

UNIVERSITE DE METZ



UFR SCiFA
C.R.E.U.M.
LABORATOIRE D'ECOTOXICOLOGIE

THESE

Présentée à l'université de METZ en vue de l'obtention du grade de:

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ

MENTION: SCIENCES DE LA VIE

SPECIALITE: HYDROBIOLOGIE

par

François GUEROLD

Titre

**L'ACIDIFICATION DES COURS D'EAU:
IMPACT SUR LES PEUPELEMENTS DE MACROINVERTEBRES BENTHIQUES:
APPLICATION AU MASSIF VOSGIEN**

Soutenue le 15 décembre 1992 devant le jury composé de:

Président de jury	J.C. MORETEAU	:Professeur Université de Metz
Rapporteur	J.C. MASSABUAU	:CNRS Arcachon
Rapporteur	J. GIUDICELLI	:Professeur Université de Aix Marseille III
Rapporteur	N. MORGAN	:Expert U.I.C.N.
Directeur de thèse	J.C. PIHAN	:Professeur Université de Metz
Examineur	F. LANGENFELD	:Ingénieur Chef de division Agence de l'eau

PLAN

INTRODUCTION

IERE PARTIE: LA PROBLEMATIQUE DES RETOMBÉES ATMOSPHERIQUES ACIDES. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

2. EMISSION, TRANSPORT ET DEPOT

2.1. EMISSIONS

2.1.1. SO₂

2.1.2. NO_x

2.1.3. Autres polluants

2.2. TRANSPORT ET DEPOT

2.2.1. Transport

2.2.2. Dépôts

2.2.3. Emergence du concept de charge critique

3. CHIMIE DES DEPOTS HUMIDES

3.1. LE TERME PLUIE "ACIDE"

3.2. COMPOSITION DES PRECIPITATIONS: LE CAS DU MASSIF VOSGIEN

4. IMPACT DES DEPOTS ACIDES SUR LES SOLS

4.1. ACIDIFICATION DES SOLS

4.1.1. Les sols carbonatés

4.1.2. Les sols non carbonatés

5. ACIDIFICATION DES EAUX DE SURFACES

5.1. LES ZONES A RISQUE

5.2. ETENDUE DU PHENOMENE A L'ECHELLE MONDIALE

5.3. LA SITUATION SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS

5.4. LES DESCRIPTEURS D'ACIDIFICATIONS DES EAUX

5.4.1. Le statut acide-base des eaux

i) Acidité et pH:

ii) Alcalinité

5.4.2. Sulfates

5.4.4. Evaluation du degré d'acidification

5.5. IMPACT SUR LES COMMUNAUTES BIOLOGIQUES

5.5.1. Les producteurs

i) Phytoplancton.

ii) Périphyton.

iii) Macrophytes.

iv) Les communautés microbiennes.

5.5.2. Les consommateurs

i) Zooplancton.

ii) Poissons.

iii) Amphibiens.

iv) Avifaune.

v) Mammifères.

2EME PARTIE: MATERIELS ET METHODES

1. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

1.1. ECHANTILLONNAGE

1.2. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

1.2.1. pH

1.2.2. Conductivité

1.2.3. Température

1.2.4. Anions

1.2.5. Alcalinité

1.2.6. Cations majeurs

1.2.7. Aluminium total

1.2. 8. Autres métaux

2. MACROFAUNE BENTHIQUE

2.1. PRELEVEMENTS QUANTITATIFS

2.2. PRELEVEMENTS QUALITATIFS

2.3. FIXATION DES ECHANTILLONS

3. SITES D'ETUDE

3.1. ETUDE SPATIALE DE L'ACIDIFICATION

3.3. ETUDE TEMPORELLE: LE BASSIN VERSANT DU ROUGE-RUPT

3.2.1. Végétation

- a) l'étage montagnard moyen.
- b) l'étage montagnard supérieur
- c) l'étage subalpin

3.2.2 Géomorphologie (d'après Mansuy et *al.*, 1990)

3.2.3 Géologie

- a) le granite des crêtes
- b) le granite du Valtin
- c) Les granites du Bramont et du Ventron
- d) Formation superficielle: le crassin

3.2.4 Les sols

- a) sur granite acide
- b) sur granite des crêtes

3.2.6 Localisation des stations

- a) Etude physico-chimique
- b) Etude de la macrofaune benthique

4. APPROCHE ECOTOXICOLOGIQUE

4.1 MATERIEL BIOLOGIQUE ET EXPERIENCES D'INTOXICATION

4.2 HISTOCHIMIE, MICROSCOP~E ET MICROANALYSE

4.2.1 Méthode au nitrate d'argent

4.2.2 Préparation des échantillons et des coupes

4.2.3 Méthode d'Irwin à l'aluminon

4.2.4 Microanalyse laser: **LAser** Microprobe Mass **Spectrometry** (LAMMS)

3EME PARTIE: ETUDE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ACIDIFICATION DES EAUX

1. ETUDE DE L'ACIDIFICATION A L'EHELLE DU MASSIF VOSGIEN: VARIABILITE SPATIALE

1.1 TENDANCE GENERALE

1.2 RELATION ENTRE LES DIFFERENTS FACTEURS PHYSICO-CHIMIQUES

1.2.1 Relation entre le pH et Al, HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} et conductivité

i) pH-Al

ii) pH- HCO_3^-

iii) pH- Ca^{2+} et pH- Mg^{2+}

iv) relation pH-conductivité.

1.2.2 Relations entre HCO_3^- , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et SO_4^{2-}

1.3 UTILISATION DES METHODES D'ANALYSES MULTIVARIEES

1.3.1 Analyse en composantes principales (A.C.P.)

1.3.2 Ordination par classification hiérarchique

1.4 LES ZONES D'ACIDIFICATION DU MASSIF

2. ETUDE DE LA VARIABILITE TEMPORELLE: LE CAS DU BASSIN VERSANT DU ROUGE-RUPT

2.1. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES MOYENNES DES COURS D'EAU

2.2. LES PERIODES PRESENTANT DES CHIMISMES CONTRASTES

2.2.1. Evolution temporelle du pH

2.2.2. Variations des concentrations en aluminium

2.2.3. Variations de l'alcalinité

2.2.4. La charge cationique

2.3. CARBONE ORGANIQUE DISSOUS (COD)

2.4. TEMPERATURE

2.5. LES CONCENTRATIONS METALLIQUES

2.5.1. Manganèse

2.5.2. Cuivre

2.5.3. Plomb

2.5.4. Cadmium

4ème PARTIE: ETUDE DES PEUPELEMENTS DE MACROINVERTEBRES BENTHIQUES

1. ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PEUPELEMENTS

1.1. INVENTAIRE FAUNISTIQUE

1.2. LES PRINCIPAUX DESCRIPTEURS DE PEUPELEMENTS

1.2.1. Richesse taxonomique

1.2.2. Abondance

1.2.3. Diversité

1.2.4. Dominance

- i) Fréquence du taxon de rang 1
- ii) Nombre de taxa nécessaire pour atteindre 50% du peuplement
- iii) Diagrammes rang-fréquences cumulées
- iv) Contribution relative des taxa à la structure des peuplements

1.3. STRUCTURE GLOBALE DES PEUPEMENTS

1.3.1. Abondance relative des principaux groupes faunistiques

1.5. LES DIFFERENTS GROUPES FAUNISTIQUES

1.5.1. Mollusques et Crustacés

1.5.2. Ephéméroptères

1.5.3. Trichoptères

1.5.4. Plécoptères

1.5.5. Coléoptères

1.5.6. Diptères

1.5.7. Triclades, Oligochètes et divers

1.6. LE CAS PARTICULIER DE QUELQUES COURS D'EAU

1.6.1. Cours d'eau chaulé

1.6.2. Proliférations algales

1.7. ANALYSES MULTIVARIEES

1.7.1. Analyse factorielle des correspondances (A.F.C.)

1.7.2. Analyse en composantes principales. (A.C.P.)

- i) Répartition des variables individu
- ii) Distribution des stations en fonction des peuplements

1.7.3. Classification hiérarchique

1.8. COEFFICIENT D'AFFINITE COENOTIQUE DE JACQUART

2. ETUDE TEMPORELLE DES PEUPEMENTS BENTHIQUES: LE BASSIN DU ROUGE-RUPT

2.1. LES DESCRIPTEURS DE PEUPEMENTS

2.1.1. Richesse taxonomique

2.1.2. Abondances

2.1.3. Diversité et équitabilité

2.1.4. Biomasse

2.2. COMPOSITION DES PEUPEMENTS

2.2.1 Contribution relative des différents groupes

2.2.2. Mollusques et Crustacés

2.2.3. Ephéméroptères

2.2.4. Trichoptères

2.2.5. **Plécoptères**

2.2.6. Coléoptères

2.2.7. Diptères

2.2.8. Oligochètes et Triclades

2.3. **SYNTHESE**

3. DISCUSSION

5EME PARTIE: APPROCHE DES MECANISMES IMPLIQUES DANS LA DISPARITION
DES ESPECES

1. APPROCHE ECOPHYSIOLOGIQUE

1.1. GENERALITES

1.2. LE CAS DES INSECTES AQUATIQUES

1.3. HAEMOLYMPHE ET CONCENTRATION EN SODIUM

1.4. LES CELLULES A CHLORURES

1.4.1. Mise en évidence

1.4.2. Histologie et structure des cellules à chlorures

1.4.3. Mise en évidence de l'aluminium

2. L'HYPOTHESE TROPHIQUE

CONCLUSIONS

PERSPECTIVES

Introduction

La majorité des pollutions qui touche les écosystèmes aquatiques est directement liée à des effluents liquides agricoles, industriels et urbains. Ces pollutions, pour la plupart, concernent les cours inférieurs des rivières. Leur chimie et les perturbations générées au niveau de l'édifice biologique ont fait et font encore l'objet de nombreux travaux. Les "pluies acides" et l'acidification des eaux qui en résulte, s'inscrivent dans un schéma général très complexe de pollution, qui intègre à la fois l'atmosphère, les sols, la végétation et les eaux douces. Elles trouvent leur origine dans les émissions atmosphériques anthropiques de composants acides et de précurseurs d'acidité. Les conséquences de ces rejets sur les eaux de surface, se font ressentir dans des régions dites naturelles, situées le plus souvent en amont de toute activité agricole, industrielle et urbaine.

L'acidification des eaux, phénomène d'ampleur internationale, est un sujet pluridisciplinaire par excellence qui a fait l'objet de très nombreuses recherches s'attachant à décrire et comprendre l'impact de ce type particulier de pollution hydrique, sur les composantes tant abiotiques que biotiques. L'étude des poissons et en particulier des Salmonidae, a soulevé un intérêt majeur. Les peuplements de macroinvertébrés ont également reçu une attention particulière et l'influence de l'acidification sur les peuplements, en terme de modifications qualitatives, est bien établie. Mais la littérature, bien qu'abondante, néglige trop souvent l'aspect biologique et dynamique ainsi que l'importance de l'ensemble des facteurs chimiques. Par exemple de nombreuses expériences d'acidification ayant pour but de reproduire artificiellement des stress acides, ont été réalisées en conditions naturelles (Hall et al., 1980; Hall et al., 1982; Hall et Likens, 1984; Weatherley et al., 1988; Merret et al., **1991**), semi-naturelles (Allard et Moreau, 1984; Burton et Allan, 1984; Allard et Moreau, **1987a, b**) et en laboratoire (Bell et Nebeker, 1989; Bell, 1971) en se focalisant sur les paramètres pH ou pH et aluminium. De telles expérimentations ne représentent qu'une approche biaisée des conditions rencontrées *in situ*. Ainsi, un ajout d'acide ne peut en rien provoquer une déminéralisation de l'eau, processus pourtant caractéristique résultant de l'altération des sols et accompagnant l'acidification.

Un certain nombre de faits sont peu ou pas relatés par la littérature. C'est pourquoi nous avons, au cours de cette étude, essayé de décrire en terme de biodiversité, les perturbations des peuplements de macroinvertébrés benthiques engendrées par l'acidification des ruisseaux vosgiens, tout en caractérisant les facteurs chimiques, condition indispensable à la compréhension du milieu ambiant des organismes. Nous n'avons pas voulu réaliser un simple constat, mais également apporter des éléments permettant de mieux cerner les paramètres pertinents impliqués dans la toxicité des eaux acides et de comprendre les mécanismes conduisant aux modifications des structures des peuplements. Pour cela deux approches ont été réalisées:

- une approche spatiale de l'acidification, comprenant une étude des paramètres physico-chimiques et des peuplements de 34 cours d'eau
- une approche de l'évolution spatiale du **chimisme** et des peuplements d'un bassin versant : le bassin du Rouge-Rupt

Enfin nous avons réalisé une étude préliminaire des mécanismes écophysologiques possibles en rapport avec la toxicité des eaux acides, en considérant le cas de deux espèces sensibles.

Lorsque nous avons abordé ce sujet, la macrofaune benthique des ruisseaux vosgiens était pratiquement inconnue. En collaboration avec d'autres chercheurs nous avons dû appréhender la systématique de certains groupes sous l'angle de la détermination des espèces, travail qui nécessite beaucoup de temps mais qui est indispensable à toute étude traitant de la biologie des organismes et des populations. Par ailleurs la chimie des eaux oligotrophes demande une qualité d'analyse et une précision que peu de laboratoires peuvent apporter en routine. Là encore nous avons essayé de fournir l'effort nécessaire à l'acquisition de données fiables.

Le sujet étant extrêmement vaste et diversifié, nous sommes conscient qu'il reste un énorme travail à fournir. Nous avons préféré étudier le problème sous l'aspect global d'un problème écologique, ce qui explique le caractère quelque peu pluridisciplinaire de cette étude. La totalité du matériel biologique et des informations récoltées, n'est pas traitée dans ce document, nous laissant ainsi la possibilité d'approfondir et d'éclaircir par la suite un certain nombre de points.

CONCLUSION

Un certain nombre de cours d'eau du massif vosgien est actuellement soumis à une pollution acide. L'étude des paramètres chimiques montre que le pH, l'aluminium, la minéralisation et les paramètres qui lui sont associés, sont atypiques des eaux oligotrophes drainant des bassins sur grès ou granite. Il existe une variabilité spatiale du niveau d'acidification et tous les ruisseaux ne présentent pas les mêmes caractéristiques physico-chimiques. Par ailleurs un même cours d'eau subit une évolution temporelle des concentrations des différents éléments chimiques. Ainsi, la qualité peut évoluer vers un état moins acidifié en période d'étiage ou plus acidifié durant les stress acides printaniers ou ceux induits par certaines précipitations. Probst et *al.* (1990) ont montré que pour ces deux périodes opposées, un même ruisseau peut afficher des **chimismes** très **contrastés** présentant tantôt les caractéristiques acides et tantôt un statut plus conforme aux conditions édaphiques locales. Il existe donc une grande variabilité spatiale et temporelle du degré d'acidification, remarquablement illustrée par l'exemple des cours d'eau du bassin du Rouge-Rupt.

Les peuplements benthiques sont profondément affectés par l'acidification. Richesse, abondance, diversité et équitabilité, diminuent significativement quand le niveau d'acidification augmente. Les peuplements dans les cours d'eau acidifiés sont alors typiquement dominés par les Plécoptères et les Oligochètes. Tous les groupes faunistiques majeurs caractérisant les peuplements de macroinvertébrés des cours d'eau drainant l'amont des bassins, sont affectés à des degrés divers. Il est acquis que les Mollusques, Crustacés et Ephéméroptères sont quasiment exclus dans leur totalité des eaux acides. Les Trichoptères affichent une importante réduction du nombre de taxa et des effectifs, mais quelques espèces ne sont pas sensibles **aux** conditions du milieu. Bien que la richesse des Plécoptères augmente avec le pH, l'abondance n'est pas touchée et le nombre d'espèces évoluant en milieu acidifié reste élevé. Le sous-ordre des Sétipaples, qui comprend un nombre relativement restreint d'espèces dans les ruisseaux vosgiens, est toutefois affecté et les deux familles, Perlidae et Perlodidae, disparaissent avec l'acidification. La richesse et l'abondance des Diptères et des Coléoptères diminuent significativement avec le pH. Compte tenu des limites de détermination adoptées dans cette étude, la sensibilité de ces groupes est certainement sous-estimée. En l'absence de détermination, il est impossible de savoir si les

Oligochètes sont sensibles aux eaux acides. Toutefois, d'un point de vue abondance absolue, aucune différence n'est notée entre les divers cours d'eau étudiés. La sensibilité de nombreux taxa apparaît plus élevée que chez celle de la truite.

Il existe une recolonisation constante des milieux par certaines espèces sensibles qui s'opère par migration aérienne remontante. Il est certain que des oeufs de quelques espèces **d'Ephémères**, Trichoptères et Plécoptères peuvent réaliser un développement embryonnaire complet en milieu acidifié en période d'étiages lorsque les conditions sont plus favorables. Toutefois compte tenu des effectifs récoltés dans de tels ruisseaux, le taux de réussite semble très faible. Il est acquis que chez *Baetis rhodani*, qui est une espèce bivoltine, la génération d'été peut accomplir un développement complet.

Un peuplement typique de milieu acide comprend:

Trichoptères: *Plectrocnemia conspersa*, *Rhyacophila evoluta*, Limnephilidae

Plécoptères: *Amphinemura suicicoidis*, *Siphonoperia torrentium*,

Protonemura sp, *Leuctra* sp

Diptères: Chironomidae, Simuliidae, Empididae et Limoniidae

Triclades: *Polyceis feina*

Oligochètes

Plusieurs taxa apparaissent être des indicateurs pertinents de bonne qualité:

Ephéméroptères: toutes les espèces **d'Heptageniidae**

Trichoptères: *Hydropsyche* sp, *Glossosoma* sp

Plécoptères: *Perla marginata*

Diptères: *Ibisa marginata*, *Liponeura* sp, *Berdeniella* sp

Coléoptères: *Hydraena*

Il semble possible d'évaluer le statut d'un cours d'eau vis à vis de l'acidification en se basant uniquement sur la richesse taxonomique et la présence ou l'absence de plusieurs taxa (Guérol et al., 1991).

La toxicité des eaux acides réside dans les concentrations élevées en protons et en aluminium et dans la faible minéralisation associée aux concentrations en ions biologiquement importants. D'autres métaux tels que le plomb peuvent éventuellement être impliqués. Ces différents paramètres considérés séparément possèdent leur propre toxicité. En milieu acide, il existe donc une toxicité cumulée résultant d'une synergie des

différents facteurs. La toxicité peut toutefois être modulée par la présence de carbone organique dissous et/ ou le calcium..

La toxicité des eaux acides semble s'exercer sur les macroinvertébrés benthiques selon deux mécanismes, non nécessairement distincts:

- en modifiant la qualité et la distribution des ressources alimentaires des organismes se nourrissant aux dépens des producteurs et de la matière organique. Selon nous, cette voie tendrait plutôt à réduire les effectifs.

- une perturbation des fonctions physiologiques de régulation et en particulier de l'ionorégulation. L'organisme ne pouvant maintenir son milieu intérieur constant, est confronté à une fuite des ions.

Ce deuxième point est certainement le plus important et conduit vraisemblablement à une disparition des espèces. En l'état de nos connaissances, on peut également émettre l'hypothèse, qu'une modification des ressources trophiques peut prédisposer l'organisme ou provoquer des perturbations physiologiques au niveau du développement, de la croissance et de la reproduction.

PERSPECTIVES

En raison des efforts accomplis depuis quelques années, en matière de réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère, les problèmes d'acidification des eaux de surface sont peu à peu délaissés dans certains pays et en particulier en Amérique du Nord. Pourtant, si une réversibilité des processus semble possible à long terme, il n'en demeure pas moins qu'à l'heure actuelle, de nombreuses régions sont encore confrontées à ce problème. De plus, de nombreux faits sont encore inconnus ou mal définis.

En ce qui concerne les invertébrés, des études restent à réaliser et les points suivants mériteraient un intérêt particulier:

- approfondir les connaissances concernant les Diptères, Coléoptères et Oligochètes
- étudier la dérive en fin de période d'étiage
- établir les cycles de développement

- analyser les modifications des ressources trophiques: producteurs, activité des micro-organismes, qualité et valeur énergétique
- établir les régimes alimentaires des espèces
- évaluer la sensibilité des différents stades de développement
- étudier la régulation ionique chez des insectes sensibles et non sensibles
- étudier l'ultrastructure des sites impliqués dans la régulation

Par ailleurs, d'autres études peuvent être entreprises dans l'optique soit d'une restauration progressive et naturelle des milieux, soit d'une action curative. Cette dernière alternative est actuellement envisagée et fait l'objet d'un important projet de recherche pluridisciplinaire. Il est proposé d'évaluer, en grandeur réelle dans un site atelier, l'efficacité d'un traitement, par épandage de matériaux au niveau des sols, sur la restauration de ruisseaux acidifiés. Après établissement d'un bilan sur une année de l'état initial, il sera particulièrement intéressant de suivre l'évolution des peuplements d'invertébrés en relation avec la dynamique de recolonisation.