SUR LES FACTEURS DE L'AFC

On procède d'abord au calcul du tableau de régression en suivant la méthode décrite à la section 2.2.2. Au tableau analysé par l'AFC, on adjoint en colonnes supplémentaires le tableau binaire qui a servi initialement au calcul des tableaux de contingence. On rappelle que ce tableau binaire (rempli de 0 ou de 1) comprend 35 colonnes (lacs) et L lignes correspondant aux K variables séparées en trois modalités. On calcule ensuite les coordonnées factorielles de ces points supplémentaires par l'équation (1) donnée à la section 2.2.2. On obtient ainsi pour chacun des scénarios d'application définis précédemment (cf Section 4.1) un tableau de coordonnées factorielles comprenant 35 lignes (lacs) et p' colonnes (facteurs). C'est ce tableau de coordonnées factorielles qui sert de tableau de régression à partir duquel on applique la régression multiple usuelle pour prédire une valeur d'alcalinité ou de pH.

Les résultats du calcul des paramètres de la régression multiple sont présentés au tableau 4.3. On a retenu seulement les coefficients des deux premiers facteurs; un test de Student sur le coefficient du troisième facteur a montré que celui-ci n'était pas significativement différent de zéro au niveau de 5%.

Les valeurs de R^2 , qui indiquent la qualité de la prédiction, sont généralement élevées à la fois pour l'alcalinité et le pH (0,61 à 0,68) compte tenu de la variabilité naturelle intrinsèque au phénomène. Les prédictions sont légèrement meilleures pour le pH. En outre, on observe que le modèle de régression ne perd pas de qualité même si on élimine les variables de chimie des sols. Cette constatation est fort intéressante, car elle signifie que l'on peut prédire l'alcalinité ou le pH d'un lac inconnu en utilisant de l'information facilement disponible à partir de cartes géographiques.

Tableau 4.3 Paramètres de la régression multiple usuelle sur l'alcalinité et le pH pour différents scénarios

scénario	paramètre	variable à expliquer	
		alcalinité	pH
1	b_0	7,79	6,53
	b_1	-11,6	-0,975
	b_2	-6,20	0,029
	R^2	0,637	0,678
2	b_0	7,79	6,53
	b_1	-9,62	-0,878
	b_2	-9,43	0,317
	R^2	0,629	0,654
3	b_0	7,79	6,53
	b_1	-8,66	-0,792
	b_2	-8,78	-0,295
	R^2	0,610	0,656

Voir la section 4.1 pour la définition des scénarios d'application.

De plus, le modèle de régression conserve la même qualité de prédiction même si on élimine des variables du territoire telles que les superficies de lacs ou de bassins versants qui n'ont pratiquement pas de relation avec la minéralisation des eaux. À la limite, on pourrait envisager un quatrième scénario dans lequel on éliminerait certaines variables du territoire redondantes telles que l'altitude du lac ou l'altitude maximale du bassin versant, la superficie de résineux ou de feuillus, le volume ou la profondeur du lac etc. On peut supposer que la qualité de la prévision ne diminuerait que légèrement.

On peut donc considérer qu'en connaissant un certain nombre de variables clés du territoire, on peut prédire avec une certaine précision certaines variables de qualité de l'eau (en particulier l'alcalinité et le pH) sur d'autres lacs. Évidemment, ce modèle de régression a été calibré sur une région particulière; on pourrait cependant envisager qu'il pourrait être facilement calibré pour être étendu à d'autres territoires plus vastes du Bouclier Canadien.

5. CONCLUSION

On a effectué une analyse des interrelations entre variables de qualité de l'eau et variables du milieu terrestre sur un ensemble de données recueillies sur 35 systèmes lacs/bassins versants du réseau TADPA au Québec. Les variables du territoire qui ont été considérées sont des variables décrivant la physiographie du bassin versant, la météorologie, la végétation, la chimie des sols, la granulométrie des sols, la minéralogie des sols et la géologie de la roche en place. On a effectué une analyse des interrelations de ces groupes de variables avec les variables de qualité de l'eau en calculant les coefficients de corrélation de Spearman et en examinant les résultats de l'analyse en composantes principales appliquée sur la matrice de ces coefficients. Cette analyse ne pouvait être réalisée sans l'utilisation de méthodes statistiques adéquates qui permettent d'obtenir une vision globale et qui tiennent compte du type et de la nature des données.

Cette analyse a révélé la présence de relations importantes entre certaines variables du territoire et les variables de minéralisation des eaux. On a identifié

entre autres que l'altitude, la précipitation, le débit spécifique, la concentration de sulfates atmosphériques et la superficie de feuillus ou de résineux sont des variables très importantes dans l'explication de la minéralisation des eaux et par conséquent de la sensibilité à l'acidification. La chimie des horizons organiques BF et BHF des sols est également très importante, notamment la somme des cations, la saturation en bases, la capacité d'échange cationique, le pH de l'eau interstitielle, la teneur en calcium, en magnésium, en sodium et en potassium. Lorsqu'il y a sur le bassin versant une présence importante de l'horizon BHF, ces variables prendraient une importance encore plus grande, mais les échantillons de sols prélevés sont trop faibles pour permettre de le confirmer. En ce qui concerne les variables de granulométrie et de minéralogie des sols, on ne trouve pas de relations apparentes avec la qualité de l'eau à l'exception d'une certaine relation observée avec la présence de limon et d'épidote.

Dans cette étude, on a développé et élaboré un modèle de régression permettant de prédire certaines variables de qualité de l'eau à partir d'un certain nombre de caractéristiques du milieu terrestre. Il s'agit en fait d'une régression multiple usuelle appliquée sur les facteurs obtenus d'une analyse des correspondances. L'essentiel de l'information d'un grand nombre de variables terrestres se trouve réparti sur un nombre réduit de facteurs orthogonaux. L'utilisation des facteurs dans la régression multiple permet ainsi d'éviter les problèmes de collinéarité et d'homogénéité des variables. Ce modèle de régression a été appliqué à la prédiction des valeurs d'alcalinité et de pH de l'eau des lacs.

Compte tenu de la variabilité naturelle, on peut affirmer que la qualité de la prédiction (pourcentage de variance) du modèle de régression est très bonne à la fois pour l'alcalinité et le pH (0,64 et 0,68 respectivement) en considérant un grand nombre de variables biophysiques et de chimie des sols dans l'analyse des correspondances. En outre, on observe que le modèle de régression conserve la même qualité de prédiction même si on élimine de l'analyse des correspondances les variables de chimie des sols et d'autres variables biophysiques peu explicatives. On peut donc considérer qu'en connaissant un certain nombre de variables clés du territoire (facilement disponibles), on peut prédire avec une certaine précision

certaines variables de qualité de l'eau (en particulier l'alcalinité et le pH) sur d'autres lacs de la région d'étude. On peut envisager que ce modèle pourrait facilement être calibré pour être étendu à la prédiction de la qualité de l'eau (ou la sensibilité à l'acidification) d'autres régions ou territoires plus vastes du Bouclier Canadien.

6. BIBLIOGRAPHIE

ALTSHULLER, A.P. et G.A. McBEAN (1980). Deuxième rapport du groupe consultatif de recherche Etats-Unis - Canada sur le transport à grande distance de polluants atmosphériques. Environnement Canada, 39 p.

BOUCHARD, A. (1987).

Relations entre la géologie et la qualité de l'eau. Environnement Canada, direction des eaux intérieures, région du Québec, document interne, 14 p.

CAZES, P. (1980).

L'analyse de certains tableaux rectangulaires décomposés en blocs: Généralisation des propriétés rencontrés dans l'étude des correspondances multiples. II Questionnaires: variantes de codage et nouveaux calculs de contributions. Cahiers de l'Analyse des Données, 5: 387-403.

CAZES, P. (1983).

Analyse des correspondances multiples: application à l'étude des questionnaires. Bulletin no. 12, de l'A.D.D.A.D. (Tour 45-55-E2, 4, Place Jussieu, 75230 Paris, Cedex 05).

COWELL, D.W., A.E. LUCAS et C.D.A. RUBEC (1981).

The development of an ecological sensitivity rating for acid precipitation impact assessment. Environment Canada, Lands Directorate, working paper no 10, 42 p.

ENVIRONNEMENT CANADA (1988).

Les pluies acides: une évaluation nationale de la sensibilité. Fiche d'information sur l'environnement 88-1, Ottawa.

ÉTATS-UNIS - CANADA (1983).

Impact assessment work group 1, Memorandum of intent on transboundary air pollution. Final report January 1983, 626 p.

GOUVERNEMENT DU CANADA (1987).

Le système canadien de classification des sols. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa (Ont), publication 1646, seconde édition, 170 p.

GRIMARD, Y. (1984).

Réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec: sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1981- 1982- 1983. Ministère de l'Environnement du Québec, service de la qualité des eaux, rapport PA-11, Enviroduq 840595, 163 p.

HAEMMERLI, J. (1988).

Réseau TADPA-Québec: banque de données physico-chimiques 1983-1988. Environnement Canada, Conservation et Protection, Région du Québec.

HENDREY, G.R., J.N. GALLOWAY, S.A. NORTON, C.L. SCHOFIELD, P.W. SCHEFFER, D.A. BURNS (1980)

Geological and hydrochemichal sensitivity of the eastern United States to acid precipitation. Prepared for the USEPA Ecological effects division, Corvallis Environnement Research laboratory under EPA-DOE interagency agreement, Dept. of Energy and Environment, Brookhaven National Laboratory.

HUNSAKER, C.T., J.L. MALANCHUK, R.J. OLSON, S.W. CHRISTENSEN, ET R.S. TURNER. (1986)

Adirondack headwater lake chemistry relationships with watershed characteristics. Water Air Soil Pollut., 31: 79-88.

KING, M. ET W.C. HART (1988).

Determination of important terrestrial parameters for prediction of water quality in 35 Canadian Shield lakes. Prepared for the Department of Environment of Canada, Technical University of Nova Scotia, Centre for Water Resources Studies, Halifax, Internal Data Report 88-2.

KLOPATEK, J.M., W.F. HARRIS et R.J. OLSON (1980).

A regional ecological assessment approach to atmospheric deposition: effects on soil systems. Dans Shriner, D.S. et al. (éditeurs). Atmospheric Sulphur Deposition: Environment Impact and Health Effects, Ann Arbor Science Publishers Inc. Ann Arbor (Michigan), pp. 539-553.

LACHANCE, M. et D. GAMACHE (1985).

Sensibilité à l'acidification des lacs du bouclier canadien: analyse et interprétation de données géologiques et biophysiques de 158 bassins versants du sud du Québec. Environnement Canada, Direction générale des terres, document de travail no 41, 102 p. 3 annexes.

LEGENDRE, L. et P. LEGENDRE (1984). Ecologie numérique. 1. Le traitement des données écologiques. 2. La structure des données écologiques. Presses de l'Université du Québec, Québec, 2e édition.

LOUCKS, O.L., G.E. GLASS, J.A. SORESENSEN, B.W. LIUKKONEN, J. ALLERT ET G. RAPP Jr (1986).

Role of precipitation chemistry versus other watershed properties in Wisconsin lake acidification. Water Air Soil Pollut., 31: 67-77.

McFEE, W.W. (1980).

Sensitivity of soil to acid precipitation, USEPA-600/3-80-013. Corvallis Environmental Research Laboratory. Corvallis (Oregon), 186 p.

NORTON, S.A. (1980).

Geologic factors controlling the sensitivity of aquatic ecosystems to acidic precipitation. Dans Shriner, D.S. (éd.), Atmospheric sulfur deposition, Ann Arbor Science, Chap. 50, pp 521-531.

PARADIS, (1985), D. (1985).

Variabilité spatio-temporelle des précipitations acides sur le Québec méridional (1982-1983). Thèse de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, 221 p.

RAPP, G. Jr, J.D. ALLERT, B.W. LIUKKONEN, J.A. ILSE, O.L. LOUCKS et G.E. GLASS (1985).

Acid deposition and watershed characteristics in relation to lake chemistry in Northeastern Minnesota. Environ. International, 11: 425-440.

ROBERTS, D.J. T. LINDELL ET H. KVARNAS (1982).

Environmental factors governing regional lake water quality differences. Statens naturvordsverk SNVPM 1621, Avdelning/ Byra.

ROBITAILLE, G. (1980).

Acid precipitation and vegetation. Communication présentée au 73e congrès annuel de l'Association pour le Contrôle de la Pollution de l'air, juin 22-27, 1980. Montréal (Québec), 71p.

SHILTS, W.W., K.D. CARD, W.H. POOLE et B.V. SANDFORD (1981).

Sensibilité de la roche en place aux précipitations acides: modifications dues aux phénomènes glaciaires. Commission géologique du Canada, Etude 81-14, 7 p., 3 cartes.

WANG, C. et D.R. COOTE. (1980).

Sensitivity classification of agricultural land to long term acid precipitation in eastern Canada, Unpublished manuscript and map. 16 p.

Tableau A.1 Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de chimie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	pH	Ca	Mg	Na	K	NH3	AlcT
PHH2O	BF	0,403*	0,351*	0,314	0,100	0,057	-0,022	0,380*
	BHF	0,832**	0,848**	0,626**	0,241	0,476*	-0,121	0,836**
	BF+BHF	0,505**	0,448**	0,415*	0,142	0,155	-0,057	0,487**
	BC	0,049	0,041	0,058	-0,007	-0,119	-0,291	0,044
	C	-0,005	-0,066	0,019	-0,113	-0,294	0,138	0,009
	BC+C	0,178	0,139	0,149	0,016	-0,106	-0,142	0,159
PHCALC	BF	0,316	0,270	0,227	0,055	-0,011	0,039	0,283
	BHF	0,720**	0,770**	0,631**	0,437	0,531*	0,169	0,711**
	BF+BHF	0,413*	0,373*	0,367*	0,153	0,100	0,037	0,390*
	BC	0,095	0,091	0,127	-0,046	-0,078	-0,142	0,065
	C	-0,059	-0,111	-0,001	0,066	-0,250	0,289	-0,050
	BC+C	0,196	0,171	0,186	0,042	-0,025	0,015	0,165
CEC	BF	-0,245	-0,183	-0,189	-0,211	-0,036	0,185	-0,225
	BHF	-0,614**	-0,553*	-0,586**	-0,318	-0,476*	0,189	-0,575**
	BF+BHF	-0,333	-0,297	-0,315	-0,314	-0,156	0,149	-0,321
	BC	0,045	0,101	-0,013	-0,124	-0,174	0,070	0,034
	C	0,119	0,203	0,142	0,213	0,279	0,453*	0,120
	BC+C	0,130	0,162	0,081	0,009	0,047	0,159	0,129
CA	BF	0,647**	0,611**	0,651**	0,132	0,361*	-0,007	0,625**
	BHF	0,787**	0,765**	0,713**	0,409	0,371	0,220	0,749**
	BF+BHF	0,711**	0,695**	0,675**	0,104	0,407*	-0,038	0,690**
	BC	0,537**	0,561**	0,610**	0,280	0,347	0,099	0,501**
	C	0,586**	0,618**	0,612**	0,482*	0,604**	0,444*	0,548**
	BC+C	0,656**	0,674**	0,673**	0,403*	0,506**	0,168	0,618**
MG	BF	0,349*	0,312	0,291	0,027	0,156	0,362*	0,295
	BHF	0,804**	0,763**	0,817**	0,501*	0,481*	0,377	0,756**
	BF+BHF	0,448**	0,422*	0,391*	0,081	0,242	0,352*	0,397*
	BC	0,425*	0,476**	0,416*	0,101	0,254	0,374*	0,429*
	C	0,474*	0,449*	0,518**	0,541**	0,476*	0,455*	0,429*
	BC+C	0,444**	0,456**	0,434*	0,233	0,325	0,472**	0,414*
K	BF	0,512**	0,476**	0,444**	0,240	0,476**	0,277	0,477**
	BHF	0,765**	0,700**	0,628**	0,213	0,575**	0,007	0,698**
	BF+BHF	0,551**	0,515**	0,465**	0,252	0,495**	0,283	0,512**
	BC	0,512**	0,498**	0,443*	0,274	0,559**	0,393*	0,491**
	C	0,474*	0,477*	0,409*	0,401*	0,646**	0,284	0,429*
	BC+C	0,484**	0,481**	0,452**	0,348*	0,564**	0,377*	0,452**
NA	BF	0,340*	0,281	0,269	0,152	0,245	0,258	0,299
	BHF	0,366	0,365	0,208	-0,085	0,119	-0,368	0,354
	BF+BHF	0,370*	0,321	0,313	0,186	0,313	0,228	0,332
	BC	0,379*	0,336	0,277	0,032	0,382*	0,273	0,364
	C	0,395*	0,337	0,342	0,105	0,364	0,180	0,331
	BC+C	0,362*	0,342*	0,302	0,096	0,370*	0,346*	0,338

Tableau A.1 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de chimie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	pH	Ca	Mg	Na	K	NH3	AlcT
CARBO	BF	-0,014	0,047	0,016	-0,230	0,121	-0,055	-0,003
	BHF	-0,419	-0,363	-0,431	-0,274	-0,336	0,166	-0,435
	BF+BHF	-0,234	-0,172	-0,267	-0,332	-0,073	0,014	-0,222
	BC	0,152	0,172	0,028	-0,012	-0,055	-0,084	0,137
	C	0,254	0,305	0,251	-0,014	0,125	-0,161	0,231
	BC+C	0,147	0,151	0,091	0,005	-0,029	-0,221	0,137
CARBCA	BF	0,352*	0,299	0,174	-0,137	0,106	0,096	0,314
	BHF	-0,253	-0,290	-0,369	-0,196	-0,416	-0,132	-0,286
	BF+BHF	0,383*	0,329	0,219	-0,067	0,121	0,136	0,338*
	BC	0,057	-0,027	-0,087	-0,181	-0,077	0,158	0,010
	C	0,036	0,013	-0,189	-0,081	0,084	0,348	-0,030
	BC+C	0,048	-0,015	-0,143	-0,135	-0,021	0,355*	-0,009
FE	BF	-0,110	-0,095	-0,019	-0,073	0,017	-0,208	-0,103
	BHF	-0,161	-0,179	-0,287	-0,285	-0,056	-0,014	-0,138
	BF+BHF	-0,224	-0,200	-0,204	-0,220	-0,119	-0,139	-0,220
	BC	-0,129	-0,118	-0,110	0,027	0,022	0,171	-0,137
	C	0,289	0,344	0,261	0,061	0,369	-0,177	0,271
	BC+C	-0,026	-0,007	-0,037	-0,133	0,102	-0,065	-0,031
AL	BF	-0,195	-0,151	-0,065	-0,014	0,013	-0,073	-0,175
	BHF	-0,232	-0,156	-0,270	-0,095	-0,125	0,208	-0,221
	BF+BHF	-0,360*	-0,304	-0,316	-0,163	-0,154	0,011	-0,350*
	BC	-0,201	-0,195	-0,217	0,027	-0,147	0,096	-0,206
	C	0,089	0,156	0,066	0,022	0,136	-0,132	0,102
	BC+C	-0,149	-0,133	-0,140	-0,021	-0,065	-0,036	-0,138
STOTAL	BF	-0,018	-0,006	0,019	0,249	-0,051	0,307	-0,026
	BHF	0,500	0,500	-0,205	0,205	0,718	0,500	0,300
	BF+BHF	-0,047	-0,057	-0,045	0,167	-0,078	0,290	-0,059
	BC	0,070	0,036	0,295	0,748*	0,195	-0,243	0,140
	C	0,211	0,000	0,400	-0,258	-0,600	-0,400	0,000
	BC+C	-0,074	-0,079	0,066	0,213	-0,066	-0,342	-0,036
SULF	BF	-0,145	-0,140	-0,109	-0,062	-0,247	-0,115	-0,165
	BHF	0,700	0,700	0,821	0,718	0,051	0,700	0,600
	BF+BHF	-0,135	-0,125	-0,102	-0,095	-0,272	-0,130	-0,157
	BC	0,468	0,455	0,411	0,193	-0,347	-0,527	0,394
	C	-0,105	-0,400	0,200	-0,258	-0,800	0,000	-0,400
	BC+C	0,205	0,156	0,126	-0,051	-0,500	-0,367	0,125
SCATIO	BF	0,572**	0,507**	0,514**	0,069	0,270	0,147	0,523**
	BHF	0,853**	0,788**	0,766**	0,418	0,480*	0,219	0,809**
	BF+BHF	0,683**	0,636**	0,593**	0,068	0,370*	0,068	0,632**
	BC	0,572**	0,595**	0,535**	0,224	0,409*	0,347	0,548**
	C	0,648**	0,636**	0,667**	0,554**	0,660**	0,426*	0,606**
	BC+C	0,632**	0,631**	0,622**	0,340*	0,513**	0,325	0,588**

Tableau A.1 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de chimie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	pH	Ca	Mg	Na	K	NH3	AlcT
SATB	BF	0,628**	0,569**	0,554**	0,216	0,376*	0,153	0,579**
	BHF	0,828**	0,792**	0,711**	0,408	0,426	0,178	0,786**
	BF+BHF	0,725**	0,695**	0,630**	0,234	0,467**	0,103	0,686**
	BC	0,560**	0,530**	0,554**	0,263	0,458*	0,183	0,540**
	C	0,474*	0,413*	0,549**	0,452*	0,462*	0,439*	0,430*
	BC+C	0,559**	0,524**	0,565**	0,315	0,453**	0,302	0,519**
VAR.	HOR.	AlcG	SO4CO	SO4CI	Ca+Mg	Cl	NO3	SiO2
PHH2O	BF	0,364*	0,305	0,343*	0,366*	0,054	-0,237	-0,031
	BHF	0,836**	0,676**	0,715**	0,847**	0,225	-0,157	-0,338
	BF+BHF	0,473**	0,318	0,369*	0,460**	0,100	-0,250	-0,007
	BC	0,026	0,055	0,111	0,051	-0,182	-0,217	0,011
	C	-0,016	-0,004	-0,012	-0,032	-0,060	-0,136	0,167
	BC+C	0,144	0,121	0,150	0,153	-0,008	-0,152	-0,010
PHCALC	BF	0,266	0,297	0,323	0,288	-0,013	-0,301	-0,009
	BHF	0,697**	0,802**	0,828**	0,802**	0,315	-0,272	-0,189
	BF+BHF	0,373*	0,362*	0,395*	0,397*	0,061	-0,353*	0,028
	BC	0,046	0,252	0,279	0,118	-0,009	-0,119	-0,051
	C	-0,070	-0,057	-0,064	-0,078	0,050	-0,067	0,332
	BC+C	0,147	0,250	0,266	0,194	0,095	-0,159	-0,000
CEC	BF	-0,224	-0,004	-0,078	-0,181	0,100	0,055	-0,087
	BHF	-0,593**	-0,464*	-0,514*	-0,554*	-0,105	-0,189	0,365
	BF+BHF	-0,317	-0,061	-0,117	-0,290	-0,049	0,006	-0,153
	BC	0,044	0,072	0,015	0,082	0,027	0,294	0,102
	C	0,112	0,309	0,234	0,191	0,400*	0,207	-0,312
	BC+C	0,136	0,124	0,081	0,155	0,127	0,154	-0,156
CA	BF	0,613**	0,616**	0,641**	0,635**	0,280	-0,244	-0,345*
	BHF	0,747**	0,820**	0,827**	0,781**	0,427	0,153	0,022
	BF+BHF	0,684**	0,697**	0,713**	0,705**	0,312	-0,201	-0,357*
	BC	0,498**	0,658**	0,674**	0,582**	0,239	-0,037	-0,258
	C	0,553**	0,702**	0,679**	0,629**	0,388	0,225	-0,294
	BC+C	0,622**	0,712**	0,715**	0,693**	0,388*	-0,050	-0,286
MG	BF	0,305	0,224	0,180	0,315	0,386*	0,057	-0,030
	BHF	0,763**	0,799**	0,775**	0,794**	0,510*	0,310	0,009
	BF+BHF	0,405*	0,312	0,266	0,422*	0,465**	0,074	-0,042
	BC	0,429*	0,375*	0,315	0,477**	0,470*	-0,025	0,100
	C	0,431*	0,374	0,357	0,481*	0,406*	0,048	0,042
	BC+C	0,420*	0,415*	0,359*	0,476**	0,469**	-0,028	0,035

Tableau A.1 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de chimie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	AlcG	SO4CO	SO4CI	Ca+Mg	Cl	NO3	SiO2
K	BF	0,485**	0,290	0,261	0,471**	0,539**	0,102	-0,074
	BHF	0,723**	0,572*	0,567*	0,688**	0,304	0,310	-0,258
	BF+BHF	0,520**	0,320	0,289	0,507**	0,549**	0,131	-0,063
	BC	0,496**	0,335	0,307	0,498**	0,548**	0,073	-0,151
	C	0,437*	0,374	0,354	0,461*	0,227	0,223	-0,271
	BC+C	0,454**	0,385*	0,350*	0,481**	0,445**	0,151	-0,128
NA	BF	0,302	0,098	0,087	0,276	0,321	0,143	0,054
	BHF	0,386	0,167	0,201	0,318	-0,272	0,154	-0,402
	BF+BHF	0,334	0,107	0,099	0,313	0,375*	0,142	0,046
	BC	0,366	0,131	0,110	0,334	0,313	-0,011	-0,227
	C	0,344	0,268	0,227	0,343	0,194	0,090	-0,051
	BC+C	0,338	0,232	0,194	0,341*	0,307	0,094	-0,057
CARBO	BF	0,014	0,126	0,066	0,034	0,114	0,135	-0,276
	BHF	-0,419	-0,150	-0,204	-0,398	-0,022	-0,182	0,320
	BF+BHF	-0,209	0,049	-0,013	-0,186	-0,085	0,160	-0,319
	BC	0,162	-0,046	-0,058	0,140	-0,085	0,143	-0,005
	C	0,245	0,384	0,396*	0,305	0,085	-0,084	-0,163
	BC+C	0,158	0,004	0,009	0,139	-0,122	0,061	-0,104
CARBCA	BF	0,328	0,218	0,218	0,297	0,170	-0,169	-0,103
	BHF	-0,253	-0,278	-0,293	-0,352	-0,265	0,274	0,025
	BF+BHF	0,352*	0,247	0,247	0,328	0,228	-0,163	-0,056
	BC	0,045	-0,186	-0,177	-0,038	-0,048	0,121	0,001
	C	-0,040	0,080	0,024	-0,001	0,103	0,193	-0,074
	BC+C	0,001	-0,102	-0,137	-0,025	0,060	0,179	0,094
FE	BF	-0,081	-0,203	-0,213	-0,101	0,061	0,264	-0,033
	BHF	-0,159	-0,252	-0,276	-0,170	-0,174	-0,172	0,076
	BF+BHF	-0,199	-0,181	-0,209	-0,209	-0,058	0,272	-0,149
	BC	-0,107	-0,348	-0,400*	-0,137	-0,017	0,249	0,210
	C	0,280	0,360	0,345	0,329	0,130	0,027	-0,426*
	BC+C	-0,001	-0,154	-0,211	-0,014	-0,012	0,202	-0,190
AL	BF	-0,175	-0,238	-0,259	-0,143	0,028	0,106	0,076
	BHF	-0,247	-0,055	-0,098	-0,135	0,005	-0,423	-0,001
	BF+BHF	-0,345*	-0,215	-0,257	-0,298	-0,093	0,083	-0,096
	BC	-0,190	-0,368*	-0,380*	-0,214	-0,108	0,255	0,268
	C	0,100	0,070	0,068	0,130	0,073	0,002	-0,369
	BC+C	-0,125	-0,266	-0,276	-0,146	-0,149	0,223	-0,029
STOTAL	BF	-0,022	0,150	0,153	0,013	0,003	0,034	0,125
	BHF	0,500	-0,300	-0,300	0,300	-0,577	0,300	-0,500
	BF+BHF	-0,050	0,095	0,097	-0,041	-0,072	0,060	0,081
	BC	0,140	-0,040	0,122	0,103	0,217	-0,338	0,182
	C	0,000	0,200	0,200	0,000	-0,316	-0,200	0,400
	BC+C	-0,044	-0,173	-0,051	-0,046	-0,060	-0,244	0,194

Tableau A.1 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de chimie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	AlcG	S04CO	S04CI	Ca+Mg	Cl	N03	Si02
SULF	BF	-0,166	-0,031	-0,040	-0,121	-0,147	-0,166	0,022
	BHF	0,700	0,900*	0,900*	0,600	0,577	0,000	-0,100
	BF+BHF	-0,158	-0,003	-0,008	-0,105	-0,158	-0,212	0,020
	BC	0,394	0,353	0,394	0,479	-0,055	-0,313	0,309
	C	-0,400	0,400	0,400	-0,400	-0,632	0,400	0,200
	BC+C	0,130	0,097	0,165	0,165	-0,184	-0,128	0,235
SCATIO	BF	0,525**	0,413*	0,413*	0,521**	0,356*	-0,131	-0,273
	BHF	0,805**	0,802**	0,819**	0,812**	0,421	0,219	-0,050
	BF+BHF	0,639**	0,548**	0,550**	0,637**	0,388*	-0,067	-0,308
	BC	0,549**	0,513**	0,481**	0,599**	0,459*	-0,028	-0,181
	C	0,612**	0,580**	0,563**	0,654**	0,421*	0,128	-0,154
	BC+C	0,596**	0,585**	0,558**	0,649**	0,444**	-0,035	-0,171
SATB	BF	0,579**	0,441**	0,458**	0,579**	0,391*	-0,045	-0,214
	BHF	0,785**	0,791**	0,798**	0,798**	0,387	0,227	-0,051
	BF+BHF	0,686**	0,558**	0,572**	0,695**	0,441**	-0,040	-0,203
	BC	0,532**	0,432*	0,437*	0,543**	0,367	-0,206	-0,237
	C	0,435*	0,421*	0,414*	0,446*	0,287	0,070	0,006
	BC+C	0,514**	0,490**	0,482**	0,546**	0,426*	-0,147	-0,113
VAR.	HOR.	Doc	Dic	Coul.	Cond.	Al	Mn	Fe
PHH2O	BF	-0,006	0,316	-0,165	0,333	-0,374*	-0,309	-0,297
	BHF	-0,233	0,794**	-0,552*	0,786**	-0,801**	-0,557*	-0,730**
	BF+BHF	-0,019	0,431**	-0,199	0,422*	-0,477**	-0,408*	-0,378*
	BC	0,038	0,005	-0,003	0,022	-0,157	-0,173	-0,076
	C	0,101	-0,067	0,029	-0,060	0,004	0,093	0,193
	BC+C	0,017	0,115	-0,055	0,118	-0,219	-0,177	-0,053
PHCALC	BF	0,004	0,240	-0,117	0,261	-0,319	-0,267	-0,245
	BHF	-0,059	0,757**	-0,343	0,809**	-0,617**	-0,596**	-0,712**
	BF+BHF	0,036	0,361*	-0,111	0,373*	-0,405*	-0,382*	-0,319
	BC	0,108	0,040	0,053	0,098	-0,082	-0,245	-0,106
	C	0,183	-0,075	0,174	-0,085	0,111	0,102	0,277
	BC+C	0,129	0,144	0,068	0,172	-0,173	-0,203	-0,077
CEC	BF	0,282	-0,137	0,344*	-0,139	0,362*	0,264	0,301
	BHF	0,391	-0,526*	0,510*	-0,547*	0,701**	0,674**	0,628**
	BF+BHF	0,182	-0,269	0,238	-0,251	0,416*	0,368*	0,293
	BC	-0,139	0,027	-0,085	0,107	0,055	0,141	-0,045
	C	0,243	0,220	0,271	0,245	0,129	-0,089	0,017
	BC+C	-0,009	0,181	0,023	0,189	0,028	-0,028	-0,075

Tableau A.1 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de chimie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	Doc	Dic	Coul.	Cond.	Al	Mn	Fe
CA	BF	0,025	0,611**	-0,117	0,624**	-0,552**	-0,550**	-0,468**
	BHF	-0,205	0,762**	-0,351	0,831**	-0,679**	-0,676**	-0,726**
	BF+BHF	-0,005	0,679**	-0,151	0,699**	-0,608**	-0,528**	-0,523**
	BC	-0,001	0,469*	-0,082	0,585**	-0,392*	-0,582**	-0,475**
	C	0,184	0,574**	0,176	0,645**	-0,350	-0,465*	-0,351
	BC+C	0,113	0,623**	0,015	0,698**	-0,461**	-0,571**	-0,479**
MG	BF	0,011	0,320	0,064	0,325	-0,175	-0,207	-0,221
	BHF	-0,039	0,723**	-0,193	0,829**	-0,681**	-0,747**	-0,674**
	BF+BHF	0,025	0,409*	0,053	0,427*	-0,248	-0,253	-0,283
	BC	0,191	0,441*	0,129	0,505**	-0,143	-0,276	-0,281
	C	0,102	0,462*	0,085	0,485*	-0,324	-0,498**	-0,305
	BC+C	0,167	0,455**	0,130	0,499**	-0,208	-0,320	-0,264
K	BF	0,088	0,485**	0,055	0,463**	-0,231	-0,377*	-0,303
	BHF	-0,228	0,623**	-0,403	0,665**	-0,775**	-0,713**	-0,658**
	BF+BHF	0,071	0,518**	0,024	0,498**	-0,268	-0,403*	-0,335*
	BC	0,089	0,522**	0,015	0,500**	-0,311	-0,446*	-0,348
	C	-0,062	0,432*	-0,054	0,458*	-0,408*	-0,491*	-0,497**
	BC+C	0,083	0,462**	0,070	0,480**	-0,320	-0,440**	-0,352*
NA	BF	-0,081	0,285	-0,104	0,267	-0,212	-0,246	-0,278
	BHF	-0,398	0,258	-0,449	0,268	-0,461*	-0,218	-0,313
	BF+BHF	-0,034	0,320	-0,064	0,299	-0,253	-0,264	-0,263
	BC	-0,065	0,371*	-0,141	0,323	-0,385*	-0,289	-0,285
	C	-0,229	0,311	-0,263	0,329	-0,491*	-0,313	-0,428*
	BC+C	0,003	0,329	-0,047	0,337	-0,356*	-0,221	-0,242
CARBO	BF	0,067	0,047	0,108	0,066	0,110	0,095	0,035
	BHF	0,174	-0,414	0,355	-0,350	0,482*	0,531*	0,330
	BF+BHF	0,023	-0,199	0,073	-0,150	0,303	0,331	0,144
	BC	-0,327	0,111	-0,283	0,159	-0,192	0,003	-0,194
	C	-0,252	0,223	-0,233	0,327	-0,251	-0,221	-0,389*
	BC+C	-0,331	0,136	-0,308	0,160	-0,189	-0,172	-0,259
CARBCA	BF	-0,097	0,319	-0,188	0,281	-0,197	-0,204	-0,314
	BHF	-0,324	-0,429	-0,010	-0,369	0,217	0,398	0,151
	BF+BHF	-0,091	0,342*	-0,167	0,310	-0,216	-0,237	-0,323
	BC	-0,152	0,012	-0,096	-0,042	-0,081	-0,028	-0,031
	C	-0,061	0,035	-0,094	0,016	-0,002	-0,049	-0,096
	BC+C	-0,126	0,036	-0,090	-0,018	-0,043	-0,055	-0,065
FE	BF	0,014	-0,079	0,135	-0,088	0,186	0,028	0,169
	BHF	0,231	-0,104	0,046	-0,162	0,266	0,104	0,198
	BF+BHF	-0,017	-0,203	0,063	-0,180	0,313	0,176	0,188
	BC	0,089	-0,164	0,163	-0,136	0,202	0,165	0,232
	C	-0,078	0,306	-0,109	0,342	-0,215	-0,295	-0,369
	BC+C	0,011	-0,037	0,057	-0,012	0,095	0,109	0,091

Tableau A.1 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de chimie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	Doc	Dic	Coul.	Cond.	Al	Mn	Fe
AL	BF	0,140	-0,135	0,179	-0,143	0,148	-0,004	0,232
	BHF	0,336	-0,190	0,286	-0,150	0,272	0,300	0,189
	BF+BHF	0,071	-0,319	0,126	-0,273	0,312	0,266	0,260
	BC	-0,076	-0,235	-0,009	-0,197	0,134	0,116	0,195
	C	-0,125	0,148	-0,138	0,157	-0,045	-0,175	-0,293
	BC+C	-0,114	-0,129	-0,079	-0,123	0,108	0,010	0,062
STOTAL	BF	0,088	-0,041	0,096	0,042	0,080	-0,113	0,050
	BHF	-0,200	-0,200	-0,872	-0,205	-0,900*	-0,100	-0,400
	BF+BHF	0,026	-0,089	0,031	-0,019	0,092	-0,058	0,059
	BC	-0,170	0,290	-0,028	0,043	-0,243	-0,293	0,195
	C	-0,600	0,000	-0,600	0,000	-0,211	0,105	-0,200
	BC+C	-0,246	0,039	-0,193	-0,115	-0,157	-0,110	0,115
SULF	BF	-0,126	-0,150	-0,113	-0,126	-0,074	0,038	-0,007
	BHF	0,500	0,500	0,410	0,821	-0,300	-0,200	-0,800
	BF+BHF	-0,123	-0,136	-0,112	-0,106	-0,087	0,032	-0,040
	BC	-0,697*	0,334	-0,617	0,418	-0,673*	-0,267	-0,358
	C	-0,800	-0,400	-0,800	-0,400	0,105	-0,211	-0,400
	BC+C	-0,708**	0,077	-0,639*	0,090	-0,447	-0,197	-0,336
SCATIO	BF	-0,047	0,510**	-0,098	0,513**	-0,425*	-0,414*	-0,433**
	BHF	-0,205	0,788**	-0,399	0,837**	-0,747**	-0,808**	-0,754**
	BF+BHF	-0,093	0,613**	-0,159	0,628**	-0,543**	-0,441**	-0,540**
	BC	0,068	0,553**	-0,012	0,618**	-0,316	-0,477**	-0,463*
	C	0,048	0,619**	0,022	0,657**	-0,498**	-0,599**	-0,484*
	BC+C	0,089	0,602**	0,009	0,666**	-0,415*	-0,514**	-0,480**
SATB	BF	-0,036	0,557**	-0,108	0,566**	-0,454**	-0,472**	-0,488**
	BHF	-0,277	0,758**	-0,460*	0,810**	-0,763**	-0,744**	-0,742**
	BF+BHF	-0,034	0,672**	-0,132	0,683**	-0,554**	-0,508**	-0,559**
	BC	0,050	0,521**	-0,050	0,545**	-0,387*	-0,582**	-0,449*
	C	0,022	0,416*	0,032	0,438*	-0,411*	-0,490*	-0,356
	BC+C	0,073	0,515**	0,028	0,539**	-0,425*	-0,504**	-0,408*

Nombre d'échantillons: horizons BF-----N=35

BHF-----N=19 sauf STOT et SULF: N= 5

BF+BHF---N=35

BC-----N=29 sauf STOT et SULF: N=10

C-----N=26 sauf STOT et SULF: N= 4

BC+C----N=34 sauf STOT et SULF: N=14

* significativement différent de zéro au niveau de 5%

** significativement différent de zéro au niveau de 1%

Tableau A.2 Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de granulométrie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	pH	Ca	Mg	Na	K	NH3	AlcT
GRAVIE	BF	-0,410*	-0,435**	-0,327	-0,053	-0,299	-0,218	-0,403*
GRAVIE	BHF	-0,612**	-0,572*	-0,456*	-0,016	-0,342	-0,066	-0,528*
GRAVIE	BF+BHF	-0,405*	-0,414*	-0,307	0,005	-0,250	-0,181	-0,389*
GRAVIE	BC	-0,225	-0,248	-0,157	-0,063	0,006	0,021	-0,203
GRAVIE	C	-0,062	-0,128	-0,125	0,173	-0,228	0,128	-0,145
GRAVIE	BC+C	-0,298	-0,359*	-0,318	-0,094	-0,171	0,031	-0,345*
SABLE	BF	0,096	0,130	0,050	0,060	0,204	0,046	0,113
SABLE	BHF	0,451	0,479*	0,308	-0,073	0,077	-0,035	0,396
SABLE	BF+BHF	0,021	0,053	-0,078	-0,072	0,067	0,042	0,021
SABLE	BC	0,272	0,278	0,147	-0,111	0,125	-0,211	0,240
SABLE	C	0,062	0,094	0,105	-0,318	0,171	-0,309	0,108
SABLE	BC+C	0,267	0,292	0,221	-0,122	0,201	-0,125	0,288
STG	BF	-0,279	-0,264	-0,250	-0,046	0,035	0,242	-0,269
STG	BHF	-0,211	-0,230	-0,032	0,104	-0,289	0,062	-0,119
STG	BF+BHF	-0,278	-0,270	-0,235	-0,063	0,048	0,166	-0,250
STG	BC	-0,147	-0,194	-0,137	-0,244	-0,061	-0,216	-0,145
STG	C	0,033	-0,032	0,041	-0,015	-0,116	-0,057	-0,017
STG	BC+C	-0,042	-0,114	-0,063	-0,170	-0,132	-0,203	-0,074
SG	BF	0,037	0,047	0,075	0,055	0,265	0,231	0,045
SG	BHF	-0,116	-0,102	0,045	-0,083	-0,315	0,035	-0,075
SG	BF+BHF	-0,113	-0,099	-0,080	-0,055	0,129	0,249	-0,102
SG	BC	-0,015	-0,057	-0,027	-0,260	-0,121	-0,193	-0,030
SG	C	0,094	0,063	0,199	0,129	0,015	-0,067	0,082
SG	BC+C	0,066	0,004	0,075	-0,084	-0,023	-0,089	0,040
SM	BF	0,225	0,259	0,280	0,212	0,296	0,230	0,237
SM	BHF	0,105	0,137	0,082	0,095	0,024	0,351	0,070
SM	BF+BHF	0,181	0,228	0,203	0,162	0,272	0,249	0,192
SM	BC	0,149	0,168	0,085	-0,271	0,160	-0,319	0,134
SM	C	0,245	0,160	0,251	0,045	-0,062	-0,074	0,197
SM	BC+C	0,230	0,218	0,188	-0,091	0,182	-0,116	0,222
SF	BF	0,040	0,107	0,025	0,264	0,081	0,027	0,069
SF	BHF	0,284	0,319	0,054	-0,109	0,226	-0,026	0,225
SF	BF+BHF	0,046	0,105	-0,053	0,168	0,049	0,014	0,062
SF	BC	0,081	0,105	0,055	0,078	0,126	0,108	0,056
SF	C	0,054	0,092	0,076	-0,277	0,189	-0,152	0,106
SF	BC+C	0,126	0,166	0,118	0,010	0,175	0,059	0,148
STF	BF	-0,045	-0,067	-0,105	-0,267	-0,256	-0,220	-0,058
STF	BHF	0,102	0,012	-0,072	-0,229	0,022	-0,372	0,019
STF	BF+BHF	-0,022	-0,070	-0,090	-0,261	-0,261	-0,234	-0,047
STF	BC	-0,057	-0,033	-0,051	0,148	-0,131	0,130	-0,061
STF	C	-0,099	-0,016	-0,087	-0,125	0,106	-0,064	-0,007
STF	BC+C	0,036	0,106	0,083	0,119	0,002	0,066	0,084

Tableau A.2 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de granulométrie des sols pour différents horizons.

VAR	HOR.	pH	Ca	Mg	Na	K	NH3	AlcT
LIMON	BF	0,315	0,292	0,312	-0,002	-0,055	0,059	0,301
LIMON	BHF	0,354	0,293	0,279	0,104	0,404	-0,029	0,293
LIMON	BF+BHF	0,434**	0,404*	0,416*	0,052	0,007	0,009	0,401*
LIMON	BC	-0,117	-0,091	0,030	0,396*	-0,213	0,376*	-0,115
LIMON	C	-0,094	-0,079	-0,059	0,080	-0,187	0,209	-0,061
LIMON	BC+C	-0,100	-0,040	0,036	0,294	-0,223	0,234	-0,070
ARGILE	BF	-0,011	-0,010	0,085	0,102	0,019	0,235	0,001
ARGILE	BHF	-0,642**	-0,590**	-0,484*	-0,045	-0,367	0,338	-0,633**
ARGILE	BF+BHF	-0,032	-0,032	0,082	0,109	-0,012	0,252	-0,022
ARGILE	BC	0,021	0,037	0,319	0,452*	0,283	0,328	0,014
ARGILE	C	0,110	0,025	0,097	0,393*	-0,042	0,311	0,113
ARGILE	BC+C	-0,032	-0,071	0,106	0,339	0,043	0,364*	-0,042
VAR.	HOR.	AlcG	SO4CO	SO4CI	Ca+Mg	Cl	NO3	SiO2
GRAVIE	BF	-0,396*	-0,459**	-0,446**	-0,415*	-0,182	-0,139	0,041
GRAVIE	BHF	-0,537*	-0,657**	-0,681**	-0,600**	-0,248	-0,116	0,227
GRAVIE	BF+BHF	-0,382*	-0,473**	-0,470**	-0,399*	-0,144	-0,112	0,110
GRAVIE	BC	-0,197	-0,399*	-0,420*	-0,255	-0,056	0,276	-0,224
GRAVIE	C	-0,113	-0,241	-0,183	-0,128	-0,068	0,215	0,234
GRAVIE	BC+C	-0,325	-0,422*	-0,402*	-0,361*	-0,187	0,235	-0,058
SABLE	BF	0,116	0,023	0,003	0,114	0,006	0,120	-0,041
SABLE	BHF	0,395	0,451	0,440	0,484*	0,180	-0,013	-0,309
SABLE	BF+BHF	0,021	0,036	0,010	0,035	-0,038	0,142	-0,124
SABLE	BC	0,234	0,388*	0,415*	0,284	0,122	-0,209	-0,001
SABLE	C	0,080	0,125	0,078	0,091	-0,065	-0,206	-0,284
SABLE	BC+C	0,269	0,347*	0,330	0,290	0,131	-0,186	-0,116
STG	BF	-0,263	-0,246	-0,304	-0,255	0,035	0,194	-0,011
STG	BHF	-0,125	-0,378	-0,395	-0,226	0,006	0,116	0,375
STG	BF+BHF	-0,246	-0,311	-0,364*	-0,263	0,077	0,178	0,060
STG	BC	-0,139	-0,310	-0,327	-0,195	-0,089	0,057	-0,372*
STG	C	0,000	-0,176	-0,149	-0,032	-0,090	0,162	-0,113
STG	BC+C	-0,064	-0,189	-0,170	-0,110	-0,110	0,096	-0,295
SG	BF	0,047	-0,018	-0,065	0,057	0,212	0,109	-0,111
SG	BHF	-0,086	-0,315	-0,356	-0,081	0,064	0,060	0,189
SG	BF+BHF	-0,103	-0,135	-0,203	-0,092	0,150	0,183	-0,091
SG	BC	-0,028	-0,056	-0,039	-0,043	-0,130	-0,011	-0,279
SG	C	0,083	-0,101	-0,082	0,076	0,002	0,070	-0,063
SG	BC+C	0,049	-0,031	-0,017	0,018	-0,088	-0,006	-0,306

Tableau A.2 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de granulométrie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	AlcG	S04CO	S04CI	Ca+Mg	Cl	NO3	SiO2
SM	BF	0,228	0,244	0,209	0,271	0,257	0,009	-0,187
SM	BHF	0,037	0,162	0,114	0,184	0,110	-0,233	-0,291
SM	BF+BHF	0,180	0,265	0,215	0,237	0,257	0,014	-0,264
SM	BC	0,132	0,278	0,294	0,182	-0,019	-0,049	-0,344
SM	C	0,194	-0,004	0,018	0,188	0,021	0,043	-0,004
SM	BC+C	0,215	0,201	0,192	0,233	0,040	-0,107	-0,192
SF	BF	0,069	-0,007	-0,012	0,087	0,108	0,141	0,243
SF	BHF	0,226	0,421	0,404	0,296	0,120	-0,050	-0,363
SF	BF+BHF	0,064	0,008	0,004	0,082	0,037	0,093	0,138
SF	BC	0,052	0,247	0,253	0,111	0,061	-0,038	0,218
SF	C	0,078	0,180	0,119	0,092	-0,006	-0,264	-0,295
SF	BC+C	0,129	0,231	0,213	0,164	0,052	-0,146	0,033
STF	BF	-0,058	0,009	0,041	-0,087	-0,289	0,006	0,014
STF	BHF	0,042	0,136	0,211	0,002	-0,272	0,090	-0,284
STF	BF+BHF	-0,045	0,036	0,092	-0,085	-0,368*	0,006	-0,014
STF	BC	-0,068	0,113	0,130	-0,037	-0,151	-0,092	0,359
STF	C	-0,030	0,114	0,061	-0,024	0,081	-0,165	-0,008
STF	BC+C	0,066	0,199	0,195	0,099	0,027	-0,105	0,246
LIMON	BF	0,289	0,425*	0,445**	0,307	0,027	-0,134	-0,038
LIMON	BHF	0,305	0,485*	0,563*	0,325	-0,015	0,106	-0,166
LIMON	BF+BHF	0,395*	0,555**	0,606**	0,416*	-0,023	-0,089	-0,048
LIMON	BC	-0,119	0,000	0,001	-0,087	-0,154	-0,108	0,493**
LIMON	C	-0,066	0,151	0,160	-0,049	0,050	-0,016	0,155
LIMON	BC+C	-0,079	0,083	0,094	-0,029	-0,029	-0,031	0,418*
ARGILE	BF	-0,004	-0,004	-0,045	-0,007	0,162	-0,004	0,173
ARGILE	BHF	-0,623**	-0,529*	-0,589**	-0,575*	-0,234	-0,048	0,078
ARGILE	BF+BHF	-0,028	-0,010	-0,047	-0,024	0,144	-0,034	0,174
ARGILE	BC	0,037	0,093	0,061	0,067	0,255	0,289	0,277
ARGILE	C	0,097	-0,077	-0,031	0,047	0,118	0,084	0,287
ARGILE	BC+C	-0,044	-0,072	-0,056	-0,045	0,117	0,092	0,408*
VAR.	HOR.	Doc	Dic	Coul.	Cond.	Al	Mn	Fe
GRAVIE	BF	-0,091	-0,409*	0,069	-0,423*	0,329	0,297	0,276
GRAVIE	BHF	0,184	-0,512*	0,349	-0,604**	0,663**	0,519*	0,674**
GRAVIE	BF+BHF	-0,025	-0,383*	0,139	-0,406*	0,358*	0,315	0,320
GRAVIE	BC	-0,074	-0,271	0,040	-0,256	0,168	0,152	0,215
GRAVIE	C	-0,250	-0,140	-0,168	-0,121	0,020	-0,228	-0,169
GRAVIE	BC+C	-0,247	-0,393*	-0,097	-0,362*	0,197	0,058	0,049

Tableau A.2 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de granulométrie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	Doc	Dic	Coul.	Cond.	Al	Mn	Fe
SABLE	BF	0,163	0,204	0,093	0,117	-0,036	0,029	0,014
SABLE	BHF	-0,173	0,386	-0,258	0,431	-0,572*	-0,291	-0,379
SABLE	BF+BHF	0,112	0,116	0,061	0,039	0,017	0,084	0,029
SABLE	BC	0,058	0,315	-0,080	0,273	-0,154	-0,174	-0,269
SABLE	C	0,123	0,090	0,085	0,066	-0,140	0,212	0,111
SABLE	BC+C	0,168	0,330	0,051	0,280	-0,206	-0,040	-0,089
STG	BF	0,300	-0,206	0,375*	-0,241	0,453**	0,452**	0,359*
STG	BHF	0,153	-0,111	0,182	-0,227	0,387	0,152	0,474*
STG	BF+BHF	0,316	-0,174	0,370*	-0,257	0,487**	0,455**	0,402*
STG	BC	-0,125	-0,178	-0,024	-0,190	0,194	0,180	0,101
STG	C	-0,283	-0,037	-0,220	-0,037	-0,095	-0,249	-0,219
STG	BC+C	-0,335	-0,119	-0,227	-0,110	0,044	-0,057	-0,166
SG	BF	0,342*	0,118	0,294	0,064	0,202	0,156	0,150
SG	BHF	0,203	-0,044	0,236	-0,104	0,159	0,083	0,433
SG	BF+BHF	0,358*	-0,020	0,340*	-0,082	0,331	0,289	0,299
SG	BC	-0,094	-0,065	-0,106	-0,045	0,087	-0,032	-0,062
SG	C	0,033	0,055	0,042	0,069	0,001	-0,160	-0,050
SG	BC+C	-0,141	0,007	-0,099	0,017	-0,025	-0,103	-0,140
SM	BF	0,315	0,330	0,217	0,280	-0,010	-0,160	-0,042
SM	BHF	0,209	0,083	0,188	0,127	-0,106	-0,191	0,042
SM	BF+BHF	0,312	0,281	0,212	0,246	0,024	-0,100	-0,004
SM	BC	0,050	0,187	-0,099	0,170	-0,084	-0,089	-0,181
SM	C	-0,021	0,100	0,005	0,164	-0,266	-0,101	-0,050
SM	BC+C	0,137	0,240	0,024	0,219	-0,187	-0,115	-0,098
SF	BF	0,133	0,142	0,130	0,082	0,023	-0,014	0,065
SF	BHF	-0,087	0,186	-0,159	0,250	-0,417	-0,101	-0,400
SF	BF+BHF	0,081	0,133	0,058	0,075	-0,010	0,006	0,007
SF	BC	0,181	0,128	0,089	0,104	-0,092	-0,099	-0,028
SF	C	0,153	0,080	0,102	0,070	-0,138	0,233	0,116
SF	BC+C	0,255	0,181	0,132	0,152	-0,195	0,006	0,064
STF	BF	-0,325	-0,138	-0,324	-0,092	-0,183	-0,071	-0,101
STF	BHF	-0,523*	-0,048	-0,483*	0,032	-0,306	-0,091	-0,481*
STF	BF+BHF	-0,420*	-0,141	-0,425*	-0,088	-0,243	-0,109	-0,199
STF	BC	0,079	-0,035	0,042	-0,037	-0,069	0,038	0,053
STF	C	0,241	0,009	0,178	-0,014	0,155	0,353	0,271
STF	BC+C	0,229	0,111	0,126	0,103	-0,063	0,081	0,117

Tableau A.2 (Suite) Corrélations de Spearman entre les variables de qualité de l'eau et les variables de granulométrie des sols pour différents horizons.

VAR.	HOR.	Doc	Dic	Coul.	Cond.	Al	Mn	Fe
LIMON	BF	-0,193	0,217	-0,289	0,311	-0,386*	-0,430*	-0,339*
LIMON	BHF	-0,200	0,288	-0,329	0,385	-0,352	-0,452	-0,604**
LIMON	BF+BHF	-0,294	0,297	-0,390*	0,422*	-0,530**	-0,525**	-0,518**
LIMON	BC	0,168	-0,121	0,216	-0,068	0,019	-0,050	0,175
LIMON	C	0,100	-0,125	0,059	-0,032	0,225	0,098	0,128
LIMON	BC+C	0,190	-0,075	0,149	-0,014	0,087	-0,010	0,179
ARGILE	BF	0,154	-0,031	0,159	-0,004	0,122	-0,009	0,171
ARGILE	BHF	0,217	-0,546*	0,403	-0,533*	0,539*	0,554*	0,546*
ARGILE	BF+BHF	0,150	-0,051	0,163	-0,016	0,132	0,013	0,165
ARGILE	BC	0,353	0,071	0,436*	0,117	0,168	-0,226	0,124
ARGILE	C	0,012	0,099	-0,013	0,053	0,022	-0,297	-0,118
ARGILE	BC+C	0,117	-0,023	0,165	-0,018	0,126	-0,245	0,006

Nombre d'échantillons: horizons BF-----N=35
 BHF-----N=19 sauf STOT et SULF: N= 5
 BF+BHF---N=35
 BC-----N=29 sauf STOT et SULF: N=10
 C-----N=26 sauf STOT et SULF: N= 4
 BC+C-----N=34 sauf STOT et SULF: N=14

* . significativement différent de zéro au niveau de 5%

** significativement différent de zéro au niveau de 1%

