



**HAL**  
open science

**Distribution et écologie de l'hyperaccumulateur de cadmium, de zinc et de nickel *Noccaea caerulescens* (J. & C. Presl) F.K. Mey. dans le massif vosgien**  
Adélaïde Humbert

► **To cite this version:**

Adélaïde Humbert. Distribution et écologie de l'hyperaccumulateur de cadmium, de zinc et de nickel *Noccaea caerulescens* (J. & C. Presl) F.K. Mey. dans le massif vosgien. Sciences de l'environnement. 2010. hal-01883421

**HAL Id: hal-01883421**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01883421>**

Submitted on 28 Sep 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

## Master FAGE

« Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement »

Spécialité « Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes »

# Distribution et écologie de l'hyperaccumulateur de cadmium, de zinc et de nickel *Noccaea caerulescens* (J. & C. Presl) F.K. Mey. dans le massif vosgien



**Adélaïde Humbert**

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 06 Septembre 2010

Année universitaire 2009 – 2010

Maître de stage : Mme Catherine SIRGUEY, Docteur en Sciences Agronomiques, Maître de Conférences INPL/ENSAIA.

Laboratoire Sols et Environnement UMR 1120 ENSAIA-INPL/INRA – 2, avenue de la Forêt de Haye, BP 172, F-54505 Vandœuvre-lès-Nancy cedex

## **Remerciements**

J'adresse mes plus vifs remerciements à Catherine Sirguez, ma maître de stage, pour le temps qu'elle m'a consacré, sans oublier sa participation au cheminement de ce rapport. Elle m'a formée et accompagnée tout au long de cette expérience professionnelle avec beaucoup de gentillesse et de pédagogie.

Un grand merci à Jean-Louis Morel, directeur du laboratoire, qui m'a accueillie chaleureusement au sein du Laboratoire Sols et Environnement.

J'exprime toute mon amitié à Guy Sez nec et Thierry Mahévas, des Jardins Botaniques de Nancy, pour leur sympathie, l'étendue de leurs connaissances botaniques qu'ils m'ont généreusement partagé, ainsi que pour les conseils qu'ils ont pu me prodiguer.

D'une façon plus générale, je remercie l'ensemble des membres du LSE pour leur sympathique accueil et l'expérience enrichissante qu'ils m'ont fait vivre durant ces six mois de stage au sein du laboratoire.

Enfin, un grand merci à tous ceux que je n'ai pas cités et qui m'ont soutenu pendant toute cette période.

# Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>- 4 -</b>
1.1	PRESENTATION DU LABORATOIRE D'ACCUEIL .....	- 4 -
1.2	CARACTERISATION GENERALE DE <i>NOCCAEA CAERULESCENS</i> .....	- 4 -
1.2.1	<i>Biologie et écologie de l'espèce</i> .....	- 4 -
1.2.2	<i>Distribution géographique</i> .....	- 5 -
1.2.3	<i>Position systématique</i> .....	- 6 -
1.2.4	<i>Hyperaccumulation et tolérance aux éléments traces métalliques</i> .....	- 6 -
1.2.5	<i>Noccaea caerulescens, un candidat potentiel pour la phytoremédiation</i> .....	- 7 -
1.3	OBJECTIFS DU STAGE.....	- 8 -
<b>2</b>	<b>MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>- 8 -</b>
2.1	PROSPECTION DANS LE MASSIF VOSGIEN .....	- 8 -
2.2	TRAITEMENTS DES ECHANTILLONS.....	- 9 -
2.2.1	<i>Echantillons de sols</i> .....	- 9 -
2.2.2	<i>Echantillons de plantes</i> .....	- 10 -
2.3	TRAITEMENT STATISTIQUE ET CARTOGRAPHIE DES DONNEES .....	- 11 -
<b>3</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>- 11 -</b>
3.1	DISTRIBUTION ET ECOLOGIE DE <i>NOCCAEA CAERULESCENS</i> .....	- 11 -
3.2	APTITUDE HYPERACCUMULATRICE EN CONDITIONS NATURELLES .....	- 14 -
3.3	ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES .....	- 15 -
3.3.1	<i>Caractérisation des stations selon le cortège floristique</i> .....	- 15 -
3.3.2	<i>Caractérisation des stations sur l'ensemble des paramètres</i> .....	- 16 -
<b>4</b>	<b>DISCUSSION .....</b>	<b>- 19 -</b>
4.1	NICHE ECOLOGIQUE DE <i>NOCCAEA CAERULESCENS</i> DANS LE MASSIF VOSGIEN.....	- 19 -
4.2	IDENTIFICATION D'ECOTYPES .....	- 21 -
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>- 22 -</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>- 23 -</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>- 26 -</b>

# 1 Introduction

## 1.1 Présentation du laboratoire d'accueil

Le Laboratoire Sols et Environnement (LSE) a été créé en 1994 dans les locaux de l'École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) afin de développer les connaissances dans le domaine du devenir des polluants introduits dans les sols anthropisés par les activités agricoles, industrielles et urbaines. Depuis 1996, il est une Unité Mixte de Recherche INPL-ENSAIA-INRA. Le LSE est également l'une des huit unités de recherche de la Fédération de Recherche Eau-Sol-Terre (FR-EST). Il participe à deux masters de la faculté des Sciences et Techniques de Nancy, est rattaché à l'école doctorale Ressources, Procédés, Produits, Environnement (RP2E) et gère deux enseignements de 3<sup>e</sup>A à l'ENSAIA.

Les travaux du LSE se placent dans un contexte d'anthropisation croissante des sols. Il est en effet nécessaire de combler les lacunes concernant le fonctionnement, l'extension spatiale et la typologie des sols fortement marqués ou créés par l'activité humaine, si l'on veut maîtriser le devenir et les impacts sur la santé, les écosystèmes et les ressources en eau de ces sols souvent enrichis en substances polluantes.

Les recherches du LSE se déclinent en deux thèmes correspondant à deux équipes : « Pédogenèse des sols fortement anthropisés » et « Phytoremédiation des sols contaminés » au sein duquel j'ai effectué mon stage. L'objectif appliqué de cette équipe est de développer et d'optimiser des cultures de phytoremédiation. Celles-ci visent à extraire les polluants ou à favoriser leur dégradation, grâce à des végétaux spécifiques. Les travaux concernent donc l'utilisation de plantes adaptées et de pratiques agronomiques appropriées pour réduire les risques de dissémination des polluants métalliques à partir de sites contaminés.

## 1.2 Caractérisation générale de *Noccaea caerulescens*

### 1.2.1 Biologie et écologie de l'espèce

*Noccaea caerulescens*, angiosperme appartenant à la famille des *Brassicaceae*, est une herbacée annuelle, bisannuelle ou pérenne à court cycle de vie (Escarré *et al.*, 2000 ; Frérot *et al.*, 2003), hémicryptophyte, qui présente une large gamme de variations morphologiques. Le cycle de vie de cette espèce est relativement mal connu et il se peut que celui-ci varie en fonction des conditions du milieu ou par déterminisme génétique. La floraison s'étend d'avril à juillet selon les facteurs abiotiques de la station (ensoleillement, altitude). Le pollen étant trop lourd pour être dispersé par le vent, la pollinisation semble être principalement entomophile (Riley, 1956). Le mécanisme floral est de type protogyne, pour favoriser l'allofécondation. Pourtant Riley (1956) a observé un taux d'autofécondation de 95% et sur les 5% de fécondation croisée, le pollen provient principalement des proches voisins souvent apparentés. Il en résulte un très faible brassage génétique à l'intérieur des populations. L'absence de mécanisme d'autoincompatibilité pourrait être un moyen de maintenir des combinaisons de gènes et de permettre l'établissement de nouvelles colonies isolées par la dispersion d'un seul individu (Ingrouille & Smirnoff, 1986). Les fruits sont des siliques pouvant contenir jusqu'à 8 graines (Assunção *et al.*, 2003b), et le mode de dispersion est barochore, donc également limité, mais il arrive que des inflorescences entières soient emportées par le vent (Riley, 1956). Tous ces facteurs conduisent à un isolement reproductif des populations et expliquent en partie la très forte variabilité existant au sein de cette espèce. Cependant, une grande production de graines, une forte fertilité, une stabilité génétique résultant de l'autofécondation et un fort taux de germination (en moyenne 94%) rendent

l'espèce bien adaptée pour se maintenir dans ses habitats marginaux (Riley, 1956). Le système de reproduction pourrait donc être considéré comme une adaptation sélective à ce type d'environnement.

*N. caerulescens*, espèce alpine ou subalpine (Riley, 1956), est présente de 400 à 2000 m d'altitude (Frérot *et al.*, 2003) essentiellement dans les prairies en montagne (Reeves *et al.*, 2001) ou les talus aux bords des routes (Molitor *et al.*, 2005). Une étude menée au Luxembourg (Molitor *et al.*, 2005), a mis en évidence que *N. caerulescens* est présente sur des sols peu profonds, très pierreux, en pente souvent raide, donc souvent bien drainés, neutres à acides. Elle serait donc une espèce à tendance héliophile et thermophile. Cette plante est sensible à la compétition et préfère ainsi les sols nus ou comportant une végétation herbacée ouverte mais elle peut s'accommoder de milieux plus ombragés tels que les lisières forestières. *N. caerulescens* est qualifiée de métallophyte facultative car on la trouve aussi bien sur des sols calaminaires ou serpentiniques naturellement riches en métaux, ou sur des sites contaminés par l'action de l'Homme (mines, sites industriels,...) que sur des sols non pollués (Reeves *et al.*, 2001 ; Assunção *et al.*, 2003b ; Frérot *et al.*, 2003 ; Roosens *et al.*, 2003 ; Dechamps *et al.*, 2005). Selon les définitions de Grime (1977) (cité par Molitor *et al.*, 2005), cette espèce pourrait être assignée aux stratégies rudérale-tolérante au stress. Les rares études portant sur la flore accompagnatrice de *N. caerulescens* (Molitor *et al.*, 2005 ; Banášová *et al.*, 2006) indiquent des différences dans la composition végétale tant au niveau des espèces dominantes que de la richesse spécifique. Cependant, les communautés végétales sont ouvertes et souvent de faible productivité. Sur les sols riches en métaux, d'autres espèces tolérantes sont présentes telles que *Arabidopsis arenosa*, *Silene dioica*, *Silene vulgaris* ou encore *Thymus pulegioides*.

Les populations sont généralement de petite taille et distribuées de façon sporadique formant des populations isolées (Molitor *et al.*, 2005). Ces propriétés ainsi que son mode de reproduction font que cette espèce est sujette à une grande dérive génétique. De plus au vu de la grande étendue de sa distribution et par conséquent de l'hétérogénéité de ses habitats (Reeves *et al.*, 2001), les grandes variations de cette espèce et l'apparition de différents écotypes sont facilement compréhensibles. Ces particularités peuvent avoir engendré des différences de stratégies adaptatives.

### **1.2.2 Distribution géographique**

Origine de la distribution actuelle : *N. caerulescens* est considérée comme appartenant aux flores alpines relictuelles. Autrefois largement répartie, elle est maintenant restreinte à des milieux spécifiques. Ceci s'explique par le fait que, lors de la dernière glaciation, l'espèce s'est trouvée confinée dans des refuges glaciaires, peut être des terrains métallifères n'ayant pas gelé et recouverts de prairies (Koch *et al.*, 1998). L'histoire post-glaciaire de cette plante est encore inconnue, mais de telles connaissances seraient utiles pour comprendre l'hétérogénéité de l'espèce qui résulte peut être des différents refuges lors de la dernière glaciation ou des différentes voies de recolonisation (Besnard *et al.*, 2009).

Distribution actuelle : *N. caerulescens* possède une large répartition géographique dans l'Europe (Koch *et al.*, 1998) mais reste peu commune (Reeves *et al.*, 2001). Sa distribution est très disjointe. On la retrouve d'Est en Ouest de la Pologne à la Grande-Bretagne et du Nord au Sud de la Scandinavie, où elle a été introduite et naturalisée (Assunção *et al.*, 2003b), à l'Espagne. En France elle est présente dans le Jura, le Massif Central, les Pyrénées, les Alpes et les Vosges. Reeves *et al.* (2001) pensent que la France avec plus de 80 sites de *N. caerulescens* pourrait être le pays possédant le plus grand nombre et la plus grande variété de sites de cette espèce.

### 1.2.3 Position systématique

De son nom français commun « Tabouret bleuâtre », *Noccaea caerulescens* (J. & C. Presl) F.K. Mey. ou *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl possède une systématique très complexe du fait d'un important polymorphisme (Ingrouille & Smirnof, 1986). Selon Baker *et al.* (1994), la difficulté de reconnaissance des unités taxonomiques résulte à la fois de la distribution disjointe et du comportement d'autofécondation de *N. caerulescens*.

A l'origine dénommée *Thlaspi alpestre* L., les botanistes ont ensuite employé différents synonymes pour dénommer l'espèce dont les plus courants sont : *T. sylvestre* Jordan, *T. occitanum* Jordan, *T. virens* Jordan et *T. montanum* L. subsp. *alpestre* Bonnier & Layens (Koch *et al.*, 1998). Dvoráková, en 1968, a même partagé le taxon en deux sous-espèces, *T. caerulescens caerulescens* et *T. caerulescens calaminare* selon leur provenance édaphique, respectivement les sols non métallifères et les sols métallifères. Mais toutes ces distinctions ont été démenties par Ingrouille & Smirnof (1986) qui suite à une étude morphologique ont conclu qu'il n'y avait pas de réelles distinctions entre les variants. Ce raisonnement est consolidé par Koch *et al.* (1998) qui prétendent qu'aucune subdivision taxonomique de *T. caerulescens* n'est possible. Meyer, en 1973, a redéfini le genre *Thlaspi*, qu'il a divisé en 3 lignées et a renommé l'espèce *Noccaea caerulescens* car appartenant selon lui au genre *Noccaea* série *Alpestre* (Ingrouille & Smirnof, 1986). Les résultats des travaux de Mummenhoff *et al.* (1997) supportent 3 groupes qui sont congruents avec les lignées décrites par Meyer. Cependant, de nombreux débats subsistent encore quant à la réelle taxonomie.

### 1.2.4 Hyperaccumulation et tolérance aux éléments traces métalliques

La première référence d'hyperaccumulation chez *N. caerulescens* remonte à 1865 lorsque Sachs J. a reporté les données de Risse F. sur les concentrations en Zn dans les différents organes de cette plante (Reeves & Baker, 2000 ; Reeves *et al.*, 2001). Cette découverte a été confirmée tout au long du siècle dernier et les études de plus en plus poussées sur les différents aspects de l'accumulation des métaux par cette espèce se sont multipliées.

Les deux écotypes (métallicole et non métallicole) de *N. caerulescens* montrent une tolérance élevée à divers métaux et accumulent en particulier le zinc (Zn), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni) jusqu'à respectivement 30 000 mg.kg<sup>-1</sup> (Baker *et al.*, 1994), 3 000 mg.kg<sup>-1</sup> (Schwartz *et al.*, 2003) et 4 700 mg.kg<sup>-1</sup> (Schat *et al.*, 2000) sans aucun signe apparent de toxicité (Meerts & Van Isacker, 1997 ; Escarré *et al.*, 2000 ; Assunção *et al.*, 2003a ; Frérot *et al.*, 2003 ; Dechamps *et al.*, 2007).

Cependant, l'hyperaccumulation et la tolérance sont deux traits bien distincts (Meerts & Van Isacker, 1997). Le caractère de tolérance aux métaux serait apparu indépendamment à deux reprises dans les populations. Selon Ingrouille & Smirnof (1986), il est possible qu'il soit apparu durant la dernière glaciation pour permettre la survie de *N. caerulescens* sur des milieux contaminés où peu d'espèces compétitrices étaient présentes, lui offrant ainsi une nouvelle niche écologique. L'origine de l'hyperaccumulation n'a pas été clairement établie, mais il se pourrait que cette capacité ait été sélectionnée comme protection contre les herbivores et les pathogènes (Pollard & Baker, 1997 ; Jhee *et al.*, 1999) ou en complément du trait de tolérance (Assunção *et al.*, 2003b). Plusieurs études ont démontré que l'hyperaccumulation est constitutive au niveau de l'espèce pour le Zn, alors qu'elle ne l'est pas pour le Cd et le Ni (Meerts & Van Isacker, 1997 ; Escarré *et al.*, 2000 ; Lombi *et al.*, 2000 ; Reeves *et al.*, 2001 ; Assunção *et al.*, 2003b ; Roosens *et al.*, 2003 ; Richau & Schat, 2009).

Les populations métallicoles et non métallicoles, bien que non dissociables d'un point de vue taxonomique, constituent cependant deux écotypes bien distincts. En effet, ceux-ci



différent en plusieurs points, notamment la tolérance et l'hyperaccumulation. En dépit d'une tolérance constitutive commune aux deux écotypes, une forte sélection naturelle aurait joué un rôle majeur dans leur différenciation en sélectionnant des mécanismes de tolérance spécifiques dans les populations métallicoles en réponse à la contamination des sols (Ingrouille & Smirnoff, 1986 ; Meerts & Van Isacker, 1997 ; Jiménez-Ambriz *et al.*, 2007). En effet, pour le Zn, une plus forte tolérance mais une accumulation moindre sont systématiquement observées dans les populations métallicoles par rapport aux populations non métallicoles (Meerts & Van Isacker, 1997 ; Escarré *et al.*, 2000 ; Assunção *et al.*, 2003a ; Frérot *et al.*, 2003 ; Dechamps *et al.*, 2005 ; Dechamps *et al.*, 2007). La tolérance au Zn serait donc inversement corrélée à la capacité d'hyperaccumulation de ce même métal (Ingrouille & Smirnoff, 1986 ; Meerts & Van Isacker, 1997 ; Escarré *et al.*, 2000). Cependant, les travaux de Frérot *et al.* (2005) ont montré que sous le seuil d'hyperaccumulation du Zn, il n'y a pas de relation entre la tolérance et l'hyperaccumulation de cet élément. Ce point semble différent pour les autres métaux, où les populations de calamines du sud de la France et de serpentines combinent un niveau élevé à la fois de tolérance et d'accumulation respectivement de Cd et de Ni (Richau & Schat, 2009).

En plus des variations entre écotypes, il est admis qu'il existe de très grandes variations dans la capacité d'accumulation des métaux chez cette espèce, à la fois entre populations (Meerts & Van Isacker, 1997 ; Escarré *et al.*, 2000, Lombi *et al.*, 2000 ; Assunção *et al.*, 2003a ; Frérot *et al.*, 2003 ; Roosens *et al.*, 2003 ; Schmitt-Sirguy, 2004 ; Schwartz *et al.*, 2006) et entre individus à l'intérieur d'une même population (Meerts & Van Isacker, 1997 ; Escarré *et al.*, 2000) qu'elles proviennent de sites métallifères ou de sites non métallifères. La variation inter-population la plus remarquable concerne le Cd, avec quelques populations du sud de la France qui ont une étonnante capacité à prélever cet élément (Escarré *et al.*, 2000 ; Lombi *et al.*, 2000). Concernant la variation intra-population, Chardot *et al.* (2007) ont montré des concentrations en Ni très variables chez des individus issus de la même toposéquence ultramafique dans les Vosges.

### **1.2.5 *Noccaea caerulescens*, un candidat potentiel pour la phytoremédiation**

Plusieurs éléments ont fait de *N. caerulescens* une des espèces modèles la plus largement étudiée et l'une des plus prometteuses pour la phytoextraction dans les régions tempérées: (i) une capacité d'hyperaccumulation inhabituelle chez les espèces européennes (Ingrouille & Smirnoff, 1986) ; (ii) un des rares hyperaccumulateurs présent à la fois sur sol métallifère et non métallifère (Assunção *et al.*, 2003a) ; (iii) une hyperaccumulation du Cd, phénomène peu fréquent dans le règne végétal (Reeves *et al.*, 2001) ; (iv) une capacité peu commune chez les plantes à tolérer et à accumuler des métaux variés (Zn, Cd et Ni) à des concentrations élevées et même à faibles concentrations dans les sols. Cela constitue un avantage non négligeable pour dépolluer les sols souvent contaminés par plusieurs éléments (Baker *et al.*, 1994 ; Lombi *et al.*, 2000 ; Reeves & Baker, 2000 ; Roosens *et al.*, 2003) ; (v) un haut niveau de variation intraspécifique dans les caractères de tolérance et d'hyperaccumulation que l'on ne trouve nulle part ailleurs à un tel degré (Assunção *et al.*, 2003a).

Au vu de toutes ces informations, cette espèce a été très étudiée depuis quelques années comme un candidat possible pour la phytoremédiation des sites pollués par les métaux lourds. Dans ce contexte, il est essentiel d'acquérir de profondes connaissances sur l'étendue des variations existantes au sein des populations naturelles de cette espèce et une grande attention doit être portée sur les deux écotypes (Meerts & Van Isacker, 1997). Or bien souvent, les études ne concernent que l'écotype métallicole et, qui plus est, les populations les plus connues. D'autre part, comparées à la physiologie et à la biologie moléculaire de la tolérance et de l'accumulation, l'écologie et l'évolution de *N. caerulescens* ont été très peu étudiées

(Dechamps *et al.*, 2007). Molitor *et al.* (2005) s'y sont employés pour le Luxembourg mais ceci reste bien insuffisant face à l'immense variabilité de cette espèce.

Pour exploiter au mieux le procédé de phytoextraction, il est nécessaire d'appliquer des techniques d'amélioration des plantes en combinant les potentialités des deux écotypes (Escarré *et al.*, 2000). Il est donc indispensable de recenser et de connaître le mieux possible les différentes populations naturelles ainsi que leur aptitude à accumuler les métaux, pour cibler par la suite les populations les plus efficaces, et mettre en œuvre des programmes de croisement et de sélection.

### **1.3 Objectifs du stage**

Les études de l'écologie et de la phénologie de cette espèce, pourtant indispensables à la domestication de la plante en vue d'une utilisation potentielle en phytoremédiation étant quasi inexistantes, le LSE et les Jardins Botaniques de Nancy se sont associés depuis 2007 pour réaliser une étude de caractérisation et de répartition de l'hyperaccumulateur *N. caerulea* dans les Vosges. L'objectif de mon stage est de compléter ces études de la distribution de l'espèce dans le massif vosgien et de réaliser une première caractérisation phénotypique des populations inventoriées.

Un objectif majeur de ce travail a donc été d'étendre les connaissances sur la présence, l'écologie et la phénologie de cette espèce dans le massif vosgien. En effet, dans l'optique d'utiliser *N. caerulea* en phytoremédiation, il est impératif de mieux cerner son mode de vie, ses exigences, ses habitats et surtout les facteurs qui gouvernent l'accumulation des métaux chez cette espèce. Cette étude visait également à déterminer la variabilité d'accumulation des éléments traces métalliques chez *N. caerulea* en conditions naturelles.

Le but de ces recherches étant à terme de sélectionner une ou des populations dont l'écophysiologie laisse espérer une utilisation en phytoremédiation et de mettre en place une démarche de domestication de l'espèce.

## **2 Matériels et méthodes**

### **2.1 Prospection dans le massif vosgien**

Les échantillons et données analysés dans cette étude ont été récoltés dans le massif des Vosges. Ce massif montagneux d'environ 73 000 hectares est situé dans le nord-est de la France et s'étend sur 7 départements. Sa longueur est d'environ 180 km et sa largeur varie entre 20 km au Nord, 60 km au Sud et 4 km à la hauteur de Saverne. Le climat de type semi-continentale y est caractérisé par des hivers souvent froids et enneigés et des étés chauds et secs. Le massif des Vosges offre un profil très contrasté, avec le sud principalement composé de granit et le nord composé essentiellement de grès, l'ouest en pente douce et l'est avec un relief plus accidenté.

Les prospections ont pour objectif d'établir une carte de la répartition de *N. caerulea* dans le massif vosgien et de récolter des échantillons de couple sol-plante afin de procéder à des analyses chimiques de terres et de plantes. La zone de prospection s'étend sur 4 départements : Vosges, Haut-Rhin, Haute-Saône et Territoire de Belfort. Le choix des zones à prospecter a été établi sur la base de données botaniques anciennes, du contexte géologique, du passé industriel et des milieux propices à l'espèce.

Les prélèvements suivent un protocole d'échantillonnage strict mis au point en 2008 par Catherine Sirguy. Ce protocole doit être suivi rigoureusement afin que les prospections à

chaque saison d'échantillonnage soient réalisées de manière identique. Néanmoins, il est à adapter à la taille et à la phénologie des populations des différentes stations. Des relevés phytosociologiques ont été réalisés par l'équipe des Jardins Botaniques de Nancy.

Chaque station prospectée est référencée selon une fiche type de prélèvement. Celle-ci a pour but de décrire les stations où l'espèce est présente (type de milieu, taille de la station, exposition, nombre d'individus, ...) afin de cerner au mieux l'écologie et l'habitat de l'espèce et de suivre l'évolution de chaque population au cours du temps.

La saison de prospection s'est déroulée de début avril à mi-mai en fonction de l'altitude. A partir de fin-mai nous avons procédé à la récolte des semences de *N. caeruleascens*.

## **2.2 Traitements des échantillons**

*Lors de ce stage, j'ai procédé au conditionnement des échantillons de sols des prospections 2007, 2008 et 2010. En raison du nombre important d'échantillons prélevés, seuls les échantillons de sols des saisons 2007 et 2008 ont été analysés, ainsi que les échantillons végétaux de 2008.*

### **2.2.1 Echantillons de sols**

#### *2.2.1.1 Préparation des terres*

En vue des analyses, les échantillons de sols sont séchés à l'étuve à 40°C puis tamisés avec un tamis à maillage de 2 millimètres afin d'éliminer les gros éléments et les débris végétaux et obtenir ainsi une fraction homogène et assez fine pour les analyses.

#### *2.2.1.2 Mesure du $pH_{eau}$*

Le  $pH_{eau}$  a été mesuré selon la norme AFNOR NF ISO 10390 (1994). Une suspension de terre dans de l'eau distillée avec un rapport 1:5 (v:v) est réalisée en 2 répétitions par échantillon. Les suspensions sont mises à agiter pendant 5 mn puis laissées au repos. Les mesures sont réalisées à deux reprises (deux heures après l'agitation et entre les 24h d'agitation) afin de vérifier si l'équilibre chimique est atteint.

#### *2.2.1.3 Extraction des cations échangeables*

En vue d'une détermination de la capacité d'échange cationique et des cations extractibles dans les échantillons de sols, il faut procéder à une mise en solution de ces cations. La méthode utilisée est l'extraction au chlorure de cobaltihexammine selon les normes AFNOR NF X 31-130 (1999) et NF X 31-108 (2002).

Une prise d'essai de 2.5 g de terre séchée à 40°C et tamisée à 2 mm est mise en suspension avec 25 ml de réactif (rapport d'extraction de 1/10, m/V). Les solutions sont agitées durant 1 h pour être ensuite filtrées à 0.45  $\mu$ m et acidifiées avec 200  $\mu$ L  $HNO_3$  à 69% avant analyse. Dans ces conditions, il y a échange entre les cations retenus par l'échantillon de terre et les ions cobaltihexammine de la solution aqueuse. Sur ce même filtrat peuvent être dosés les cations échangés et le cobalt ou la cobaltihexammine.

#### *2.2.1.4 Détermination de la capacité d'échange cationique*

La capacité d'échange cationique (CEC) est déterminée par dosage du cobalt ou de la cobaltihexammine par colorimétrie comme décrit dans la norme AFNOR NF X 31-130 (1999). Le dosage colorimétrique des ions cobaltihexammine en solution est réalisé à une longueur d'onde de 475 nm grâce à un spectrophotomètre. La CEC exprimée en  $cmol^+.kg^{-1}$  a

été calculée selon la formule donnée dans la norme en apportant les corrections de l'adsorption par le filtre et de l'influence de la matière organique soluble.

#### 2.2.1.5 Concentrations en cations échangeables

La détermination des cations extractibles dans les sols est réalisée d'après la norme AFNOR NF X 31-108 (2002) à partir des solutions préparées (2.2.1.3). Quatre éléments majeurs, calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K) et sodium (Na), ainsi que quatre métaux, cadmium (Cd), manganèse (Mn), nickel (Ni) et zinc (Zn), ont été dosés.

Les concentrations en Ca, Mg, Na, Cd, Mn, Ni et Zn ont été analysées par spectrométrie d'émission atomique à plasma induit d'argon (ICP-AES, Liberty II, Varian). Le K a été dosé par spectrométrie d'absorption de flamme. Les éléments en très faibles concentrations (cas du Cd dans certains échantillons) ont été analysés par spectrométrie d'absorption atomique à four Zeeman (AAS, Spectraa 220, Varian).

Afin de vérifier la validité des résultats, chaque série d'analyse contient au moins un échantillon de référence certifié (eau usée, EU-H-2, SCP Science) dont les concentrations en divers éléments sont connues.

#### 2.2.1.6 Taux de saturation du complexe adsorbant

Le taux de saturation exprimé en % correspond au ratio  $(S/T*100)$  où S est la somme des principaux cations échangeables  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  et  $Na^+$  en  $cmol^+.kg^{-1}$  et T est la CEC en  $cmol^+.kg^{-1}$  de chaque échantillon de sol. Il s'exprime entre 0 et 150% selon la classification du Laboratoire Agronomique de Normandie (LANO).

### 2.2.2 Echantillons de plantes

#### 2.2.2.1 Conditionnement des échantillons végétaux

Les plantes récoltées sont lavées abondamment à l'eau du robinet afin d'éliminer toutes les particules de terre puis rincées à l'eau distillée et séchées avec du papier absorbant. Elles sont séparées en deux parties : hampes et feuilles (les racines n'étant pas conservées). Les biomasses sèches sont déterminées après passage à l'étuve à 70°C pendant 48h.

#### 2.2.2.2 Mise en solution

Afin de déterminer les concentrations totales des métaux des échantillons végétaux, on procède à une minéralisation acide. Les différents organes des plantes sont broyés dans un mortier en agate. Le protocole de minéralisation utilisé permet de minéraliser les échantillons de faibles biomasses sèches. Une prise d'essai de 50 mg est placée dans un tube en verre de volume 8 ml avec 2 ml  $HNO_3$  concentré et mis à l'étuve à 80°C pendant 24 heures. Une fois les tubes refroidis, 2 ml  $H_2O_2$  30% sont ajoutés. Les minéralisats sont filtrés sur filtres sans cendres et complétés à 10 mL dans des fioles jaugées avec de l'eau ultra pure.

Deux répétitions par échantillons sont effectuées.

Afin de vérifier la validité des résultats, chaque série de 50 minéralisations contient un blanc et un témoin (échantillon interne de contrôle de *N. caerulea*) qui suivent le même protocole de minéralisation. La valeur du blanc sera retranchée des valeurs pour les échantillons et le témoin permet de vérifier le rendement de minéralisation.

#### 2.2.2.3 Concentrations totales en métaux

Les concentrations totales en métaux dans les plantes sont obtenues par analyses ICP et/ou AAS des minéralisats végétaux. Cinq métaux ont été dosés : Cd, Fe, Mn, Ni et Zn. Les

quantités d'éléments traces métalliques, correspondant à la capacité de phytoextraction, sont obtenues en rapportant les teneurs dans les plantes à la quantité de biomasse sèche produite.

#### 2.2.2.4 Facteurs de bioconcentration

Le facteur de bioconcentration de chaque élément pour chaque individu a été déterminé par le ratio  $[\text{Métal}]_{\text{plante}} / [\text{Métal}]_{\text{sol}}$  où  $[\text{Métal}]_{\text{plante}}$  représente la concentration en métal dans la biomasse sèche (en  $\text{mg.kg}^{-1}$ ) et  $[\text{Métal}]_{\text{sol}}$  représente la concentration en métal extractible au chlorure de cobaltihexammine dans le sol (en  $\text{mg.kg}^{-1}$  sol sec). Ce facteur donne une idée de la capacité de chaque plante à prélever et accumuler Cd, Mn, Ni et Zn. Il est l'un des facteurs les plus importants dans la détermination de la faisabilité de la phytoextraction (McGrath *et al.*, 2006).

### 2.3 Traitement statistique et cartographie des données

L'amplitude écologique des populations de *N. caerulea* a été représentée graphiquement par des histogrammes de fréquence. La représentation en box-plot a été utilisée pour représenter la variabilité au sein des populations. Afin d'obtenir une vision globale des différents paramètres mesurés sur les stations prospectées et d'identifier des groupes ou des relations entre variables ou entre observations, nous avons utilisé des méthodes statistiques multivariées. Les analyses sont réalisées soit sur les données brutes soit sur les données log-transformées afin de répondre à la normalité nécessaire à la réalisation de ces analyses statistiques. L'analyse factorielle des correspondances (AFC) et l'analyse en composantes principales (ACP) ont donc été utilisées pour regrouper les variables et/ou les observations. Le nombre de facteurs a été limité à 4 et les projections ont été tracées sur ces 4 facteurs. Une rotation des 4 facteurs (lors de l'ACP) a été réalisée selon la méthode varimax. En complément, l'analyse des correspondances multiples (ACM) a permis de transformer les variables qualitatives en variables quantitatives sur la base de leurs contributions au facteur 1 (facteur le plus explicatif) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) a complété le classement des paramètres. Des analyses successives ont été réalisées en éliminant à chaque étapes les associations identifiées jusqu'à ne plus pouvoir distinguer de groupes. Les interprétations ont été basées sur l'ensemble des projections et des analyses. Pour désigner les stations, un système de codification a été utilisé pour chaque analyse (annexe 1). Une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée pour déterminer s'il existe des différences significatives entre les écotypes distingués. Les régressions sont accompagnées de l'équation de régression et du coefficient de corrélation R. Toutes les analyses ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT (version d'évaluation 2010.4.01).

Une carte de la localisation des stations de *N. caerulea* a été réalisée avec le logiciel libre Quantum GIS 1.4.0 - Enceladus en utilisant un fond de carte IGN d'échelle 1/1 000 000.

## 3 Résultats

### 3.1 Distribution et écologie de *Nocca caerulea*

Distribution géographique : Suite aux 3 campagnes de prospections, 67 stations de *N. caerulea* ont été recensées dans 4 départements du massif vosgien (figure 1 ; annexe 2). L'espèce a été observée d'est en ouest de Rupt-sur-Moselle (88) à Buhl (68) et du nord au sud de Le Valtin (88) à Plancher-Bas (70). Le nombre de stations est nettement plus important sur le versant lorrain que sur le versant alsacien. L'espèce est absente sur la partie nord du massif.

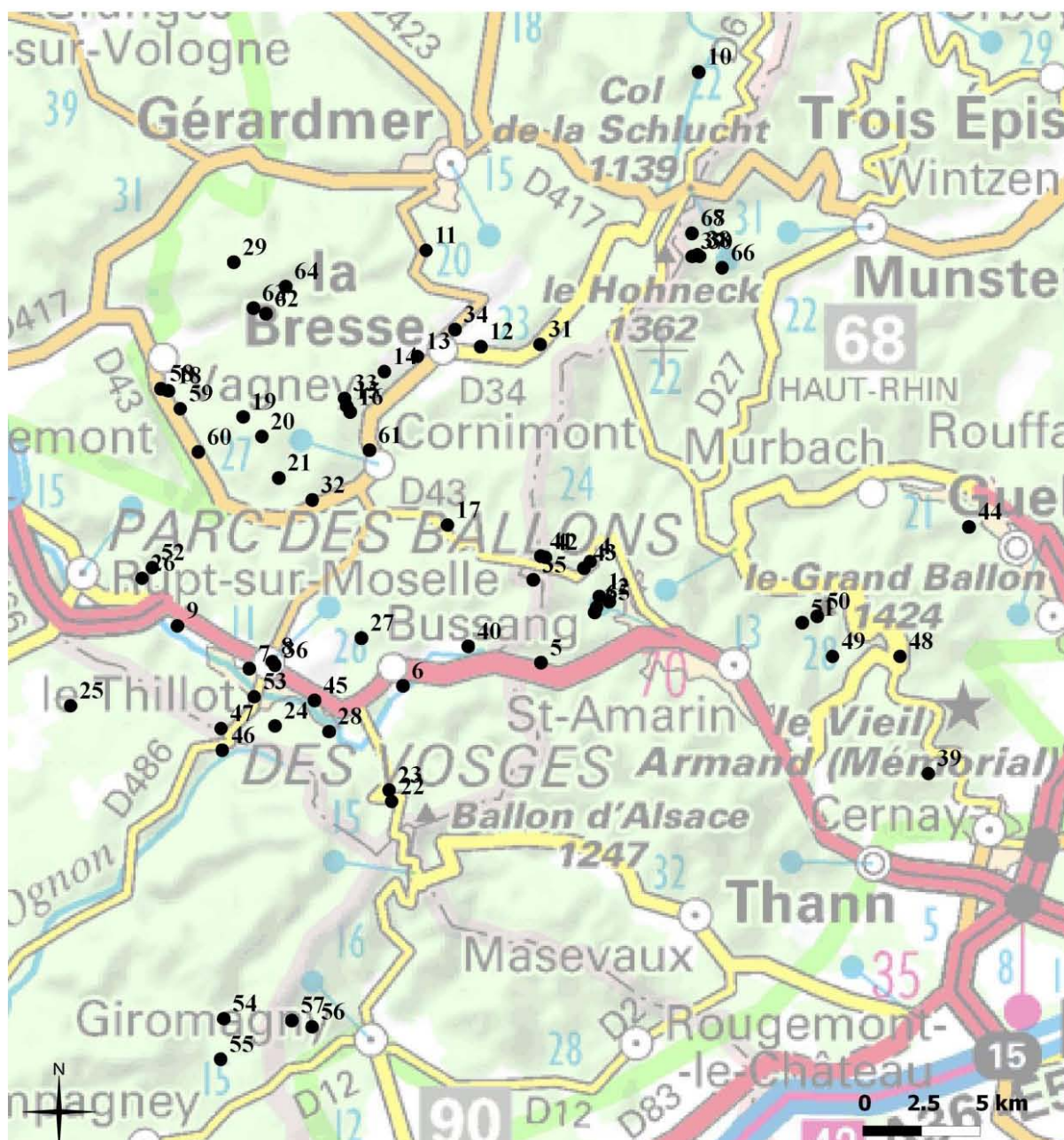


Figure 1 : Localisation des 67 stations de *Noccaea caerulea* recensées dans les Vosges

Description des stations : Les stations recensées, situées entre 410 et 1250 m d'altitude (moyenne±écart-type : 703±201 m) (figure 2a), étaient en grande majorité exposées au sud (figure 2b) sur les talus aux bords des routes ou en prairies. Toutefois quelques unes (versant alsacien) étaient dans des chênaies claires thermophiles (annexe 3). La taille des stations étaient très variable (de quelques mètres à tout un village ou toute une prairie). Les stations étaient plus nombreuses sur le versant lorrain que sur le versant alsacien certainement en raison des différences de mode de gestion (fauche plus précoce en Alsace) et de types de milieux (chênaies thermophiles très escarpées côté alsacien ; prairies en pente plus douce côté lorrain). Quasiment toutes les stations étaient en pente, sur un sol très superficiel, pierreux et drainant. D'un point de vue géologique, les populations étaient présentes le plus souvent sur du granite alcalin et notamment sur le granite des crêtes. Une seule localité comportant plusieurs stations était une serpentine, les autres stations étaient sur des sols non métallifères. La serpentine est une roche métamorphique formée à partir de l'altération d'une roche

éruptive ultramafique. Elle contient de fortes proportions en Mg (18-24%), Fe (6-9%) et Ni (0,1-1%) mais une faible quantité de Ca (1-4%) et Al (1-2%) (Chardot *et al.*, 2007).

Les populations, le plus souvent de petite taille (figure 2c), comptaient majoritairement moins de 200 pieds. Cependant, 4 stations comportaient plus de 1000 individus.

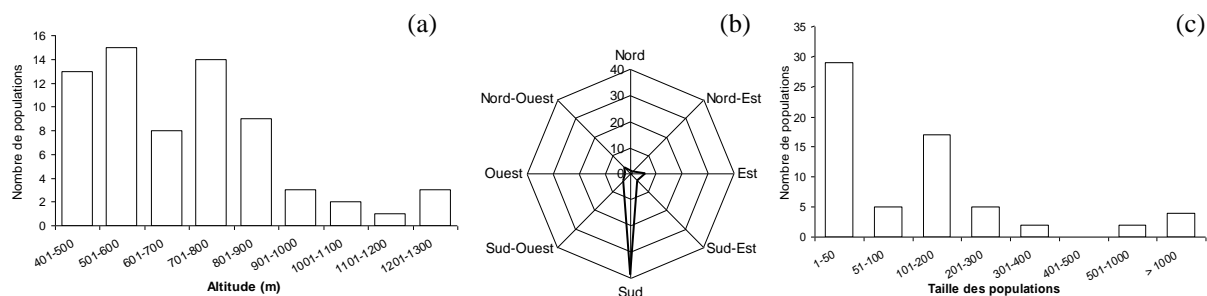


Figure 2 : Amplitude écologique des populations de *Noccaea caerulea* dans le massif vosgien. (a) altitude, (b) exposition, (c) taille des populations (nombre d'individus)

**Chimie des sols :** Une grande variabilité est observée pour l'ensemble des paramètres mesurés (tableau 1). Cette variabilité est valable aussi bien entre stations qu'à l'intérieur d'une même station. La gamme de pH des sols s'étend de 4.20 à 6.75 avec un pH moyen par station de 4.21 à 6.28. Les sols ont une CEC faible à très élevée (2.26-27.64  $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ ) et un taux de saturation de la CEC insuffisant à saturé (30-135%). Les plages de variation des concentrations en éléments majeurs extractibles sont de 91-6181  $\text{mg Ca}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 19-373  $\text{mg K}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ , 18-542  $\text{mg Mg}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$  et 5-506  $\text{mg Na}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ ; et celles en éléments traces métalliques de 0.3-283  $\text{mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 0.0001-0.5  $\text{mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 0.2-1  $\text{mg Ni} \cdot \text{kg}^{-1}$  et 0.2-179  $\text{mg Mn} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Les teneurs en éléments traces métalliques extractibles dans les sols des différentes stations entrent dans les gammes de valeurs « ordinaires » sauf en Zn pour une station. Cependant, les sols des stations sur serpentine n'ont pas été analysés.

Tableau 1 : Caractérisation chimique des sols des stations de *Noccaea caerulea*

	Ca	K	Mg	Na	Cd	Mn	Ni	Zn	pH	CEC	Saturation
Moyenne	2355,78	146,92	240,06	51,38	0,09	34,73	0,52	12,27	5,34	13,06	103,1
Ecart-type	1421,95	83,02	135,13	87,10	0,08	37,75	0,19	38,87	0,66	6,26	20,8
Minimum	91,10	19,10	17,64	5,05	0,0001	0,16	0,23	0,19	4,2	2,26	29,9
Maximum	6181,34	372,62	541,72	505,63	0,48	178,80	1,15	283,4	6,75	27,64	135,1
n (effectif)	57	57	57	57	57	57	57	57	174	63	63

Concentrations en éléments minéraux extractibles ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); CEC ( $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ ); Taux de saturation (%)

**Cortège floristique :** Un nombre total de 273 espèces a été relevé sur 52 stations (annexe 4) avec une moyenne de 24 espèces (écart-type :  $\pm 13$  espèces) par sites soit un coefficient de variation de 54%. 113 espèces uniques (présentes dans une seule station), soit 41% du nombre total d'espèces, ont été observées. L'amplitude entre relevé est de 8 à 67 espèces. Les 9 espèces les plus fréquemment rencontrées (au minimum dans 40% des relevés) avec *N. caerulea* sont : *Galium mollugo* (63%); *Rumex acetosa* (62%); *Taraxacum sp.* (60%); *Achillea millefolium* (52%); *Urtica dioica* (44%); *Heracleum sphondylium* (42%); *Plantago lanceolata* (42%); *Silene dioica* (40%); *Anemone nemorosa* (40%).

Quelques espèces tolérantes aux métaux étaient présentes telles que *Arrhenatherum elatius*, *Campanula rotundifolia*, *Hieracium pilosella*, *Plantago lanceolata*, *Rumex acetosa*, *Silene dioica*, *Silene vulgaris*, ou encore *Thymus pulegioides*.

### 3.2 Aptitude hyperaccumulatrice en conditions naturelles

Les individus de *N. caerulea* analysés présentent des concentrations en métaux des tissus aériens très variables : 0.8-127 mg Cd.kg<sup>-1</sup>, 98-1581 mg Fe.kg<sup>-1</sup>, 17-752 mg Mn.kg<sup>-1</sup>, 0.2-4455 mg Ni.kg<sup>-1</sup>, 120-16730 mg Zn.kg<sup>-1</sup> (tableau 2). Quatre plantes possèdent cependant une teneur en Cd inférieure à la limite de détection (LD = 0,0135 mg.kg<sup>-1</sup>). Vingt individus ont des concentrations supérieures au seuil admis pour définir l'hyperaccumulation soit 100 mg Cd.kg<sup>-1</sup> matière sèche (0,01%), 1000 mg Ni.kg<sup>-1</sup>MS (0,1%) et 10000 mg Zn.kg<sup>-1</sup>MS (1%) (Reeves, 2003). Par conséquent ces plantes peuvent être qualifiées d'hyperaccumulatrices. Le plus grand nombre d'hyperaccumulateur est observé pour le Zn avec douze individus provenant de La Bresse (pour 6 d'entre eux), Basse-sur-le-Rupt (4 pieds), Fresse-sur-Moselle (1 individu) et Cornimont (1 plante). Pour le Ni, sept pieds sont hyperaccumulateurs et proviennent de Ventron (1 plante) et de la serpentine d'Oderen (6 individus). Enfin un seul individu issu d'une station de La Bresse hyperaccumule le Cd. Aucune plante n'hyperaccumule plus d'un élément trace métallique.

La mesure des teneurs en métaux dans les plantes et dans les sols a permis de calculer un facteur de bioconcentration pour chaque individu et chaque métal. Une forte variabilité a été observée tant au niveau inter- qu'au niveau intra-population (tableau 3). La représentation en box-plot (figure 3) montre l'existence d'individus remarquables (outlayers) présentant une forte bioconcentration. Ces individus sont capables d'extraire les métaux à des concentrations élevées même pour des teneurs normales en ces éléments dans les sols. Ce sont ces individus qui sont intéressants du point de vue de la phytoextraction. Les accumulations les plus élevées sont observées pour le Zn, le Cd et le Ni. Ceci est la preuve du caractère hyperaccumulateur de l'espèce pour ces métaux.

Tableau 2 : Concentrations (mg.kg<sup>-1</sup> MS) en 5 métaux dans la biomasse aérienne de *N. caerulea*

	Cd	Fe	Mn	Ni	Zn
Moyenne	20,8	317,9	70,4	238,6	6229,1
Ecart-type	19	264,7	89,9	724,9	3208,5
Minimum	0,82	97,6	16,8	0,15	119,2
Maximum	127,32	1580,5	751,8	4455	16730,2
n (effectif)	96	99	94	100	100

Tableau 3 : Facteurs de bioconcentration de 4 métaux lourds chez *Noccaea caerulea*

	BCF Cd	BCF Mn	BCF Ni	BCF Zn
Moyenne	453,2	8,8	212,8	1942,7
Ecart-type	554,7	26,1	928,2	2538,3
Minimum	4,8	0,3	0,5	25,1
Maximum	2545,7	226,8	8611,7	15249,8
n (effectif)	81	80	86	86

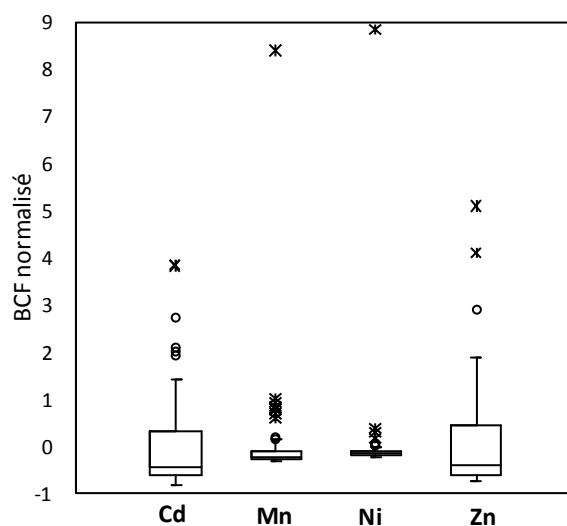


Figure 3 : Facteurs de bioconcentration normalisés chez *Noccaea caerulea*

L'analyse des relations entre les teneurs en métaux dans les sols et les facteurs de bioconcentration des mêmes éléments dans les plantes met en évidence des corrélations négatives (non linéaires) hautement significatives ( $p < 0.01$ ) en ce qui concerne les éléments traces métalliques Zn et Cd (figure 4). En d'autres termes, plus les concentrations en Zn et en



Cd extractibles dans les sols sont élevées, plus les facteurs de bioconcentration de ces métaux chez *N. caeruleus* sont faibles. Ces observations coïncident avec celles de Liang *et al.* (2009) qui ont mesuré une diminution des facteurs de bioconcentration chez les individus hyperaccumulateurs avec l'augmentation de la concentration en métaux dans le sol.

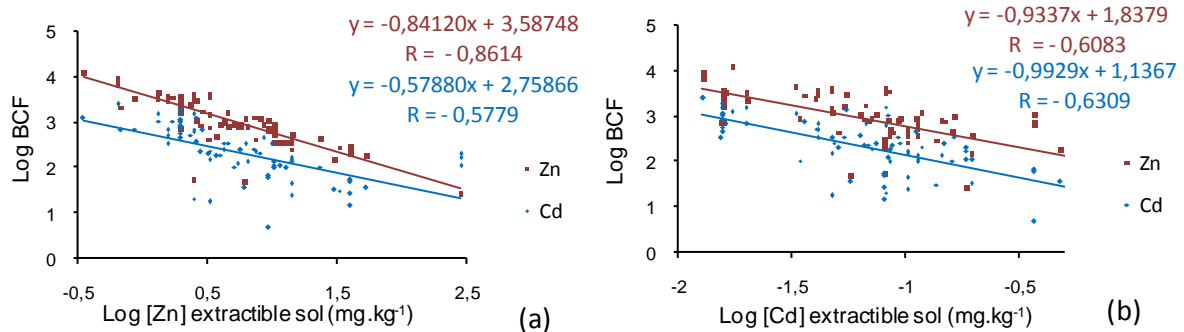


Figure 4 : Relation entre les facteurs de bioconcentration du Zn et du Cd et les concentrations extractibles du Zn (a ; n=81) et du Cd (b ; n=80) dans les sols (mg.kg<sup>-1</sup>)

Des corrélations significativement positives ont été observées entre les facteurs de bioconcentration en Zn et Cd ( $p < 0.01$ ; figure 5a) et entre les facteurs de bioconcentration en Zn et Ni ( $p < 0.05$ ; figure 5b). Cela démontre que plus un individu accumule de Cd plus il accumule de Zn. De même avec le Zn et le Ni. Cependant, malgré une significativité statistique, le lien entre les facteurs de bioconcentration en Zn et Ni est nettement moins fort que le précédent. Une relation entre Zn et Cd a déjà été mise en évidence par d'autres auteurs (Roosens *et al.*, 2003 ; Dechamps *et al.*, 2005).

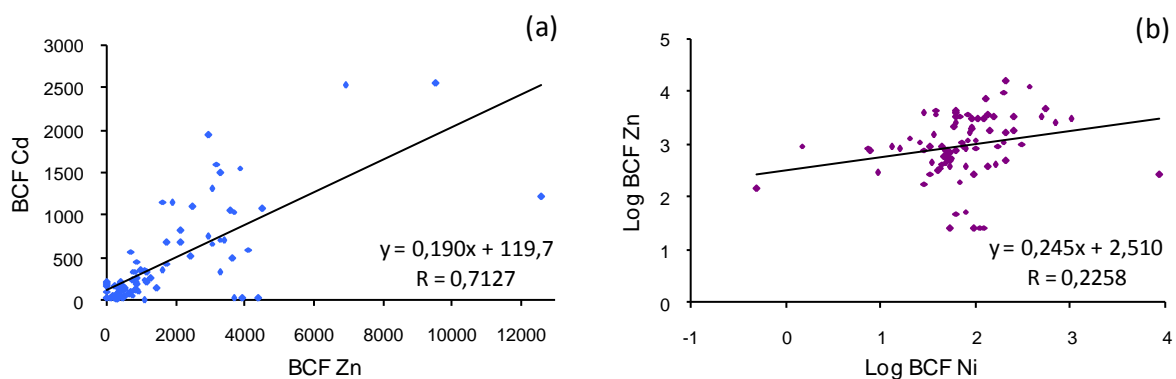


Figure 5 : Relation entre les facteurs de bioconcentration en Zn et Cd (a) et en Zn et Ni (b) chez *N. caeruleus* (n=82)

### 3.3 Analyse exploratoire des données

#### 3.3.1 Caractérisation des stations selon le cortège floristique

Trois ACP et AFC successives ont été réalisées sur les observations et sur les variables par élimination progressive des groupes identifiés. Ces analyses ont été effectuées sur le tableau de présence-absence des espèces végétales. Elles ont permis de mettre en évidence plusieurs ensembles de stations (figure 6).

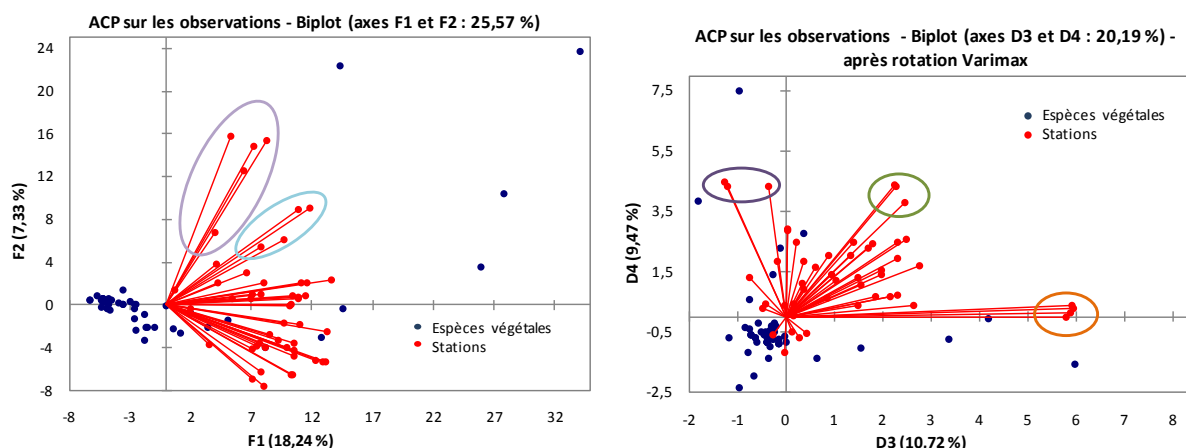


Figure 6 : Exemples de mise en évidence de groupes homogènes de stations suite aux analyses ACP

Sur les 4 facteurs retenus pour les analyses, le pourcentage de variance expliquée variait de 19,03% à 41,1% (tableau 4). Les rotations varimax ont permis dans certains cas d’observer des distinctions plus nettes dans la formation des groupes. La CAH permet de visualiser les distances entre les variables et ainsi de distinguer des groupes homogènes (annexe 5). Le trait en pointillé représente la troncature et permet de visualiser 4 grandes classes homogènes. L’analyse du dendrogramme a révélé la formation de groupes de stations en adéquation avec les résultats des ACP et AFC et ce sont ainsi 10 ensembles de stations qui ont pu être identifiés dont certains correspondant à des niches bien particulières. Le groupe X correspond par exemple aux deux seules stations situées en chênaies thermophiles (versant alsacien). Ces groupes ‘floristiques’ ont ensuite été réutilisés dans le cadre des analyses globales.

Tableau 4 : Pourcentage de variance expliquée par les analyses du cortège floristique

1ère étape		2ème étape		3ème étape	
ACP	AFC	ACP	AFC	ACP	AFC
37,7 / 28,97	19,54	38,31 / 24,51	19,03	41,1 / 29,09	27,25

ACP : sur les observations / sur les variables

### 3.3.2 Caractérisation des stations sur l’ensemble des paramètres

Les analyses exploratoires ont également été conduites sur l’ensemble des variables mesurées (pH, CEC, taux de saturation, concentrations en éléments minéraux dans les sols, facteurs de bioconcentration (BCF) en Cd, Mn, Ni et Zn dans les plantes, altitude, exposition, géologie, taille des populations, groupe ‘floristique’, type de milieu) afin d’étudier les éventuelles relations entre les différents paramètres caractérisant les stations (annexe 6). Les variables quantitatives ont été codées en rang afin de réaliser une AFC.

Concernant l’AFC (figure 7), le pourcentage de variance expliquée par les 4 facteurs atteint 66%. Le facteur 1 qui explique 34,24% de la variance totale est lié d’une part aux facteurs de bioconcentration des métaux dans les plantes et d’autre part à “l’offre du sol”. Ces deux ensembles de variables sont anti-corrélés. Le facteur 2 (16,41%) est quant à lui fortement corrélé aux groupes floristiques identifiés précédemment et partiellement à la géologie. Peu de variables sont liées aux facteurs 3 et 4 (13,94% et 8,63%) mis à part respectivement l’altitude et le facteur de bioconcentration du Ni. L’altitude et l’offre du sol ne semblent pas être des paramètres explicatifs des groupes floristiques identifiés. Les analyses ont également montré un lien très étroit entre les facteurs de bioconcentration du Zn et du Cd souvent anti-corrélés avec les teneurs dans les sols de ces mêmes éléments (figure 7a), confirmant ainsi les régressions linéaires calculées précédemment.

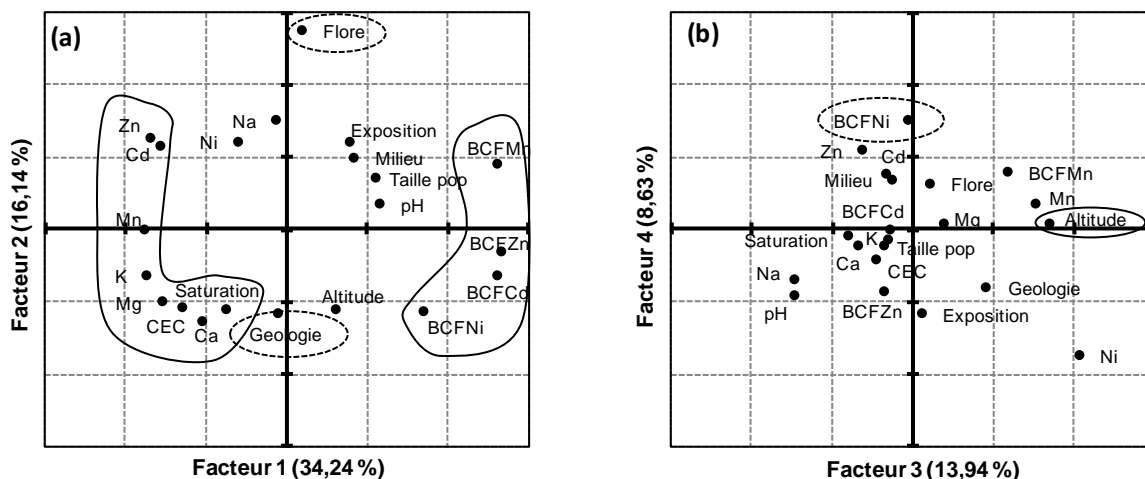


Figure 7 : Cartes factorielles des variables mesurées sur les stations (a : facteurs 1 et 2 ; b : facteurs 3 et 4)

La matrice de corrélation de Pearson, obtenue avec l'ACP sur les variables, signale 32 corrélations linéaires statistiquement significatives (annexe 7). Les liens les plus étroits (donnés par les coefficients de corrélation R) sont observés entre la CEC et la concentration en Ca extractible des sols (0.932), les teneurs dans les sols en Zn et Na (0.908), celles en K et Mg (0.872), l'exposition et la géologie (0.868), le taux de saturation et la teneur en Ca du sol (0.860) et enfin les facteurs de bioconcentration en Zn et Cd chez *N. caerulescens*. Cependant il convient d'être prudent quant à l'interprétation des coefficients proches de zéro qui ne signifient pas forcément une absence de relation entre les paramètres. Une corrélation entre deux variables peut être proche de zéro parce que la relation n'est pas linéaire, ou parce qu'elle est complexe et nécessite la prise en compte d'autres variables. Les 4 facteurs de l'ACP expliquent 54,4% de la variance totale (figure 8). Le facteur 1 (25,78%) confirme le lien entre les paramètres de l'offre du sol mis en évidence par l'AFC et les place en opposition avec les paramètres de la typologie des stations. Ceci semble indiquer une anti-corrélation entre ces 2 groupes de variables (figure 8a).

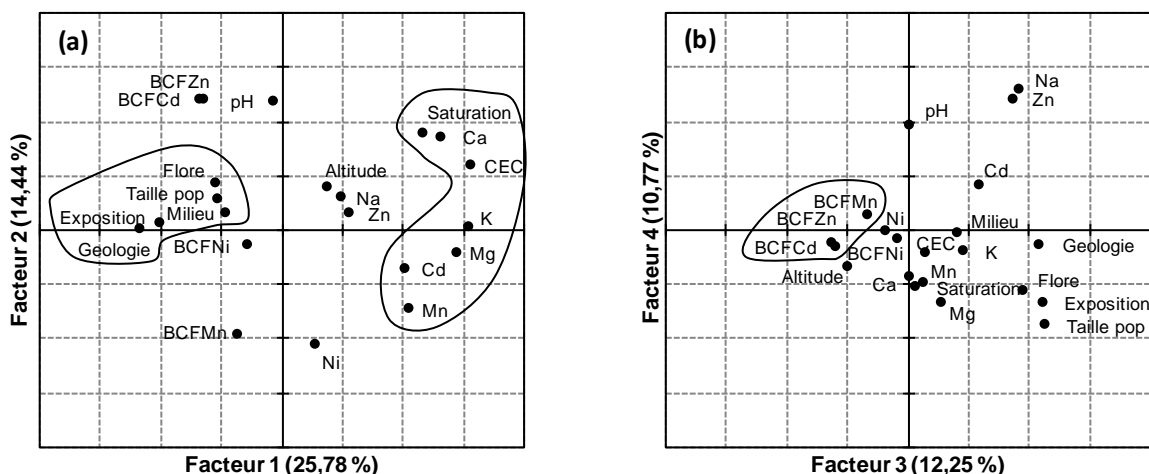


Figure 8 : Cartographie de la position des variables en fonction des composantes principales (a : facteurs 1 et 2 ; b : facteurs 3 et 4)

Cependant la matrice de corrélation (annexe 7) ne montre aucune corrélation significative entre ces variables mis à part la géologie qui apparaît significativement corrélée ( $p < 0.05$ ) à

la CEC, au taux de saturation et à la concentration en Ca dans les sols. Les groupes floristiques s'expliqueraient davantage par le type de milieu, la géologie ou encore l'exposition. La taille des populations de *N. caerulea* serait une conséquence de tous ces paramètres. On peut en effet penser que certains groupes floristiques comporteraient des espèces végétales moins compétitrices ou moins abondantes permettant ainsi un développement plus important de *N. caerulea* et il est évident que selon l'exposition, la géologie et le type de milieu les conditions sont plus ou moins favorables à l'espèce. Le facteur 3 (12,25%) illustre bien le lien existant entre tous les paramètres de bioconcentration sauf dans le cas du Ni qui n'est bien expliqué sur aucun des axes (figure 8b). Les facteurs de bioconcentration mesurés chez *N. caerulea* ne semblent pas avoir de lien avec les paramètres typologiques des stations.

L'ACP sur les observations explique 98,9% de la variance totale sur l'ensemble des 4 facteurs (figure 9). Toutes les stations expliquent ou sont expliquées par les axes. Trois grands ensembles de stations (plus 2 stations à part) peuvent être distingués sur la base de l'ensemble des variables étudiées dont un fortement lié au facteur 1 (73,13%).

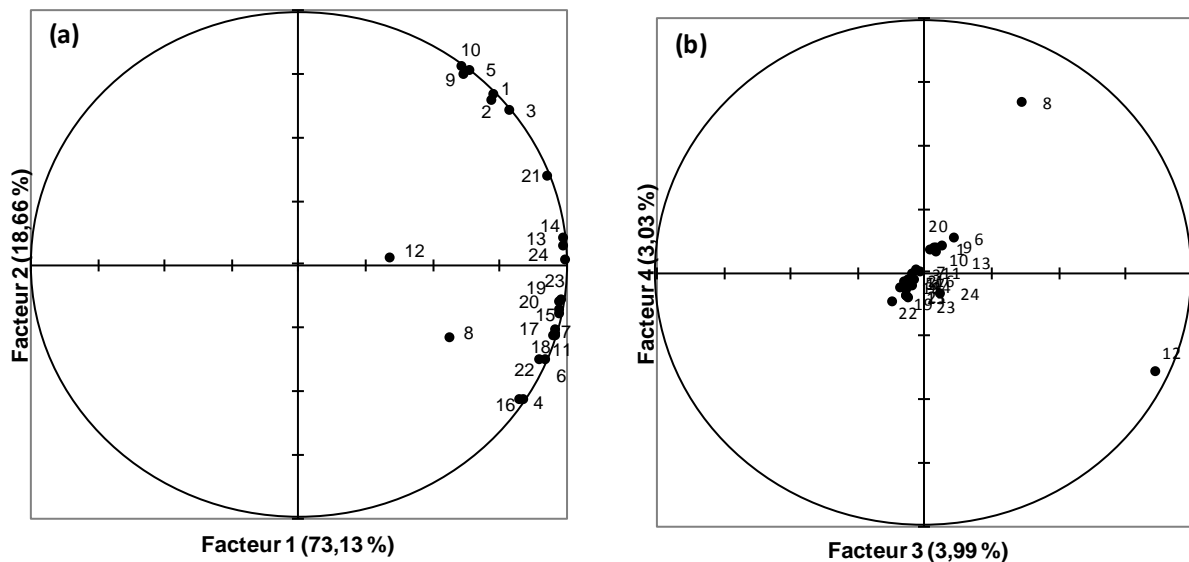


Figure 9 : Cercles de corrélations des stations (a : facteurs 1 et 2 ; b : facteurs 3 et 4)

D'après la CAH des stations, trois ensembles homogènes plus une station, correspondant approximativement aux ensembles identifiés sur le cercle des corrélations (figure 9), peuvent être distingués (annexe 8). Les stations ne semblent pas se regrouper selon leur proximité géographique, mais plutôt selon certaines caractéristiques communes. Nous considérerons ces groupes comme des écotypes écologiques dans le sens où les stations appartenant à chaque classe présentent des propriétés homogènes. Quelques propriétés similaires à chaque ensemble ont en effet pu être identifiées mais mériteraient d'être confirmées. Ainsi, le groupe A est composé des stations présentant au niveau des sols les teneurs en Zn les plus élevées et souvent de fortes concentrations en Mg. Les stations du groupe B semblent caractérisées par les taux de saturation les plus faibles et des facteurs de bioconcentration en Zn dans les plantes assez élevés. Le groupe C rassemble les sites possédant une forte concentration en Ca dans les sols, les CEC les plus fortes et de fait les taux de saturation les plus élevés ainsi que dans la majorité des cas des facteurs de bioconcentration en Cd, Ni et Zn dans les plantes les plus grands. Enfin le groupe D, représenté par la seule station 2007\_15 (La Bresse) se démarque par les teneurs en Cd ( $0,01 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) et en Zn ( $0,63 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) dans les sols les plus faibles et les facteurs de bioconcentration du Cd (2538,54) et du Zn (8242,47) les plus élevés

parmi l'ensemble des stations. La population de cette station présente donc une étonnante capacité d'extraction à la fois du Zn et du Cd et mérite d'être étudiée plus profondément. De façon à déterminer s'il existe des différences significatives entre ces groupes et en expliquer l'origine de façon statistique, une ANOVA a été réalisée avec comme variable explicative l'appartenance au groupe (A, B, C ou D) et comme variables dépendantes les paramètres mesurés. Cette analyse confirme en partie les observations précédentes. Le groupe A se distingue principalement par le taux de saturation, la concentration en Zn dans les sols et les facteurs de bioconcentration en Cd et Zn. Le groupe B est caractérisé par la CEC, le taux de saturation et les teneurs en éléments majeurs extractibles dans les sols. Enfin ce sont le taux de saturation, l'altitude, la taille des populations et l'exposition qui interviennent dans la distinction du groupe C.

La CAH des paramètres mesurés permet de distinguer trois grands ensembles de variables (annexe 9). Le premier groupe composé de la concentration en Ca dans les sols, de l'altitude et des facteurs de bioconcentration du Cd et du Zn ne présente de relations significatives avec aucun des autres groupes. Le deuxième groupe est constitué par les teneurs en K, Na et Mg dans les sols associés au taux de saturation. Enfin le troisième groupe rassemble les autres paramètres avec une association très étroite (dissimilarité de seulement 0,02) entre la géologie, l'exposition, la taille des populations, le type de milieu et les groupes floristiques.

## 4 Discussion

### 4.1 Niche écologique de *Noccaea caerulescens* dans le massif vosgien

Toutes nos observations concernant l'écologie et la flore accompagnatrice de *N. caerulescens* dans le massif vosgien sont en accords avec les données sur l'écologie de cette espèce au Luxembourg (Molitor *et al.*, 2005) et viennent confirmer et compléter les principales conclusions dégagées lors des précédentes études (Vigo, 2007 ; Martin, 2008).

L'absence de *N. caerulescens* dans certains milieux, alors que ceux-ci pourraient au vu de son écologie lui être favorable, peut s'expliquer de différentes façons. La première explication peut être historique, l'espèce n'ayant pas encore eu la possibilité d'atteindre ces endroits. D'autres explications ont été proposées par Ingrouille & Smirnoff (1986) : présence de métaux non tolérés, teneur toxique en métaux par-rapport à ce que la plante peut tolérer, ou à l'inverse absence ou teneur en métaux trop faible pouvant provoquer des carences (Pollard & Baker, 1997). Enfin, une autre explication est la sensibilité de *N. caerulescens* à la compétition, obligeant cette plante à s'installer là où peu d'espèces peuvent survivre, notamment les milieux anthropisés avec des sols très superficiels.

Dans les Vosges, l'installation de *N. caerulescens* ne semble pas être conditionnée par la teneur en élément métallique du sol. En effet, cette espèce s'est installée sur des sols présentant de larges gammes de concentration extractible en Zn (0.2-283.4 mg.kg<sup>-1</sup>), Cd (0.0001-0.5 mg.kg<sup>-1</sup>), Mn (0.2-178.8 mg.kg<sup>-1</sup>) et Ni (0.2-1.2 mg.kg<sup>-1</sup>). Les exigences climatiques, et plus particulièrement le caractère héliophile et thermophile (exposition sud, milieu sec et drainant) de l'espèce ainsi que sa faible compétitivité (présence en altitude dans des milieux ouverts et souvent gérés par l'Homme) expliqueraient davantage sa répartition dans ce massif montagneux. L'intervention de l'Homme par la fauche ou la présence de bétail (pâturage) semblent essentiels au maintien de l'espèce et constitueraient un facteur important de dissémination et de propagation de l'espèce. Ceci soutient l'idée que les activités humaines aient probablement aidées et influencées la dispersion de l'espèce (Koch *et al.*, 1998 ; Ingrouille & Smirnoff, 1986 ; Riley, 1956) même en dehors des sites miniers. Cela démontre la grande préférence de cette espèce pour les milieux ouverts et anthropisés ou les sols

décapés, où la compétition est souvent plus faible. La plupart des stations sont présentes sur des sols acides, mais l'espèce n'y est pas limitée car certains sols sont proches de la neutralité. Selon Molitor *et al.* (2005), la large gamme de pH est en accord avec une large variation dans les teneurs en Ca et Mg ce qui va dans le même sens que dans cette présente étude.

L'espèce est absente de la partie nord du massif sans doute en raison de la géologie. En effet, les populations sont majoritairement présentes sur du granite alcalin et plus précisément sur le granite des crêtes. La distribution géographique de l'espèce à l'échelle du massif vosgien est limitée entre 410 m et 1250 m d'altitude et la géologie semble être un facteur déterminant vis-à-vis de son installation tout comme le type de milieu. Deux grands types de stations ont pu être observées : les stations subnaturelles (ou primaires) et les sites anthropisés. Pour des raisons qui demeurent encore inconnues, l'espèce est très abondante dans la vallée de la Moselotte dans la zone qui s'étend entre Vagney, Saulxures-sur-Moselotte, La Bresse et Gérardmer.

La faible capacité de dispersion de l'espèce associée à l'isolement des populations peuvent rapidement mener à une différenciation génétique des populations. Ceci explique sans doute en partie la forte variabilité existant chez cette espèce mais la fragilise. Les populations très petites, qui peuvent disparaître et réapparaître d'un site de causes naturelles, sont spécialement en danger (Reeves *et al.*, 2001) et une gestion prudente des talus routiers serait même nécessaire pour assurer la survie de l'espèce sur le long terme (Molitor *et al.*, 2005).

Concernant le cortège végétal accompagnant *N. caerulea*, beaucoup de biais entravent l'exploitation possible de ces résultats. La richesse en nombre d'espèce dépendant de l'étendue des stations, de la date d'observation, de l'altitude, de l'observateur et de la méthodologie du relevé. Ces éléments pourraient en partie expliquer la grande amplitude du nombre d'espèce des relevés et il s'avère notamment nécessaire de compléter les relevés floristiques des stations de 2007. Cependant, il est clair que les espèces les plus fréquemment rencontrées sont des plantes héliophile ou de demi-ombre, appartenant à un cortège rudéral nitrophile, affectionnant les sols neutres à moyennement acides et ayant une préférence pour les sols drainants. Ceci s'accorde avec nos observations concernant l'habitat de *N. caerulea*. Les analyses multivariées du cortège floristique ont mis en évidence l'existence de niches particulières avec une flore associée permettant de regrouper nos stations en 10 groupes floristiques. Ces groupes floristiques s'expliquent par le type de milieu, l'exposition et la géologie. L'altitude n'est cependant pas un facteur explicatif. Les stations sont peut être situées dans un étage altitudinal où les effets de l'altitude notamment sur la flore ne sont pas visibles. De même, les paramètres du sol ainsi que les facteurs de bioconcentration des métaux lourds n'ont pas de lien avec ces ensembles floristiques.

Les différentes observations faites sur le terrain nous permettent d'émettre une hypothèse concernant la dispersion de *N. caerulea* à l'échelle du massif vosgien. L'espèce se serait dispersée à partir des crêtes pour s'étendre sur les deux versants. Les différences de milieux, de relief et de mode de gestion peuvent expliquer le contraste observé dans la répartition de la plante des deux côtés du massif. Du côté lorrain, l'espèce occupe ses habitats préférentiels, à savoir les prairies de pâturage et les talus aux bords des routes, alors que côté alsacien, un entretien des talus plus fréquent et précoce et des milieux plus pentus et fermés limitent la présence de l'espèce aux chênaies thermophiles.

Les objectifs principaux de cette étude étant de définir le(s) habitat(s) et de distinguer d'éventuels écotypes de *N. caerulea* dans le massif vosgien, les analyses multivariées sur l'ensemble des variables sont essentielles. Cependant il faut rester prudent face aux résultats de ces analyses car, ne possédant pas l'intégralité des résultats, beaucoup de stations ont été retirées et notamment les stations sur serpentines : seulement 22 stations sur les 68 stations recensées sont prises en compte dans les analyses multivariées sur l'ensemble des paramètres.

Cependant quelques grandes observations peuvent être tirées. Tout d'abord, en condition non métallifère, les teneurs en métaux extractibles dans les sols ne semblent pas intervenir dans la typologie des stations. Ensuite, à propos des liens potentiels entre les paramètres, il est clair que les paramètres du sol sont liés entre eux et notamment la CEC, le taux de saturation et les éléments majeurs. Dans beaucoup d'étude, le pH est corrélé avec les éléments du sol (Robinson *et al.*, 1998) pourtant un tel lien n'a pu être mis en évidence ici.

Une des perspectives futures est d'utiliser des modèles géostatistiques pour déterminer la niche écologique de *N. caeruleus* dans le massif vosgien sur la base des données déjà acquises et de données climatiques.

## 4.2 Identification d'écotypes

Au vu de toutes les analyses, quatre écotypes ayant probablement des comportements différents ont été identifiés dans la zone d'étude. Ce sont principalement les paramètres du sol et les facteurs de bioconcentration des métaux lourds qui interviennent dans la différenciation des écotypes. Seul le groupe C se distingue essentiellement au niveau des paramètres de la typologie des stations (altitude, exposition et taille des populations). La concentration en métaux dans les parties aériennes des plantes est un caractère phénotypique déterminant dans le choix des futurs candidats pour la phytoextraction. Or les analyses ANOVA nous ont révélé que ce paramètre n'intervient pas directement dans la différenciation des écotypes mais indirectement via le facteur de bioconcentration. Cela signifie que certains des écotypes déterminés ici présentent surtout un intérêt pour leur aptitude à concentrer les métaux lorsque ceux-ci sont faiblement disponibles dans le sol. Le fait que nous n'ayons pas vu d'effet de la concentration en métal sur la définition des écotypes peut être relié à la non prise en compte des individus développés sur la serpentine. Les explications données ici ne sont qu'une première interprétation qu'il faut affiner et compléter. Il faut approfondir les études pour confirmer si les paramètres intéressants en termes de phytoremédiation présentent bien des caractéristiques particulières au sein de chaque groupe. La localisation géographique ne semble pas jouer de rôle dans l'explication des écotypes mais des conditions locales différentes en ont un.

Il serait également utile de pouvoir établir un lien plus précis entre la typologie des stations et/ou les facteurs du sol vis-à-vis des capacités de phytoextraction des écotypes. On espérerait ainsi définir des critères à l'échelle des Vosges indiquant qu'il serait intéressant d'aller chercher l'espèce tant tel environnement pour sa capacité d'accumulation des métaux.

La caractérisation complète des écotypes permettra de sélectionner ceux dont les critères sont intéressants (facteurs de bioconcentration et teneurs en métaux dans les parties aériennes) et de les exploiter au mieux dans une optique de phytoremédiation en fonction de leurs capacités d'extraction et d'accumulation des métaux mais aussi de leur écologie. En fonction de sa niche écologique, un écotpe peut ne pas s'adapter à d'autres conditions écologiques. Un écotpe se distinguant par d'importants facteurs de bioconcentration, signe d'une forte extraction des métaux lorsqu'ils sont faiblement extractibles dans les sols, sera intéressant à utiliser dans les milieux où la pollution est diffuse comme les milieux agricoles. En intégrant une culture de cet écotpe dans le cycle cultural on peut ainsi espérer maintenir les concentrations inférieures à une valeur seuil. Au contraire, un écotpe se distinguant par son caractère hyperaccumulateur, c'est-à-dire par des teneurs en métaux très élevées dans sa biomasse sèche mais éventuellement un facteur de bioconcentration moindre, sera avantageux sur les sites où la pollution est plus élevée.

Les analyses ont clairement mis en évidence la présence d'individus hyperaccumulateurs de Cd, Zn ou Ni et d'individus possédant un facteur de bioconcentration élevé pour au moins un élément trace métallique et donc potentiellement efficaces dans une optique de phytoremédiation. La forte variabilité observée ne semble cependant pas entièrement liée aux hétérogénéités locales (concentrations dans le sol, fertilité du sol, etc) même si une corrélation négative existe entre les facteurs de bioconcentration en Cd et en Zn chez les plantes et leurs concentrations dans les sols. En effet, Schwartz *et al.* (2006) ont observé que même avec une composition de sol et des conditions de croissance uniformes, il existe une large variation dans le prélèvement et l'accumulation des métaux. Dans cette étude, c'est surtout la phytoextraction du Cd qui nous intéresse le plus car elle prend moins de temps pour atteindre les objectifs d'élimination des métaux (Schwartz *et al.*, 2006).

Pour les analyses statistiques, seules les stations pour lesquelles nous possédions tous les paramètres ont été conservées. Ceci nous a donc privés d'informations importantes à la bonne compréhension des corrélations entre paramètres et de la variabilité du phénomène d'hyperaccumulation en milieux naturels. Il serait donc utile de retourner sur les stations recensées afin d'effectuer de nouveaux prélèvements. De plus, les résultats des analyses des échantillons de sols et de plantes prélevés lors de cette saison de prospection doivent impérativement être intégrés aux analyses statistiques multivariées. Cela devrait permettre de compléter et peut être de confirmer et approfondir les observations faites dans cette étude.

## 5 Conclusion

*N. caerulea* est représentée dans le massif vosgien par un large nombre de populations non-métallicoles et par une population métallicole. L'espèce occupe une niche écologique bien définie en raison de son comportement thermophile et héliophile et de sa faible compétitivité. Elle affectionne les milieux ouverts et souvent anthropisés. Les caractéristiques de la flore accompagnatrice vont d'ailleurs dans ce sens. Connaissant l'écologie de la plante, il sera ainsi possible d'orienter les futures recherches de stations dans ce massif.

Certaines stations présentent des individus hyperaccumulateurs de Cd, Zn ou Ni ainsi que des individus possédant une forte bioconcentration de ces mêmes éléments pour des concentrations standards dans les sols. Quatre écotypes se distinguant essentiellement par les paramètres du sol et les facteurs de bioconcentration ont été identifiés dans les Vosges. Le potentiel pour la phytoremédiation existe. Une étude plus poussée des corrélations entre les différents paramètres des stations et des capacités d'accumulation des individus pourra peut être aboutir au ciblage de stations contenant des écotypes vosgiens de *N. caerulea* capables de répondre aux attentes en termes d'utilité et d'efficacité dans la phytoremédiation.

La forte variabilité intra- et inter-populations offre un formidable potentiel. Il s'avère donc essentiel de connaître le mieux possible les populations naturelles afin de les exploiter correctement tout en conservant ce patrimoine. Il faut mener des études plus approfondies sur les populations les plus prometteuses, notamment par la mise en place de tests de croissance permettant de vérifier en conditions contrôlées les capacités naturelles d'accumulation, et engager des programmes de sélection pour ne garder que les meilleurs individus et de stabilisation pour réduire la variabilité. La domestication de l'espèce par l'établissement d'itinéraires techniques adaptés sera également indispensable à une utilisation efficace de l'espèce dans la dépollution des sols.



## Bibliographie

- AFNOR NF ISO 10390 (1994) Détermination du pH.
- AFNOR NFX 31-130 (1999) Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles.
- AFNOR NFX 31-108 (2002) Détermination des cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  extractibles par l'acétate d'ammonium.
- Assunção A.G.L., Bookum W.M., Nelissen H.J.M., Vooijs R., Schat S. & Ernst W.H.O., 2003a. Differential metal-specific tolerance and accumulation patterns among *Thlaspi caerulescens* populations originating from different soil types. *New Phytologist* 159: 411-419.
- Assunção A.G.L., Schat H. & Aarts M.G.M., 2003b. *Thlaspi caerulescens*, an attractive model species to study heavy metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist* 159: 351-360.
- Baker A.J.M., Reeves R.D. & Hajar A.S.M., 1994. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytologist* 127: 61-68.
- Banášová V., Horak O., Čiamporová M., Nadubinská M. & Lichtscheidl I., 2006. The vegetation of metalliferous and non-metalliferous grasslands in two former mine regions in Central Slovakia. *Biologia, Bratislava* 61(4): 433-439.
- Besnard G., Basic N. & al., 2009. *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae) population genetics in western Switzerland: is the genetic structure affected by natural variation of soil heavy metal concentrations?. *New Phytologist* 181: 974-984.
- Chardot V., Echevarria G., Gury M., Massoura S. & Morel J.L., 2007. Nickel bioavailability in an ultramafic toposequence in the Vosges Mountains (France). *Plant and Soil* 293(1-2): 7-21.
- Dechamps C., Lefèbvre C., Noret N. & Meerts P., 2007. Reaction norms of life history traits in response to zinc in *Thlaspi caerulescens* from metalliferous and nonmetalliferous sites. *New Phytologist* 173(1): 191-198.
- Dechamps C., Roosens N.H., Hotte C. & Meerts P., 2005. Growth and mineral element composition in two ecotypes of *Thlaspi caerulescens* on Cd contaminated soil. *Plant and Soil* 273: 327-335.
- Escarré J., Lefèbvre C., Gruber W., Leblanc M., Lepart J., Rivière Y. & Delay B., 2000. Zinc and cadmium hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens* from metalliferous and nonmetalliferous sites in the Mediterranean area: implications for phytoremediation. *New Phytologist* 145(3): 429-437.

- Frérot H., Lefèbvre C., Petit C., Collin C., Dos Santos A. & Escarré J., 2005. Zinc tolerance and hyperaccumulation in F1 and F2 offspring from intra and interecotype crosses of *Thlaspi caerulescens*. *New Phytologist* 165: 111-119.
- Frérot H., Petit C., Lefèbvre C., Gruber W., Collin C. & Escarré J., 2003. Zinc and cadmium accumulation in controlled crosses between metallicolous and nonmetallicolous populations of *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae). *New Phytologist* 157: 643-648.
- Ingrouille M.J. & Smirnoff N., 1986. *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl. (*T. alpestre* L.) in Britain. *New Phytologist* 102: 219-233.
- Jhee E.M., Dandridge K.L., Christy A.M. & Pollard A.J., 1999. Selective herbivory on low-zinc phenotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae). *Chemoecology* 9 : 93-95.
- Jiménez-Ambriz G., Petit C., Bourrié I., Dubois S., Olivier I. & Ronce O., 2007. Life history variation in the heavy metal tolerant plant *Thlaspi caerulescens* growing in a network of contaminated and noncontaminated sites in southern France: role of gene flow, selection and phenotypic plasticity. *New Phytologist* 173: 199-215.
- Koch M., Mummenhoff K. & Hurka H., 1998. Systematics and evolutionary history of heavy metal tolerant *Thlaspi caerulescens* in Western Europe: evidence from genetic studies based on isozyme analysis. *Biochemical Systematics and Ecology* 26: 823-838.
- LANO. Laboratoire Agronomique de Normandie. Interprétation de la teneur en CaO échangeable. Disponible le 20/06/10 à [http://www.lano.asso.fr/oxyde\\_de\\_calcium.html](http://www.lano.asso.fr/oxyde_de_calcium.html).
- Liang H.M., Lin T.H., Chiou J.M. & Yeh K.C., 2009. Model evaluation of the phytoextraction potential of heavy hyperaccumulators and non-hyperaccumulators. *Environmental Pollution* 157: 1945-1952.
- Lombi E., Zhao F.J., Dunham S.J. & McGrath S.P., 2000. Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goesingense*. *New Phytologist* 145: 11-20.
- Martin L., 2008. Etude phytosociologique de l'hyperaccumulateur *Noccaea caerulescens* dans le massif vosgien : impact du fond géochimique sur la variabilité d'accumulation des métaux. Stage de Master 1 de l'Université Henri Poincaré, France, Nancy, p.41.
- Meerts P. & Van Isacker N., 1997. Heavy metal tolerance and accumulation in metallicolous and non-metallicolous populations of *Thlaspi caerulescens* from continental Europe. *Plant Ecology* 133: 221-231.
- Molitor M., Dechamps C., Gruber W. & Meerts P., 2005. *Thlaspi caerulescens* on nonmetalliferous soil in Luxembourg: ecological niche and genetic variation in mineral element composition. *New Phytologist* 165(2): 503-512.
- Mummenhoff K., Franzke A. & Koch M., 1997. Molecular phylogenetics of *Thlaspi* s.l. (Brassicaceae) based on chloroplast DNA restriction site variation and sequences of the internal transcribed spacers of nuclear ribosomal DNA. *Can. J. Bot.* 75: 469-482.

- Pollard A.J. & Baker A.J.M., 1997. Deterrence of herbivory by zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae). *New Phytologist* 135: 655-658.
- Reeves R.D., 2003. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction. *Plant and Soil* 249: 57-65.
- Reeves R.D. & Baker A.J.M., 2000. In: Raskin I., Ensley B.D., eds. *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 193-229.
- Reeves R.D., Schwartz C., Morel J.L. & Edmondson J., 2001. Distribution and metal-accumulating behavior of *Thlaspi caerulescens* and associated metallophytes in France. *International Journal of Phytoremediation* 3(2): 145-172.
- Richau K.H. & Schat H., 2009. Intraspecific variation of nickel and zinc accumulation and tolerance in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil* 314: 253-262.
- Riley R., 1956. The influence of the breeding system on the genecology of *Thlaspi alpestre* L.. *New Phytologist* 55(3): 319-330.
- Robinson B.H., Leblanc M., Petit D., Brooks R.R., Kirkman J.H. & Gregg P.E.H., 1998. The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils. *Plant and Soil* 203: 47-56.
- Roosens N., Verbruggen N., Meerts P., Ximénez-Embun & Smith J.A.C., 2003. Natural variation in cadmium tolerance and its relationship to metal hyperaccumulation for seven populations of *Thlaspi caerulescens* from Western Europe. *Plant, Cell and Environment* 26: 1657-1672.
- Schat H., Llugany M. & Bernhard R., 2000. Metal-specific patterns of tolerance, uptake, and transport of heavy metals in hyperaccumulating and nonhyperaccumulating metallophytes. In: Terry N., Bañuelos G., eds. *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Boca Raton, FL, USA : CRC Press LLC, 171-188.
- Schmitt-Sirguy C., 2004. Dynamique du Cd disponible du sol sous l'influence de l'hyperaccumulateur *Thlaspi caerulescens*. Thèse de Doctorat de l'INPL, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, Nancy, p.137.
- Schwartz C., Echevarria G. & Morel J.L., 2003. Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil* 249: 27-35.
- Schwartz C., Sirguy C., Peronny S., Reeves R.D., Bourgaud F. & Morel J.L., 2006. Testing of outstanding individuals of *Thlaspi caerulescens* for cadmium phytoextraction. *International Journal of Phytoremediation* 8: 339-357.
- Vigo J., 2007. Etude chorologique et écologique de l'hyperaccumulateur de cadmium et de nickel *Noccaea caerulescens* dans le massif vosgien. Stage de Master 1 de l'Université Henri Poincaré, France, Nancy, p.45.

## Annexe 1 : Codification des stations de *Noccaea caerulescens* dans le massif vosgien

Stations	Carte des stations	Cortège floristique	Ensemble des paramètres
2007_01*	-	1	-
2007_02	1	2	-
2007_03	2	3	-
2007_04	3	4	-
2007_05	4	5	-
2007_06	5	6	-
2007_07	6	7	-
2007_08	7	8	-
2007_09	8	9	-
2007_10	9	10	-
2007_11	10	11	11
2007_12	11	12	9
2007_13a	12	13	2
2007_13b			3
2007_14	13	14	4
2007_15	14	15	5
2007_16	15	16	7
2007_17	16	17	8
2007_18	17	18	12
2007_19	18	19	-
2007_20	19	20	-
2007_21	20	21	6
2007_22	21	22	-
2007_23	22	23	1
2007_24	23	24	-
2007_25	24	25	-
2007_26	25	26	-
2007_27	26	27	-
2007_28	27	28	-
2007_29	28	29	10
2007_30	29	30	-
2007_31	30	31	-
2007_32	31	-	-
2007_33	32	-	-
2007_34	33	-	-
2007_35	34	-	-
2007_36	35	-	-
2007_37	36	-	-
2007_38	37	-	-
2007_39	38	-	-

Stations	Carte des stations	Cortège floristique	Ensemble des paramètres
2008_01	39	32	13
2008_02	40	33	-
2008_03	41	34	14
2008_04	42	35	-
2008_05	43	36	15
2008_06	44	37	16
2008_07a	45	38	17
2008_07b			18
2008_08	46	39	19
2008_09	47	40	20
2008_10	48	41	21
2008_11	49	42	22
2008_12	50	43	23
2008_13	51	44	24
2010_14	52	-	-
2010_15	53	45	-
2010_16	54	-	-
2010_17	55	46	-
2010_18	56	47	-
2010_19	57	48	-
2010_20	58	-	-
2010_21	59	-	-
2010_22	60	-	-
2010_23	61	-	-
2010_24	62	49	-
2010_25	63	-	-
2010_26	64	-	-
2010_27a	65	50	-
2010_27b		51	-
2010_28	66	52	-
2010_29	67	-	-

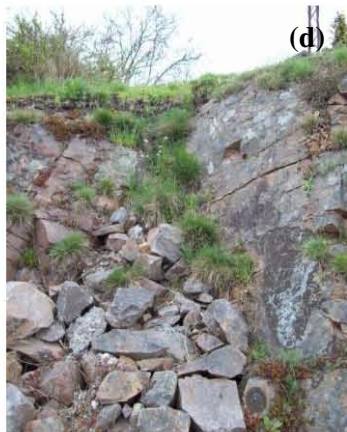
\* *Noccaea caerulescens* n'a pas été retrouvée sur cette station en 2010. Celle-ci a donc été supprimée des analyses sur l'ensemble des paramètres et n'a pas été représentée sur la carte de localisation des différentes stations.

## Annexe 2 : Stations de *Noccaea caerulescens* recensées dans le massif vosgien

Station	Code	Commune	Département	Altitude	Exposition	Nombre d'individus	Géologie
2007_02	1	Oderen	Haut-Rhin (68)	829	Sud	> 100	Eboulis serpentinisés
2007_03	2	Oderen	Haut-Rhin (68)	698	Sud	> 10	Granite alcalin
2007_04	3	Oderen	Haut-Rhin (68)	640	Sud	30	Granite alcalin
2007_05	4	Oderen	Haut-Rhin (68)	628	Sud	150	Granite alcalin
2007_06	5	Urbès	Haut-Rhin (68)	599	Sud	150	Dévonien
2007_07	6	Bussang	Vosges (88)	575	Sud	100	Formations superficielles
2007_08	7	Le Thillot	Vosges (88)	480	Sud	50	Matériau remanié à base de granite
2007_09	8	Le Thillot	Vosges (88)	480	Sud	50	Matériau remanié à base de granite
2007_10	9	Ferdrupt	Vosges (88)	460	Sud-Ouest	< 50	Matériau remanié à base de granite
2007_11	10	Le Valtin	Vosges (88)	735	Sud	30	Granite alcalin
2007_12	11	Gérardmer	Vosges (88)	772	Sud	50	Granite alcalin
2007_13	12	La Bresse	Vosges (88)	492	Sud	> 100	Granite alcalin
2007_14	13	La Bresse	Vosges (88)	738	Sud	> 100	Granite alcalin
2007_15	14	La Bresse	Vosges (88)	789	Sud	50	Granite alcalin
2007_16	15	Cornimont	Vosges (88)	824	Sud	50	Granite alcalin
2007_17	16	Cornimont	Vosges (88)	797	Sud	50	Granite alcalin
2007_18	17	Ventron	Vosges (88)	632	Sud	100	Granite alcalin
2007_19	18	Vagney	Vosges (88)	576	Sud	50	Granite alcalin
2007_20	19	Basse-sur-le-rupt	Vosges (88)	720	Sud	50	Granite alcalin
2007_21	20	Basse-sur-le-rupt	Vosges (88)	820	Nord	30	Granite alcalin
2007_22	21	Saulxure-sur-Moselotte	Vosges (88)	590	Sud	30	Granite alcalin
2007_23	22	St Maurice-sur-Moselle	Vosges (88)	996	Sud	100	Granite alcalin
2007_24	23	St Maurice-sur-Moselle	Vosges (88)	921	Sud-Ouest	< 100	Granite alcalin
2007_25	24	Le Thillot	Vosges (88)	656	Est	> 100	Matériau remanié à base de granite
2007_26	25	Rupt-sur-Moselle	Vosges (88)	438	Sud-Est	50	Matériau remanié à base de granite
2007_27	26	Rupt-sur-Moselle	Vosges (88)	558	Sud-Est	70	Matériau remanié à base de granite
2007_28	27	Le Thillot	Vosges (88)	745	Sud	> 100	Matériau remanié à base de granite
2007_29	28	Fresse-sur-Moselle	Vosges (88)	579	Est	> 1000	Matériau remanié à base de granite
2007_30	29	Vagney	Vosges (88)	780	Sud-Ouest	30	Granite alcalin
2007_31	30	Metzeral	Haut-Rhin (68)	1215	Sud	< 10	Granite alcalin
2007_32	31	La Bresse	Vosges (88)	730	Sud-Est	> 10	Granite alcalin
2007_33	32	Saulxure-sur-Moselotte	Vosges (88)	500	Sud	-	Granite alcalin
2007_34	33	Cornimont	Vosges (88)	890		-	Granite alcalin
2007_35	34	La Bresse	Vosges (88)	735	Sud	> 10	Granite alcalin
2007_36	35	Ventron	Vosges (88)	900		-	Granite alcalin

Station	Code	Commune	Département	Altitude	Exposition	Nombre d'individus	Géologie
2007_37	36	Le Thillot	Vosges (88)	500	Nord-Ouest	> 100	Formations superficielles
2007_38	37	Metzeral	Haut-Rhin (68)	1225	Est	> 10	Granite alcalin
2007_39	38	Metzeral	Haut-Rhin (68)	1250	Est	> 10	Granite alcalin
2008_01	39	Uffholtz	Haut-Rhin (68)	600	Sud	5	Dévonien
2008_02	40	Bussang	Vosges (88)	665	Sud	10	Viséen
2008_03	41	Felling	Haut-Rhin (68)	810	Sud	> 100	Formations glaciaires
2008_04	42	Felling	Haut-Rhin (68)	800	Sud	> 200	Formations glaciaires
2008_05	43	Kruth	Haut-Rhin (68)	600	Sud	> 200	Viséen
2008_06	44	Buhl	Haut-Rhin (68)	565	Sud	2	Viséen
2008_07	45	Fresse-sur-Moselle	Vosges (88)	520	N-E / S-O	> 100	Granite alcalin
2008_08	46	Haut-du-Them-Château-Lambert	Haute-Saône (70)	548	Sud	> 100	Granite alcalin
2008_09	47	Le Thillot	Vosges (88)	740	Sud	> 100	Formations glaciaires
2008_10	48	Goldbach-Altenbach	Haut-Rhin (68)	870	Ouest	> 200	Dévonien
2008_11	49	Geishouse	Haut-Rhin (68)	1035	Sud	20	Viséen
2008_12	50	Geishouse	Haut-Rhin (68)	940	Sud	50	Viséen
2008_13	51	Geishouse	Haut-Rhin (68)	895		1000	Granite alcalin
2010_14	52	Rupt-sur-Moselle	Vosges (88)	575	Sud	250	Formations superficielles
2010_15	53	Le Thillot	Vosges (88)	565	Nord-Ouest	200	Viséen
2010_16	54	Plancher-Bas	Haute-Saône (70)	480	Nord-Ouest	50	Dépôts glaciaires
2010_17	55	Plancher-Bas	Haute-Saône (70)	450	-	250	Dépôts glaciaires
2010_18	56	Auxelles-Haut	Territoire de Belfort (90)	755	-	400	Viséen
2010_19	57	Auxelles-Haut	Territoire de Belfort (90)	775	Est	> 100	Viséen
2010_20	58	Vagney	Vosges (88)	410	Ouest	600	Formations superficielles
2010_21	59	Pubas	Vosges (88)	420	-	150	Formations superficielles
2010_22	60	Thiéfosse	Vosges (88)	433	Sud	170	Granite alcalin
2010_23	61	Cornimont	Vosges (88)	660	Sud	> 1000	Granite alcalin
2010_24	62	Rochesson	Vosges (88)	535	Sud	> 1000	Formations superficielles
2010_25	63	Sapois	Vosges (88)	475	Sud-Est	400	Formations superficielles
2010_26	64	Le Pont Levé	Vosges (88)	550	-	50	Granite alcalin
2010_27	65	Felling	Haut-Rhin (68)	739-810	Sud	> 1000	Eboulis serpentinisés
2010_28	66	Gaschney	Haut-Rhin (68)	1108	Est	60	Granite alcalin
2010_29	67	Frankenthal	Haut-Rhin (68)	1022	-	20	Formations glaciaires

### Annexe 3 : Exemples de milieux prospectés



(a) Fresse-sur-Moselle (88); (b) Le Thillot (88); (c) Cornimont (88); (d) Thiéfosse (88); (e) Fellingring(68); (f) Uffholtz (68); (g) Buhl (68)  
(Photographies du Laboratoire Sols et Environnement)

#### Annexe 4 : Relevés floristiques de certaines stations recensées

N° station	Relevé floristique
2007_01	Anemone nemorosa ; Cardamine hirsuta ; Cardamine pratensis ; Glechoma hederacea ; Lamium purpureum ; Luzula sp ; Noccaea caerulescens ; Rumex acetosa
2007_02	Achillea millefolium ; Betula pendula ; Hypericum perforatum ; Knautia dipsacifolia ; Luzula campestris ; Noccaea caerulescens ; Pteridium aquilinum ; Sorbus sp
2007_03	Achillea millefolium ; Anemone nemorosa ; Cardamine hirsuta ; Cardamine pratensis ; Glechoma hederacea ; Lamium purpureum ; Luzula sp ; Noccaea caerulescens ; Rumex acetosa
2007_04	Achillea millefolium ; Anemone nemorosa ; Cardamine hirsuta ; Cardamine pratensis ; Fragaria vesca ; Glechoma hederacea ; Lamium purpureum ; Luzula sp ; Myosotis sp ; Noccaea caerulescens ; Rumex acetosa ; Taraxacum sp ; Vicia cracca
2007_05	Anemone nemorosa ; Arum maculatum ; Euphorbia amygdaloides ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Mercurialis perennis ; Noccaea caerulescens ; Rubus sp ; Taraxacum sp ; Viola riviniana
2007_06	Anemone nemorosa ; Arum maculatum ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Mercurialis perennis ; Noccaea caerulescens ; Rubus sp ; Taraxacum sp ; Viola riviniana
2007_07	Achillea millefolium ; Cardamine hirsuta ; Cardamine pratensis ; Luzula campestris ; Noccaea caerulescens ; Thymus serpyllum ; Trifolium sp ; Vicia cracca
2007_08	Achillea millefolium ; Cardamine hirsuta ; Cardamine pratensis ; Leucanthemum vulgare ; Luzula campestris ; Noccaea caerulescens ; Taraxacum sp ; Trifolium sp ; Urtica dioica ; Valerianella locusta ; Vicia cracca
2007_09	Achillea millefolium ; Cardamine hirsuta ; Leucanthemum vulgare ; Luzula campestris ; Noccaea caerulescens ; Taraxacum sp ; Trifolium sp ; Urtica dioica ; Valerianella locusta ; Vicia cracca
2007_10	Achillea millefolium ; Cardamine hirsuta ; Hieracium sp ; Luzula campestris ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Urtica dioica ; Veronica filiformis ; Vicia cracca
2007_11	Achillea millefolium ; Anthriscus sylvestris ; Arapidopsis thaliana ; Asplenium trichomanes subsp. trichomanes ; Campanula rotundifolia ; Cytisus scoparius ; Dactylis glomerata ; Deschampsia flexuosa ; Digitalis purpurea ; Festuca pratensis ; Glechoma hederacea ; Heracleum spondylium ; Hypochaeris radicata ; Knautia dipsacifolia ; Lapsana communis ; Leontodon saxatilis ; Linaria vulgaris ; Noccaea caerulescens ; Poa chaixii ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Rumex crispus ; Sedum telephium subsp. telephium ; Silene rupestris ; Succisa pratensis ; Taraxacum sp ; Teucrium scorodonia ; Trifolium pratense ; Veronica persica
2007_12	Achillea millefolium ; Arapidopsis thaliana ; Deschampsia flexuosa ; Glechoma hederacea ; Heracleum spondylium ; Hypochaeris radicata ; Knautia dipsacifolia ; Lapsana communis ; Linaria vulgaris ; Noccaea caerulescens ; Poa chaixii ; Sedum telephium subsp. telephium ; Silene latifolia ; Taraxacum sp ; Teucrium scorodonia ; Thymus pulegioides ; Veronica persica
2007_13	Arapidopsis thaliana ; Deschampsia flexuosa ; Glechoma hederacea ; Heracleum spondylium ; Hypochaeris radicata ; Knautia dipsacifolia ; Lapsana communis ; Linaria vulgaris ; Noccaea caerulescens ; Poa chaixii ; Sedum telephium subsp. telephium ; Silene latifolia ; Taraxacum sp ; Teucrium scorodonia ; Thymus pulegioides ; Veronica persica
2007_14	Achillea millefolium ; Ajuga reptans ; Anemone nemorosa ; Anthoxanthum odoratum ; Cardamine pratensis ; Cytisus scoparius ; Dipsacus fullonum ; Filipendula ulmaria ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Geranium sylvaticum ; Heracleum spondylium ; Hypericum perforatum ; Knautia arvensis ; Knautia dipsacifolia ; Luzula sp ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Poa chaixii ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Saponaria sp ; Silene vulgaris ; Succisa pratensis ; Teucrium scorodonia ; Thymus pulegioides ; Trifolium arvense
2007_15	Achillea millefolium ; Anemone nemorosa ; Anthriscus sylvestris ; Arabidopsis thaliana ; Dactylis glomerata ; Galium mollugo ; Galium aparine ; Geranium sylvaticum ; Geranium robertianum ; Glechoma hederacea ; Hemerocallis sp ; Heracleum spondylium ; Lamium purpureum ; Lupinus polyphyllus ; Myosotis sp ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Ranunculus bulbosus ; Ranunculus ficaria ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Silene dioica ; Stellaria media ; Symphytum officinale ; Taraxacum sp ; Urtica dioica
2007_16	Alchemilla sp ; Anthriscus sylvestris ; Arabidopsis thaliana ; Asplenium trichomanes susp. trichomanes ; Dactylis glomerata ; Dryopteris filix-mas ; Galium aparine ; Galium mollugo ; Geranium robertianum ; Geranium sylvaticum ; Glechoma hederacea ; Hemerocallis sp ; Heracleum spondylium ; Hieracium murorum ; Hypericum perforatum ; Knautia arvensis ; Knautia dipsacifolia ; Lamium purpureum ; Lapsana communis ; Lupinus polyphyllus ; Mycelis muralis ; Myosotis sp ; Noccaea caerulescens ; Petasites albus ; Plantago lanceolata ; Ranunculus bulbosus ; Ranunculus ficaria ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Silene dioica ; Silene rupestris ; Stellaria media ; Symphytum officinale ; Urtica dioica
2007_17	Anthriscus sylvestris ; Arabidopsis thaliana ; Asplenium trichomanes ; Dactylis glomerata ; Dryopteris filix-mas ; Galium aparine ; Galium mollugo ; Geranium robertianum ; Geranium sylvaticum ; Glechoma hederacea ; Hemerocallis sp ; Heracleum spondylium ; Hieracium murorum ; Hypericum perforatum ; Knautia arvensis ; Knautia dipsacifolia ; Lamium purpureum ; Lapsana communis ; Lupinus polyphyllus ; Mycelis muralis ; Myosotis sp ; Noccaea caerulescens ; Petasites albus ; Plantago lanceolata ; Ranunculus bulbosus ; Ranunculus ficaria ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Silene dioica ; Silene rupestris ; Stellaria media ; Symphytum officinale ; Urtica dioica
2007_18	Arabidopsis thaliana ; Cardamine hirsuta ; Dactylis glomerata ; Geranium robertianum ; Glechoma hederacea ; Hypericum perforatum ; Lapsana communis ; Leontodon autumnalis ; Noccaea caerulescens ; Oenothera subterminalis ; Sedum spurium

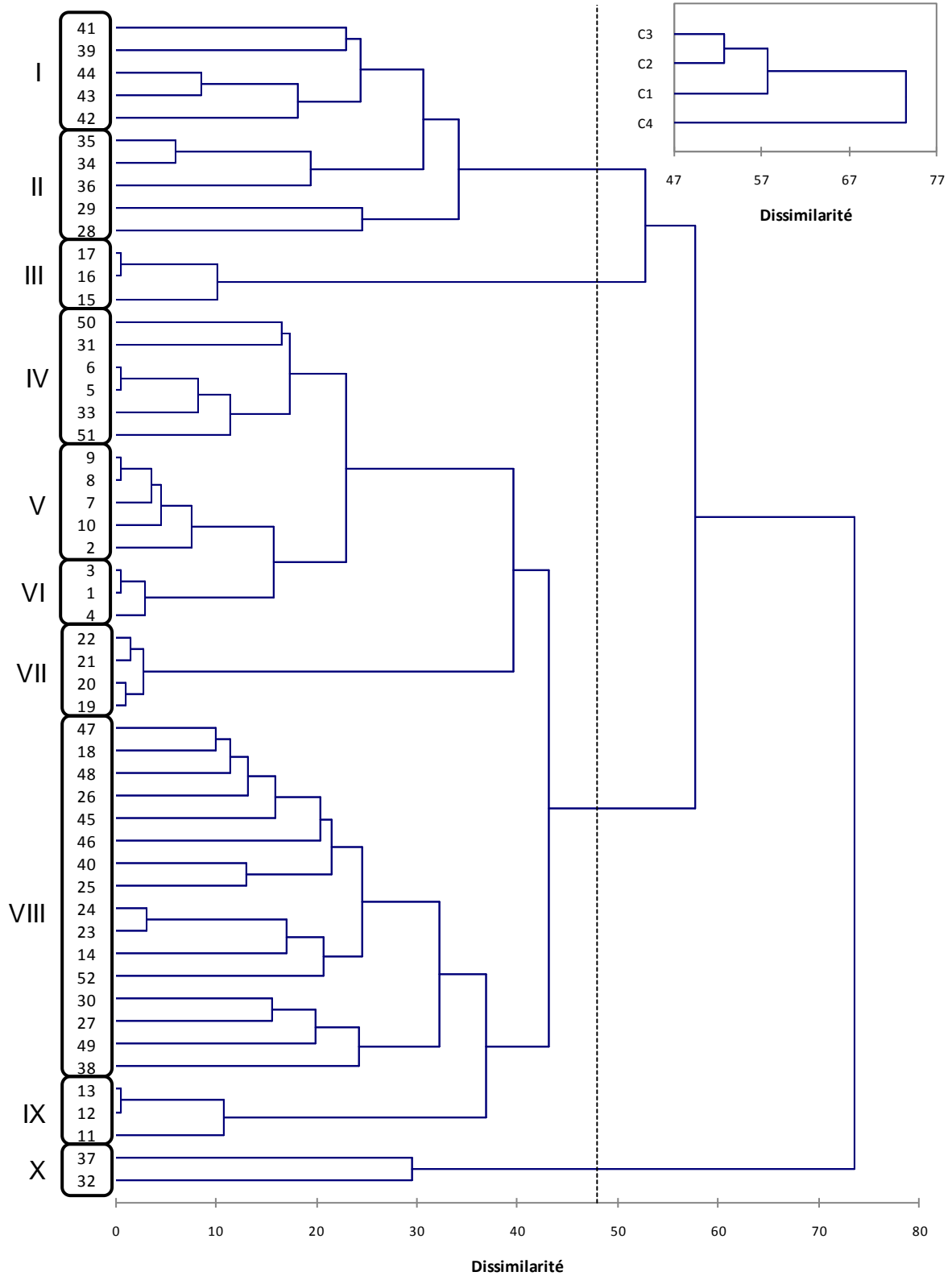


2007_19	Ajuga reptans ; Anthoxanthum odoratum ; Cardamine pratensis ; Cerastium fontanum ; Dactylis glomerata ; Galium mollugo ; Holcus mollis ; Lamium purpureum ; Lotus corniculatus ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Stellaria media ; Taraxacum sp
2007_20	Ajuga reptans ; Anthoxanthum odoratum ; Cardamine pratensis ; Dactylis glomerata ; Galium mollugo ; Holcus mollis ; Lamium purpureum ; Lotus corniculatus ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Stellaria media ; Taraxacum sp ; Viola saxatilis subsp. saxatilis
2007_21	Anthoxanthum odoratum ; Cardamine pratensis ; Cerastium fontanum ; Dactylis glomerata ; Galium mollugo ; Holcus mollis ; Lamium purpureum ; Lotus corniculatus ; Narcissus pseudonarcissus ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Stellaria media ; Taraxacum sp ; Viola saxatilis subsp. saxatilis
2007_22	Anthoxanthum odoratum ; Cardamine pratensis ; Dactylis glomerata ; Galium mollugo ; Holcus mollis ; Lamium purpureum ; Lotus corniculatus ; Narcissus pseudonarcissus ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Stellaria media ; Viola saxatilis subsp. saxatilis
2007_23	Achillea millefolium ; Alchemilla sp ; Arabidopsis thaliana ; Cytisus scoparius ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Genista pilosa ; Heracleum sphondylium ; Hieracium pilosella ; Hypericum perforatum ; Luzula sp ; Noccaea caerulescens ; Persicaria bistorta ; Plantago lanceolata ; Poa chaixii ; Rumex acetosella ; Silene dioica ; Spergularia rubra ; Taraxacum sp ; Trifolium sp ; Viola riviniana
2007_24	Achillea millefolium ; Adoxa moschatellina ; Alchemilla sp ; Arabidopsis thaliana ; Euphorbia amygdaloides ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Heracleum sphondylium ; Hieracium pilosella ; Hypericum perforatum ; Luzula sp ; Noccaea caerulescens ; Persicaria bistorta ; Plantago lanceolata ; Poa chaixii ; Rumex acetosella ; Silene dioica ; Taraxacum sp ; Trifolium sp ; Urtica dioica ; Viola riviniana
2007_25	Ajuga genevensis ; Ajuga reptans ; Alchemilla sp ; Arabidopsis thaliana ; Betula pendula ; Cardamine pratensis ; Epilobium angustifolium ; Filipendula ulmaria ; Galium mollugo ; Heracleum sphondylium ; Noccaea caerulescens ; Ranunculus acris ; Ranunculus ficaria ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Sanguisorba minor ; Silene dioica ; Stellaria media ; Taraxacum sp ; Trifolium medium ; Urtica dioica ; Veronica hederifolia
2007_26	Allium sp ; Asplenium trichomanes subsp. trichomanes ; Carex caryophylla ; Cruciatia laevipes ; Epilobium sp ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Galium verum ; Glechoma hederacea ; Heracleum sphondylium ; Hieracium pilosella ; Hypericum perforatum ; Luzula sp ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata ; Poa chaixii ; Potentilla sterilis ; Ranunculus acris ; Ranunculus ficaria ; Ranunculus repens ; Rubus sp ; Rumex acetosa ; Silene dioica ; Silene vulgaris ; Stachys officinalis
2007_27	Achillea millefolium ; Anemone nemorosa ; Arabidopsis thaliana ; Campanula rotundifolia ; Cardamine pratensis ; Cruciatia laevipes ; Galium verum ; Hedera helix ; Hieracium pilosella ; Knautia arvensis ; Knautia dipsacifolia ; Leucanthemum vulgare ; Luzula campestris ; Meum athamanticum ; Noccaea caerulescens ; Pimpinella saxifraga ; Plantago lanceolata ; Potentilla erecta ; Potentilla sterilis ; Rumex acetosa ; Stachys officinalis ; Stellaria alsine ; Taraxacum sp ; Teesdalia nudicaulis ; Thymus pulegioides ; Veronica chamaedrys ; Vicia sepium ; Viola saxatilis subsp. saxatilis
2007_28	Acer pseudoplatanus ; Achillea millefolium ; Ajuga reptans ; Anemone nemorosa ; Anthriscus sylvestris ; Arabidopsis thaliana ; Capsella bursa-pastoris ; Cytisus scoparius ; Dactylis glomerata ; Digitalis purpurea ; Dryopteris filix-mas ; Erodium cicutarium ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Geranium robertianum ; Hieracium murorum ; Holcus mollis ; Hypericum humifusum ; Knautia dipsacifolia ; Lamium purpureum ; Lathyrus linifolius ; Leucanthemum vulgare ; Moehringia trinervia ; Mycelis muralis ; Noccaea caerulescens ; Ornithopus perpusillus ; Phyteuma spicatum ; Picea abies ; Plantago lanceolata ; Plantago major ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rubus sp ; Sedum annuum ; Silene dioica ; Stachys officinalis ; Stellaria media ; Taraxacum sp ; Teesdalia nudicaulis ; Teucrium scorodonia ; Urtica dioica ; Veronica chamaedrys ; Viola riviniana
2007_29	Achillea millefolium ; Aegopodium podagraria ; Ajuga reptans ; Alchemilla filicaulis ; Alnus sp ; Anemone nemorosa ; Angelica sylvestris ; Anthoxanthum odoratum ; Anthriscus sylvestris ; Aquilegia vulgaris ; Arabidopsis thaliana ; Asarum europeum ; Betula sp ; Cardamine pratensis ; Corylus avellana ; Cytisus scoparius ; Filipendula ulmaria ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Genista pilosa ; Glechoma hederacea ; Knautia dipsacifolia ; Lamium galeobdolon ; Lathyrus linifolius ; Luzula campestris ; Meum athamanticum ; Noccaea caerulescens ; Phegopteris connectilis ; Phyteuma nigrum ; Pimpinella saxifraga ; Pteridium aquilinum ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rubus sp ; Rumex acetosa ; Salix sp ; Sambucus nigra ; Sedum telephium subsp. telephium ; Silaum silaus ; Silene dioica ; Stellaria media ; Taraxacum sp ; Teucrium scorodonia ; Trifolium pratense ; Urtica dioica ; Viola riviniana
2007_30	Ajuga reptans ; Anthriscus sylvestris ; Cardamine pratensis ; Centaurea jacea ; Cerastium fontanum ; Dactylis glomerata ; Festuca glauca ; Glechoma hederacea ; Heracleum sphondylium ; Hieracium pilosella ; Knautia dipsacifolia ; Leucanthemum vulgare ; Luzula campestris ; Meum athamanticum ; Noccaea caerulescens ; Persicaria bistorta ; Phyteuma nigrum ; Plantago lanceolata ; Poa chaixii ; Ranunculus acris ; Rumex acetosa ; Silene dioica ; Silene vulgaris ; Stachys officinalis ; Taraxacum sp ; Thymus pulegioides ; Viola riviniana
2007_31	Carlina vulgaris ; Cotoneaster integerrimus ; Genista pilosa ; Jasione laevis ; Lathyrus linifolius ; Leucanthemum vulgare ; Luzula luzuloides ; Narcissus pseudonarcissus ; Nardus stricta ; Noccaea caerulescens ; Poa chaixii ; Potentilla crantzii ; Sedum annuum ; Silene rupestris ; Stachys officinalis ; Taraxacum sp ; Thymus pulegioides ; Vaccinium myrtillus

2008_01	Abies alba ; Acer campestre ; Acer platanoides ; Acer pseudoplatanus ; Achillea millefolium ; Ajuga reptans ; Alliaria petiolata ; Anemone nemorosa ; Anthericum liliago ; Anthoxanthum odoratum ; Anthriscus sylvestris ; Arum maculatum ; Asplenium adiantum-nigrum ; Asplenium trichomanes ; Cardamine heptaphylla ; Cardamine hirsuta ; Cardaminopsis arenosa ; Convallaria majalis ; Corydalis solida ; Crataegus monogyna ; Deschampsia flexuosa ; Digitalis lutea ; Doronicum pardalianches ; Euphorbia amygdaloides ; Euphorbia cyparissias ; Galium aparine ; Galium mollugo ; Galium odoratum ; Galium sylvaticum ; Genista pilosa ; Genistella sagittalis ; Hedera helix ; Helleborus foetidus ; Hepatica nobilis Hieracium murorum ; Hypericum perforatum ; Lathyrus vernus ; Leucanthemum vulgare ; Ligustrum vulgare ; Lilium martagon ; Lunaria rediviva ; Melittis melissophyllum ; Mercurialis perennis ; Mycelis muralis ; Noccaea caerulea ; Polygonatum odoratum ; Potentilla micrantha ; Potentilla sterilis ; Primula veris subsp. suaveolens ; Prunus mahaleb ; Prunus spinosa ; Pulmonaria montana ; Quercus petraea ; Quercus robur ; Rosa arvensis ; Rosa sp. ; Sambucus nigra ; Sedum rupestre ; Sedum telephium ; Serratula tinctoria ; Silene nutans ; Silene vulgaris ; Stellaria holostea ; Tanacetum corymbosum ; Teucrium scorodonia ; Urtica dioica ; Valeriana wallrothii ; Verbascum sp.
2008_02	Cardamine pratensis ; Corylus avellana ; Euphorbia amygdaloides ; Fragaria vesca ; Ilex aquifolium ; Noccaea caerulea ; Picea abies ; Rubus sp. ; Silene latifolia subsp. alba ; Viola reichenbachiana
2008_03	Abies alba ; Achillea millefolium ; Alliaria petiolata ; Anemone nemorosa ; Campanula rotundifolia ; Corydalis solida ; Cytisus scoparius ; Digitalis purpurea ; Euphorbia amygdaloides ; Fagus sylvatica ; Galium mollugo ; Geranium robertianum ; Hypericum perforatum ; Noccaea caerulea ; Picea abies ; Potentilla sterilis ; Ranunculus acris ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Silene dioica ; Teucrium scorodonia ; Urtica dioica ; Veronica chamaedrys
2008_04	Abies alba ; Achillea millefolium ; Anemone nemorosa ; Corydalis solida ; Corylus avellana ; Cytisus scoparius ; Dactylis glomerata ; Euphorbia amygdaloides ; Fagus sylvatica ; Geranium robertianum ; Leucanthemum vulgare ; Luzula sylvatica ; Noccaea caerulea ; Picea abies ; Potentilla sterilis ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Silene dioica ; Teucrium scorodonia
2008_05	Abies alba ; Acer pseudoplatanus ; Ajuga reptans ; Anemone nemorosa ; Campanula rotundifolia ; Cardamine pratensis ; Cirsium palustre ; Corylus avellana ; Digitalis purpurea ; Dryopteris filix-mas ; Euphorbia amygdaloides ; Fagus sylvatica ; Filipendula ulmaria ; Galium mollugo ; Geranium robertianum ; Glechoma hederacea ; Hedera helix ; Heracleum sphondylium ; Hieracium murorum ; Lamium galeobdolon ; Luzula campestris ; Mercurialis perennis ; Noccaea caerulea ; Phyteuma spicatum ; Polygonum bistorta ; Potentilla sterilis ; Primula elatior ; Pteridium aquilinum ; Pulmonaria montana ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Silene dioica ; Veronica chamaedrys ; Viola reichenbachiana
2008_06	Abies alba ; Acer campestre ; Alliaria petiolata ; Amelanchier ovalis ; Asplenium adiantum-nigrum ; Asplenium trichomanes ; Atropa belladonna ; Brachypodium sylvaticum ; Campanula rotundifolia ; Castanea sativa ; Convallaria majalis ; Crataegus monogyna ; Cytisus scoparius ; Deschampsia flexuosa ; Digitalis lutea ; Galeopsis tetrahit ; Galium mollugo ; Galium odoratum ; Genista pilosa ; Genistella sagittalis ; Geranium robertianum ; Hedera helix ; Helleborus foetidus ; Hepatica nobilis ; Hieracium murorum ; Hypericum perforatum ; Lathyrus linifolius subsp. montanus ; Lathyrus vernus ; Lonicera periclymenum ; Lonicera xylostemum ; Luzula luzuloides ; Luzula sylvatica ; Melampyrum pratense ; Melica uniflora ; Melittis melissophyllum ; Noccaea caerulea ; Polygonatum odoratum ; Polypodium vulgare ; Potentilla micrantha ; Quercus petraea ; Quercus robur ; Ribes uva-crispa ; Rosa sp. ; Silene nutans ; Stellaria holostea ; Teucrium scorodonia ; Tilia platyphyllos ; Vicia sepium
2008_07	Achillea millefolium ; Ajuga reptans ; Anthoxanthum odoratum ; Arabidopsis thaliana ; Arrhenatherum elatius ; Calluna vulgaris ; Cardamine pratensis ; Carex caryophylla ; Cerastium fontanum ; Dactylis glomerata ; Erigeron annuus ; Erophilia verna ; Euphorbia cyparissias ; Festuca sp. ; Galeopsis tetrahit ; Galium mollugo ; Galium verum ; Geranium robertianum ; Hieracium sphondylium ; Hieracium pilosella ; Holcus mollis ; Hypericum perforatum ; Hypochaeris radicata ; Impatiens glandulifera ; Knautia dipsacifolia ; Lathyrus latifolia ; Lotus corniculatus ; Luzula campestris ; Noccaea caerulea ; Pimpinella saxifraga ; Plantago lanceolata ; Poa annua ; Ranunculus bulbosus ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Sedum rupestre ; Sedum telephium ; Senecio vulgaris ; Silene dioica ; Silene vulgaris ; Stachys officinalis ; Taraxacum sp. ; Thlaspi arvense ; Thymus pulegioides ; Trifolium pratense ; Urtica dioica ; Valeriana sp. ; Veronica chamaedrys
2008_08	Alchemilla glabra ; Anemone nemorosa ; Aquilegia vulgaris ; Arum maculatum ; Athyrium filix-femina ; Euphorbia amygdaloides ; Filipendula ulmaria ; Galium mollugo ; Geranium robertianum ; Glechoma hederacea ; Hedera helix ; Heracleum sphondylium ; Knautia dipsacifolia ; Lamium galeobdolon ; Ligustrum vulgare ; Lonicera periclymenum ; Lotus corniculatus ; Mercurialis perennis ; Moehringia trinervia ; Noccaea caerulea ; Phyteuma spicatum ; Polygonatum odoratum ; Pulmonaria montana ; Ranunculus acris ; Rubia sp. ; Rumex obtusifolius ; Silene dioica ; Silene vulgaris ; Taraxacum sp. ; Teucrium scorodonia ; Urtica dioica ; Vicia sepium ; Viola reichenbachiana ; Viola riviniana
2008_09	Achillea millefolium ; Ajuga reptans ; Alchemilla glabra ; Anemone nemorosa ; Aquilegia vulgaris ; Arabidopsis thaliana ; Cardamine pratensis ; Cerastium fontanum ; Chaerophyllum hirsutum ; Epilobium angustifolium ; Filipendula ulmaria ; Galium mollugo ; Leucanthemum vulgare ; Luzula campestris ; Noccaea caerulea ; Plantago lanceolata ; Polygonum bistorta ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Scrophularia nodosa ; Silene dioica ; Teucrium scorodonia ; Urtica dioica ; Veronica chamaedrys ; Veronica persica
2008_10	Ajuga reptans ; Alchemilla glabra ; Alchemilla monticola ; Alliaria petiolata ; Anemone nemorosa ; Anthoxanthum odoratum ; Athyrium filix-femina ; Cerastium fontanum ; Crucifera laevipes ; Deschampsia flexuosa ; Fragaria moschata ; Fragaria vesca ; Galium mollugo ; Galium odoratum ; Genista pilosa ; Geranium robertianum ; Glechoma hederacea ; Helianthemum nummularium ; Heracleum sphondylium ; Hieracium murorum ; Hypericum perforatum ; Knautia dipsacifolia ; Lathyrus linifolius subsp. montanus ; Leucanthemum vulgare ; Lotus corniculatus ; Luzula campestris ; Luzula luzuloides ; Mercurialis perennis ; Mycelis muralis ; Myosotis sylvatica ; Noccaea caerulea ; Phyteuma nigrum ; Poa chaixii ; Prenanthes purpurea ; Primula veris ; Pulmonaria obscura ; Ranunculus acris ; Rumex acetosa ; Rumex acetosella ; Taraxacum sp. ; Urtica dioica ; Veronica chamaedrys ; Veronica filiformis ; Viola riviniana

2008_11	Alchemilla monticola ; Alliaria petiolata ; Athyrium filix-femina ; Digitalis purpurea ; Euphorbia amygdaloides ; Fragaria vesca ; Galium aparine ; Galium mollugo ; Galium odoratum ; Geranium robertianum ; Heracleum sphondylium ; Hieracium murorum ; Hypericum perforatum subsp. perforatum ; Lapsana communis ; Luzula sylvatica ; Mycelis muralis ; Noccaea caerulescens ; Phyteuma nigrum ; Polygonatum verticillatum ; Prenanthes purpurea ; Ranunculus acris ; Rumex acetosa ; Senecio ovatus ; Silene dioica ; Stachys sylvatica ; Taraxacum sp. ; Teucrium scorodonia ; Urtica dioica ; Valerina tripteris ; Viola reichenbachiana
2008_12	Alchemilla monticola ; Angelica sylvestris ; Dryopteris filix-mas ; Galium mollugo ; Heracleum sphondylium ; Hieracium murorum ; Linaria vulgaris ; Mercurialis perennis ; Myosotis sylvatica ; Noccaea caerulescens ; Plantago media ; Prenanthes purpurea ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Senecio ovatus ; Silene dioica ; Urtica dioica ; Veronica chamaedrys
2008_13	Abies alba ; Acer pseudoplatanus ; Alchemilla monticola ; Angelica sylvestris ; Dactylorhiza maculata ; Dryopteris filix-mas ; Euphorbia cyparissias ; Fragaria vesca ; Fraxinus excelsior ; Galium mollugo ; Genistella sagittalis ; Heracleum sphondylium ; Hieracium murorum ; Knautia dipsacifolia ; Larix decidua ; Luzula luzuloides ; Mercurialis perennis ; Myosotis sylvatica ; Noccaea caerulescens ; Orchis mascula ; Plantago media ; Prenanthes purpurea ; Ranunculus acris ; Ranunculus repens ; Rumex acetosa ; Senecio ovatus ; Silene dioica ; Silene nutans ; Taraxacum sp. ; Ulmus glabra ; Urtica dioica ; Veronica chamaedrys ; Viola reichenbachiana ; Viola riviniana
2010_15	Achillea millefolium L. ; Anemone nemorosa L. ; Angelica sylvestris L. ; Asplenium trichomanes L. subsp. trichomanes ; Calluna vulgaris (L.) Hull ; Cardamine impatiens L. ; Daucus carota L. ; Fragaria vesca L. ; Galium mollugo L. ; Geranium robertianum L. ; Glechoma hederacea L. ; Heracleum sphondylium L. ; Knautia sp. ; Lathyrus linifolius (Reichard) Bässler ; Noccaea caerulescens ; Polypodium vulgare L. ; Ranunculus acris L. ; Ranunculus repens L. ; Rumex acetosa L. ; Rumex acetosella L. ; Succisa pratensis Moench ; Taraxacum sp. ; Tussilago farfara L. ; Urtica dioica L. ; Vaccinium myrtillus L.
2010_17	Achillea millefolium L. ; Alopecurus pratensis L. ; Anemone nemorosa L. ; Artemisia vulgaris L. ; Capsella bursa-pastoris (L.) Med. ; Cardamine hirsuta L. ; Cardaminopsis arenosa (L.) Hayek subsp. borbasii (Zapal.) Pawl. ex H. Scholz ; Cerastium cf. fontanum Baumg. ; Daucus carota L. ; Echium vulgare L. ; Erophila verna (L.) Chevall. ; Galium mollugo L. ; Hieracium pilosella L. ; Hypochaeris radicata L. ; Leontodon cf. hispidus L. ; Leucanthemum vulgare Lam. ; Lysimachia vulgaris L. ; Noccaea caerulescens ; Oenothera cf. subterminalis R.R. Gates et Catchside ; Ornithogalum pyrenaicum L. ; Plantago lanceolata L. ; Poa pratensis L. ; Ranunculus acris L. ; Ranunculus repens L. ; Rumex acetosa L. ; Sedum telephium L. subsp. Telephium ; Silene vulgaris (Moench) Garcke ; Stellaria media (L.) Vill. ; Taraxacum sp. ; Trifolium pratense L.
2010_18	Achillea millefolium L. ; Cardamine hirsuta L. ; Galium mollugo L. ; Glechoma hederacea L. ; Hieracium pilosella L. ; Hypericum perforatum L. ; Knautia sp. ; Lysimachia nummularia L. ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata L. ; Ranunculus acris L. ; Ranunculus repens L. ; Rumex acetosa L. ; Rumex obtusifolius L. ; Silene vulgaris (Moench) Garcke ; Stachys officinalis (L.) Trev. ; Urtica dioica L.
2010_19	Alchemilla xanthochlora Rothm. ; Campanula rotundifolia L. ; Fragaria vesca L. ; Galium mollugo L. ; Glechoma hederacea L. ; Heracleum sphondylium L. ; Hieracium gr. murorum L. ; Hypericum perforatum L. ; Leucanthemum vulgare Lam. ; Noccaea caerulescens ; Pimpinella major (L.) Huds. ; Ranunculus ficaria L. ; Rumex acetosa L. ; Senecio jacobaea L. ; Silene vulgaris (Moench) Garcke ; Solidago virgaurea L. ; Taraxacum sp.
2010_24	Achillea millefolium L. ; Ajuga reptans L. ; Alchemilla sp. ; Anemone nemorosa L. ; Angelica sylvestris L. ; Cardamine hirsuta L. ; Cardamine pratensis L. ; Dactylis glomerata L. ; Digitalis purpurea L. ; Erigeron annuus (L.) Desf. ; Festuca sp. ; Galium mollugo L. ; Geranium sylvaticum L. ; Glechoma hederacea L. ; Hedera helix L. ; Hieracium pilosella L. ; Hypericum perforatum L. ; Hypochaeris radicata L. ; Knautia dipsacifolia Kreutzer ; Leontodon saxatilis Lam. ; Luzula campestris (L.) DC. ; Narcissus pseudonarcissus L. ; Noccaea caerulescens ; Oenothera sp. ; Plantago lanceolata L. ; Potentilla sterilis (L.) Garcke ; Ranunculus acris L. ; Ranunculus repens L. ; Rumex acetosa L. ; Rumex acetosella L. ; Senecio vulgaris L. ; Silene dioica (L.) Clairv. ; Silene vulgaris (Moench) Garcke ; Stachys officinalis (L.) Trev. ; Stellaria media (L.) Vill. ; Taraxacum sp. ; Teucrium scorodonia L. ; Thymus pulegioides L. ; Urtica dioica L. ; Veronica filiformis Smith.
2010_27a	Achillea millefolium L. ; Carex caryophylla Latourr. ; Colchicum autumnale L. ; Cytisus scoparius (L.) Link ; Deschampsia cespitosa (L.) Beauv. ; Euphorbia cyparissias L. ; Galium verum L. ; Genistella sagittalis (L.) Gams ; Lathyrus linifolius (Reichard) Bässler ; Lathyrus pratensis L. ; Luzula campestris (L.) DC. ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata L. ; Polygala vulgaris L. ; Pteridium aquilinum (L.) Kuhn ; Rubus sp. ; Rumex acetosa L. ; Teucrium scorodonia L. ; Thymus pulegioides L. ; Vicia sepium L. ; Viola riviniana Reichenb.
2010_27b	Abies alba Mill. ; Acer pseudoplatanus L. ; Angelica sylvestris L. ; Athyrium filix-femina (L.) Roth ; Corylus avellana L. ; Dryopteris filix-mas (L.) Schott ; Euphorbia amygdaloides L. ; Fagus sylvatica L. ; Fragaria vesca L. ; Galium mollugo L. ; Lathyrus linifolius (Reichard) Bässler ; Noccaea caerulescens ; Origanum vulgare L. ; Pteridium aquilinum (L.) Kuhn ; Quercus petraea Lieblein ; Rubus sp. ; Taraxacum sp. ; Teucrium scorodonia L. ; Vincetoxicum hirundinaria Med.
2010_28	Achillea millefolium L. ; Alchemilla filicaulis Buser subsp. vestita (Buser) Bradsh. ; Anemone nemorosa L. ; Athyrium filix-femina (L.) Roth ; Cirsium acaule Scop. ; Dryopteris filix-mas (L.) Schott ; Festuca sp. ; Fragaria vesca L. ; Genistella sagittalis (L.) Gams ; Geranium robertianum L. ; Heracleum sphondylium L. ; Hypericum perforatum L. ; Juniperus communis L. ; Luzula campestris (L.) DC. ; Noccaea caerulescens ; Plantago lanceolata L. ; Poa chaixii Vill. ; Polypodium vulgare L. ; Ranunculus acris L. ; Rubus idaeus L. ; Rumex arifolius All. ; Senecio ovatus (P. Gaertn., B. Mey. et Scherb.) Willd. ; Silene dioica (L.) Clairv. ; Sorbus aria (L.) Crantz ; Taraxacum sp. ; Thymus pulegioides L. ; Urtica dioica L. ; Vaccinium myrtillus L. ; Veronica chamaedrys L. ; Viola lutea Huds.

**Annexe 5 : Classification ascendante hiérarchique des stations selon le cortège floristique**  
 Identification de 10 groupes de stations (sur la base de l'ensemble des analyses)



Annexe 6 : Tableau de données pour les analyses multivariées sur l'ensemble des paramètres

Stations	Facteurs bioconcentration										Éléments extractibles dans les sols										
	Milieu	Flore	Taille pop	Géologie	Exposition	Altitude	Zn	Ni	Mn	Cd	Zn	Ni	Mn	Cd	Na	Mg	K	Ca	Saturation	CEC	pH
2007_23	0,049	0,029	0,008	0,037	0,011	996	2948,10	90,98	2,63	750,89	1,96	0,47	21,29	0,04	15,01	146,14	72,78	887,88	78,96	7,45	4,85
2007_13a	0,032	0,025	0,021	0,037	0,011	492	3850,40	41,58	2,93	50,15	3,25	0,52	9,83	0,05	83,64	104,97	92,60	1257,29	82,58	9,37	5,56
2007_13b	0,032	0,025	0,021	0,037	0,011	492	2305,92	64,36	7,90	719,33	2,44	0,47	7,46	0,08	57,71	86,27	66,30	1009,80	80,40	7,67	5,41
2007_14	0,032	0,029	0,021	0,037	0,011	738	25,79	95,65	0,68	170,28	283,41	0,49	49,15	0,19	505,63	242,84	252,77	2625,76	99,56	18,03	5,43
2007_15	0,032	0,003	0,008	0,037	0,011	789	8242,47	162,80	3,41	2538,54	0,63	0,40	8,34	0,01	11,09	114,96	83,60	1824,65	101,03	10,21	5,67
2007_21	0,049	3E-05	0,008	0,037	0,00003	820	260,24	59,07	1,20	35,53	39,24	0,60	19,70	0,08	26,46	147,17	117,59	1415,80	92,84	9,36	5,53
2007_16	0,049	0,003	0,008	0,037	0,011	824	842,58	42,92	0,61	43,15	9,29	0,78	77,03	0,37	11,23	541,72	251,26	2465,07	92,54	18,86	4,89
2007_17	0,049	0,003	0,008	0,037	0,011	797	83,34	1,78	494,00	1,55	1,55	0,86	43,68	0,04	8,98	170,45	58,34	492,55	60,76	6,66	4,47
2007_12	0,032	0,025	0,008	0,037	0,011	772	2290,19	137,65	29,64	1091,61	1,96	0,37	1,84	0,02	13,84	138,26	56,97	397,90	70,03	4,75	4,86
2007_29	0,049	0,126	0,134	0,141	0,141	579	2179,00	88,19	14,06	685,97	0,68	0,44	4,61	0,02	17,77	45,59	19,10	312,32	68,58	3,00	4,63
2007_11	0,032	0,025	0,008	0,037	0,011	735	636,68	67,69	0,58	111,19	10,17	0,40	117,77	0,11	41,30	307,53	155,58	2109,84	100,59	13,56	4,55
2007_18	0,032	0,029	0,008	0,037	0,011	632	414,35	1786,19	7,56	84,93	13,97	0,38	25,74	0,10	12,60	85,10	71,25	514,49	71,54	4,90	4,47
2008_01	0,005	0,004	0,008	0,005	0,011	600	830,78	20,74	1,80	225,65	3,00	0,88	37,20	0,07	17,59	130,32	107,27	1131,15	85,55	7,69	4,21
2008_03	0,049	0,126	0,021	0,018	0,011	810	1866,61	147,18	7,11	854,14	3,90	0,44	39,42	0,05	109,10	203,71	104,13	2616,72	110,70	12,95	5,02
2008_05	0,025	0,126	0,048	0,01	0,011	600	1069,03	128,05	1,54	258,02	7,27	0,42	53,38	0,06	20,39	314,05	199,32	2756,29	125,80	13,38	4,82
2008_06	4E-04	0,004	0,008	0,01	0,011	565	48,08	60,85	2,42	36,41	5,99	0,48	178,80	0,06	15,08	459,23	305,70	2079,93	95,80	15,66	4,26
2008_07a	0,032	0,029	0,021	0,037	0,01	520	584,10	14,19	2,76	152,33	20,58	0,55	45,07	0,11	56,27	198,82	134,46	1944,22	116,47	10,58	4,69
2008_07b	0,032	0,029	0,021	0,037	0,012	520	639,04	15,21	3,79	86,35	21,07	0,44	11,19	0,20	224,42	199,29	153,83	2113,98	101,79	13,58	5,48
2008_08	0,032	0,02	0,021	0,037	0,011	548	1407,68	72,51	5,45	453,82	6,46	0,39	11,97	0,10	24,09	305,15	157,22	3371,33	117,42	16,97	4,92
2008_09	0,049	0,029	0,021	0,018	0,011	740	597,72	24,73	2,69	224,68	8,01	0,59	20,87	0,14	24,69	187,51	72,97	1491,85	109,90	8,35	4,56
2008_10	0,049	0,02	0,048	0,018	0,023	870	4406,32	293,27	2,92	686,02	2,06	0,60	35,86	0,05	26,67	292,28	228,03	3618,20	107,24	19,68	5,19
2008_11	0,049	0,02	0,008	0,01	0,011	1035	807,37	68,44	2,99	219,22	5,61	0,51	33,56	0,11	15,25	229,47	137,54	4606,60	120,64	20,57	4,89
2008_12	0,001	0,02	0,008	0,01	0,011	940	1773,01	250,44	4,17	682,14	2,84	0,43	24,10	0,07	16,28	226,53	120,38	4239,60	126,46	18,50	4,84
2008_13	0,049	0,02	0,134	0,037	0,02	895	1658,86	449,24	5,80	501,82	3,72	0,63	33,84	0,09	14,49	402,55	222,00	2598,80	117,90	14,35	4,69

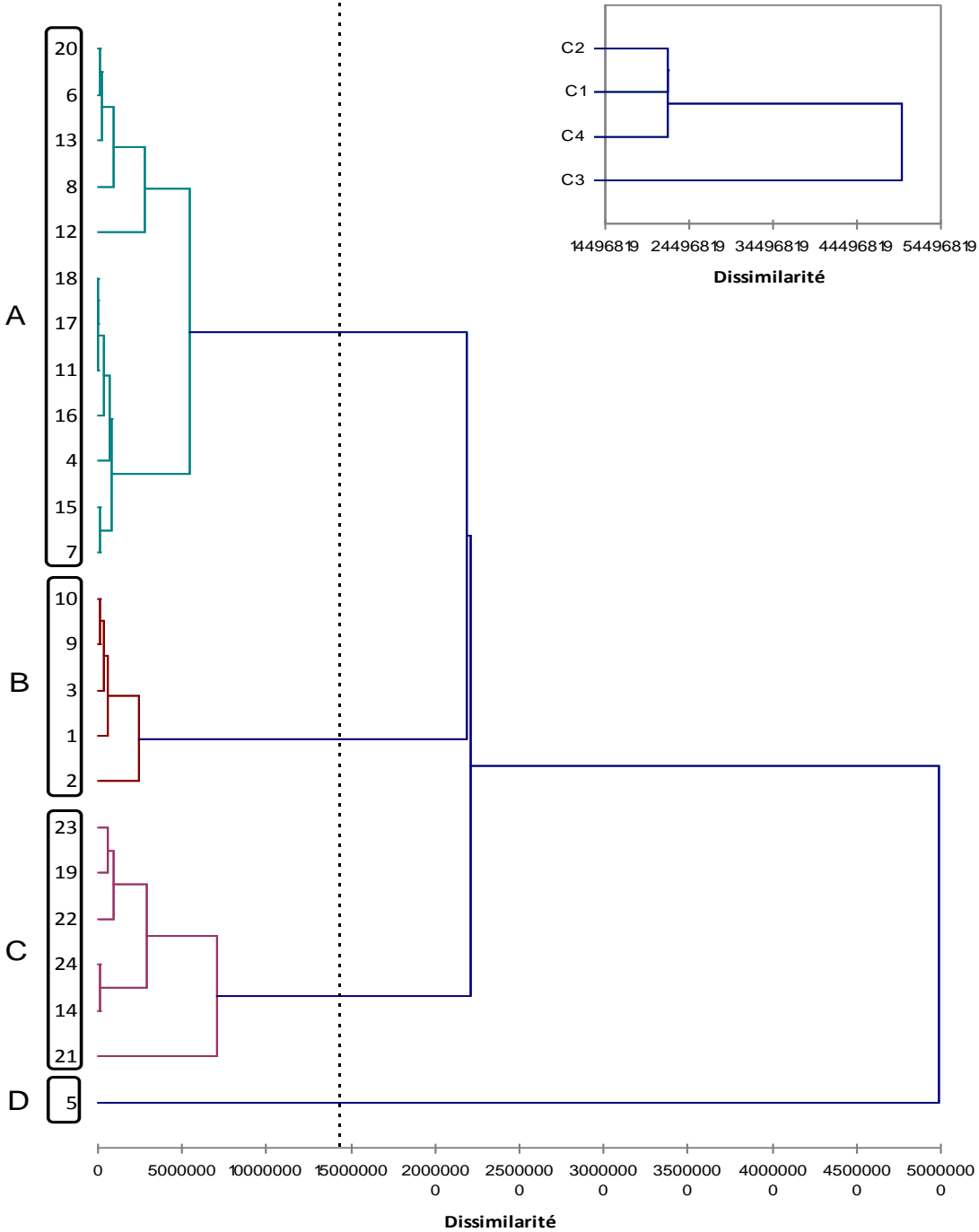
(les variables qualitatives ont été transformées en variables quantitatives suite à une ACM)  
(ces variables sont codées en rang pour réaliser l'AFC)

## Annexe 7 : Matrice de corrélation (Pearson) des variables mesurées

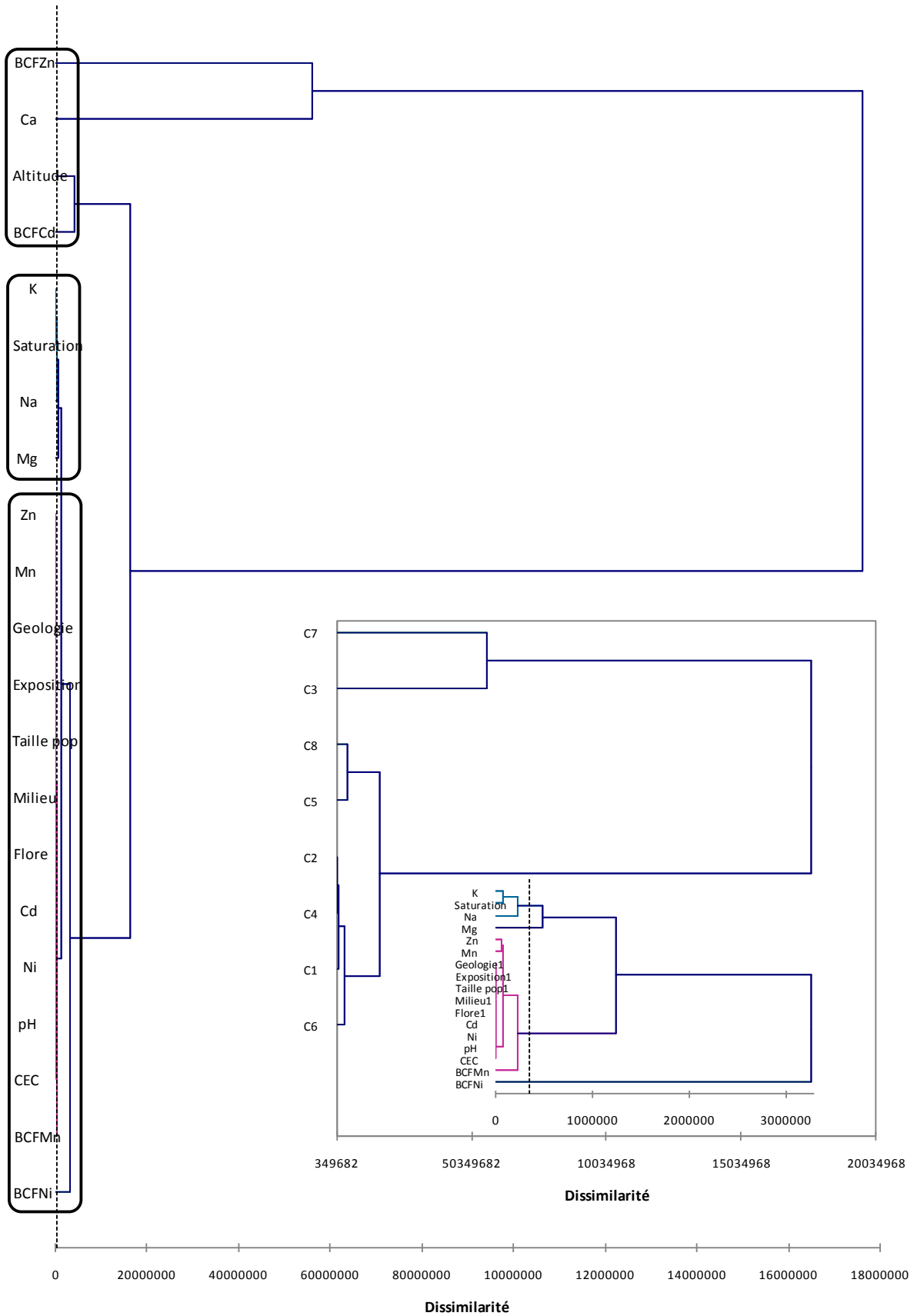
Variables	Milieu	Flore	Taille pop	Géologie	Exposition	Altitude	BCFZn	BCFNI	BCFMn	BCFCd	Zn	Ni	Mn	Cd	Na	Mg	K	Ca	Saturation	CEC	pH
pH	0,242	-0,055	-0,096	0,061	-0,159	-0,006	<b>0,505</b>	-0,194	-0,228	0,359	0,293	-0,286	<b>-0,465</b>	0,061	<b>0,423</b>	-0,229	-0,025	0,147	0,098	0,169	<b>1</b>
CEC	-0,101	-0,170	-0,101	<b>-0,469</b>	-0,319	0,335	-0,080	-0,192	-0,246	-0,142	0,249	0,003	0,369	<b>0,439</b>	0,251	<b>0,722</b>	<b>0,779</b>	<b>0,932</b>	<b>0,731</b>	<b>1</b>	0,169
Saturation	-0,142	0,121	0,067	<b>-0,475</b>	-0,288	0,194	-0,020	-0,169	<b>-0,430</b>	0,021	0,043	-0,202	0,131	0,182	0,069	<b>0,470</b>	<b>0,490</b>	<b>0,860</b>	<b>1</b>	<b>0,731</b>	0,098
Ca	-0,107	-0,024	-0,036	<b>-0,473</b>	-0,257	0,384	-0,007	-0,147	-0,294	-0,023	0,107	-0,121	0,175	0,237	0,115	<b>0,537</b>	<b>0,572</b>	<b>1</b>	<b>0,860</b>	<b>0,932</b>	0,147
K	-0,221	-0,184	0,034	-0,388	-0,284	0,049	-0,241	-0,101	-0,247	-0,307	0,350	0,116	<b>0,672</b>	<b>0,467</b>	0,299	<b>0,872</b>	<b>1</b>	<b>0,572</b>	<b>0,490</b>	<b>0,779</b>	-0,025
Mg	-0,073	-0,166	0,047	-0,344	-0,257	0,188	-0,279	-0,153	-0,107	-0,290	0,040	0,200	<b>0,682</b>	<b>0,548</b>	-0,022	<b>1</b>	<b>0,872</b>	<b>0,537</b>	<b>0,470</b>	<b>0,722</b>	-0,229
Na	-0,032	0,066	-0,056	0,027	-0,082	-0,149	-0,201	-0,118	-0,106	-0,161	<b>0,908</b>	-0,126	-0,015	0,334	<b>1</b>	<b>0,548</b>	0,299	0,115	0,069	0,251	<b>0,423</b>
Cd	0,145	-0,220	-0,158	-0,090	-0,208	-0,010	<b>-0,423</b>	-0,040	-0,165	<b>-0,442</b>	0,312	0,276	0,211	<b>1</b>	0,334	<b>0,548</b>	<b>0,467</b>	0,237	0,182	<b>0,439</b>	0,061
Mn	-0,356	-0,130	-0,176	-0,290	-0,174	-0,042	-0,381	-0,093	0,008	-0,369	0,064	0,110	<b>1</b>	0,211	-0,015	<b>0,682</b>	<b>0,672</b>	0,175	0,131	0,369	<b>-0,465</b>
Ni	0,143	-0,366	-0,008	-0,162	-0,104	0,133	-0,248	-0,242	<b>0,479</b>	-0,361	-0,042	<b>1</b>	0,110	0,276	-0,126	0,200	0,116	-0,121	-0,202	0,003	-0,286
Zn	-0,026	-0,044	-0,062	0,027	-0,085	0,000	-0,253	-0,036	-0,077	-0,170	<b>1</b>	-0,042	0,064	0,312	<b>0,908</b>	0,040	0,350	0,107	0,043	0,249	0,293
BCFCd	0,027	0,077	0,066	0,121	0,117	0,224	<b>0,858</b>	-0,026	-0,152	<b>1</b>	-0,170	-0,361	-0,369	<b>-0,442</b>	-0,161	-0,290	-0,307	-0,023	0,021	-0,142	0,359
BCFMn	0,197	-0,151	-0,098	0,054	-0,027	0,095	-0,176	-0,095	<b>1</b>	-0,152	-0,077	<b>0,479</b>	0,008	-0,165	-0,106	-0,107	-0,247	-0,294	<b>-0,430</b>	-0,246	-0,228
BCFNI	-0,019	0,006	0,051	0,010	-0,027	0,019	-0,038	<b>1</b>	-0,095	-0,026	-0,036	-0,242	-0,093	-0,040	-0,118	-0,153	-0,101	-0,147	-0,169	-0,192	-0,194
BCFZn	0,090	-0,012	0,086	0,114	0,104	0,130	<b>1</b>	-0,038	-0,176	<b>0,858</b>	-0,253	-0,248	-0,381	<b>-0,423</b>	-0,201	-0,279	-0,241	-0,007	-0,020	-0,080	<b>0,505</b>
Altitude	0,380	-0,168	-0,051	-0,233	-0,161	<b>1</b>	0,130	0,019	0,095	0,224	0,000	0,133	-0,042	-0,010	-0,149	0,188	0,049	0,384	0,194	0,335	-0,006
Exposition	0,207	<b>0,532</b>	<b>0,715</b>	<b>0,868</b>	<b>1</b>	-0,161	0,104	-0,027	-0,027	0,117	-0,085	-0,104	-0,174	-0,208	-0,082	-0,257	-0,284	-0,257	-0,288	-0,319	-0,159
Géologie	0,368	0,358	<b>0,594</b>	<b>1</b>	<b>0,868</b>	-0,233	0,114	0,010	0,054	0,121	0,027	-0,162	-0,290	-0,090	0,027	-0,344	-0,388	<b>-0,473</b>	<b>-0,475</b>	<b>-0,469</b>	0,061
Taille pop	0,306	<b>0,471</b>	<b>1</b>	<b>0,594</b>	<b>0,715</b>	-0,051	0,086	0,051	-0,098	0,066	-0,062	-0,008	-0,176	-0,158	-0,056	0,047	0,034	-0,036	0,067	-0,101	-0,096
Flore	0,174	<b>1</b>	<b>0,471</b>	0,358	<b>0,532</b>	-0,168	-0,012	0,006	-0,151	0,077	-0,044	-0,366	-0,130	-0,220	0,066	-0,166	-0,184	-0,024	0,121	-0,170	-0,055
Milieu	<b>1</b>	0,174	0,306	0,368	0,207	0,380	0,090	-0,019	0,197	0,027	-0,026	0,143	-0,356	0,145	-0,032	-0,073	-0,221	-0,107	-0,142	-0,101	0,242

Les valeurs correspondent au coefficient de corrélation (r)  
 Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

**Annexe 8 :** Dendrogramme de la classification des stations de *Noccaea caerulescens* selon les variables mesurées



**Annexe 9 :** Dendrogramme de la classification de l'ensemble des variables mesurées sur les stations de *Noccaea caerulescens*





## Résumé

Cette étude vient compléter de précédents travaux sur l'étude de la répartition et de l'écologie de *Noccaea caerulescens* dans le massif vosgien et réaliser une première caractérisation phénotypique des populations inventoriées. Il s'agit d'évaluer la capacité des populations à accumuler les métaux lourds par des analyses chimiques de sols et de plantes.

Dans les Vosges, *N. caerulescens* privilégie les sols pierreux, drainants, de pH acide à neutre et exposés au sud. Les populations, souvent de petite taille, occupent principalement des milieux ouverts et en particulier les talus aux bords des routes. Les analyses multivariées permettent d'avoir une première vision des relations entre les variables mesurées et de distinguer des groupes de stations homogènes correspondant à des écotypes distincts.

La détermination des aptitudes accumulatrices des populations naturelles de sites métallifères et non métallifères confirme la très grande variabilité d'accumulation des métaux chez cette espèce en conditions naturelles. La mise en évidence de l'existence d'individus hyperaccumulateurs permet d'espérer une utilisation de ces populations en phytoremédiation.

Ces capacités devront désormais être vérifiées en conditions contrôlées et la mise en place de programmes de sélection sera indispensable pour améliorer la phytoextraction des métaux.