



FACULTE DES SCIENCES & TECHNIQUES

U.F.R. Sciences & Techniques  
Sciences de l'Environnement  
Ecole Doctorale Ressources  
procédés, produits, environnement  
Formation doctorale Géosciences

## Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

**Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I**

**en Géoscience & Environnement**

**par Théodora NEDELTCHEVA**

### **Analyse spatiale de la composition chimique des ruisseaux vosgiens**

Soutenue publiquement le 14 décembre 2005

Membres du jury :

Président :	M. Michel JAUZEIN	Professeur à l'Université Nancy I
Rapporteurs :	Mme Anne PROBST	Directeur de recherche, CNRS Toulouse
	M. Christian WALTER	Professeur à l'ENSA-INRA Rennes
Examineurs :	M. Etienne DAMBRINE	Directeur de recherche, INRA Nancy
	M. Laurent ST. ANDRÉ	Chargé de recherche, CIRAD Montpellier
	M. J.-C. GÉGOUT	Maître de conférence, INRA-ENGREF Nancy

INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 8

ACIDITÉ ET ACIDIFICATION DES ECOSYSTÈMES ..... 11

INTRODUCTION ..... 13

1. ACIDITÉ ET ACIDIFICATION DES SOLUTIONS ..... 13

1.1. ACIDITÉ DES EAUX ..... 14

1.2. ACIDITÉ DES SOLS ..... 16

2. MÉCANISMES D'ACIDIFICATION DANS LES ECOSYSTÈMES ..... 20

2.1. SOURCES DE PROTONS ..... 20

2.2. SOURCES D'ALCALINITÉ ..... 21

3. DÉVELOPPEMENT DES RECHERCHES SUR L'ACIDIFICATION ..... 22

3.1. COMPARAISON DES CARACTÈRES CHIMIQUES DES SOLS ET DES EAUX À PLUSIEURS ANNÉES D'INTERVALLE ..... 22

3.2. L'ÉTABLISSEMENT DES BILANS ..... 23

4. CONSÉQUENCES BIOLOGIQUES DE L'ACIDIFICATION ..... 25

5. CRITAIRES BIOLOGIQUES ET CHIMIQUES ..... 27

6. MODÉLISATION DE L'ACIDIFICATION ..... 29

6.1. MODÈLES MÉCANISTES ..... 29

6.2. MODÈLES EMPIRIQUES ..... 34

MATÉRIEL ET MÉTHODES ..... 35

INTRODUCTION ..... 37

1. MATÉRIEL ..... 38

1.1. CONDITION DE PRÉLÈVEMENT ..... 38

1.2. CHOIX DES BASSINS ..... 39

1.3. DONNÉES DISPONIBLES ..... 39

1.4. LE SECTEUR D'ÉTUDE ..... 41

1.4.1. CLIMAT ET BILAN HYDRIQUE ..... 44

1.4.2. DÉPÔTS ATMOSPHÉRIQUES ..... 45

1.4.3. SUBSTRAT GÉOLOGIQUE ..... 49

1.4.3.1. GRANITES ..... 49

1.4.3.2. GRÈS ..... 59

1.4.4. SOLS ..... 62

1.4.4.1. SOLS SUR GRANITES ..... 62

1.4.4.2. SOLS SUR GRÈS ..... 63

1.4.5. VÉGÉTATION ..... 64

2. MÉTHODES ..... 69

2.1. COMBINAISON GÉOGRAPHIQUE DES DONNÉES À L'AIDE D'UN SIG ..... 69

TABLE DES MATIÈRES

2.1.1.	DÉFINITION DES UNITÉS SPATIALES D'INTÉGRATION (USI).....	- 73 -
2.1.2.	COMBINAISON SPATIALE DES DONNÉES.....	- 74 -
2.2.	<i>ANALYSES STATISTIQUES</i> .....	- 75 -
2.3.	<i>GÉNÉRALISATION SPATIALE DES MODÈLES STATISTIQUES</i> .....	- 76 -
<b>RELATION ENTRE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SUR SUBSTRATS GRANITIQUES ET LES VARIABLES DU MILIEU</b> .....		- 77 -
INTRODUCTION .....		- 80 -
1.	RESULTATS.....	- 80 -
1.1.	<i>COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX ET DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES CORRESPONDANT AUX TYPES DE GRANITE</i> .....	- 84 -
1.2.	<i>COMPOSITION CHIMIQUE DES RUISSEUX SELON LA MINÉRALOGIE DES GRANITES ET LES VARIABLES DU MILIEU</i> .....	- 85 -
2.	DISCUSSION .....	- 93 -
3.	CONCLUSION .....	- 96 -
<b>FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX INFLUENÇANT</b> .....		- 97 -
<b>LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SUR SUBSTRATS GRÉSEUX DANS LES VOSGES</b> .....		- 97 -
INTRODUCTION .....		- 98 -
1.	RÉSULTATS.....	- 98 -
1.1.	<i>COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX ET VARIABLES ENVIRONNEMENTALES CORRESPONDANTS AUX DIFFÉRENTS TYPES DE GRÈS</i> .....	- 102 -
1.3.	<i>COMPOSITION CHIMIQUE DES RUISSEUX SELON LE TYPE DU BASSIN ET LES VARIABLES DU MILIEU</i> .....	- 102 -
2.	DISCUSSION .....	- 108 -
3.	CONCLUSION .....	- 110 -
<b>COMPARAISON DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SUR SUBSTRATS GRANITIQUES ET GRÉSEUX</b> .....		- 111 -
INTRODUCTION .....		- 111 -
1.	RESULTATS.....	- 113 -
<i>MORPHOLOGIE DES BASSINS ET VARIABLES DU MILIEU</i> .....		- 113 -
<i>CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES GÉNÉRALES DES EAUX ET ORIGINE DES ÉLÉMENTS</i> .....		- 117 -
1.3.1.	VARIATION DU pH ET ANC.....	- 117 -
1.2.1.1.	RELATION ENTRE pH ET TENEURS EN ALUMINIUM.....	- 120 -
1.2.1.2.	RELATION ENTRE pH ET TENEURS EN Ca, Mg, K ET Na.....	- 121 -
1.2.2.	VARIATION DES CATIONS ET DES ANIONS.....	- 123 -
1.2.2.1.	VARIATION DU Ca.....	- 124 -
1.2.2.2.	VARIATION DU Mg.....	- 124 -
1.2.2.3.	VARIATION DU Na.....	- 124 -
1.2.2.4.	VARIATION DU K.....	- 124 -
1.2.2.5.	VARIATION DU Si.....	- 125 -

TABLE DES MATIÈRES

---

1.2.6.	VARIATION DU SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> ET Cl.....	- 125
1.3.	ANALYSE COMPARÉE DE LA CHIMIE DES RUISSEAUX.....	- 125
1.4.	VARIATION DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DES VARIABLES DU MILIEU.....	- 126
2.	DISCUSSION.....	- 135
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	- 138
	TABLE DES RÉFÉRENCES.....	- 124
	ANNEXES.....	- 138
	TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	- 226
	LISTE DES FIGURES.....	- 227
	LISTE DES TABLEAUX.....	- 231
	LISTE DES ANNEXES.....	- 233

Le travail présenté est une continuité de l'étude réalisée par A-L Thomas (1998) et s'inscrit dans le projet de modélisation spatialisée des écoulements et de la composition chimique des eaux qui forment la Moselle amont. L'objectif est de parvenir à l'établissement de modèles statistiques décrivant la variabilité de la composition chimique des eaux, basés sur des raisonnements mécanistes et traduisant notre compréhension du milieu. Cet exercice a été effectué d'abord sur les granites puis sur les grès pour aboutir à des lois généralisées décrivant la variabilité spatiale des concentrations des ruisseaux vosgiens.

A tous les niveaux de modélisation, il est apparu que les facteurs écologiques de l'acquisition de la composition chimique des eaux étaient par ordre d'importance : les précipitations, la richesse du substrat en minéraux altérables et la taille du bassin versant, qui exprime la capacité de neutralisation dans les nappes profondes.

Les précipitations sont le facteur majeur influençant les concentrations dans les ruisseaux de plusieurs façons :

- Les concentrations des pluies diminuent avec l'augmentation de la lame d'eau précipitée annuellement ;
- Elles diluent le flux issu de l'altération et de l'échange d'ions par la lame d'eau, d'où des concentrations plus fortes associées aux faibles pluviométries ;
- Elles épuisent les sols en minéraux altérables en fonction de la pluviométrie cumulée.

Comme nous avons étudié des eaux en étiage, dont le temps de contact avec les minéraux de l'arène est par définition très long, cette influence majeure de la lame d'eau précipitée suggère que l'essentiel des concentrations des ruisseaux s'acquière dans les sols et ce, d'autant plus que les roches mères sont pauvres en minéraux altérables et que les écoulements sont moins profonds.

Généralement, à pluviométrie ou bilan hydrique équivalent, les roches plus riches en un élément chimique donné fournissent des solutions plus concentrées en cet élément. Cependant, l'influence de la minéralogie de la roche ne devient dominante que pour des substrats riches en minéraux altérables, tels que la biotite et hornblende ou la dolomie, influençant ainsi les concentrations en Ca et Mg dans les ruisseaux.

Les teneurs en potassium paraissent résulter d'un double contrôle : d'une part l'altération du feldspaths potassique serait la source principale de potassium et d'autre part, une fraction de ce potassium serait fixée au niveau des argiles. Les deux phénomènes expliqueraient les teneurs plus faibles en potassium des eaux sur les substrats plus riches en phyllites.

L'origine du sodium et de la silice sur les deux substrats est différente. Sur grès, le sodium provient des précipitations et la silice est une fonction de la dilution des solutions des sols par la pluie. Sur granite, à cette dilution se rajoute l'altération des minéraux qui interviennent pour déterminer les concentrations en silice dans les ruisseaux. Dans ce cas, bien que la silice et le sodium soient corrélés, il paraît improbable que ce soit l'altération de l'albite, minéral peu altérable, qui fournisse l'essentiel du flux de silice. Il est plus vraisemblable que, par l'échange ionique, le sodium remplace dans les eaux de drainage les autres cations (Ca, Mg, K) libérés par l'altération mais partiellement piégés par échange d'ions, néoformation ou prélèvement biologique.

L'ensemble de ce travail montre que la réponse des ruisseaux aux modifications globales de l'environnement est contrainte par les facteurs du milieu physique (climat, géologie, hydrologie), que le gestionnaire doit intégrer car il ne peut les modifier.

**Mots clés :** hydrochimie, acidification, analyse spatiale, SIG, granite, grès.