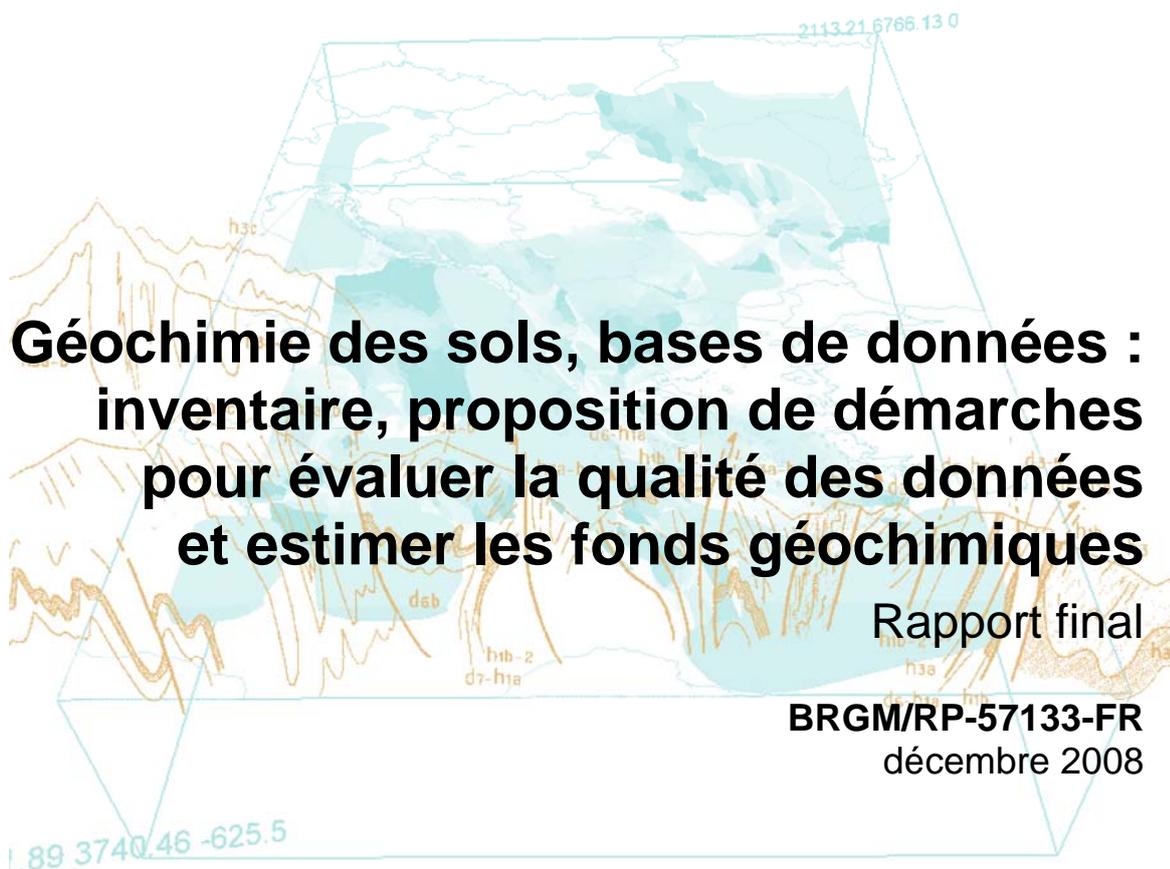


Document public



**Géochimie des sols, bases de données :
inventaire, proposition de démarches
pour évaluer la qualité des données
et estimer les fonds géochimiques**

Rapport final

BRGM/RP-57133-FR
décembre 2008



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Géochimie des sols, bases de données : inventaire, proposition de démarches pour évaluer la qualité des données et estimer les fonds géochimiques

Rapport final

BRGM/RP-57133-FR

décembre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007-POL-C02
correspondant à la convention BRGM-MEEDDAT
2007 n° 000 877 action 02

L. Cary, D. Maton et P. Piantone
Avec la collaboration de
V. Laperche

Vérificateur :
Nom : J.R. Mossmann
Date : 24/06/2010
Signature : 

Approbateur :
Nom : H. Gaboriau
Date : 24/06/2010
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Géochimie, Sols, Bases de données, Inventaire, Qualité des données, Fonds géochimiques

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Cary L., Maton D. et Piantone P. (2009) - Géochimie des sols, bases de données : inventaire, proposition de démarches pour évaluer la qualité des données et estimer les fonds géochimiques. Rapport final. BRGM/RP-57133-FR. 188 p., 53 fig., 2 tab., 11 ann.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre des actions de Service Public pour répondre à une demande du Ministère en charge de l'Environnement qui souhaite mettre à la disposition du public un portail commun de consultation de toutes les données concernant la géochimie sols disponibles sur le territoire français, le BRGM a entamé une étude de faisabilité d'un tel projet. Cette étude a été menée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2007-POL-C02 correspondant à la convention BRGM-MEEDDAT 2007 n° 000 877 action 02, pour permettre, d'une part, la construction d'un portail unique dédié à une consultation publique des données et, d'autre part, la mise en œuvre d'une base de données collectant de façon aussi homogène et cohérente que possible, à l'échelle nationale, les données d'analyses disponibles concernant la chimie des sols.

- Une compilation de toutes les données disponibles à l'échelle du territoire français et européen a été établie. Elle montre la grande hétérogénéité des bases signalées et/ou disponibles sur le WEB. Cette grande hétérogénéité se marque aussi bien dans : i) les objectifs de l'acquisition des données, ii) l'origine et le nombre d'échantillons prélevés pour un même point, iii) la nature intrinsèque de l'échantillon soumis à l'analyse, et enfin iv) le large panel d'éléments abordés et de méthodes analytiques mises en œuvre qui apportent pour la majorité des biais. Ainsi, il apparaît nécessaire, à l'échelle française, de favoriser la mise en place d'une structure publique permettant la mise à disposition des données par l'intermédiaire d'un portail, accompagnée d'une évaluation de leur qualité intrinsèque, et d'assurer la collecte et la mise en banque des données géochimiques acquises sur les sols lors d'opérations publiques (recherche, état des lieux, prospection...) ou à caractère réglementaire, dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués. L'état des lieux proposé dans cette étude constitue le socle de la mise en place de cette structure.
- À l'issue de cette analyse, deux scénarios d'organisation du Système d'Information sur la géochimie des sols « Accessol » sont proposés : i) un système **centralisé**, par la **mise en place d'une base de données centralisée** à l'image de ADES, avec la capitalisation des données existantes et des échanges de fichiers interopérables entre les différentes entités productrices de données ; ii) un système **décentralisé**, plus souple et moins lourd pour la structure qui a la charge de sa gestion, **par la mise en place d'un portail d'accès à l'information géochimique** issue des différents partenaires en charge de la production et de l'acquisition. Ceci n'empêchant pas par la suite la mise en œuvre d'une base nationale en charge de l'alimentation / gestion des données non encore structurées par un acteur et un accès vers les données externes lorsqu'elles sont disponibles. Ce qui doit permettre *in fine* de se rapprocher progressivement du premier scénario.
- Dans cette étude de faisabilité, les données du référentiel géochimique européen (le seul complètement disponible sous forme de fichiers complètement « ouverts ») ont été utilisées pour alimenter la réflexion sur l'usage des outils permettant d'analyser les grandes séries statistiques. Ceci, dans l'objectif de mettre en œuvre une stratégie d'analyse qui sera utilisée lors de la bancarisation de données

géochimiques : classer des populations, mettre en évidence des anomalies, des tendances, et proposer des démarches pour évaluer un « fond géochimique ».

Ce rapport a été rédigé de manière assez détaillée pour fournir par la suite, d'une part des schémas adaptables aux diverses situations de gestion du Système d'Information proposé, et, d'autre part, la matière à l'écriture de guides qui viendront en appui dans le cadre de la mise en œuvre de la méthodologie de gestion des sites pollués, à savoir la caractérisation géochimique de « l'état des lieux » d'un site.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Présentation des bases de données françaises	15
2.1. LES BASES DE DONNÉES SOLS DE L'INRA	15
2.1.1. Le GIS Sol	15
2.1.2. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)	16
2.1.3. La Base de Données Analyse des Terres (BDAT)	17
2.1.4. La base BDETM	19
2.1.5. Les données ASPITET	21
2.2. BASE DE DONNÉES DE L'INVENTAIRE MINIER NATIONAL.....	21
2.3. RÉFÉRENTIEL PÉDO-GÉOCHIMIQUE DU NORD - PAS-DE-CALAIS	25
2.4. RENECOFOR.....	26
3. Présentation des bases de données européennes de sols	27
3.1. LE PROGRAMME FOREGS : L'ATLAS GÉOCHIMIQUE EUROPÉEN.....	27
3.1.1. Finalité de ce programme.....	27
3.1.2. Échantillonnage	27
3.1.3. Méthodologie et analyses.....	28
3.2. ENVASSO (2006-2007).....	31
4. Vers un système d'information relatif à la géochimie des sols	33
4.1. RÉSUMÉ DE L'EXISTANT	33
4.2. FINALITÉS DU SI ACCESSOL.....	34
4.3. DÉFINITION DES PRINCIPAUX CAS D'UTILISATION	35
4.3.1. Les acteurs du système.....	35
4.3.2. Principaux cas d'utilisation	36
4.3.3. Description détaillée de cas d'utilisation.....	40
4.4. MODÉLISATION DES DONNÉES GÉOCHIMIE DES SOLS.....	41
4.4.1. Introduction.....	41
4.4.2. Description des concepts	41

4.4.3. Schéma conceptuel du SI	45
4.5. ORGANISATION DU SI GÉOCHIMIE DES SOLS.....	45
5. Analyse d'une stratégie pour proposer une démarche d'évaluation des bases de données et du fond géochimique.....	49
5.1. INTRODUCTION.....	49
5.2. NOMENCLATURE AUTOUR DES ÉLÉMENTS	49
5.3. ÉLÉMENTS DE STATISTIQUES MUTIVARIABLES, QUELQUES DÉFINITIONS.....	50
5.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	51
5.3.2. Les méthodes de Classification	51
5.4. ÉLÉMENTS STATISTIQUES ET DÉMARCHES UTILISÉES POUR ÉVALUER UN FOND GÉOCHIMIQUE	52
6. Analyses statistiques des données géochimiques de la partie supérieure du sol (subsoil) du FOREGS	55
7. Tentative de détermination des différents fonds pour les ETM les plus cités	57
7.1. INTRODUCTION.....	57
7.2. LES MOYENS	57
7.3. CHOIX D'UNE DÉMARCHE STATISTIQUE	59
7.4. SOLS DE SURFACE, SOLS PROFONDS COMPARAISONS DES SIGNATURES	61
7.5. CHOIX D'ÉLÉMENTS PEU MOBILES DU SOL	64
7.5.1. Évaluation de leur mobilité relative	64
7.5.2. Proposition d'utilisation d'un élément de référence pour normer les analyses.....	66
7.6. ETM, FONDS GÉOCHIMIQUES.....	67
7.6.1. Le mercure	67
7.6.2. Le plomb	72
7.6.3. L'arsenic.....	75
7.6.4. Le cuivre.....	76
7.6.5. Le zinc.....	77
7.6.6. Le chrome	78

7.6.7. Le cadmium	79
7.7. LE MOLYBDÈNE	81
7.7.1. Le nickel	82
7.7.2. Le cobalt	83
7.7.3. L'argent.....	84
7.7.4. Le thallium	85
7.7.5. Les phosphates	86
7.8. CONCLUSION	87
8. Conclusions générales	89
9. Bibliographie.....	91

Liste des illustrations

Figure 1 : État d'avancement du réseau RMQS en février 2008 (source : http://www.gissol.fr/programme/rmqs/rmqs.php).....	16
Figure 2 : Exemple d'impression d'écran de la carte de la distribution des valeurs plomb total, horizon 0-30 cm classement selon les quartiles.....	17
Figure 3 : Nombre d'analyses disponibles par canton dans la BDAT sur la période 1990-2000.....	18
Figure 4 : Exemple d'impression d'écran de la carte de la médiane des teneurs en cuivre extrait à l'EDTA, médiane calculée sur les données disponibles par canton durant la période 2000 à 2004.....	18
Figure 5 : Répartition du nombre d'analyses disponibles par département dans la BDETM (source : http://www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php).....	19
Figure 6 : Exemple de la carte téléchargeable de répartition des concentrations en cadmium dans la région Centre.....	20
Figure 7 : Localisation des échantillons BRGM (en noir) et SNEAP (en vert), dans l'inventaire minier et superposition sur fond géologique.	23
Figure 8 : Exemple d'impression d'écran de la répartition des teneurs en chrome sur la commune de Saint-Julien-Puy-Lavèze (63), mesurées dans le cadre de l'inventaire minier national (source : http://infoterre.brgm.fr)	24
Figure 9 : Exemple d'impression d'écran de la localisation des échantillons prélevés sur la commune de Arnault (88) dans le cadre de l'inventaire minier national, détail d'une fiche inventaire comportant les résultats analytiques de l'échantillon (source : http://sigminesfrance.brgm.fr/sig.asp)	25
Figure 10 : Sélection des sites d'échantillonnage dans le cadre du programme FOREGS.	28

Figure 11 : Répartition du plomb dans la partie inférieure (Subsoils) des sols européens (FOREGS).....	30
Figure 12 : Carte d'interpolation des teneurs en plomb dans la partie supérieure (Topsoils) des sols européens (FOREGS) sous Google Earth (teneurs exprimées en mg/kg, niveau de résolution fixé à 5 km).....	31
Figure 13 : Les acteurs du SI Géochimie.....	36
Figure 14 : Cas d'utilisation « Production, Acquisition et collecte ».....	38
Figure 15 : Cas d'utilisation « Valorisation & Diffusion ».....	40
Figure 16 : Scénario 1 SI Géochimie.....	46
Figure 17 : Scénario 2 SI Géochimie.....	47
Figure 18 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du plomb.....	58
Figure 19 : Comparaison entre le diagramme des valeurs brutes en % par rapport à la population versus concentrations en mg/kg et des valeurs cumulées en % versus concentrations en mg/kg (diagramme de Matschullat et al. (2000) dérivé de celui de Lepeltier, 1969).....	59
Figure 20 : Correspondance entre une loi log-normale et la droite de Henry (Lepeltier, 1969).....	60
Figure 21 : Essai d'évaluation du fond géochimique du plomb pour la partie inférieure (SS) et la partie supérieure (TS) du sol par la méthode de Lepeltier et comparaison avec les scattergrams.....	61
Figure 22 : Projection des variables selon les axes factoriels F1/F2/F3 expliquant 55 % de la variance sur une population de 758 échantillons.....	63
Figure 23 : Axes F1 et F2, comparaisons entre la signature des parties inférieure et supérieure du sol, sur une population de 758 échantillons sur chaque type de sol.....	64
Figure 24 : Comportement d'éléments traces réputés peu mobiles, Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Zr selon les couples partie inférieure du sol (S) partie supérieure du sol (T).....	65
Figure 25 : (S) versus partie supérieure du sol. Comparaison entre les valeurs obtenues (XPbT/XZrT)/(XPbS/XZrS) et (XPbT)/(XPbS), avec T = Top Soil, S = Sub Soil. Clés : pertes en vert, gain en jaune.....	66
Figure 26 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du mercure.....	68
Figure 27 : Diagramme binaire (Hg _T /Zr _T)/(Hg _T /Zr _T) versus Hg _T	69
Figure 28 : Répartition des valeurs du rapport (Hg _T /Zr _T)/(Hg _S /Zr _S) sur la carte géologique de l'Europe.....	70
Figure 29 : Cartographie FOREGS, distribution du mercure en Europe.....	71
Figure 30 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du plomb.....	72
Figure 31 : Répartition des valeurs du rapport (Pb _T /Zr _T)/(Pb _S /Zr _S) sur la carte géologique de l'Europe.....	74

Figure 32 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas de l'arsenic.....	75
Figure 33 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du cuivre.	76
Figure 34 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du zinc. ...	77
Figure 35 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du chrome.....	78
Figure 36 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du cadmium.	79
Figure 37 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du molybdène.	81
Figure 38 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du nickel.....	82
Figure 39 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du cobalt.	83
Figure 40 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas de l'argent.....	84
Figure 41 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du thallium.	85
Figure 42 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas des phosphates.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1 : Schéma représentant les interactions entre les différentes bases de données du GIS SOL (source : http://www.gissol.fr/programme/programmes.php).....	15
Tableau 2 : Paramètres statistiques élémentaires pour le sol supérieur (top soil) et sol inférieur (subsoil). En italique sont données les fourchettes pour les valeurs de sols ordinaires d'ASPITET (INRA).....	88

Liste des annexes

Annexe 1 : Modèle commun de base de données sols.....	97
Annexe 2 : Base de données BDETM.....	105
Annexe 3 : Base de données RMQS.....	111

Annexe 4 : Base de données BDAT.....	119
Annexe 5 : Base de données ASPITET	127
Annexe 6 : Base de données de l'IMN	135
Annexe 7 : Base de données du RNPC	143
Annexe 8 : Base de données RENECOFOR	151
Annexe 9 : Base de données FOREGS	159
Annexe 10 : Éléments Traces Métalliques (ETM), définition et portée	167
Annexe 11 : Analyses statistiques des données géochimiques de la partie supérieure du sol (subsoil) du FOREGS.....	175

1. Introduction

Dans le cadre du Service Public pour répondre à une demande du MEEDDM/DGPR/SRT/SDRCP¹ qui souhaitait mettre à la disposition du public un portail commun de consultation de toutes les données concernant la géochimie sols disponibles sur le territoire français, le BRGM a entamé une étude de faisabilité d'un tel projet. Cette étude a été menée pour permettre, d'une part, la construction d'un portail unique dédié à une consultation publique des données et, d'autre part, la mise en œuvre d'une base de données collectant de façon la plus homogène et cohérente possible, à l'échelle nationale, les données d'analyses concernant la chimie des sols.

La base de données ainsi constituée doit s'adresser à toutes les données concernant les sols, partie supérieure comme inférieure, pour tenter d'individualiser les différentes distributions géochimiques (fonds et anomalies) dont les sols sont l'objet. Elle doit permettre une collecte et une capitalisation structurée des données acquises à ce jour concernant toutes opérations ayant pour objet l'étude de l'état des sols : études de diagnostic environnemental de site, études pédologiques, agronomiques, géologiques, caractérisation d'anomalies géochimiques ayant pour objet la recherche de ressources. Suite à l'analyse de l'existant, une proposition de protocole de collecte systématique des données, de vérification, de codification, de saisie dans une base de données au niveau national et de mise à disposition des informations auprès du public (sous forme de données brutes, traitées ou cartographiques SIG) est exposée.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la méthodologie de gestion des Installations Classées et des Sites Pollués proposée par le MEEDDM, l'exploitant d'un site d'une installation classée pour la protection de l'environnement est tenu de réaliser un état des lieux du site. Il en est de même lorsque les sols sont susceptibles d'avoir été pollués. L'étude de diagnostic doit comporter une caractérisation des pollutions anthropiques éventuelles sur le site, mais également localement proches du site ou de sa zone d'effet. Elle doit aussi se référer à un état initial de l'environnement (milieu témoin) représentatif du fond géochimique naturel du sol. L'objectif de cette approche consiste à identifier les pollutions attribuables au site, pour les différencier successivement des pollutions anthropiques n'impliquant pas le site ainsi que des concentrations naturellement présentes dans les sols.

La création d'une base de données spécifique sur les fonds géochimiques naturels et bruits de fond du sol, complémentaire aux bases pédo-géologiques élaborées par l'INRA (Programme RMQS du GISSOL) est construite dans l'objectif de fournir un outil d'aide à la gestion des sols pollués pour l'Inspection des Installations Classées, les exploitants et les bureaux d'études. Cette base est conçue dans l'objectif de proposer des référentiels régionaux « bruit de fond » et « fond géochimique naturel ».

L'exploitation des données contenues dans cette base doit permettre de définir des distributions types des teneurs en métaux et métalloïdes dans les sols, issues de données obtenues de manière homogène (formation lithologique similaire, techniques

¹ Direction Générale de la Prévention des Risques/Service des Risques Technologiques/Sous-direction des Risques Chroniques et du Pilotage.

de prélèvement, de préparation et d'analyse identiques). En outre, la définition de référentiels régionaux voire locaux des sols aurait pour objectif, sans vouloir se substituer au RMQS qui est essentiellement dimensionné pour suivre la qualité « agronomique » de sols, est de proposer des repères pour évaluer l'importance de la dégradation éventuelle de la qualité des sols (impact), justifier la pertinence des objectifs de réhabilitation d'un site ou des critères de gestion des terres excavées.

La première partie de ce rapport propose une synthèse des bases de données sols les plus importantes en France, notamment celles coordonnées par le GIS Sol, et en Europe. Pour les bases de données ayant déjà fait l'objet d'un rapport détaillé par Darmendrail *et al.* (2000), entre autres celles de l'IMN-SNEAP², ASPITET³, ANADEME⁴ et le Référentiel Nord - Pas-de-Calais⁵, seule la présentation de leurs champs sera détaillée.

Après compilation de toutes les bases de données consultées, un modèle unifié est proposé pour être mis en application pour toutes les futures analyses de sols français. Il est établi de manière à optimiser une sélection de paramètres minimaux nécessaire pour une gestion cohérente des données.

En deuxième partie de ce rapport une réflexion est portée sur le périmètre d'un système d'information (SI) relatif à la géochimie des sols laissant une grande souplesse sur les interactions entre les différents acteurs institutionnels et le SI. Différentes hypothèses de fonctionnement ont été abordées pour arriver à un consensus en raison de la multiplicité des acteurs potentiels et du caractère « sensible » de certaines données.

En troisième partie il est proposé d'aborder les outils qui permettront d'analyser les grandes séries statistiques. Ainsi le travail de compilation des bases de données a été aussi l'occasion de travailler sur les outils statistiques nécessaires pour assurer l'analyse cohérente d'un lot important de données (dans l'objectif de la bancarisation de données géochimiques), classer des populations, mettre en évidence des anomalies, des tendances, et proposer des démarches pour évaluer un « fond géochimique ». Il a été aussi l'occasion d'apporter des précisions sur des terminologies qui sont souvent « galvaudées » comme éléments traces métalliques (ETM), métaux lourds, et de proposer à partir du traitement des données du fond géochimique européen (FOREGS) deux classifications de fond géochimiques à l'échelle de l'Europe permettant de mettre en évidence l'empreinte anthropique.

Cette analyse de l'état des lieux et les résultats qui en sont issus sont présentés de manière assez détaillée pour fournir par la suite, d'une part, des schémas adaptables aux diverses situations de gestion du SI et, d'autre part, la matière à l'écriture de guides qui viendront en appui dans le cadre de la mise en œuvre de la méthodologie

² L'Inventaire Minier National (sols et sédiments) réalisé par le BRGM et le SNEAP

³ Le programme « Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces » (approche pédologique et typologique) réalisé par l'INRA

⁴ La collecte de données nationale (base ANADEME) sur les sols avant épandage de boues de stations d'épuration réalisé par l'ADEME et INRA

⁵ Le référentiel pédo-géochimique pour la région Nord - Pas-de-Calais par l'INRA et l'Institut Supérieur d'Agronomie de Lille

de gestion des sites pollués à savoir la caractérisation géochimique de « l'état des lieux » d'un site.

2. Présentation des bases de données françaises

2.1. LES BASES DE DONNÉES SOLS DE L'INRA

2.1.1. Le GIS Sol

Les bases de données de l'INRA concernant les sols sont nombreuses et diverses. En 2001, un Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) a été créé en France afin de gérer les inventaires, les suivis et les bases de données de sols. La plupart des informations mentionnées ci-après sont extraites du site internet <http://gissol.orleans.inra.fr/>.

Le GIS Sol regroupe le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, le Ministère de l'Environnement, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD), l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), l'ADEME et l'IRD depuis 2004.

L'objectif du GIS Sol est de constituer et de gérer un système d'information sur les sols de France, prenant en compte leur distribution spatiale, leurs propriétés et l'évolution de leurs qualités. Le GIS Sol a pour mission d'organiser la concertation et la coopération entre ses membres dans le but de concevoir, orienter et coordonner la réalisation des actions d'inventaire géographique des sols, de suivi opérationnel de leurs qualités, de création et de gestion d'un système d'information répondant aux demandes des pouvoirs publics et de la société. Le Tableau 1 suivant présente les relations entre les différentes bases de données sols gérées par le GIS Sol.

Inventaire →	Bases de données	← Suivi temporel des sols
<u>Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS)</u> <u>Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF)</u>	<u>Base de Données Analyse des Terres (BDAT)</u>	<u>Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)</u> <u>Suivi des Analyses de Terre (BDAT)</u>
	<u>Base de Données nationale des informations spatiales pédologiques (DONESOL)</u>	
	<u>Base de Données Carbone France (BDCF)</u>	
	<u>Base de Données Eléments Traces Métalliques France (BDETM)</u>	
	<u>Base de Données Indicateurs de la Qualité des Sols (INDIQUASOL)</u>	

Tableau 1 : Schéma représentant les interactions entre les différentes bases de données du GIS SOL (source : <http://www.gissol.fr/programme/programmes.php>).

Parmi ces bases de données, seules les bases de données RMQS, BDETM et BDAT contiennent des données concernant des éléments traces métalliques présents dans les sols.

2.1.2. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, dans le cadre du GIS⁶ Sol, est coordonné par l'Unité Infosol de l'INRA d'Orléans. Grâce à un réseau de sites, il vise à évaluer la qualité des sols et à suivre l'évolution de leur état par de nouveaux prélèvements selon une périodicité donnée sur les sites RMQS. Les échantillons prélevés sont stockés au Conservatoire national d'échantillons de sols à Orléans. Il donnera la possibilité de ré-analyser ultérieurement les échantillons et de remplir la fonction « mémoire » du réseau.

Ce réseau repose sur le suivi de 2 200 points répartis uniformément sur le territoire français, selon une maille carrée de 16 km de côté, calée sur le Réseau européen de suivi des dommages forestiers (ICP Forests, Niveau I). Le RMQS représente à lui seul 1600 sites d'observation. Les 600 autres sites appartiennent au Réseau européen de suivi des dommages forestiers, complémentaire du RMQS. Des mesures, des observations et des prélèvements d'échantillon de sols seront effectués tous les huit à dix ans au centre de chaque maille. Toutes les opérations réalisées dans le cadre de ce projet sont décrites de façon détaillée dans le Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des sols (RMQS)⁷.

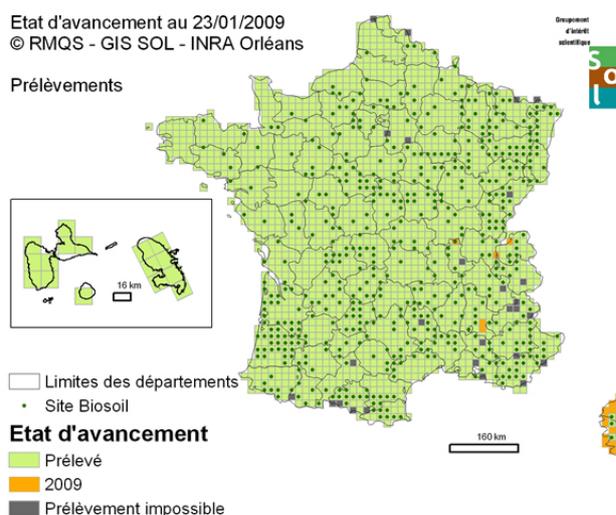


Figure 1 : État d'avancement du réseau RMQS en février 2008
(source : <http://www.gissol.fr/programme/rmqs/rmqs.php>)

Les données du RMQS rassemblent les teneurs totales en Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, TI et Zn et les teneurs extractibles par EDTA en Cd, Cu, Ni, Pb, et Zn, sur 2200 sites de mesure et deux profondeurs d'échantillonnage (0-30 cm et 30-50 cm). Les analyses de sols sont réalisées par un seul laboratoire (Laboratoire d'Analyses des Sols, INRA d'Arras).

⁶ GIS : groupement d'intérêt scientifique

⁷ Ce manuel est librement téléchargeable sur le site du Gis Sol : http://www.gissol.fr/programme/rmqs/RMQS_manuel_31032006.pdf

L'état d'avancement de ce projet est indiqué dans la Figure 1. La première campagne de suivi a commencé en 2001. En 2009 tous les prélèvements étaient terminés.

Suite à une demande du Ministère en charge de l'Environnement en 2007, GIS Sol a mis à disposition des **cartes de détection des teneurs anormales en éléments traces métalliques (ETM) des sols** couvrant l'ensemble du territoire. Ces cartes, réalisées à partir des données du RMQS sont basées sur la distribution de la population classée selon les quartiles (Figure 2).

Ces cartes sont désormais accessibles sur le site du Gis Sol via l'outil cartographique d'INDIQUASOL : <http://indiquasol.gissol.fr/geoindiquasol/main.php>.

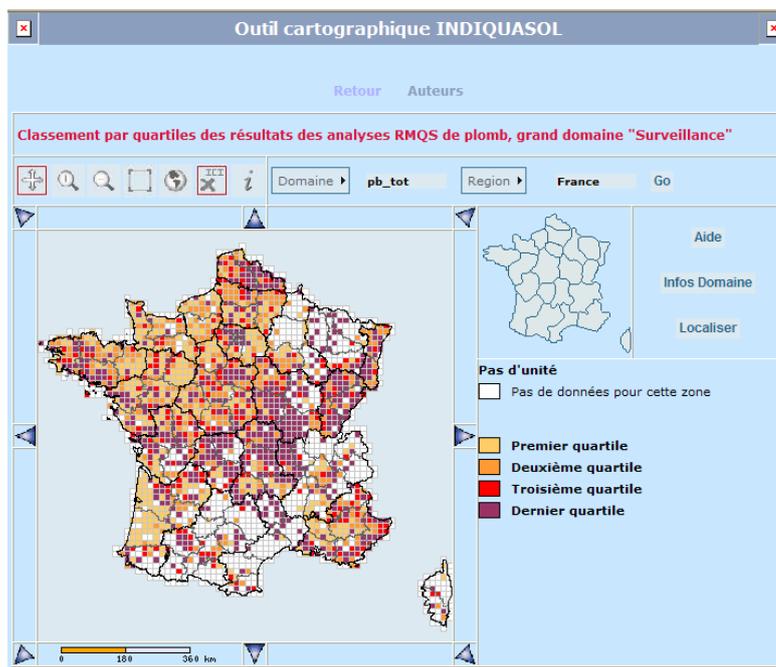


Figure 2 : Exemple d'impression d'écran de la carte de la distribution des valeurs plomb total, horizon 0-30 cm classement selon les quartiles.

(source : <http://indiquasol.gissol.fr/geoindiquasol/main.php>, avril 2010)

2.1.3. La Base de Données Analyse des Terres (BDAT)

Environ 250 000 analyses de terre sont réalisées en France chaque année, le plus souvent à la demande des agriculteurs, par des laboratoires d'analyse agréés par le ministère chargé de l'agriculture.

À l'échelle nationale, l'INRA a sollicité ces derniers afin de récupérer ces données. Après harmonisation des données, une base de données a été construite à partir de 790 000 échantillons d'horizons de surface de sols cultivés, prélevés en France entre 1990 et 2004. La base s'enrichit chaque année (Figure 3). Ces analyses d'échantillons de sols sont demandées par les agriculteurs pour gérer la fertilisation. Elles informent sur la variabilité des horizons de surface des sols cultivés ainsi que sur des paramètres fortement influencés par l'activité anthropique (teneurs en éléments fertilisants, pH...). En particulier, pour les éléments métalliques présents dans les sols agricoles, cette base rassemble les analyses chimiques concernant les teneurs totales en Br et les teneurs extractibles par EDTA en Cu, Zn, Mn et Fe.

Chaque analyse est géoréférencée au niveau de la commune de la parcelle. Les résultats sont ensuite regroupés au niveau cantonal, notamment pour disposer d'effectifs suffisants.

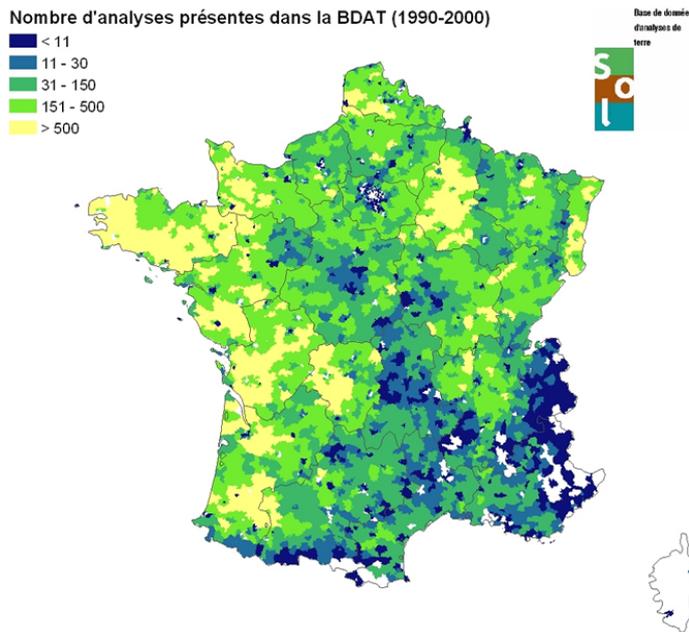


Figure 3 : Nombre d'analyses disponibles par canton dans la BDAT sur la période 1990-2000.
(source : <http://gissol.orleans.inra.fr/programme/bdat/bdat.php>)

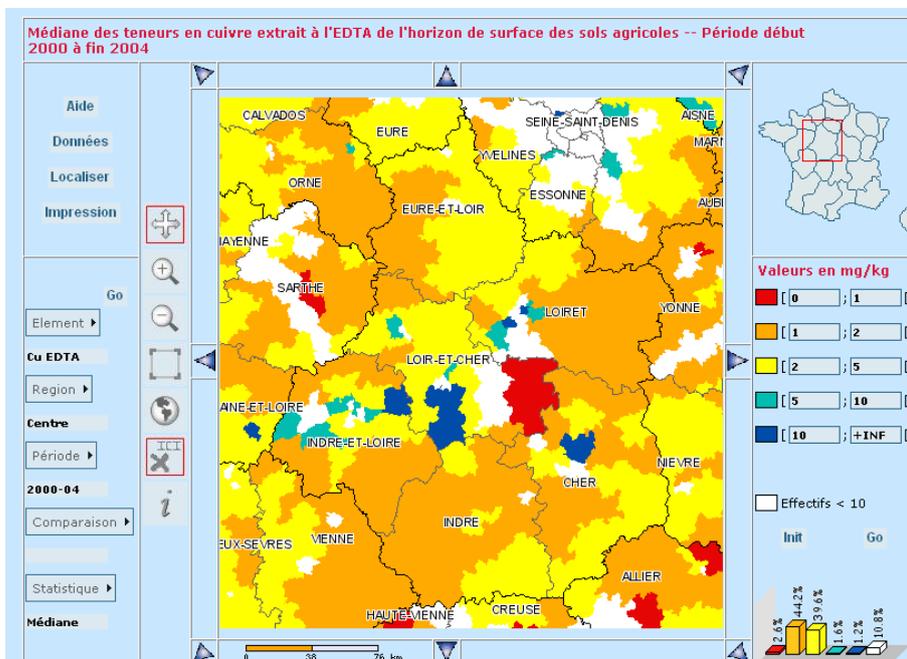


Figure 4 : Exemple d'impression d'écran de la carte de la médiane des teneurs en cuivre extrait à l'EDTA⁸, médiane calculée sur les données disponibles par canton durant la période 2000 à 2004.
(source : <http://acklins.orleans.inra.fr/geosol/index.php>, décembre 2008)

⁸ NB, l'EDTA par rapport aux extractions à HCl et à l'eau régale sous estime les fractions mobilisables pour les ETM (Madrid *et al.*, 2007).

Le site web permet de consulter les données statistiques agrégées par canton issues de la BDAT sous forme de cartes interactives (Figure 4). Les cartes sont imprimables au format « .pdf » et les données statistiques sont librement téléchargeables via l'outil cartographique de la BDAT : <http://indiquasol.gissol.fr/geoindiquasol/main.php>.

2.1.4. La base BDETM

Dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage des boues d'épuration, de très nombreuses analyses d'ETM dans les sols sont effectuées chaque année sur le territoire national. L'ADEME et l'INRA d'Orléans se sont associés et ont réalisé un important travail de collecte et de traitement des données disponibles entre 1988 et 1998, ayant abouti à la base de données ANADEME. Pour récupérer les données des plans d'épandage de boues d'épurations urbaines, l'ADEME a sollicité les différents détenteurs d'analyses afin qu'ils fournissent des données géo-référencées, sous couvert de confidentialité (les parcelles analysées ne devant pas être identifiables lors de la restitution finale). Les travaux de collecte, d'informatisation et de traitement des données ont été réalisés au cours des années 1997 et 1998 à l'INRA d'Orléans.

La base de données ainsi constituée initialement pour l'ADEME est désormais mise à la disposition du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (une réflexion sur son actualisation est en cours) sur le site internet : <http://www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php>.

Plusieurs centaines de données provenant de la base INRA-ASPITET ont été également introduites. Cette base livre des informations sur les teneurs en ETM des sols agricoles français et sur leur répartition dans l'espace.

La base de données informatisée et géoréférencée permet, grâce à une représentation spatiale des résultats analytiques, de fournir une image générale des concentrations actuelles en ETM des sols agricoles français (Figure 5 et Figure 6).

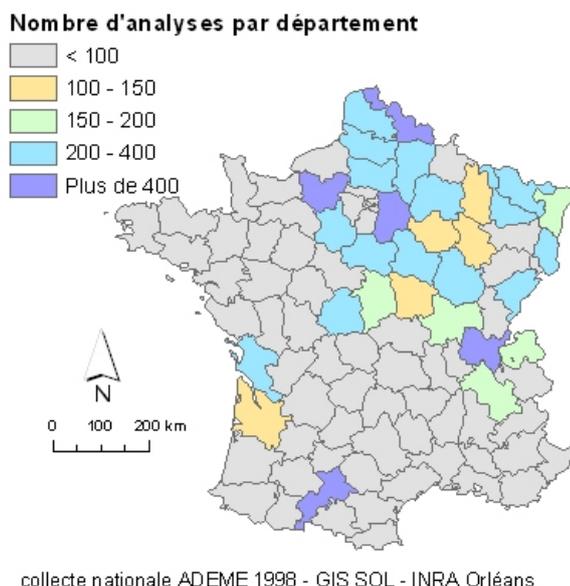


Figure 5 : Répartition du nombre d'analyses disponibles par département dans la BDETM (source : <http://www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php>).

Les analyses ne portent que sur les horizons de surface des sols cultivés. Les résultats obtenus avant les épandages de boues d'épuration traduisent donc à la fois le fond pédo-géochimique naturel local et la somme des apports liés aux activités humaines, récentes ou plus anciennes. Les causes de ces contaminations anthropiques peuvent être agricoles (fumiers, amendements, fertilisants), urbaines ou industrielles ; les sources peuvent être locales ou diffuses.

Les résultats d'analyses de 11 300 sites irrégulièrement répartis sur le territoire ont ainsi pu être rassemblés. 8000 analyses seulement ont pu être géo-référencées avec précision et sont contenues dans la base avec les mesures des concentrations des éléments traces métalliques suivants : Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn. Ces données portent sur les horizons de surface des sols cultivés.

Depuis avril 2008, le document de synthèse « Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France - Résultats d'une collecte de données à l'échelon national » est accessible sous deux formes :

- directement sur le site du Gis Sol au format HTML à cette adresse : http://www.gissol.fr/programme/bdetm/_rapport_anademe/rapport/contents.php
- et sous la forme d'un document au format pdf téléchargeable. Ce dernier ne reprend pas l'intégralité des travaux réalisés afin d'alléger sa lecture, seuls les tableaux, figures et cartes les plus illustratifs ont été sélectionnés : http://www.gissol.fr/programme/bdetm/_rapport_anademe/acces_cartogrammes.php.

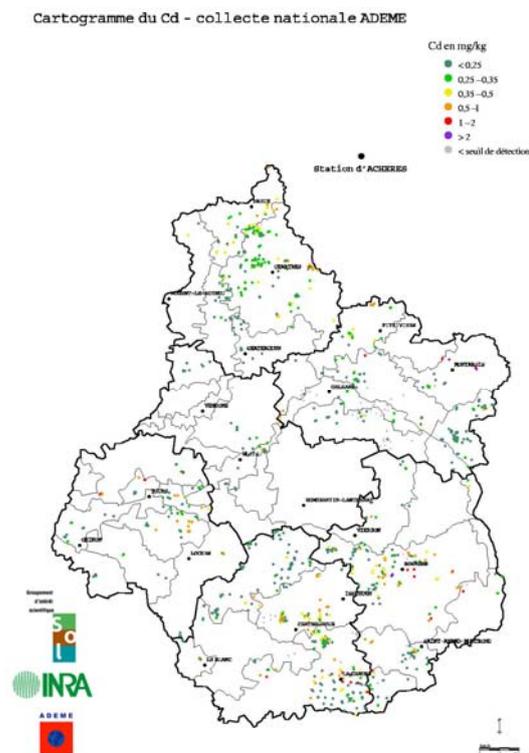


Figure 6 : Exemple de la carte téléchargeable de répartition des concentrations en cadmium dans la région Centre.

(source : http://www.gissol.fr/programme/bdetm/_rapport_anademe/acces_cartogrammes.php)

2.1.5. Les données ASPITET

Le programme ASPITET « Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces » a été lancé par l'INRA en 1993.

De nombreuses données relatives aux sols forestiers et aux horizons profonds (tous types d'occupation des sols) ont été recueillies au cours de ce programme. Des analyses d'horizons de surface de sols cultivés, réalisées depuis 1998 dans le cadre des programmes GESSOL (volet « blés ») et QUASAR, y sont également présentes.

Pour tous les échantillons, les concentrations totales en éléments traces ont été déterminées :

- toujours Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn (mise en solution par HF et HClO₄ - respectivement acides fluorhydrique et perchlorique - concentrés - norme AFNOR X 31-147) ;
- souvent As, Co, Hg, Se, Tl.

Sont également toujours disponibles des données de caractérisation pédologique courantes telles que le carbone organique, la capacité d'échange cationique, le pH, le fer total et, si nécessaire, le calcaire total. Toutes ces analyses ont été réalisées dans un seul et même laboratoire, celui de l'INRA à Arras, entre 1988 et 1998.

D'après Darmendrail *et al.* (2000), la base ASPITET a permis de mettre au point des stratégies d'interprétation et d'extrapolation spatiale (dite approche typologique). La méthode présente l'avantage de réduire fortement le nombre d'analyses, mais nécessite en préalable une cartographie pédologique détaillée et une bonne connaissance de la lithologie sous-jacente. La base de données est constituée d'analyses récentes avec une bonne limite de détection, mais se focalisant sur un nombre réduit de métaux. Cette méthode d'extrapolation peut être efficace pour des éléments traces dont le fond géochimique est déterminé par la lithologie (ex : Cr, Ni, Co, Ba, Zr, Ti, Li, B, Ba, Terres Rares...). En revanche, elle est relativement approximative pour les éléments traces (ex : As, Se, Cu, Pb, Zn, Mo, W, Cd, Tl...) plutôt influencés par d'autres phénomènes géologiques comme l'hydrothermalisme, le métamorphisme, les discontinuités structurales, etc. Cette méthode peut être envisagée dans les régions où la lithologie est relativement monotone et constituée de roches à faibles variations du fond géochimique (ex : craie, grès...).

Un résumé des principaux résultats de ce programme est présenté sur le site internet : <http://www.inra.fr/dpenv/baizec39.htm>.

À noter que plusieurs centaines de données provenant de la base INRA-ASPITET ont été également introduites dans la base BDETM.

2.2. BASE DE DONNÉES DE L'INVENTAIRE MINIER NATIONAL

Le BRGM, conformément à sa mission de Service public et à la demande du Ministère de l'Industrie, a effectué de nombreuses campagnes de prospection géochimique à vocation minière entre les années 1975 et 1991 ; ces opérations étaient réalisées dans le cadre du programme « Inventaire des ressources minérales du territoire national ». Les informations disponibles sont de nature diverse (types des prélèvements, éléments analysés, méthodes analytiques) ; le système de géo-référencement des échantillons

est également variable suivant les zones et la progression des travaux. Ces résultats sont maintenant regroupés dans une base de données unique représentant plus de 280 000 échantillons.

Cette base a été complétée par près de 60 000 résultats analytiques correspondant au même type de prospection effectué par une société extérieure (SNEAP), et qui ont été fournis au BRGM.

Les investigations géochimiques ont été focalisées sur les zones connues pour receler des minéralisations, à savoir les massifs hercyniens (Massifs central et armoricain, Vosges) et leurs marges sédimentaires, en particulier Morvan, Cévennes et Marche, soit 101 540 km². Quelques secteurs des Pyrénées et des Alpes ont également été couverts. En revanche, les grands bassins sédimentaires d'Aquitaine, du couloir rhodanien et du Bassin parisien ne sont pas informés. On peut estimer qu'un peu moins de 20 % du territoire national est couvert.

Ces investigations géochimiques ont été menées pour déceler des gisements métallifères sur le territoire national. Ces investigations ont été faites par échantillonnage systématique, à une maille telle qu'un gîte minéral important sub-affleurant puisse être détecté avec une très forte probabilité.

La Figure 7 donne une idée de la répartition de l'échantillonnage effectué dans le cadre de l'inventaire minier national.

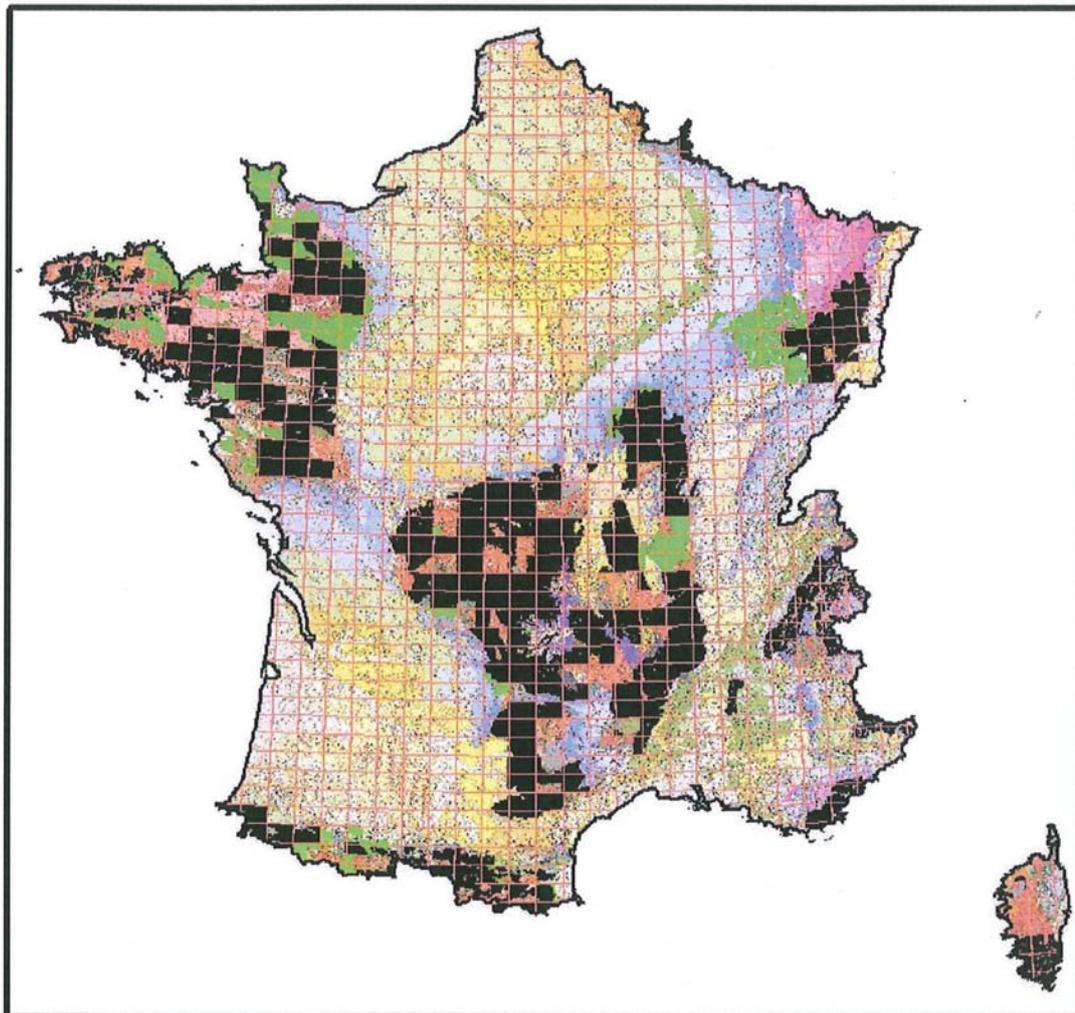


Figure 7 : Localisation des échantillons BRGM (en noir) et SNEAP (en vert), dans l'inventaire minier et superposition sur fond géologique.

Cette base de données est le résultat d'une approche systématique et standardisée sur le plan de l'échantillonnage. Elle couvre de vastes surfaces avec une forte densité d'échantillons (0,5 à 3 par km²). Cette base fournit une information relativement fiable des caractéristiques du sol entre 30 et 50 cm de profondeur mais exclut l'horizon humifère de surface.

Les études statistiques ont montré que les signaux géochimiques des sédiments de ruisseaux et des sols étaient relativement comparables sur une échelle locale.

L'ensemble des données de cette base serait donc valorisable pour définir certaines valeurs guides. La base de l'inventaire minier présente toutefois certains désavantages :

- elle ne couvre pas les principales zones industrialisées du territoire ;
- la base a été conçue pour une finalité minière et certains des principaux éléments traces sensibles en environnement comme Se, Tl, Hg... n'y figurent pas ;
- les sols ne représentent que 20 % environ des prélèvements ;

- les analyses ont été réalisées à une période où les limites de détections étaient relativement élevées et avoisinaient 10-20 ppm (Darmendrail *et al.*, 2000).

Les données brutes de cette base sont déjà visualisables sur internet via le serveur InfoTerre : <http://infoterre.brgm.fr> (Figure 8) ou librement téléchargeable sur le site internet : <http://sigminesfrance.brgm.fr/sig.asp> (Figure 9).

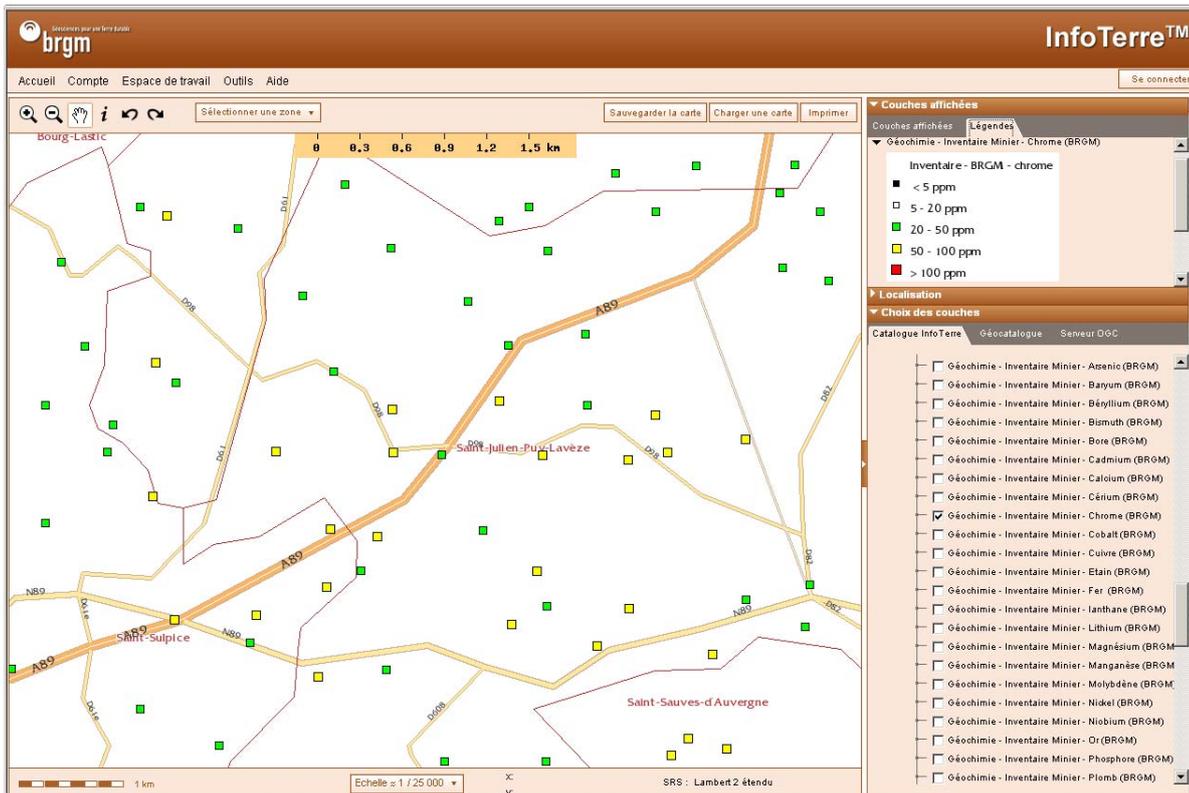


Figure 8 : Exemple d'impression d'écran de la répartition des teneurs en chrome sur la commune de Saint-Julien-Puy-Lavèze (63), mesurées dans le cadre de l'inventaire minier national (source : <http://infoterre.brgm.fr>)

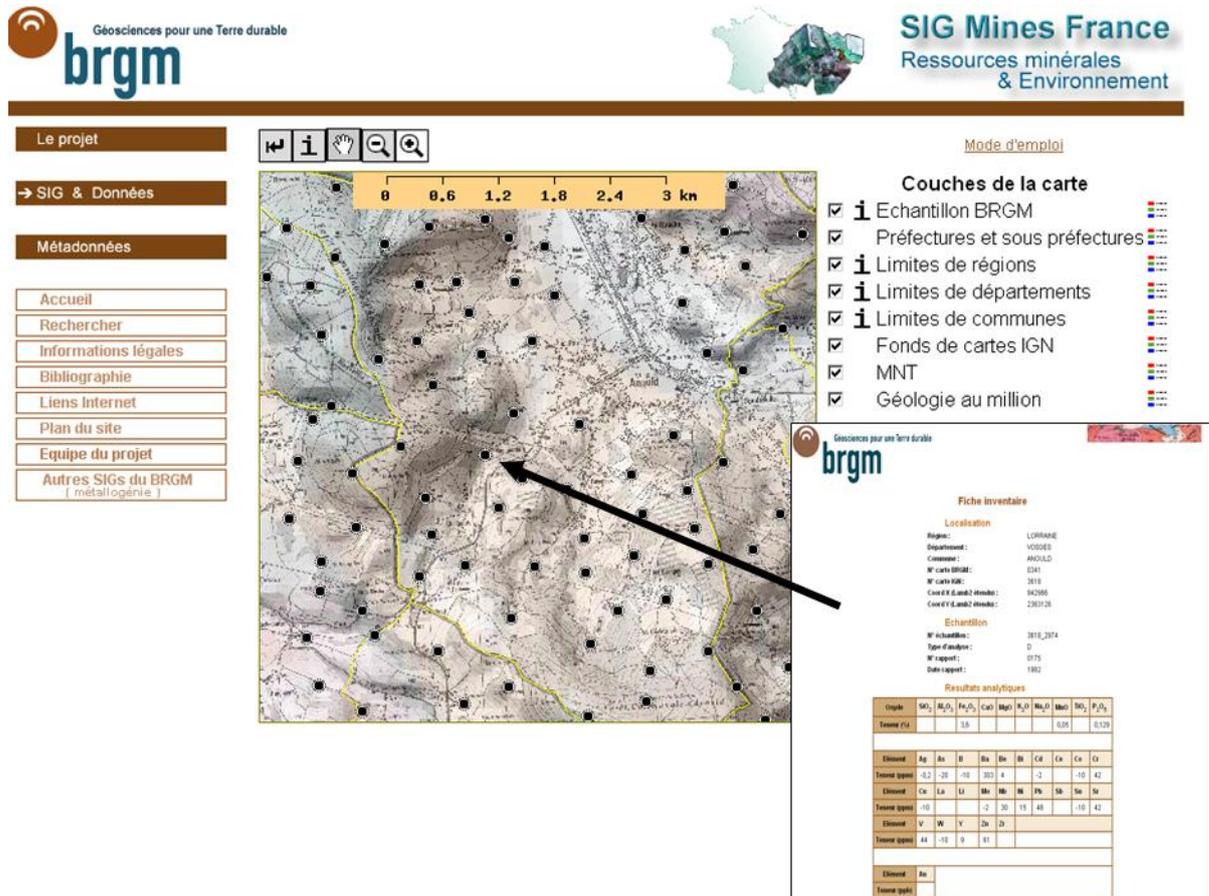


Figure 9 : Exemple d'impression d'écran de la localisation des échantillons prélevés sur la commune de Arnould (88) dans le cadre de l'inventaire minier national, détail d'une fiche inventaire comportant les résultats analytiques de l'échantillon (source : <http://sigminesfrance.brgm.fr/sig.asp>)

2.3. RÉFÉRENTIEL PÉDO-GÉOCHIMIQUE DU NORD - PAS-DE-CALAIS

La constitution du Référentiel Pédo-Géochimique du Nord - Pas-de-Calais (RPG) a été réalisée par l'INRA associé à l'Institut Supérieur d'Agronomie de Lille, sur des financements du Conseil Régional et du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

Le Référentiel Pédo-Géochimique du Nord - Pas de Calais fournit les teneurs totales en 18 éléments traces (As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, V, Zn) dans les sols agricoles et forestiers de la région. Au total, 267 « solums⁹ » ont été observés, 1 100 prélèvements réalisés et 768 échantillons de sols analysés.

Le mode d'échantillonnage (choix des sites) permet la caractérisation des matériaux parentaux et des types de sols de la région. La caractérisation systématique de trois horizons superposés (y compris le matériau parental) en chaque site permet la caractérisation des concentrations pédo-géochimiques naturelles.

⁹ Solum :

Ce document contenant l'ensemble des données est téléchargeable sur le site de l'INRA d'Arras : http://www.arras.inra.fr/fichiers/Rapport_RPG.pdf.

2.4. RENECOFOR

L'objectif principal de ce réseau est de détecter d'éventuels changements à long terme dans le fonctionnement d'une grande variété d'écosystèmes forestiers et d'en comprendre les raisons.

Le réseau est constitué de 102 sites d'observation permanents qui seront suivis pendant au moins 30 ans (1992-2022) par l'ONF. Ce réseau est caractérisé à l'échelle européenne comme étant de niveau 2, c'est-à-dire constitué de « placettes¹⁰ » non systématiques, représentatives de grands écosystèmes forestiers, sur lesquelles de nombreux prélèvements et observations sont effectués.

Dans le cadre de ce programme, seuls les horizons holorganiques¹¹ OH ont été systématiquement analysés, soit seulement 16 horizons pour 16 sites (sur 102). Des travaux complémentaires menés sont portés sur 34 horizons et 11 sites sélectionnés de ce réseau (Probst *et al.*, 2003).

Chaque placette couvre une surface de 2 hectares, dont la zone centrale d'un demi-hectare est clôturée. La plupart des installations de récoltes et d'observations se trouvent dans cette zone centrale.

Suite aux conclusions de l'évaluation du réseau et à la révision des objectifs, une modification du nombre de sites observés et des fréquences de suivi a eu lieu à partir de 2008.

Qu'il s'agisse d'horizons humifères ou minéraux, les analyses physico-chimiques des sols suivantes sont pratiquées selon une périodicité de 15 ans¹² : densité apparente, granulométrie, pH, carbone organique, capacité d'échange cationique, taux de saturation en bases, concentration en N, K, Ca, Mg, Zn, Cd, Ni, Pb, Cu, CaCO₃, P₂O₅...

Le projet RENECOFOR est présenté sur le site de l'ONF : <http://www.onf.fr/renecofor>.

¹⁰ Placette : Unités d'échantillonnage sur lesquelles sont collectées les données d'inventaire. La France, avec une placette inventoriée pour 4,5 km² de forêt, se situe dans la moyenne des pays européens (1,1 km² pour l'Espagne, 13,1 km² pour l'Italie).

¹¹ Holorganique : qualifie une couche de terrain entièrement constituée de débris organiques.

¹² Il semblerait que les analyses soient aussi assurées par l'INRA.

3. Présentation des bases de données européennes de sols

3.1. LE PROGRAMME FOREGS : L'ATLAS GÉOCHIMIQUE EUROPÉEN

3.1.1. Finalité de ce programme

Le programme européen FOREGS (Forum of European Geological Survey) vise à établir un atlas des fonds géochimiques pour différents supports et pour les éléments intéressant le domaine de l'environnement. Ce programme a débuté en 1988 et les résultats sont maintenant publiés ; 26 pays européens y ont participé, dont la France.

Dix années de tests (1988 à 1998) ont permis d'optimiser le choix des milieux de prélèvement, des éléments à doser et des méthodes d'analyses, et de trouver les compromis en termes de coûts et de spatialisation de l'information. Les services géologiques de 26 pays sont impliqués dans ce programme : ils concernent l'Autriche, l'Albanie, la Belgique, la Croatie, la République Tchèque, le Danemark, l'Estonie, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Italie, la Lettonie, la Lituanie, les Pays-Bas, la Norvège, la Pologne, le Portugal, la République Slovaque, la Slovénie, l'Espagne, la Suède, la Suisse et le Royaume-Uni. Le financement est assuré par chaque service européen. La coordination du projet et la cartographie ont été réalisées par le Service géologique de Finlande (R. Salminen).

Les phases d'échantillonnage normalisé, de traitement des échantillons et d'analyse ont duré quatre ans.

En 2005 et 2006, l'atlas a été publié en deux volumes :

- Geochemical Atlas of Europe, part 1 - Background Information, Methodology and Maps - G.S. of Finland, Espoo 2005. Cet ouvrage comporte 424 cartes de répartition des éléments à l'échelle européenne ;
- Geochemical Atlas of Europe, part 2 - Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications - G.S. of Finland, Espoo 2006. Ce second volume publié intègre l'interprétation de ces données.

Ces deux ouvrages ainsi que l'accès aux données analytiques sont disponibles sur le site internet du projet : <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/>.

3.1.2. Échantillonnage

De 1999 à 2002, échantillonnage et analyse ont eu lieu dans les 26 pays. La méthode d'échantillonnage repose sur une division de l'Europe en carrés de 160 km de côté calqués sur ceux du GTN (Global Terrestrial Network, Darnley *et al.*, 1995). Dans chaque cellule, cinq sites ont été tirés au hasard (Figure 10). À proximité de ces sites, un bassin hydrographique de drainage inférieur à 100 km² a été sélectionné. En aval, dans le bassin hydrographique qui englobe le précédent, un limon d'inondation a été prélevé (bassin de 1 000 à 6 000 km²).

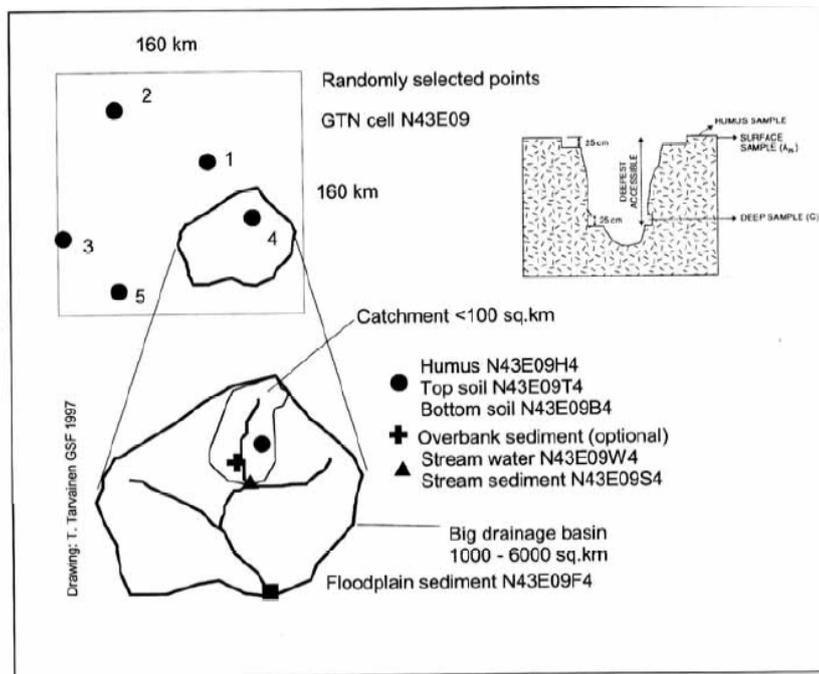


Figure 10 : Sélection des sites d'échantillonnage dans le cadre du programme FOREGS.

Au total, en France, 122 sites ont été échantillonnés pour les eaux de rivière, les sédiments actifs et 114 sites pour les limons d'inondation, de fin 1998 à mi 1999.

Sur chaque petit bassin de moins de 100 km², sont prélevés :

- les eaux de surface codées W : trois flacons conditionnés en fonction des éléments à doser ; les mesures pH, conductivité électrique (EC), alcalinité totale (méthode Hach) et radiométrie (comptage total) sont faites sur site ;
- les sédiments actifs tamisés sur place sur des tamis de 150 µm, fraction retenue inférieure à cette maille, codés S : composite de cinq prises en amont du point ;
- les sols prélevés (composite de trois puits) dans le bassin versant à l'amont du sédiment : deux horizons, un horizon supérieur (code T : compris entre 10 et 30 cm) et un horizon inférieur (code C au contact du substratum ou à 1,5 m de profondeur maximum si pas de substratum) ;
- la collecte d'un humus organique était prévue, mais ce matériel s'est avéré très rare sur les sites français (18 sites sur 115).

Sur le grand bassin aval, deux échantillons de limons ont été prélevés : un limon supérieur (code F) et un limon inférieur à une profondeur de 1,5 ou 1,8 m codé L, censé représenter l'état préindustriel.

3.1.3. Méthodologie et analyses

Les échantillons de sols et sédiments, séchés à 40 °C, ont tous été centralisés dans un laboratoire slovaque pour le broyage, le quartage et la réexpédition dans les 7 laboratoires européens retenus : BGS (UK), BGR (Allemagne), BRGM (France), GSF (Finlande), MAFI (Hongrie), PIG (Pologne) et NITG (Hollande).

Les méthodes adoptées (XRF pour les majeurs, ICP pour les traces, et autres pour certains dosages spécifiques) sont choisies pour permettre d'atteindre les valeurs de fond géochimique de l'élément considéré. Certains éléments ont pu être analysés par plusieurs méthodes. D'autres paramètres sont disponibles dans la base de données sols tels que le TOC (Total Organic Content) en % pour les sols, sédiments et limons, et le pH.

Le service EAU du BRGM a valorisé les données de l'inventaire géochimique acquises par le FOREGS dans le cadre d'une étude méthodologique nationale sur l'identification des zones à risque de fond géochimique dans les eaux souterraines et de surface. Les données de l'inventaire géochimique ont été transmises à cette occasion aux Agences de l'eau et au MEDAD. Une présentation de ce programme et des avertissements pour l'usage de ces données sont publiés sur le site : <http://sigminesfrance.brgm.fr/sig.asp>.

En guise d'illustration, la Figure 11 présente la répartition du plomb dans la partie inférieure des sols européens. Le fond géochimique Pb est de 17 ppm (dosage ICP-MS) et trois zones de distribution très contrastées apparaissent, avec un gradient du nord au sud :

- le bouclier scandinave et sa bordure périglaciaire nettement appauvris en Pb (sauf trois anomalies peu étendues entre la pointe sud de la Norvège et l'extrémité NE de la Finlande) ;
- une zone intermédiaire qui va du nord du Massif central à la Hongrie avec un fond entre 17 et 20 ppm, où deux zones anormales sont remarquables : à la frontière germano-tchèque (district filonien de l'Herzgebirge) et en Lettonie ;
- une zone méridionale qui inclut le Massif central, la Galice et le sud du Portugal, la frange tyrrhénienne de l'Italie et la Croatie-Serbie, où les teneurs de fond sont nettement plus élevées (> 30 ppm) et qui comporte de fortes anomalies sur trois secteurs : le seuil du Poitou, le district sud Cévenol et l'ancienne mine de Pb-Zn de Vallauria à la frontière italienne. En Espagne, le bassin tertiaire du Guadalquivir, en revanche, est totalement déprimé en Pb.

À noter que les données cartographiques sont également disponibles sur le site internet : <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/foregshmc/>. Sur ce site, il est proposé une analyse géostatistique des teneurs en métaux lourds dans les sols superficiels européens issues de la base de données géochimiques FOREGS. Les cartes des teneurs interpolées spatialement par la méthode de « regression-krigeage » pour huit métaux et métalloïdes (arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc) peuvent être visualisées sous Google Earth.

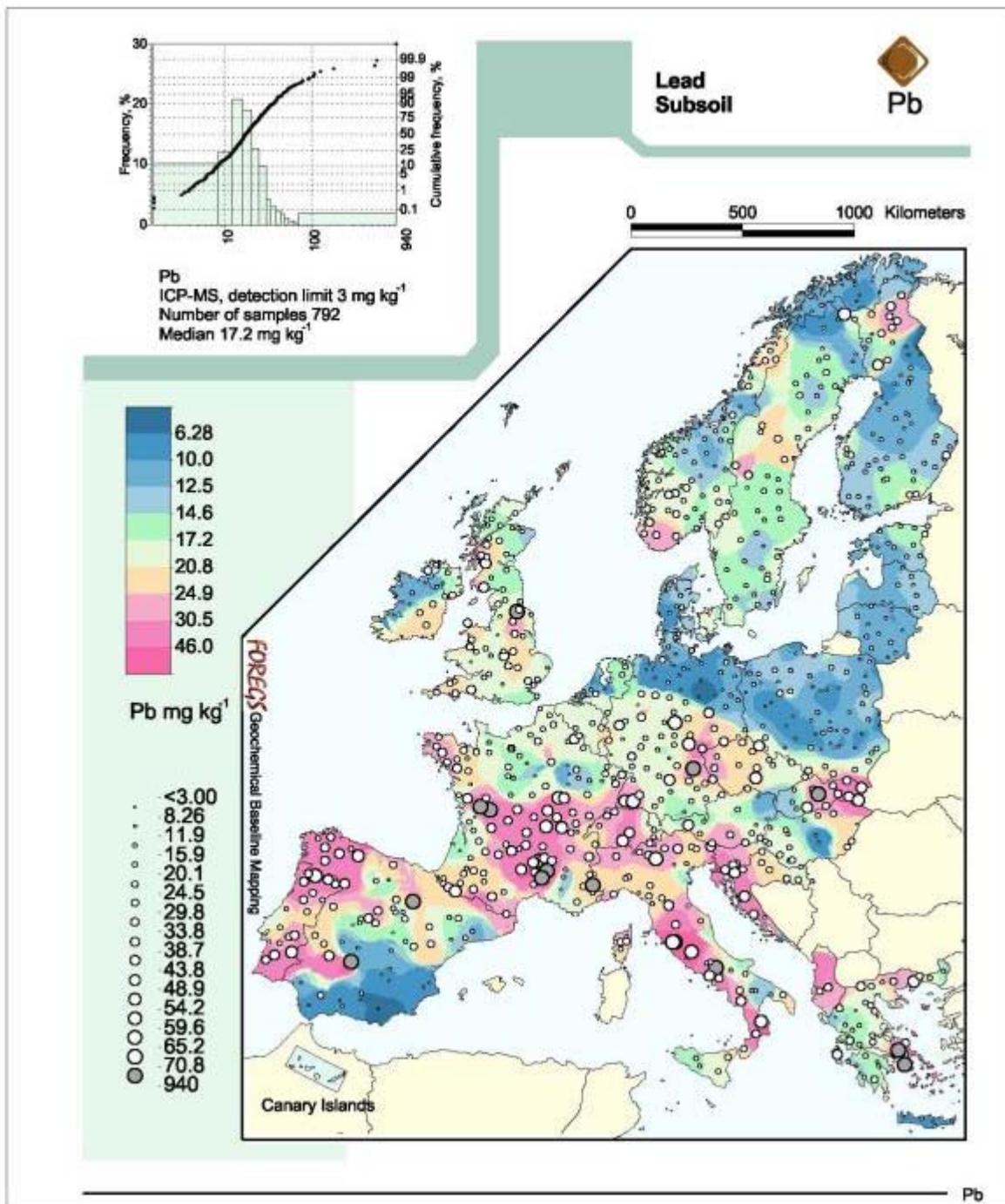


Figure 11 : Répartition du plomb dans la partie inférieure (Subsoils) des sols européens (FOREGS).

un manuel décrivant les stratégies d'échantillonnage et les indicateurs recommandés, ainsi qu'une évaluation de leur faisabilité et de leur performance sur des secteurs tests.

Plusieurs auteurs ont analysé les systèmes de surveillance européens déjà existants en montrant leur hétérogénéité et l'importance d'une harmonisation (F.A.O., 1994 ; Arrouays *et al.*, 1998 ; King et Montanarella, 2002). En particulier, selon Morvan *et al.* (2008), il ne paraît pas possible de proposer une stratégie d'échantillonnage commune sans exclure les sites de nombreux réseaux de mesure. Dans le cadre d'ENVASSO, les mêmes auteurs (56 chercheurs de 42 instituts européens) proposent des stratégies d'échantillonnage des réseaux de suivi européens (sélection des sites, surface, nombre de sous-échantillons, pas de temps d'échantillonnage) et des propositions d'harmonisation sont présentées.

En premier lieu, la définition commune d'un site de surveillance impose des conditions de géo-référencement avec une précision minimale inférieure à 10 m et plusieurs campagnes de mesures successives. Toutefois, la qualité de surveillance du site sera accrue si des sous-échantillons sont prélevés et géo-référencés avec une précision inférieure à 1 mètre.

Il apparaît également indispensable qu'une couverture spatiale minimale européenne soit réalisée. La densité de sites recommandée à l'échelle européenne par ENVASSO est conforme à celle qui a été retenue en France dans le programme RMQS. Les auteurs proposent donc qu'à partir d'une grille de 50x50 km, la densité médiane des sites soit d'un site par 300 km², ce qui nécessiterait l'ajout de 4100 nouveaux sites. La surface des sites de surveillance pourrait être limitée à un hectare mais supérieure à 100 m² (Morvan *et al.*, 2008).

La recommandation concernant le sous-échantillonnage serait de 4 prélèvements, avec un pas de temps de 10 ans maximum et un poids total compris entre 3 et 10 kg. Concernant la profondeur d'échantillonnage, les auteurs proposent à la fois de prélever les horizons pédologiques et à des profondeurs fixes, ce dernier cas étant valable pour 78 % des réseaux européens. Ceci permettrait ainsi de n'exclure aucun réseau et de lier ces bases de données aux inventaires cartographiques qui décrivent des horizons. Afin de pallier l'hétérogénéité des méthodes de prélèvements, l'idée serait de convertir les teneurs en une masse minérale équivalente (Ellert et Bettany, 1995). Ceci conduirait à devoir mesurer la densité apparente sur chaque échantillon. Ils préconisent enfin de sécher à 40 °C et de tamiser à 2 mm. Un archivage systématique des échantillons séchés à 40 °C devrait être réalisé.

Le programme ENVASSO a également recensé et décrit brièvement les informations existantes sur les sols et les bases de données mises en place dans certains pays européens. Un modèle de données et une base de données des sols (SoDa) sont proposés afin d'harmoniser les approches et de fournir des indicateurs de surveillance des sols communs à tous les états membres. En outre, un prototype de portail internet (Soil Web Service) a été développé pour rassembler et mettre à disposition les données relatives aux sols dans le cadre de ce projet. Cette base a été testée pour quelques régions pilotes d'ENVASSO. À la date de rédaction de ce rapport (2010), le portail n'est pas encore ouvert au public.

Une présentation de ce programme et les six rapports issus du projet ENVASSO sont publiés sur les sites internet : <http://www.envasso.com/> et <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/>.

4. Vers un système d'information relatif à la géochimie des sols

4.1. RÉSUMÉ DE L'EXISTANT

Sur la base d'un modèle commun (Annexe 1), les différentes bases étudiées dans le chapitre précédent sont présentées en annexe : BDETM (Annexe 2), RMQS (Annexe 3), BDAT (Annexe 4), ASPITET (Annexe 5), IMN (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), RNPC (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), RENECOFOR (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et FOREGS (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Un tableau Excel[®] issu du modèle commun a également été renseigné pour permettre une comparaison rapide entre les bases de données (Annexe 1).

Les critères importants lors de l'analyse combinée des bases de données ont permis de préciser :

- la finalité des projets ayant nécessité les analyses ;
- les critères mis en avant pour sélectionner les échantillons ;
- les méthodes d'échantillonnage et de préparation utilisées ;
- les méthodes analytiques mises en œuvre ;
- la nature du contenu de la base de données ;
- le type de financement.

À ce jour, le réseau RMQS présente la base de travail la plus complète, avec notamment une démarche qualité éprouvée (normes AFNOR, ISO ou CE) et une stratégie d'échantillonnage validée au niveau européen, basée sur la norme NF ISO 16133 (Qualité du sol : Lignes directrices pour l'établissement et l'entretien de programmes de surveillance). La base ASPITET est proche de la base RMQS au niveau du renseignement des champs. En revanche, la base BDAT est relativement sommaire concernant la description du site, les informations sur le prélèvement, la préparation analytique et les résultats.

Les bases de données européennes FOREGS et ENVASSO divergent essentiellement dans le descriptif et les informations sur le type d'échantillon, qui sont plus renseignés dans le FOREGS. La base ENVASSO comporte des analyses sur les cations échangeables et sur quelques éléments (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn). Au contraire, la base FOREGS ne s'intéresse pas aux cations échangeables mais présente la concentration d'une gamme très complète d'éléments.

En France et aussi bien en Europe, les sources de données et de gestion de bases de données sur les sols sont extrêmement hétérogènes. Les systèmes d'information mis en place sont généralement des bases de données statiques ; sans mises à jour régulières, la donnée brute acquise n'est souvent pas directement accessible au

public. Généralement, seules des données statistiques ou cartographiées sont proposées. En outre, les données et leur analyse cartographique sont, pour la plupart, issues de protocoles opératoires disparates, souvent liés à la finalité du projet porteur (minier, agronomique, environnemental...), du progrès dans les méthodes d'investigation sur le terrain et des méthodes analytiques.

4.2. FINALITÉS DU SI ACCESSOL

Afin de répondre au mieux aux besoins décrits dans l'introduction et les chapitres précédents, la mise en œuvre d'un système d'information dédié à la gestion et à la diffusion de l'information géochimique des formations superficielles est étudiée ci-après.

L'analyse de l'existant a montré que le sujet est déjà suivi par des acteurs institutionnels nationaux et européens et que des systèmes d'acquisition et de publication plus ou moins complets ont été ou sont en cours de constitution pour bancariser et diffuser l'information produite. Par ailleurs, des gisements d'informations existent dans de nombreuses études plus ou moins anciennes mais ne sont pas intégrés dans des bases de données et donc peu mobilisables par les utilisateurs.

Aussi, un SI (Système d'Information) dédié à l'information géochimique peut difficilement s'envisager sans prendre en compte les démarches existantes et en ignorant les gisements informationnels actuels. C'est donc une exigence essentielle que de définir un système permettant l'acquisition et la collecte de nouvelles informations géochimiques (bibliographique, nouvelles campagnes de mesures...) tout en fédérant les données existantes.

Le SI Géochimie « ACCESSOL » pourrait s'organiser autour des finalités suivantes :

- **un système fédérant l'information géochimique à l'échelle nationale** issue de la production publique par l'ensemble des acteurs français ; la fédération s'entend aussi bien du point de vue organisationnel (rôle des acteurs) que sur les parties techniques (outils, interopérabilité,...) ;
- **un système structurant l'information géochimique** en mettant en œuvre une organisation standardisée de la donnée géochimique ; il ne s'agit pas d'élaborer un SI référençant des bibliographies ou des rapports dans le domaine mais bien de construire une base de données conçue et approuvée par l'ensemble des acteurs ;
- **un système garantissant l'acquisition et la collecte de nouvelles informations géochimiques** en mettant à disposition un ensemble d'outils indispensables aux producteurs, que ce soit au travers de nouvelles campagnes d'échantillonnage ou de « numérisation » de la bibliographie actuelle ;
- **un système favorisant les échanges de données géochimiques** entre les bases de données actuelles tout en garantissant la **traçabilité et la qualification** de l'information ;
- **un système fournissant des traitements et valorisations** de la donnée géochimique pour répondre aux besoins réglementaires ;

- **une simplification de l'accès à l'information géochimique** avec un guichet d'accès aussi bien auprès du grand public que du public spécialisé du domaine.

4.3. DÉFINITION DES PRINCIPAUX CAS D'UTILISATION

Ce chapitre est dédié à la description des grands cas d'usages d'un système d'information et d'une base de données pour la géochimie du sol. Les acteurs concernés sont tout d'abord présentés avant de décrire les cas d'utilisation du SI.

4.3.1. Les acteurs du système

Acteur	Définition
Grand public	Citoyen à la recherche d'informations sur la géochimie des sols généralement dans son territoire avec des préoccupations environnementales fortes. <i>Exemple : Internaute, Professeurs / Instituteurs...</i>
Public expert	Regroupe l'ensemble des acteurs spécialisés de l'information environnementale mais n'assurant pas une production particulière dans le SI. <i>Exemple : Bureaux d'études environnementaux, Associations de protection, Associations de consommateurs...</i>
MEEDDM et Décideurs	Regroupe l'ensemble des instances pilotant le projet et dans l'attente d'une information pour assurer ces missions régaliennes et évolutions de la réglementation. <i>Exemple : MEEDDM, Commission européenne, Ministère de la Santé, Collectivités locales</i>
Gestionnaire de réseaux sur les données géochimiques	Regroupe l'ensemble des acteurs assurant la production régulière de données de géochimie en France dans le cadre de réseaux de mesures structurés. <i>Exemple : INRA, GISOL...</i>
Producteur d'informations sur la géochimie	Regroupe l'ensemble des acteurs produisant de manière plus ou moins ponctuelle de l'information géochimique : dossiers de demande d'autorisation d'exploitation, études d'impact, diagnostics de site pour la réhabilitation de site, étude d'interprétation de l'état des milieux, études locales sur le fond géochimique des sols ou le bruit de fond conduites par des universités, des collectivités locales, des bureau d'études... <i>Exemple : DRIRE, Bureaux d'études, Collectivités locales, Universités, Organismes scientifiques...</i>
Saisisseur	Acteur en charge du dépouillement des données non structurées (généralement documentaire) et de leur structuration dans le SI Géochimie. <i>Exemple : SGR</i>
Gestionnaire de bases de données géochimiques	Ensemble des acteurs assurant la gestion d'une base de données en lien direct avec la géochimie. <i>Exemple : GISSOL, BRGM/inventaire minier, INRA, ADEME...</i>
Gestionnaire national SI	Acteur en charge de la gestion du SI Géochimie, aussi bien sur les parties Acquisition de données que Diffusion de l'information. <i>Exemple : BRGM/EPI</i>

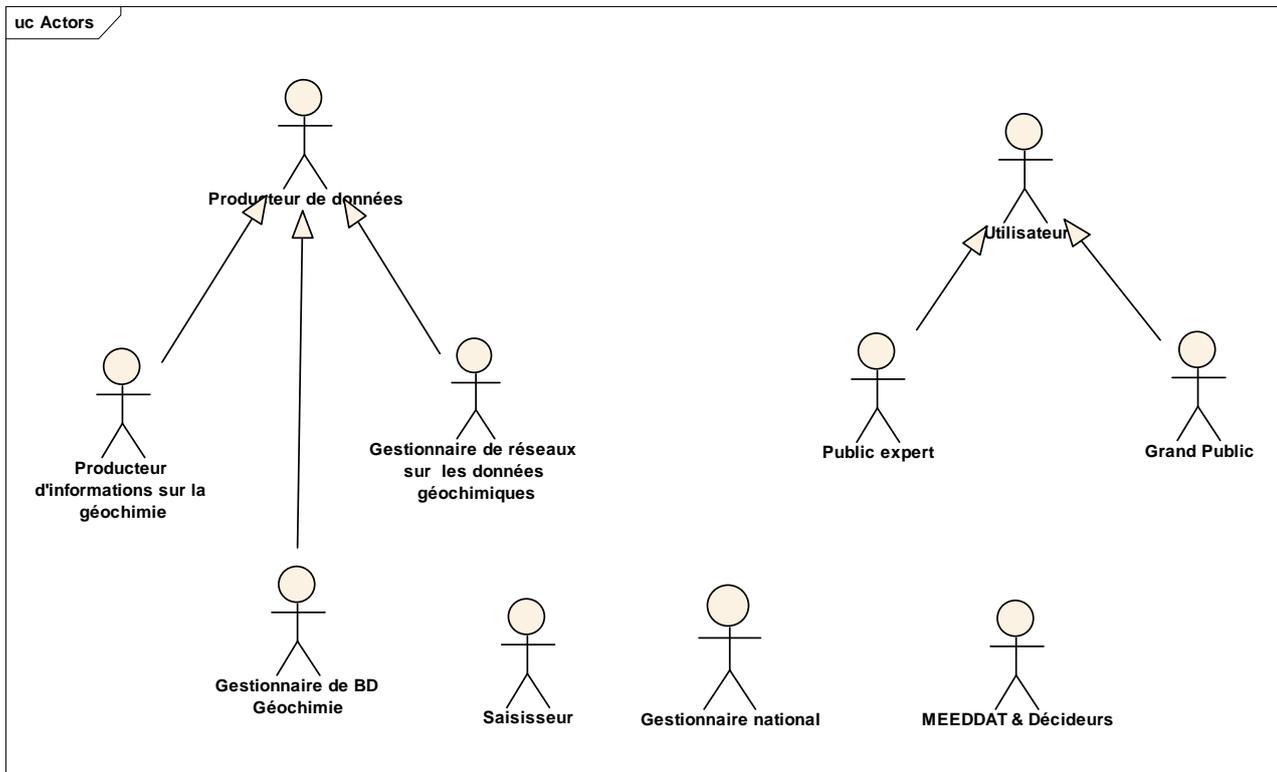


Figure 13 : Les acteurs du SI Géochimie.

4.3.2. Principaux cas d'utilisation

Afin de simplifier la compréhension des cas d'utilisation du SI, une décomposition en deux grandes familles est proposée :

- les cas d'utilisation relatifs à la production, l'acquisition et la collecte de l'information, ainsi que sa structuration ;
- les cas d'utilisation relatifs à la valorisation et diffusion de l'information vers les acteurs et les utilisateurs.

Cas d'utilisation « Production, Acquisition et Collecte »

Cas d'utilisation	Description	Acteurs concernés
Collecte des données géochimiques	Assure la production de données sur la géochimie dans le cadre de réseaux de mesures spécifiques ou plus généraux. Les données produites sont issues d'un protocole et de méthodologies connues et standardisées (à l'échelle du réseau). Généralement, un outil de saisie et de collecte accompagne les producteurs de données, que ce soit au niveau des échantillonneurs, ou à d'autres niveaux.	Gestionnaire de réseaux sur les données géochimiques
Stockage des données et organisation d'une base de données en lien avec la Géochimie	Une base de données est élaborée et mise en œuvre pour gérer de l'information géochimique. Sous la responsabilité d'un gestionnaire de BD Géochimie, elle est organisée et issue d'un réseau existant. Elle ne couvre que partiellement les besoins du SI Géochimie des sols superficiels (cf. Analyse de l'existant). Actuellement, la liste suivante est considérée dans ce cas d'utilisation : <ul style="list-style-type: none"> - BD ETM du GISOL - RMQS - IMN... 	Gestionnaire de BD Géochimie
Recueil de l'information géochimique	De nombreux acteurs assurent la production d'une connaissance sur la géochimie, généralement sur un périmètre réduit et une composante précise. Les informations acquises sont peu organisées au sens d'une base de données...	Producteur de l'information
Collecte et organisation des données ponctuelles	Assure le dépouillement des informations géochimiques non structurées et met en base de données ces informations. Travail bibliographique associé à un ensemble d'outils nécessaires à leur saisie et collecte.	Saisisseur
Qualification de l'information	Assure la cohérence de l'information et valide la donnée acquise.	Gestionnaire de BD Géochimie associé au comité de gestion de la base
Gestion d'une BD nationale Géochimie	Regroupe l'ensemble des actions permettant la constitution d'une base de données structurées autour des données géochimiques.	Pilotage : MEEDDM

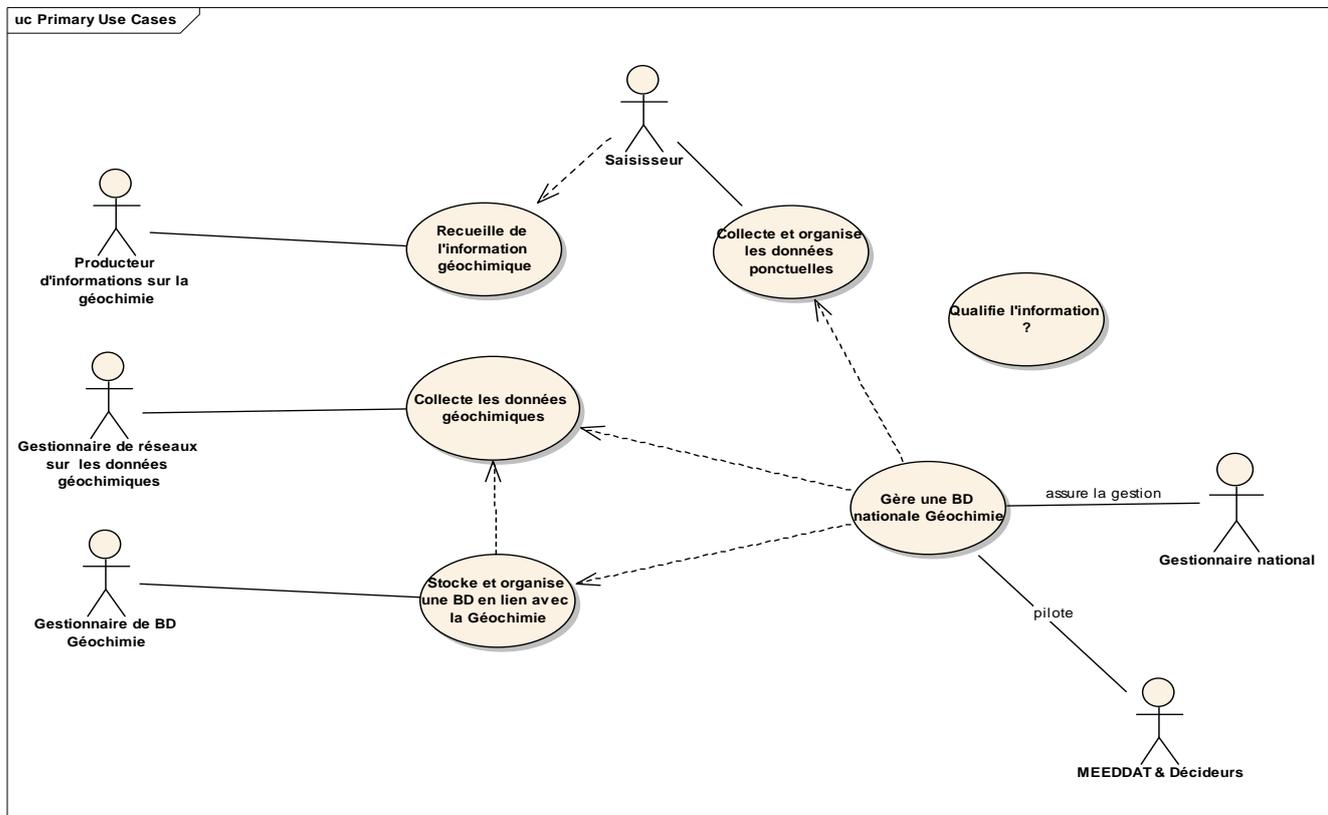


Figure 14 : Cas d'utilisation « Production, Acquisition et collecte ».

Cas d'utilisation « Valorisation et diffusion »

Cas d'utilisation	Description	Acteurs concernés
Accède à l'information géochimique	Accès à l'information géochimique sous différentes approches : <ul style="list-style-type: none"> • Consultation de l'information brute via des outils Web • Consultation de l'information valorisée via des outils Web <p>Cette consultation est fonction des décisions du pilotage du SI Géochimie mais aussi des différentes réglementations sur l'accessibilité de l'information au public, notamment la convention d'Aarhus, la directive et sa transposition sur la réutilisation des données publiques et la directive INSPIRE sur les données spatialisées environnementales.</p>	Pilotage + Tous les usagers du système
Ré-exploite l'information géochimique	Offre à l'utilisateur averti de récupérer les informations et les ré-exploiter pour ses propres usages et valorisations spécifiques.	Public expert
Valorise l'information	La valorisation concerne la réutilisation des données à des fins d'évaluation globale ou ponctuelle. Les chapitres suivants proposent notamment un ensemble de méthodologies pour l'évaluation du fond géochimique.	Public Expert
Gère un portail d'accès à l'information géochimique	L'ensemble de l'information acquise sur le sujet est proposé au travers d'un portail commun assurant l'accès à l'information validée. Ce portail est sous le pilotage du MEEDDM et est géré par un opérateur.	MEEDDAT et Décideurs Gestionnaire national

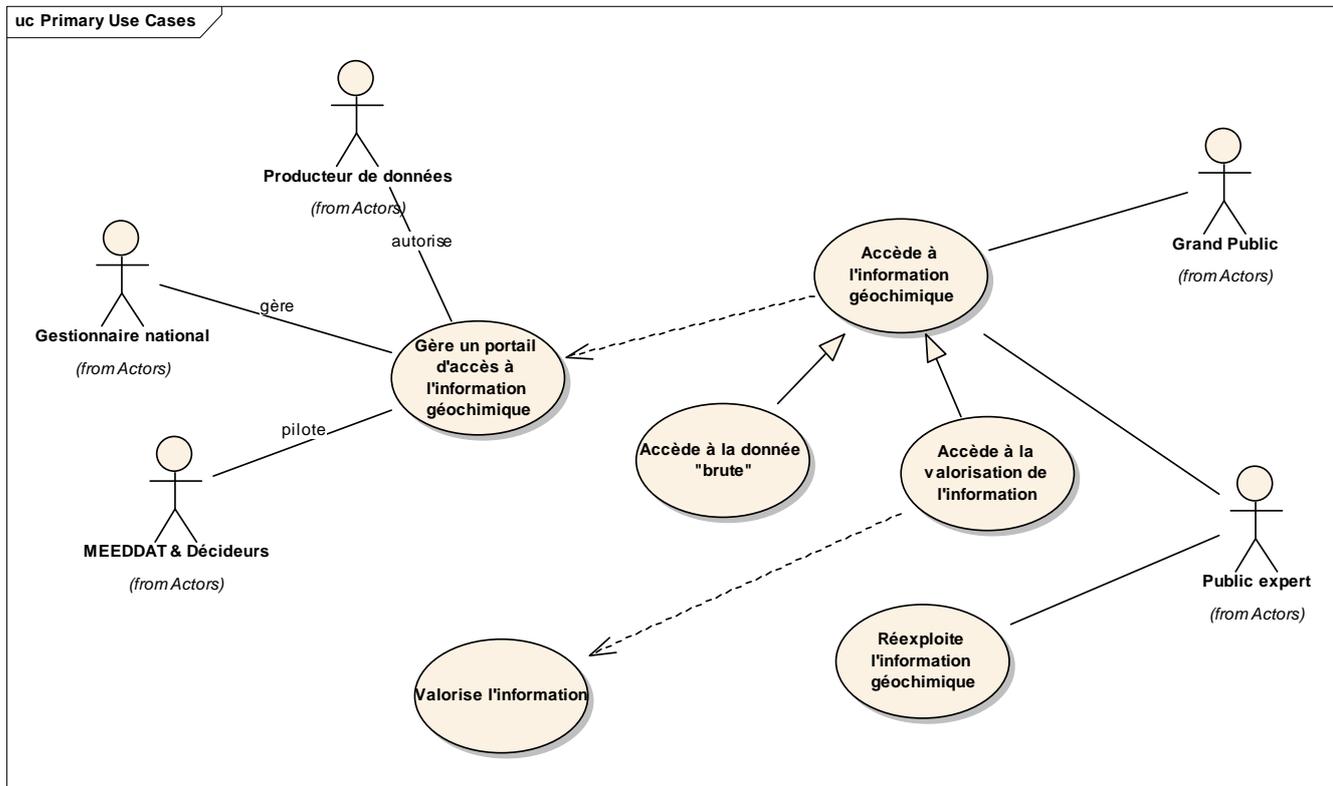


Figure 15 : Cas d'utilisation « Valorisation & Diffusion ».

4.3.3. Description détaillée de cas d'utilisation

Certains cas d'utilisation méritent une description plus fine afin de mieux comprendre les principaux usages du SI.

Accès à l'information par un portail Géochimie

Préalablement à la consultation des données, un préambule devra être validé par l'utilisateur. Le préambule devra expliquer la méthodologie suivie, les éléments de cadrage et les limites d'utilisation des données et enfin les conditions d'utilisation des données.

La recherche pourra se faire par noms de départements, de communes, par types de formations pédogéologiques, ou dans un rayon donné autour d'un point géoréférencé pour un élément chimique. L'affichage des données est possible soit sous forme de tableaux, soit sous forme de cartes (fond scanné IGN © 1/25 000) où sont pointées les stations de prélèvement localisées et géoréférencées.

Il sera possible de télécharger les données brutes des échantillons sélectionnés au format de fichier ASCII délimité. L'ensemble des données saisies ou disponibles sera

mis à disposition de l'utilisateur, sous réserve d'un accord préalable avec le producteur de la donnée.

Un onglet d'aide à la navigation et une rubrique FAQ (foire aux questions) permettra d'assister l'utilisateur dans l'utilisation du site.

Organisation des données ponctuelles

Pour permettre à un opérateur de saisir et de référencer les données produites, un module de saisie sera mis en œuvre.

Le module de saisie et de consultation des données pourrait être découpé en six onglets (ou tables) comportant un certain nombre de champs :

- 1^{er} onglet relatif à l'identification de l'échantillon ;
- 2^{ème} onglet relatif à la localisation de la station de prélèvement ;
- 3^{ème} onglet relatif à l'occupation du site ;
- 4^{ème} onglet relatif à la nature pédologique et géologique du sol prélevé ;
- 5^{ème} onglet relatif à la méthode de prélèvement de l'échantillon ;
- 6^{ème} onglet relatif aux paramètres analytiques.

4.4. MODÉLISATION DES DONNÉES GÉOCHIMIE DES SOLS

4.4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la description générale des concepts manipulés dans le domaine de la géochimie des sols superficiels. Il apporte les principales définitions nécessaires au niveau de cette étude sans détailler le modèle de données utilisé par les outils.

L'annexe 1 présente le modèle commun après la consultation des bases de données disponibles.

4.4.2. Description des concepts

Échantillon de sol

Les principales informations décrivant un échantillon de sol sont notamment :

- date de l'échantillonnage (prélèvement) ;
- finalités de l'échantillon ;
- les acteurs intervenant à la constitution de l'échantillon ;
- les méthodes utilisées pour l'échantillonnage ;

- si l'échantillon est constitué d'un seul prélèvement en un seul point et une seule profondeur (échantillon ponctuel) ou de plusieurs en différents points au niveau de la station de prélèvement ou à différentes profondeurs (échantillon composite surfacique et/ou vertical).

L'identification d'un échantillon est particulièrement cruciale dans le système. Plusieurs solutions sont possibles :

- identification attribuée par la base nationale et /ou ;
- identification spécifique à chaque partenaire et producteur de données ;
- mise en œuvre d'une standardisation nationale de l'identification d'un échantillon.

Localisation de l'échantillon

La localisation de l'échantillon est essentielle pour apporter une spatialisation de l'information géochimique. Néanmoins, plusieurs niveaux de localisation sont à prévoir dans le système en lien direct avec la qualité de l'information source et des protocoles d'échantillonnage utilisés :

- la localisation sur un point de prélèvement spécifique dont les coordonnées X, Y sont connues ;
- la localisation à l'échelle d'une parcelle agricole ;
- la localisation à l'échelle d'une commune ;
- la localisation au sein d'une grille d'échantillonnage.

Un échantillon se référence toujours à une localisation donnée.

Hormis la spatialisation, la localisation de l'échantillon apporte des informations essentielles au contexte de l'échantillon :

- occupation du sol ;
- proximité des sources anthropiques.

Finalités de l'échantillon

Un échantillon est associé à une finalité (voire plusieurs) d'acquisition. Cette information est essentielle afin de qualifier l'échantillon et la pertinence de l'information produite. On distingue deux familles de finalités :

- un programme de surveillance ou campagne de suivi, généralement regroupé sous le terme de « Réseau de mesure » ;
- une étude, bibliographie ou document administratif.

Les principales informations décrivent les finalités de l'échantillon :

- le nom de l'étude ou du programme ;

- la description de la finalité ou de l'objet de l'étude ;
- les protocoles utilisés dans ce cadre ;
- les acteurs (auteur, intervenant, gestionnaire du réseau...) ;
- les éventuelles modalités d'accès à l'information (base de données, publication du rapport...).

Nature du sol échantillonné

Elle décrit le type de sol échantillonné. Les principales informations concernent :

- la nature pédo-géologique ;
- les caractéristiques géologiques (lithologie, stratigraphie...).

Pour cette description, l'utilisation de référentiels partagés est essentielle. Ainsi, concernant le référentiel pédologique à utiliser pour la description des horizons, le WRB (World Reference Base) de la FAO est à privilégier, dans l'optique d'une homogénéisation des descriptions et dans la continuité des efforts réalisés par les différentes communautés scientifiques.

Pour les caractéristiques géologiques, les référentiels BRGM sont une base stable et partageable.

La mesure géochimique de l'échantillon

L'échantillon est ensuite analysé sur les éléments géochimiques. La mesure géochimique constitue le « cœur » du système pour les données brutes.

Les principales informations sont les suivantes :

- méthode d'analyse (avec un niveau de détail à préciser) ;
- le résultat analytique ;
- la date de l'analyse ;
- l'unité de mesure ;
- la qualification de l'information et le niveau de fiabilité (accréditation,...) ;
- les acteurs intervenant sur la mesure : laboratoire, responsable.

L'information « agrégée » de l'échantillon

Dans certains cas, seules les informations agrégées¹³ seront disponibles et/ou accessibles via le SI. Il est donc nécessaire de prévoir un stockage d'information plus synthétique, notamment :

- dans le cas d'une *agrégation spatiale* de la donnée élémentaire, notamment pour des raisons de confidentialité ;
- dans le cas d'une *agrégation temporelle* de la mesure suite à un traitement statistique, par exemple une moyenne et un écart-type sur une période déterminée ;
- dans le cas d'une *agrégation des paramètres mesurés*, par exemple en affichant uniquement les données sur l'ensemble des métaux...

Les différentes modalités d'agrégation peuvent se combiner, comme le montre l'exemple des données diffusées actuellement par le GISSOL.

Dans le cadre de cette étude, il est difficile actuellement de définir le modèle précis d'une information agrégée. Le choix des informations « acceptables » sous forme agrégées reste à préciser par le comité de pilotage du SI Géochimie.

Les référentiels

Les données produites par le système doivent s'appuyer sur un ensemble de référentiels stables et unifiés pour l'ensemble des acteurs du domaine. Cette gestion des référentiels est indispensable au fonctionnement correct du processus d'acquisition.

Les principaux référentiels sont les suivants :

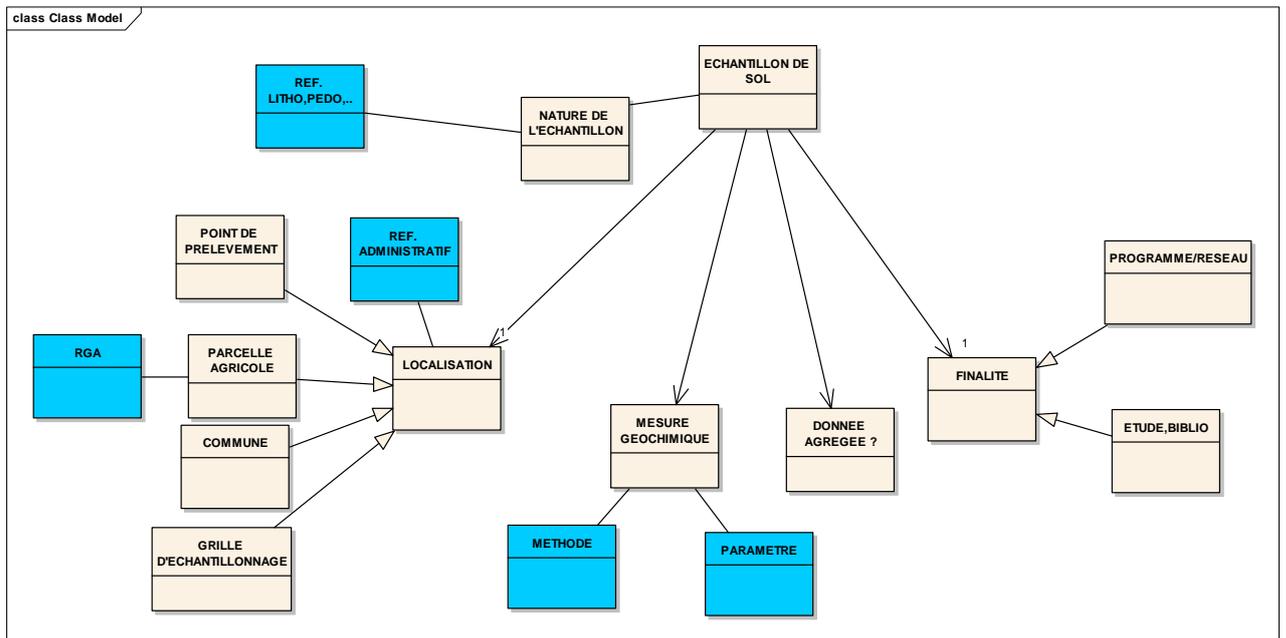
Référentiel	Contenu	Responsable
Administratif	Commune, département, région	INSEE + IGN pour la délimitation cartographique. Accès public + payant pour géographie.
Parcellaire agricole	RGA	Ministère de l'Agriculture. Accessible sur simple demande.
Protocole de mesure	Ensemble des méthodes de mesures utilisées dans le domaine	Reste à définir.
Paramètres géochimiques	Ensemble des paramètres utilisés dans le domaine	Reste à définir. L'utilisation des référentiels du Sandre

¹³ Information agrégée : correspond à une information qui, par elle-même, n'identifie pas l'analyse en tant qu'individu spécifique.

	correspondant aux paramètres	pourrait être utile.
Lithologie	Ensemble des lithologies	BRGM
Age		BRGM
Pédogéologie	Ensemble	WRB (FAO)
Acteur	Ensemble des acteurs	SIREN

4.4.3. Schéma conceptuel du SI

Le schéma ci-après décrit globalement l'organisation du modèle de données :



Référence du schéma

4.5. ORGANISATION DU SI GÉOCHIMIE DES SOLS

Le SI Géochimie doit être organisé afin de garantir les fonctions d'acquisition, de collecte de données mais aussi d'accès à l'information à l'ensemble des acteurs.

Deux « grands » scénarios sont possibles.

Scénario 1 : la mise en œuvre d'une base de données nationale regroupant l'ensemble des données géochimiques quelles que soient les finalités des mesures/échantillonnages. Les données proviennent :

- des données acquises directement par le système, essentiellement sur le dépouillement des documents existants ; des *outils de saisie* sont développés pour assurer l'acquisition de ces données ;

- des données déjà organisées dans des programmes / réseaux de mesure et généralement structurées sont collectées ; dans ce cas, des *échanges de fichiers* sont régulièrement mis en œuvre autour de formats interopérables et partagés entre les gestionnaires de base de données (avec ou sans automatisation des échanges par services web) ;
- ce scénario est ensuite couplé à un *site web* assurant l'accès à l'ensemble des informations acquises et collectées ainsi que les éventuelles valorisations réalisées par les partenaires du système ;
- ce scénario s'appuie évidemment sur un pilotage très fort du système afin que chacun se responsabilise au regard de la fourniture de l'information. Des processus dédiés à la qualification de l'information publiée sont essentiels ainsi que des garanties sur les droits d'auteurs et droits *sui generis*.

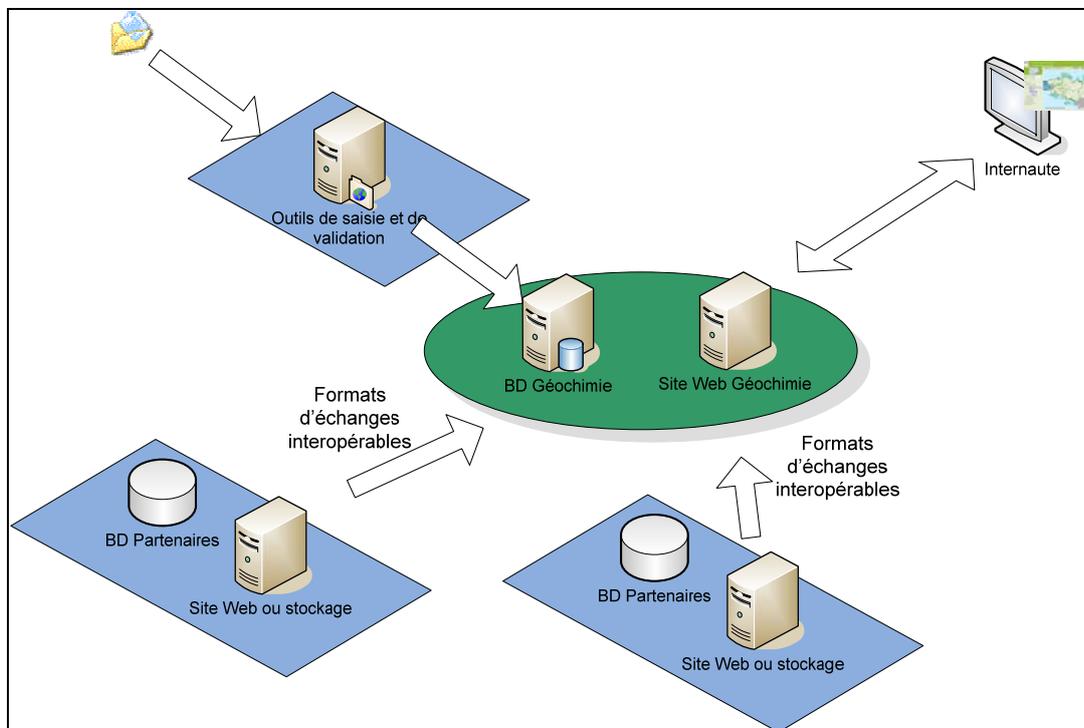


Figure 16 : Scénario 1 SI Géochimie.

Scénario 2 : la mise en œuvre d'un *portail d'accès à l'information géochimique* issue des différents partenaires en charge de la production et de l'acquisition. Ce portail permet la consultation des données structurées des bases de données partenaires et des nouvelles bases de données sans « collecter » toutes les données dans un système unifié. Dans ce cas, plusieurs niveaux d'accès sont à prévoir :

- l'accès sous forme d'un simple référencement du site du partenaire donnant accès à son information ;
- l'accès sous forme cartographique à l'information de chaque partenaire (par exemple, sous forme d'une carte montrant les « localisations », que ce soit une

grille ou un point). Les partenaires mettent à disposition des services web d'accès à ce niveau d'information (notamment OGC WMS) et des liens spécifiques sont disponibles pour accéder aux détails des informations de chaque partenaire ;

- l'accès sous forme détaillée de l'information via des services web offrant la consultation des données brutes des échantillons et mesures. La définition d'un standard basé par exemple sur l'OGC GML et OGC WFS est indispensable pour automatiser l'accès à cette information ;
- la *mise en œuvre d'outils* et d'une base de données dédiée aux données de dépouillement bibliographiques. Ces données complètent les données des partenaires ;
- ce scénario offre l'avantage d'être progressif, les partenaires adhérant selon les différents niveaux décrits précédemment et en fonction de leurs capacités techniques. Par contre, s'il permet une vision globale de l'information géochimie, il est plus complexe de produire une information « unifiée ». Il est donc plus difficile pour les utilisateurs d'exploiter et revaloriser les données du portail, car ces dernières sont éclatées dans les systèmes de base de données des partenaires.

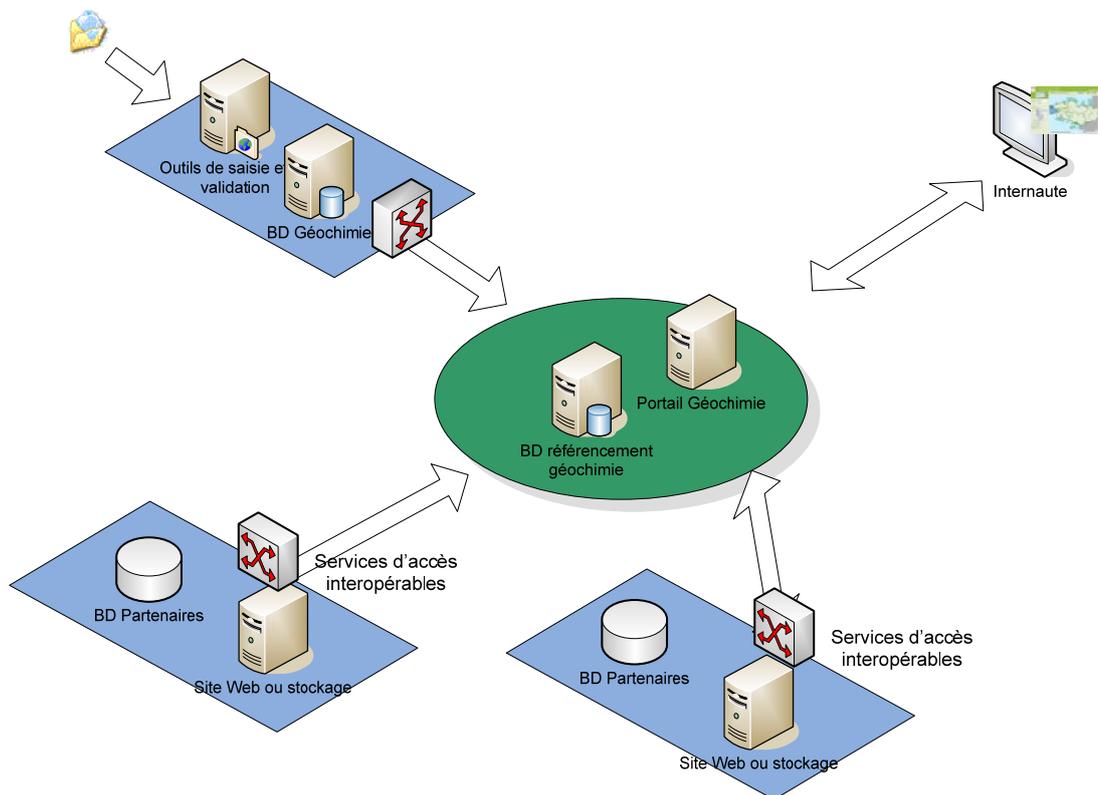


Figure 17 : Scénario 2 SI Géochimie.

Il est enfin à noter que les deux scénarios peuvent se combiner avec la mise en œuvre d'une base nationale en charge de l'alimentation / gestion des données non encore structurées par un acteur et un accès vers les données externes lorsqu'elles sont disponibles.

5. Analyse d'une stratégie pour proposer une démarche d'évaluation des bases de données et du fond géochimique

5.1. INTRODUCTION

En préambule à cette étude, qui est essentiellement basée sur la seule base de données accessible sans préalable que constitue le FOREGS (référentiel géochimique européen cité ci-dessus), il est nécessaire de reprendre quelques définitions de base appartenant au langage technique et qui ont perdu leur acception première.

5.2. NOMENCLATURE AUTOUR DES ÉLÉMENTS

Les éléments majeurs sont les éléments qui constituent plus de 99 % de la composition de la géosphère tels que Si, Al, Fe, Na, K, Ca, Mg, Mn, Ti et P. Les autres éléments, environ au nombre de 80 et appelés éléments traces, constituent moins de 1% de l'écorce terrestre. Ils peuvent néanmoins constituer localement des concentrations donnant des gisements à valeur économique pour leur exploitation. Les éléments majeurs sont généralement exprimés sous forme d'oxydes en pour cent car les minéraux majeurs constituant l'écorce terrestre sont des combinaisons d'oxygène, d'hydrogène et des éléments précités. D'ailleurs cette expression permet, puisque la majeure partie des éléments de la croûte terrestre sont constitués de O et de H, de vérifier le bouclage correct des analyses chimiques ($\approx 100\%$).

Les éléments immobiles à peu mobiles, comme Ti et Zr, sont majoritairement contenus dans des minéraux « lourds » peu solubles. Al est stabilisé par des espèces minérales résiduelles après lessivage du substratum, sous forme d'argiles ou d'oxydes d'aluminium (kaolinite, halloysite, gibbsite, boemite...). Comme ils se concentrent lors du lessivage des formations superficielles, ils sont traditionnellement considérés, dans la littérature géologique, comme des éléments peu mobiles (Brimhall and Dietrich, 1987 ; Egli and Fitze, 2000). Ils servent, dans les équations de flux, de variables repères rendant compte des évolutions volume/flux.

Ces trente dernières années, le terme de « métaux lourds » a été largement utilisé. Il est souvent usité pour décrire des métaux et semi-métaux (ou encore métalloïdes) qui sont généralement associés à des contaminations en raison de leur toxicité ou écotoxicité potentielle (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Zn...). Au même moment, à travers les textes réglementaires, des listes de métaux étaient spécifiées. Toutefois, de telles listes peuvent varier d'un pays à l'autre et, parfois, seule la terminologie de « métaux lourds » est donnée sans établir de liste précise.

Bien qu'une nouvelle appellation, « élément trace métallique (ETM) », ait pris la place de la précédente, sa signification reste une notion relativement floue car aucune

définition scientifique, technique ou juridique est unanimement reconnue. À titre d'exemple, un rapport d'information au Sénat français intitulé « Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé » indiquait : « L'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique, ni application juridique ».

Ainsi, même si une nouvelle terminologie, comme « ETM », est utilisée, il ne faut pas omettre les définitions fondamentales qui permettent de mieux définir le comportement des métaux dans le milieu naturel.

Ces définitions fondamentales sont fournies en première approche par différents concepts, tels que la classification périodique (occupation de la dernière couche électronique), l'échelle de comportement acide de Lewis (1925) complétée par la démarche de Pearson (1963) se rapprochant de l'ancienne classification géochimique donnant aux éléments constitutifs de la croûte terrestre (Goldschmidt) des caractères lithophiles (préférentiellement associés au silicium), sidérophiles (préférentiellement associés au fer), ou chalcophile (préférentiellement associés au soufre). De telles classifications résument l'appréhension du comportement des éléments et permettent une prédiction grossière de la toxicité des éléments métalliques. Une synthèse de ces différents concepts est fournie en Annexe 10.

En conclusion de ce paragraphe, une liste d'ETM correspondant à l'énumération la plus commune est proposée : **Fe, Pb, Hg, U, Cr, Cu, Ag, Zn, Ti, Ni**. D'après ce qui précède, il est évident que cette liste n'est en aucun cas immuable et devra être reconsidérée en fonction des milieux abordés, de la nature des supports constituant la sphère géologique, des activités industrielles passées ou en cours, et des populations exposées.

Pour terminer, il faut remarquer que beaucoup d'ETM ont une utilité dans les processus biologiques. Par exemple, le fer est un composant essentiel de l'hémoglobine, le zinc et le cuivre sont des oligo-éléments indispensables. Enfin, tous les éléments traces métalliques sont par définition présents naturellement à l'état de traces dans le sol. L'activité humaine peut avoir renforcé cette présence car nombre d'ETM jouent un rôle important dans la vie quotidienne.

L'impact toxicologique des ETM dépend de leur forme chimique (nommé « espèce chimique »), de leur concentration, du contexte environnemental et de la possibilité de passage dans la chaîne du vivant.

5.3. ÉLÉMENTS DE STATISTIQUES MUTIVARIABLES, QUELQUES DÉFINITIONS

L'objectif associé à l'analyse statistique des analyses sélectionnées est, d'une part, de déterminer les facteurs qui influencent l'analyse de sol et, d'autre part, de grouper l'ensemble de ces analyses en classes les plus homogènes possibles.

Différentes analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de l'outil XLstat©. Différentes méthodes d'analyses statistiques, décrites ci-après, ont été mises en œuvre.

5.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

La méthode d'Analyse en Composante Principale (ACP) est une méthode de décomposition ou de projection qui permet de décrire et discriminer les individus par rapport à l'ensemble des variables. L'ACP permet, dans une population à n dimensions, de trouver, à partir de l'analyse des corrélations, les meilleurs plans de projection autorisant une vision optimisée de l'information. Ces plans de projection (hyperplans puisqu'à $n > 2$ dimensions) sont exprimés par des fonctions appelées facteurs (F1, F2...) et correspondent à une combinaison linéaire des variables analysées. Plus la variance¹⁴ exprimée par facteur est forte, meilleure est l'explication de l'information obtenue.

Le résultat de l'ACP est représenté dans la suite du rapport sous forme d'un graphique correspondant à la projection des variables sur un plan à deux dimensions, constitué par les facteurs (axes F1, F2, F3...). Lorsque les variables se rapprochent du cercle de corrélation optimale (rayon r proche de 1) leur variance se trouve expliquée dans le plan de référence pris pour surface de projection. Si elles sont :

- proches les unes par rapport aux autres, alors elles sont positivement corrélées ;
- orthogonales les unes par rapport aux autres, alors elles sont non corrélées (r proche de 0) ;
- symétriquement opposées par rapport au centre, alors elles sont négativement corrélées.

Lorsque les variables sont centrées sur l'origine du plan de projection, aucune variance n'est expliquée.

5.3.2. Les méthodes de Classification

Les méthodes de classification permettent de constituer des groupes homogènes (des classes) sur la base de leur description par un ensemble de variables. Deux méthodes de classification sont très usitées : la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et la classification k-means.

Il existe plusieurs algorithmes de classification. Les algorithmes ascendants (ou encore agglomératifs) qui procèdent à la construction des classes par agglomération successive des objets deux à deux. C'est le cas de la classification ascendante hiérarchique (CAH).

La CAH fait intervenir l'analyse statistique en grappe. Elle procède par la comparaison, de proche en proche, des variables intrinsèques à l'individu : recherche de la paire d'échantillons les plus semblables puis comparaison avec le reste de la population et

¹⁴ En statistique et probabilité, la variance est une mesure arbitraire servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une population. La variance est toujours positive ou nulle (si nulle, cela signifie alors que les données sont toutes identiques). L'écart type est sa racine carrée.

regroupement ; dans le cas de disparités entre le groupe créé et le reste de la population, un nouveau groupe est créé sur le même principe ; puis la partition est formalisée par des itérations successives. Les résultats de cette analyse statistique multi-variables se présentent sous forme d'un arbre qui permet de visualiser le degré de correspondance entre les groupes.

Pour la méthode du k-means, les algorithmes conduisent directement à des partitions des individus en classe homogène par des techniques d'agrégation autour de centres mobiles, apparentées à la méthode des nuées dynamiques. Cette méthode est particulièrement intéressante dans le cas de populations nombreuses avec un grand nombre de variables (grands tableaux). Elle a pour but de fournir une partition en k classes (k donné a priori) bien agrégées et bien séparées entre elles.

Les groupements se font par recherche directe d'une partition, en affectant les éléments à des centres provisoires de classes, puis en recentrant ces classes, et en affectant de façon itérative ces éléments. Cette procédure est itérée jusqu'à ce que la variance intra-classe ne s'améliore plus.

Dans le cadre de cette étude, seule la CAH a été utilisée comme outil de classification.

5.4. ÉLÉMENTS STATISTIQUES ET DÉMARCHES UTILISÉES POUR ÉVALUER UN FOND GÉOCHIMIQUE

Plusieurs méthodes sont proposées dans la bibliographie pour distinguer des classes de populations anormales, souvent basées sur une distribution normale (ou dite de Gauss) ou log-normale assez « idéale » (Matschullat *et al.* 2000).

Les principales sont :

- les méthodes graphiques proposées par Lepeltier (1969), Bauer et Bor (1993, 1995), Bauer *et al.* (1992), Matschullat *et al.* (2000), permettent, sur un diagramme binaire représentant la fréquence cumulée en fonction des teneurs classées pour un élément, la recherche des points d'inflexion de la courbe et de distinguer les différentes distributions. Dans un diagramme binaire log/log, la déviation par rapport à une distribution log-normale se marque par une courbure. Dans un diagramme log/statistique, la déviation par rapport à une distribution log-normale se marque par une divergence des points par rapport à une droite qui marque une distribution log-normale idéale (Lepeltier, 1969) ;
- les méthodes basées sur la supposition d'une distribution normale ou log-normale pour une population qui situe, en dessous du 97,5 percentile, un fond géochimique, un bruit de fond ou une anomalie au-dessus de la valeur (moyenne + 2 σ) ;
- la méthode des régressions linéaires par rapport aux éléments peu mobiles non influencés par les activités anthropiques (Al, Zr, Hf...) permet de distinguer, au-delà de l'intervalle de confiance de 90 %, des individus probablement touchés par des apports artificiels (Bauer and Bor, 1993 et 1995 ; Bauer *et al.*, 1992) ;
- l'analyse des modes qui permet d'éliminer divers modes parasites sur les populations pour conserver une population unimodale à partir de laquelle un

intervalle de confiance de 95 % calculé à partir de la moyenne+2 σ correspond à la valeur de fond (Graf and Henning, 1952) ;

- test des points aberrants au-delà de 4 σ (applicable à une population de plus de 10 individus), avec élimination de ces derniers, puis calcul d'un intervalle de confiance de 95 % calculé à partir de la moyenne +2 σ correspondant à la valeur de fond. Le test peut être réitéré plusieurs fois en fonction de la taille de la population et de la valeur de fond calculée. Un test identique peut être fait à partir de 2 σ , mais il est plus radical (Erhardt *et al.*, 1998) ;
- modélisation de fonction à partir de la valeur minimale jusqu'à la médiane (qui est par nature stable par rapport aux points aberrants et aux déviations). La population ainsi isolée représente, le plus probablement, le fond géochimique naturel. Pour faire cette modélisation de la distribution, chaque valeur de la population ainsi réduite est recalculée (symétrisée) par rapport à la médiane obtenue précédemment, en ajoutant la distance de l'individu par rapport à la médiane pour créer un nouvel individu miroir symétrique. Pour cette nouvelle population, les principaux paramètres statistiques élémentaires sont calculés et la moyenne+2 σ est considérée comme le domaine de variation du fond géochimique ou anthropique (Matschullat *et al.*, 2000).

6. Analyses statistiques des données géochimiques de la partie supérieure du sol (subsoil) du FOREGS

L'approche faite dans le cadre de ce chapitre est basée sur les seules données géochimiques disponibles sans réserve sur le WEB (FOREGS). Les données proviennent des analyses chimiques d'une couche de 25 cm d'épaisseur prélevée dans l'horizon C à une profondeur comprise entre 50 et 200 cm correspondant au sol inférieur (subsoil) et ne prenant en compte que les analyses faites sur « roche totale » (exclusion de l'attaque à l'eau régale). La partie analysée est de taille inférieure à 2 µm. Les sols sélectionnés sont ceux des forêts et des zones non utilisées, des prairies et, en dernier recours, des zones agricoles non cultivées.

Elle a pour but premier de dérouler une méthode d'exploration de données (data mining) et de valider la démarche dans le cas où une approche similaire devait être utilisée pour d'autres bases de données pour en valider le contenu : validation de la cohérence des données, éviter les redondances à l'échelle des éléments (éléments ayant un comportement commun, par exemple le Zr et le Hf portés par les mêmes minéraux), élimination des individus ayant des anomalies hors normes...

Dans le cas du FOREGS, la démarche statistique avait deux objectifs : i) analyser les tendances d'une population d'analyses géochimiques ; ii) et ainsi de voir si les tendances trouvées peuvent être raisonnablement cartographiées à l'échelle du territoire considéré, en tenant compte de la faible densité ponctuelle des prélèvements et superposées de manière cohérente avec la carte géologique de l'Europe.

Bien que la maille de l'échantillonnage du FOREGS ne soit pas adaptée aux objets géologiques abordés à l'échelle de l'Europe, la méthode d'exploration de données (data mining) présente des résultats, globalement satisfaisants, qui montrent l'efficacité de la méthode appliquée aux populations de données géochimiques étendues. Les regroupements d'éléments trouvés sont cohérents avec les connaissances acquises sur le milieu naturel : affinités cristallogéniques, minéralogiques et géochimiques entre éléments constitutifs de l'écorce terrestre.

La base de données ainsi évaluée paraît cohérente et les quelques données projetées sur le support géologique présentent une correspondance certaine, que l'échelle d'échantillonnage et de cartographie ne permet pas d'affiner.

Les données issues de cette démarche sont présentées en Annexe 11.

7. Tentative de détermination des différents fonds pour les ETM les plus cités

7.1. INTRODUCTION

Avec l'importance que prend la gestion environnementale du patrimoine non renouvelable que constituent les sols, la notion de fond géochimique naturel et anthropique présente un intérêt primordial. Elle est indispensable pour définir des valeurs de référence au-delà desquelles il sera nécessaire de prendre des dispositions concernant la gestion des sols des sites impactés. Ainsi, pour ce faire, il est indispensable de définir précisément une terminologie univoque, de déterminer les moyens, les démarches et les outils nécessaires pour échantillonner les sols, d'appliquer des tests statistiques pour éprouver la robustesse des populations échantillonnées et de définir les approches les plus performantes pour évaluer des valeurs de références utilisables.

Du point de vue géochimique, la notion de fond est équivalente à celle d'absence d'anomalie. Le terme a été défini par les géochimistes issus de l'exploration minière pour différencier une roche contenant une teneur « normale » en un ou plusieurs éléments, d'une roche contenant une teneur « anormale » ou encore « anormale » en élément, définissant un enrichissement marqueur d'une minéralisation ou d'un processus à l'origine d'une minéralisation. Une anomalie peut être de plusieurs ordres, relative à une formation géologique par rapport à une région, ou portée par une formation géologique.

La notion de « bruit de fond » (qui sera distinguée volontairement du fond géochimique), ou encore fond géochimique anthropique, est nécessairement en relation avec l'activité humaine. Parfois, les teneurs apportées par l'activité anthropique sont difficilement discriminables et peuvent nécessiter des approches géochimiques croisées, rapport entre éléments, recherches de signature typique d'une activité, approches isotopiques.

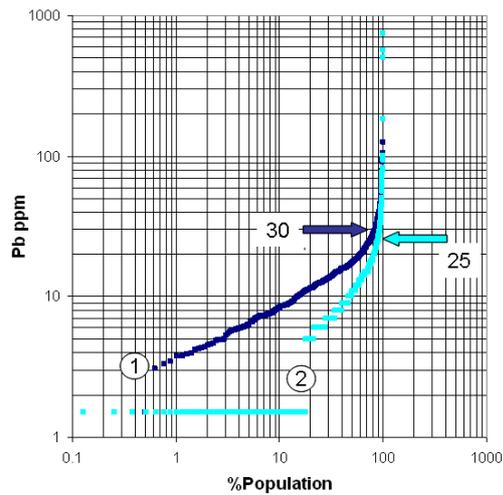
7.2. LES MOYENS

La détermination d'un fond géochimique (*s.l.*) nécessite un échantillonnage, une préparation d'échantillons rigoureux, standardisés et enfin des analyses faites à l'identique (attaques et instruments) selon des méthodes robustes, nécessairement calées sur des échantillons de référence reconnus internationalement.

Cette nécessité est illustrée par la Figure 18, qui présente pour le cas du plomb, les déviations obtenues pour des aliquotes d'échantillons de sols faisant l'objet de procédures de préparation d'échantillon et d'analyse sur des appareillages différents :

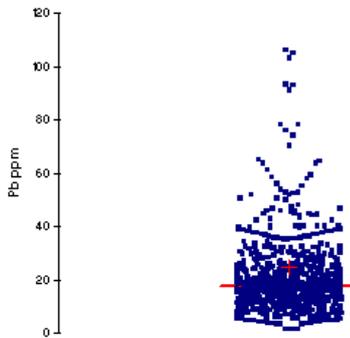
(1) fusion au peroxyde de sodium et digestion acide et analyse en ICP/MS ; (2) digestion à l'eau régale (HCl+HNO₃) et analyse en ICP/AES.

Ces déviations sont stigmatisées par des seuils analytiques divergents, une discontinuité des mesures pour l'ICP/AES et, en définitive, une distribution différente de la population qui amène à constater deux fonds géochimiques (cf. ci-dessous) différents pour un échantillonnage identique : 30 ppm pour la première méthode (1) et 25 ppm pour la seconde méthode (2).

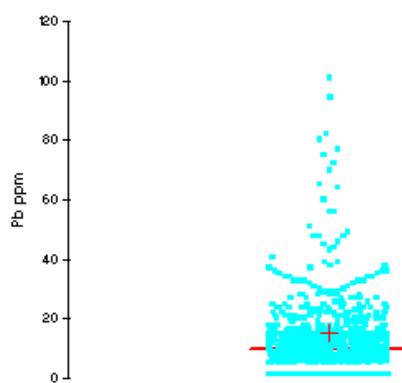


A

Scattergram (ICP_MS)



Scattergram (ICP_AES)



B

C

Figure 18 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du plomb. A) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en plomb des individus, (1) analyse ICP/MS, fusion au peroxyde de sodium et digestion acide, (2) analyse ICP/AES, digestion à l'eau régale (HCl+HNO₃), méthode graphique (Cf. *infra*) proposée par Lepeltier (1969). B) et C) diagramme de dispersion (Scattergram).

7.3. CHOIX D'UNE DÉMARCHE STATISTIQUE

Plusieurs méthodes sont proposées dans la bibliographie pour distinguer des classes de populations anormales, souvent basées sur une distribution normale (ou dite de Gauss) ou log-normale assez « idéale » (Matschullat *et al.* 2000). Les principales méthodes usitées pour déterminer les fonds géochimiques sont déjà décrites paragraphe 5 chapitre 5.4. Ici, la démarche appliquée dans la suite du travail proposé s'inspire fortement de la méthode graphique de Lepeltier (1969), qui correspond au calcul de la droite de Henry, basée sur l'hypothèse *a priori* que la répartition des populations analysées se distribue selon une loi log normale, ce qui est en général le cas.

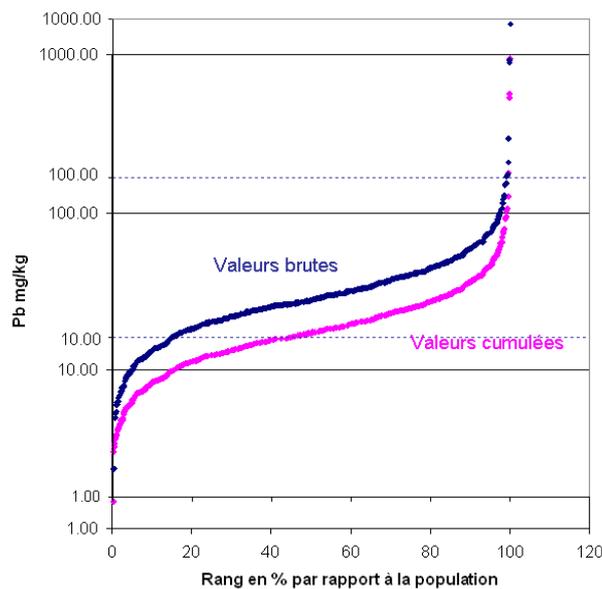


Figure 19 : Comparaison entre le diagramme des valeurs brutes en % par rapport à la population versus concentrations en mg/kg et des valeurs cumulées en % versus concentrations en mg/kg (diagramme de Matschullat *et al.* (2000) dérivé de celui de Lepeltier, 1969).

Toutefois, pour des raisons de facilité de mise en œuvre, le calcul n'est pas fait à partir de la population cumulée réelle, mais cumulée selon le rang des valeurs classées. Comme le nombre d'individus est élevé et la population représentée étendue, aucun biais n'est induit dans la démarche de recherche de la déviation par rapport à la droite de Henry, les courbes obtenues en valeurs probabilisées (rang en % par rapport à la population et valeurs cumulées) étant parfaitement conformes, comme présenté dans la Figure 19.

La dernière méthode, la plus rigoureuse en théorie, fait appel à la méthode de Lepeltier dérivée de la droite de Henry qui permet d'apprécier l'adéquation d'une distribution observée à la loi de Gauss (Figure 20) :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

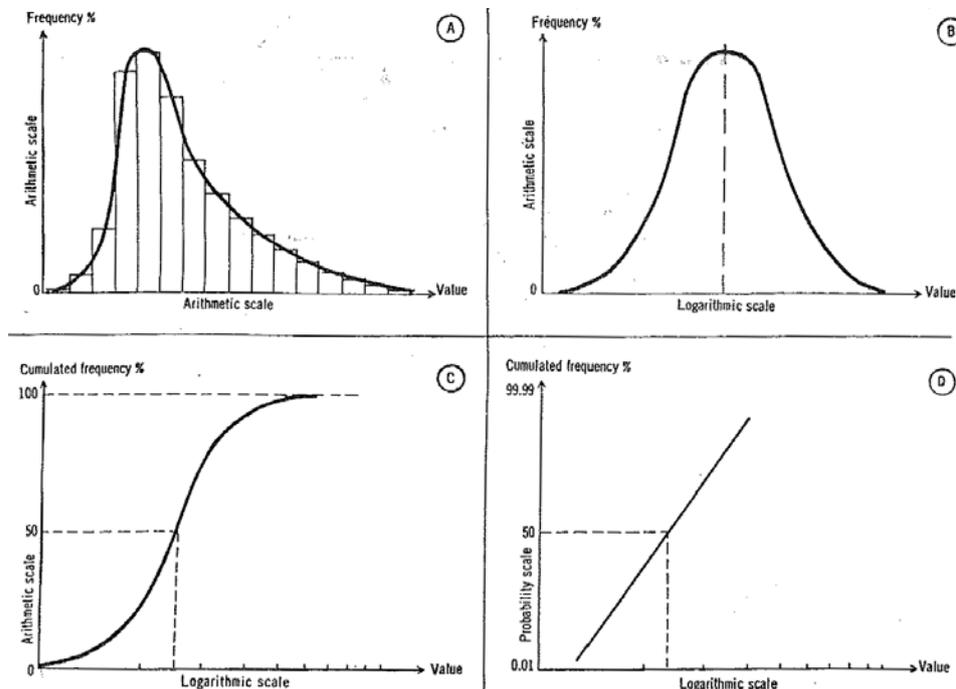
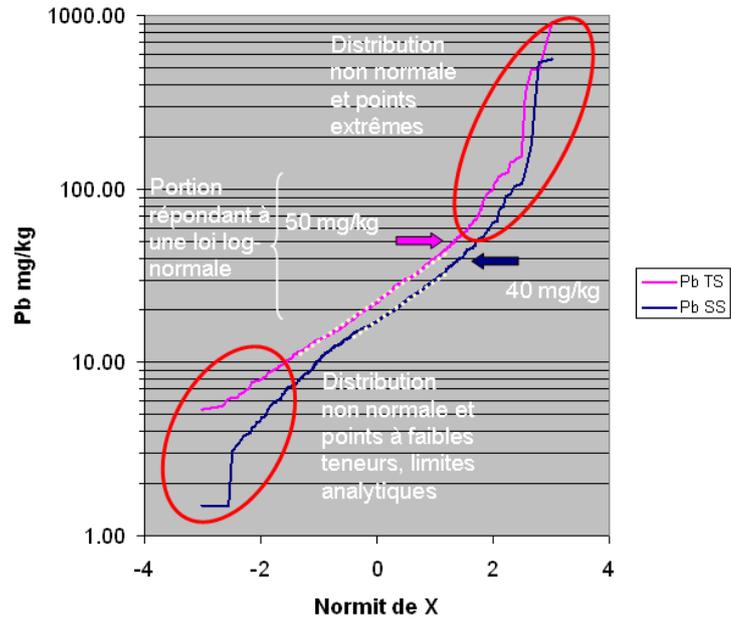


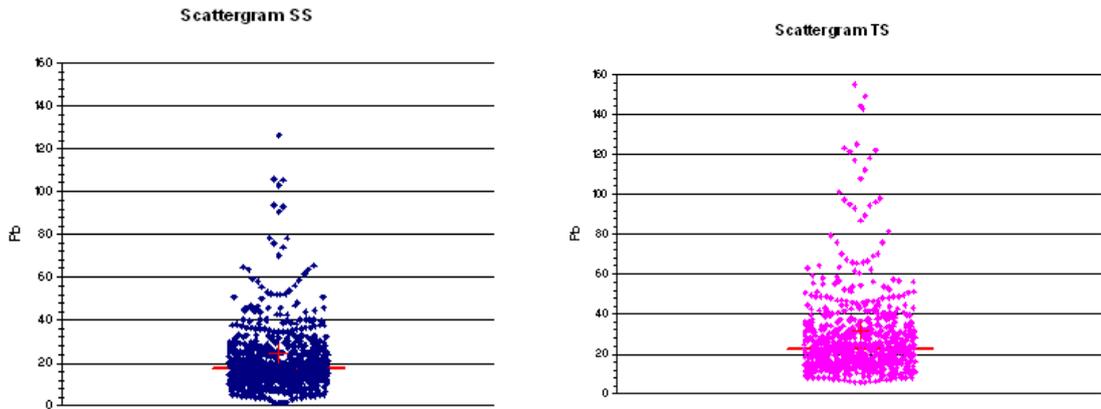
Figure 20 : Correspondance entre une loi log-normale et la droite de Henry (Lepeltier, 1969).

Le « normit » (normal unit) de x correspond à la graduation probabiliste servant au tracé de la droite de Henry. Il est calculé à partir de la fonction inverse de la loi normale standard [LOI NORMALE STANDARD INVERSE] ou loi de Gauss portant sur la probabilité d'un point d'être inférieur à la valeur choisie sur une valeur non cumulée conformément au constat ci-dessus. Dans le cas présenté, le passage à une graduation log est justifié par une distribution log-normale des analyses. Les « scattergrams » joints permettent de visualiser la pertinence du choix fait à partir de zone de convergence avec la droite de Henry.

Son application rigoureuse s'est avérée délicate. En définitive, la démarche dérivée de celle Lepeltier (1964) et décrite par Matschullat *et al.* (2000) a été choisie étalonnée sur la représentation « scattergram » de la population des analyses abordées.



A



C

D

Figure 21 : Essai d'évaluation du fond géochimique du plomb pour la partie inférieure (SS) et la partie supérieure (TS) du sol par la méthode de Lepeltier et comparaison avec les scattergrams.

7.4. SOLS DE SURFACE, SOLS PROFONDS COMPARAISONS DES SIGNATURES

L'objectif de l'analyse des signatures à travers l'Analyse en Composante Principale est de rechercher : i) les éléments qui justifient le maximum de variance de la population ; ii) les regroupements qui marquent des comportements communs, d'origine cristallographique, minérale (associations d'espèces minérales) ou géochimique (liées à des associations minérales typiques de gisement). Ensuite, il s'agit de comparer les signatures entre la partie inférieure (sub soil) et la partie supérieure (top soil) des sols.

Les diagrammes de corrélation entre variables projetées selon les axes F1/F2 et F2/F3 expliquent 55 % de la variance de la population analysée. Outre l'opposition nette entre CaO et SiO₂ qui s'explique par l'opposition des milieux carbonatés (calcaires...) (Figure 22) et les milieux riches en silice (détritiques...), ces hyperplans présentent des associations typiques :

- d'origine cristallochimique, telle que Zr-Hf (I), expliquée par le zircon [(Zr,ξHf)SiO₄], ou regroupant la majorité des terres rares (II) qui forme un groupe d'éléments qui ont un comportement cristallochimique équivalent et se concentrent dans des minéraux lourds accessoires tels que le xénotime [(Y,TRL¹⁵)PO₄], la monazite [TR¹⁶(PO₄)] et le rhabdophane [TR/(PO₄)•nH₂O] ;
- d'origine cristallochimique et minérale comme l'association III qui regroupe In, Ti, Al₂O₃, Ga et Eu, avec, d'une part, l'association Ti-Al₂O₃ contrôlée par les micas et les argiles et l'association Al₂O₃-Ga, contrôlée par la substitution du premier par le dernier, et, d'autre part, l'association Ti-In par la possibilité que peut avoir l'Indium à se substituer au Ti dans les composés titanés (rutile, anatase, brookite [TiO₂], Lerouge *et al.*, 2007). Enfin, pour Eu (terre rare) qui se situe dans ce groupe, un comportement probablement résiduel, à l'origine concentré dans les feldspaths [Ca_{1-x}(Na,K)_x(Al_{2-x}Si_{2+x}O₈)] qui se transforment en micas et en argiles ;
- d'origine cristallochimique et minérale, comme les associations IV et V qui regroupent d'une part Fe₂O₃, V, Sc, et, d'autre part, MgO, Ni, Cr, qui marquent respectivement la présence de traces de V et Sc substitués au Fe des minéraux riches en fer et la présence de traces de Ni et Cr substitués dans les minéraux riches en MgO. De même, l'association de ces éléments dans les roches ultrabasiques très riches en MgO est très courante ;
- d'origine géochimique (liées à des associations minérales typiques de gisement) telle l'association VI qui regroupe Nb, Ta, Th et Rb marquant les gisements de type leuco-granitiques ;
- enfin moins discriminés, axe F3, le groupe VII, lié aux minéralisations sulfurées et le groupe VIII, probablement aussi lié aux gisements de type leuco-granitique.

¹⁵ TRL : terre rare lourde

¹⁶ TR/ : terre rare légère

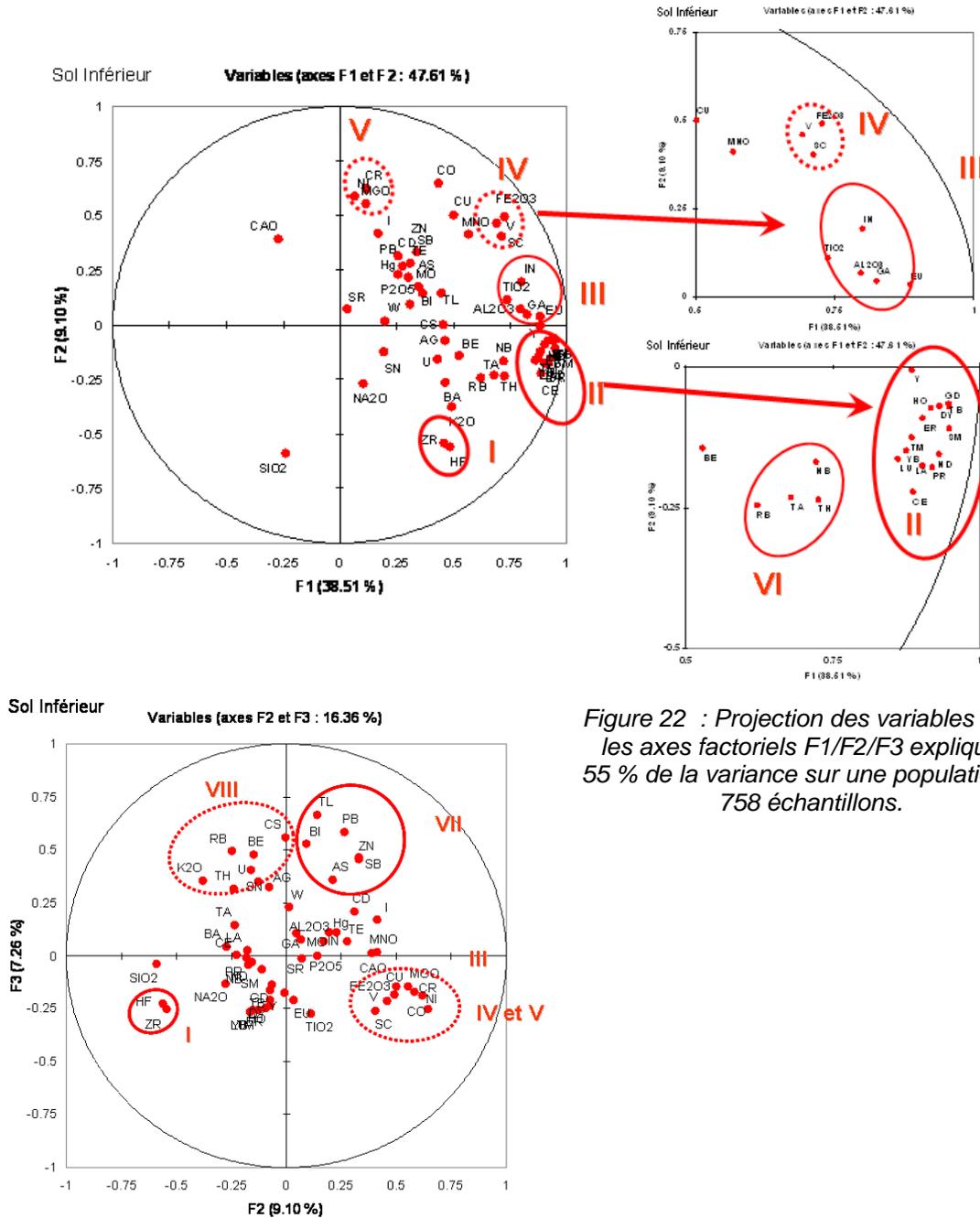


Figure 22 : Projection des variables selon les axes factoriels F1/F2/F3 expliquant 55 % de la variance sur une population de 758 échantillons.

La comparaison des signatures entre les parties inférieure et supérieure du sol présente, pour les éléments expliquant la plus forte variance (les plus discriminants), une image globale assez similaire, malgré une évolution géochimique liée au lessivage météorique et aux apports anthropiques (Figure 23). Cette image permet de déterminer les éléments invariants à peu variants, les groupes I, II, III, IV, V, dans l'évolution géochimique du profil, partie inférieure vers partie supérieure du sol. C'est dans ces

éléments qu'il sera possible de choisir des éléments peu variants ou « immobiles » pour qualifier les anomalies liées aux lessivages ou aux apports anthropiques.

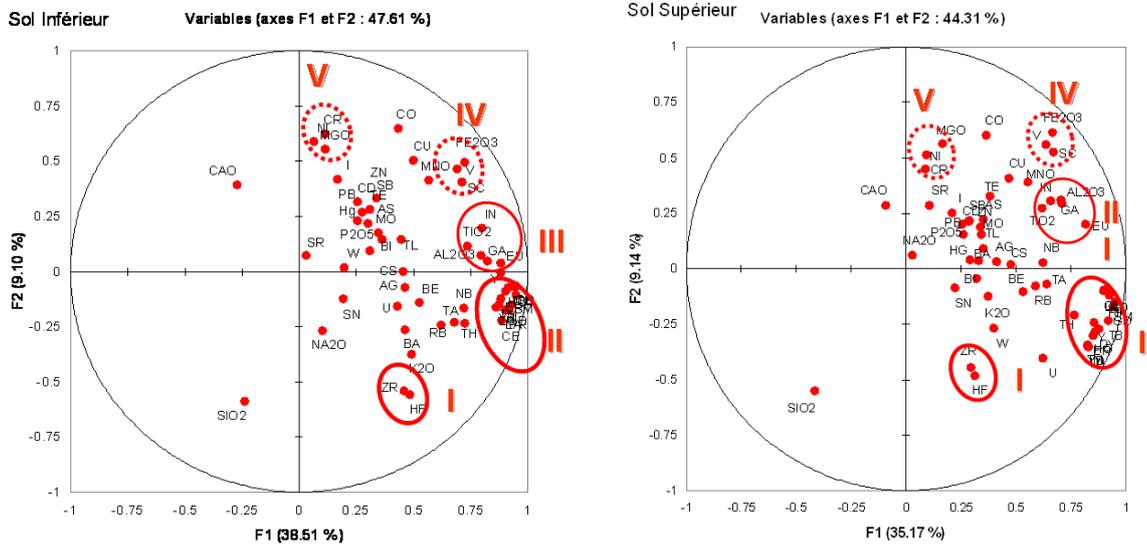


Figure 23 : Axes F1 et F2, comparaisons entre la signature des parties inférieure et supérieure du sol, sur une population de 758 échantillons sur chaque type de sol.

7.5. CHOIX D'ÉLÉMENTS PEU MOBILES DU SOL

Ti et Zr, majoritairement contenus dans des minéraux « lourds » peu solubles et Al stabilisé par des espèces minérales résiduelles après lessivage du substratum (kaolinite, halloysite, gibbsite, boemite...), sont traditionnellement considérés dans la bibliographie géologique comme des éléments peu mobiles (Brimhall and Dietrich, 1987 ; Egli and Fitze, 2000). Ti et Zr (assez communément analysés et bien quantifiés) peuvent servir de valeur normative pour faire des calculs de dissolution au niveau des profils pédologiques (Brimhall and Dietrich, 1987 ; Egli and Fitze, 2000), et, comme Al, peu influencés par l'activité anthropique, servir de base pour les calculs permettant d'individualiser les points aberrants probablement liés à l'activité humaine (Matschullat *et al.*, 2000).

7.5.1. Évaluation de leur mobilité relative

L'opportunité de la base de données fournie par le FOREGS européen (Geochemical Baseline Mapping Programme) qui permet l'accès à environ 800 points analysés de manière parfaitement harmonisée en deux points d'un profil vertical (sol de surface et partie inférieure du sol) permet d'évaluer d'une manière statistique le comportement des éléments ci-énumérés.

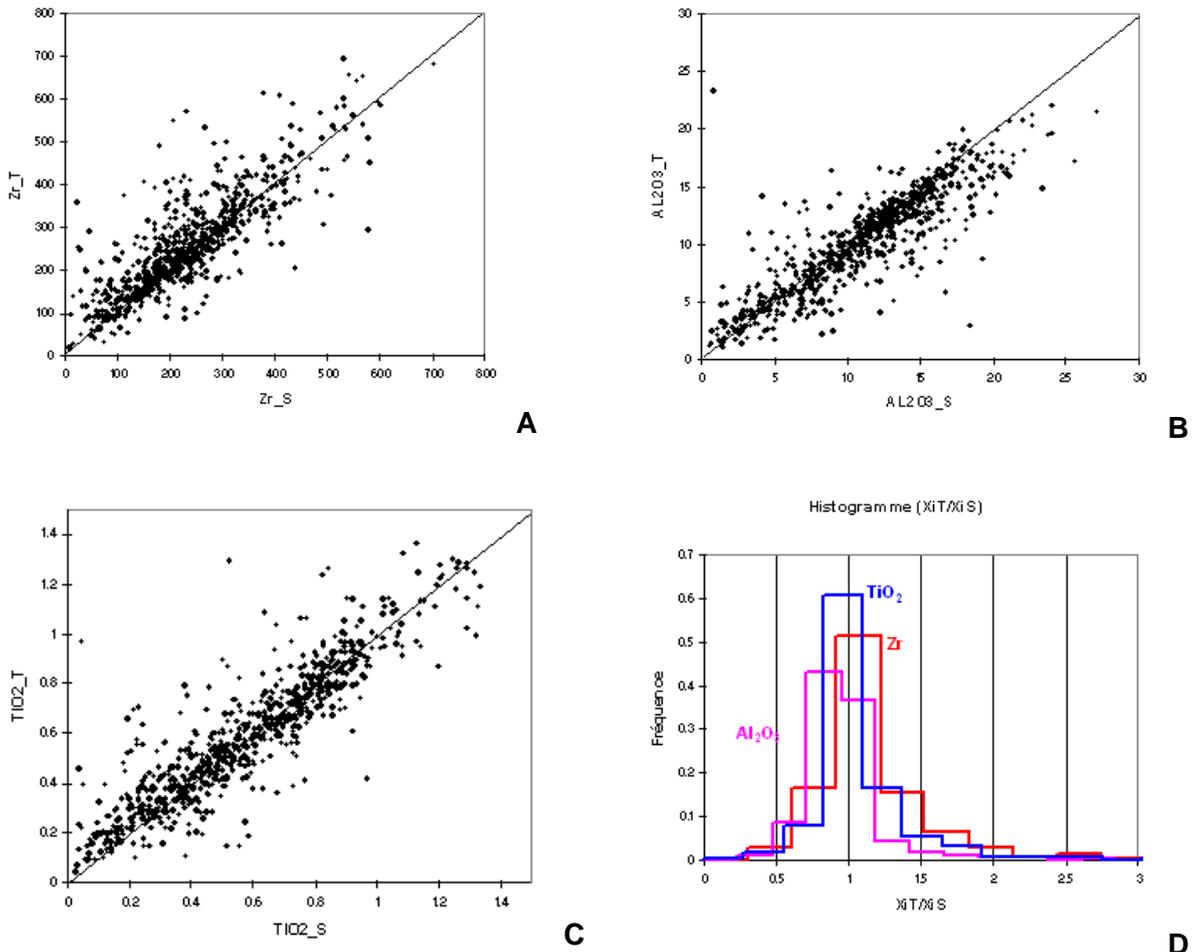


Figure 24 : Comportement d'éléments traces réputés peu mobiles, Al₂O₃, TiO₂, Zr selon les couples partie inférieure du sol (S) partie supérieure du sol (T).

A, B, C, binaires partie inférieure du sol (S) versus partie supérieure du sol (T) ;
 D) histogrammes de fréquence relative de distribution des rapports donnée de la partie inférieure du sol sur donnée de la partie supérieure du sol (X_iT/X_iS où i = élément).

Cette analyse faite à partir de diagrammes binaires comparant en un même point la donnée de la partie inférieure du sol à la donnée de la partie supérieure du sol et le calcul du rapport donnée de la partie inférieure du sol sur donnée de la partie supérieure du sol (X_iT/X_iS) montre que Zr et TiO₂ (X_iT/X_iS ≈ 1) sont les éléments les moins mobiles. À l'inverse, Al (X_{Al₂O₃T}/X_{Al₂O₃S} < 1), apparaît lessivé dans les horizons de surface, ce qui est cohérent avec les observations faites en milieu périglaciaire des Alpes suisses (Egli *et al.*, 2001). La tendance de Zr à se re-concentrer (X_{ZrT}/X_{ZrS} ≈ 1) tient à sa spéciation dans le milieu naturel sous forme de zircon (ZrSiO₄), un minéral lourd très insoluble. La présence de ce minéral est d'ailleurs confirmée par la forte corrélation Zr/Hf constatée dans cette base de données ($y = 0.0229x + 0.2957$; R² = 0.9298).

Les résultats obtenus démontrent que Ti et surtout Zr (Hf) peuvent servir comme valeur repère (normative) pour rechercher les valeurs anormales dans un sol impacté par les activités humaines.

7.5.2. Proposition d'utilisation d'un élément de référence pour normer les analyses

Les éléments peu mobiles peuvent, comme proposé par Brimhall et Dietrich (1987) et de nombreux articles à travers la bibliographie, servir de référence normative pour les sols pour tenir compte des concentrations d'éléments dues aux processus de dissolution liés aux influences climatiques. Ainsi, le rapport entre l'élément abordé X_i et le composé immobile X_{im} permet de compenser les variations induites par des processus naturels (X_i/X_{im}).

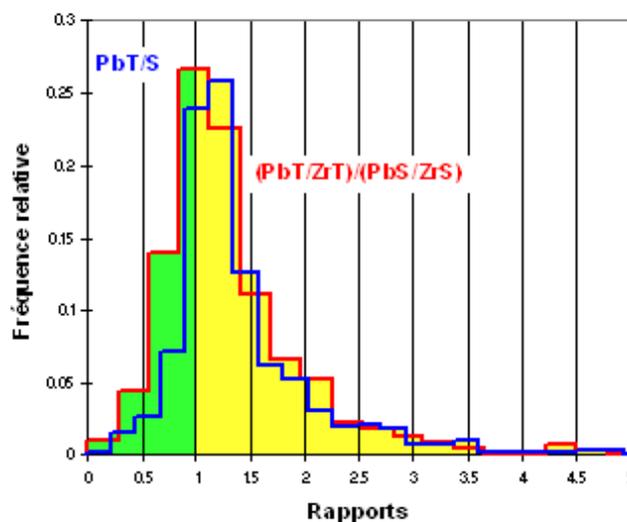


Figure 25 : Histogramme des rapports des concentrations dans la partie inférieure du sol (S) versus partie supérieure du sol. Comparaison entre les valeurs obtenues $(XPbT/XZrT)/(XPbS/XZrS)$ et $(XPbT)/(XPbS)$, avec T = Top Soil, S = Sub Soil.
Clés : pertes en vert, gain en jaune.

Parmi les éléments immobiles à peu mobiles, le zirconium (soit X_i/X_{Zr}) sera préféré au titane car il est essentiellement porté par le zircon qui est un minéral très ubiquiste présent comme minéral accessoire des roches pyrogènes¹⁷, mais aussi comme minéral résiduel dans toutes les roches détritiques.

Un exemple graphique analysant le comportement du plomb par comparaison entre la partie inférieure du sol (sub soil), qui peut être considérée globalement exempte d'apport anthropique, et la partie supérieure du sol (top soil), susceptible d'avoir été

¹⁷ Pyrogènes : roches profondes de hautes températures

impactée, montre que l'utilisation du zirconium comme élément normatif $[(X_{Pb}T/X_{Zr}T)/(X_{Pb}S/X_{Zr}S)]$, T =Top Soil, S= Sub Soil] apporte une certaine distorsion de l'image par rapport à un usage du simple rapport $[(X_{Pb}T)/(X_{Pb}S)]$. Même si l'image garde la même signification, à savoir que la partie supérieure du sol est enrichie en Pb par rapport à la partie inférieure du sol, l'usage de Zr comme élément immobile normatif permet de minorer les enrichissements liés à la persistance relative des éléments suite à la dissolution d'éléments majeurs comme la silice, l'aluminium, le calcium... Mais cet usage peut, dans certaines régions de l'ancien bloc soviétique, être considéré avec quelques suspicions en raison de l'usage d'engrais phosphatés riches en zirconium provenant de la presqu'île de Kola¹⁸.

7.6. ETM, FONDS GÉOCHIMIQUES

7.6.1. Le mercure

Le mercure, malgré sa faible abondance dans l'univers, est en fait universellement distribué dans l'écorce terrestre, l'air, l'eau et le vivant, par bioaccumulation. Cette singularité est à mettre en relation avec ses particularités physico-chimiques : liquide à température ambiante, point d'ébullition très bas (357 °C), pression de vapeur basse qui facilite son évaporation sous la plupart des climats, forte propension à se combiner aux ions chlorurés et sulfurés, et aussi à former des complexes organométalliques.

Moins de 100 espèces minérales contenant du mercure (jusqu'à 3 %) ont été identifiées. Les plus représentées en nombre d'espèces minérales sont les sulfures, suivis des halides et des éléments natifs (le mercure a la particularité de s'allier à froid avec beaucoup de métaux), enfin quelques phosphates s.l. (phosphates, chromates). Les sulfures sont surtout représentés par le Cinabre [HgS] qui est exploité pour en extraire le mercure. Ce dernier présente deux polymorphes : le métacinabre (du groupe de la sphalérite [AX] avec A = Cd, Fe, Hg, Zn et X = S, Se, Te) et l'hypercinabre. Les sulfosels, placés par souci de simplification dans les sulfures, peuvent contenir des traces de mercure à des quantités non négligeables (de l'ordre du %). Une bonne illustration des possibilités de substitutions dans ce type de minéraux peut être donnée par le groupe de la tétrahédrite avec, pour une formule de type $A_{12}B_4X_{13}$, un site A pouvant être occupé par Ag, Cu, Fe, **Hg**, Zn ainsi qu'un site B pouvant être occupé par As, Sb, Te, X = S, Se, Te. Sa présence assez fréquente sous forme d'halides montre la propension qu'a le mercure à se combiner avec les halogènes, dont le chlore, dans le milieu naturel.

¹⁸ Ce biais devrait pouvoir être levé si les données sont suffisamment nombreuses et réparties : l'histogramme des rapports de concentrations devrait être bimodal sur un sous-ensemble « soviétique ».

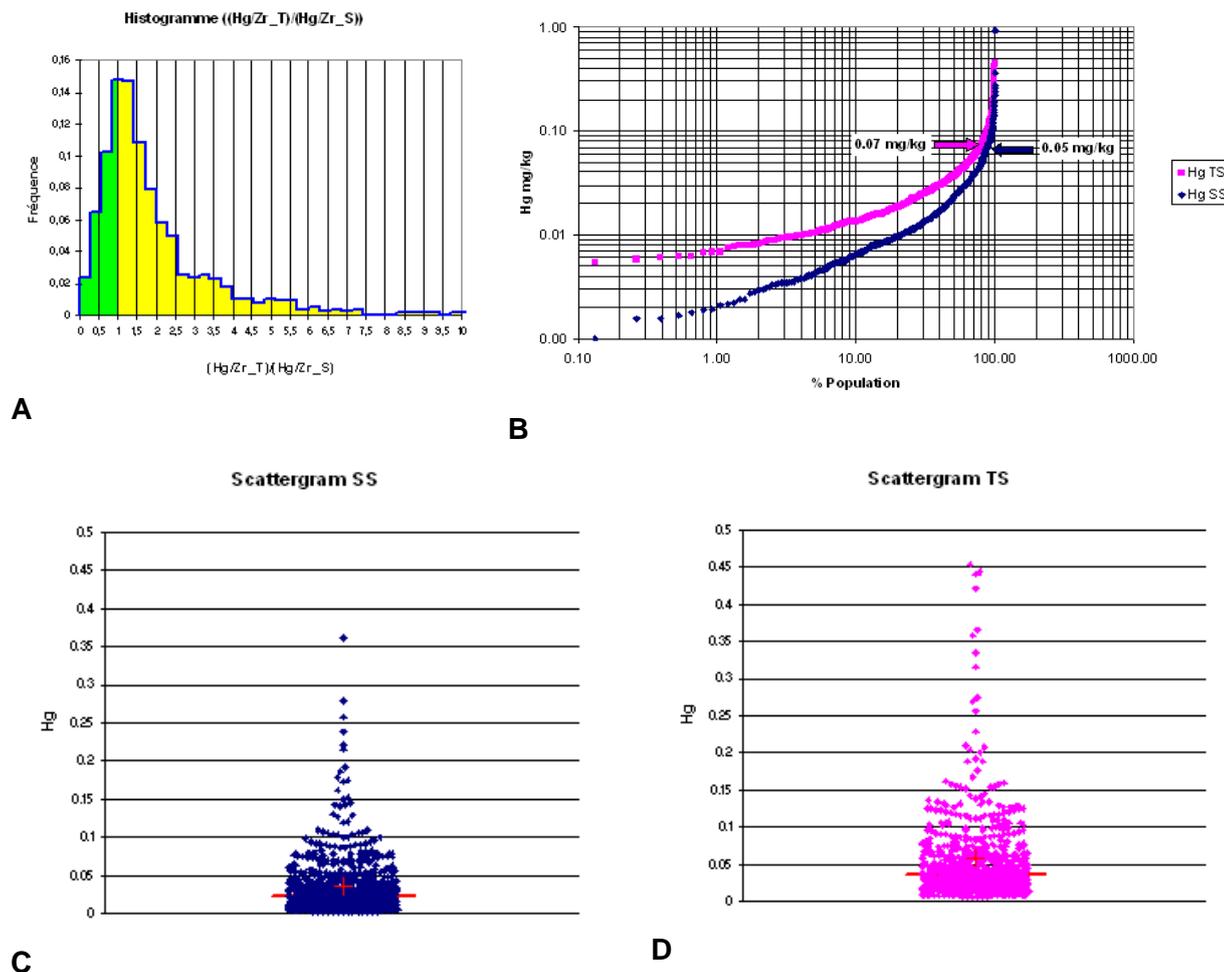


Figure 26 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du mercure. A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en mercure des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Ces minéraux sont très riches en mercure, de 96 % à 73 %, par exemple le calomel $[Hg_2Cl_2]$. Mis à part le mercure natif qui apparaît dès l'exposition du cinabre à l'oxydation, les amalgames sont nombreux grâce à la particularité de ce métal à donner des alliages à froid. Dans les gîtes hydrothermaux contenant du mercure, de nombreux alliages ont été identifiés et peuvent contenir Pd, Pb, Au, Cu et Ag. Dans le milieu naturel, le mercure peut se présenter sous forme oxydée, la montroydite $[Hg^{2+}O]$, relativement fréquente à notre connaissance... De cette description, nous retiendrons que le mercure sous forme de traces est souvent associé aux minerais sulfurés, autres que les minerais de mercure, et par ce simple fait, peut être libéré dans l'atmosphère par la seule action de griller les sulfures pour faire de l'acide sulfurique ou lors de l'affinage des métaux par pyrométallurgie.

Le mercure a aussi une forte propension à former des composés organométalliques liposolubles comme, par exemple, le méthylmercure et le diméthylmercure, qui ont une forte tendance à fixer le mercure et à se concentrer dans la chaîne alimentaire.

Le niveau de base pour les sols naturels a été estimé à $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ (sol profond des données du FOREGS). Au-dessus de cette valeur, une influence anthropique demeure possible, mais doit faire l'objet d'une analyse circonstanciée du contexte. Quoiqu'il en soit, dans le sol de surface comparé au sol profond, le fond géochimique en mercure est élevé, prouvant l'influence anthropique dans de nombreuses régions, surtout dans les zones minières et les zones à fort taux d'industrialisation. Le bruit de fond anthropique moyen estimé se situe à $0,07 \text{ mg/kg}$. L'influence anthropique est corroborée par le diagramme de la Figure 27 qui présente un étirement du nuage des points selon un axe dessinant une corrélation positive entre le rapport $(\text{Hg}_T/\text{Zr}_T)/(\text{Hg}_T/\text{Zr}_T)$ versus Hg_T .

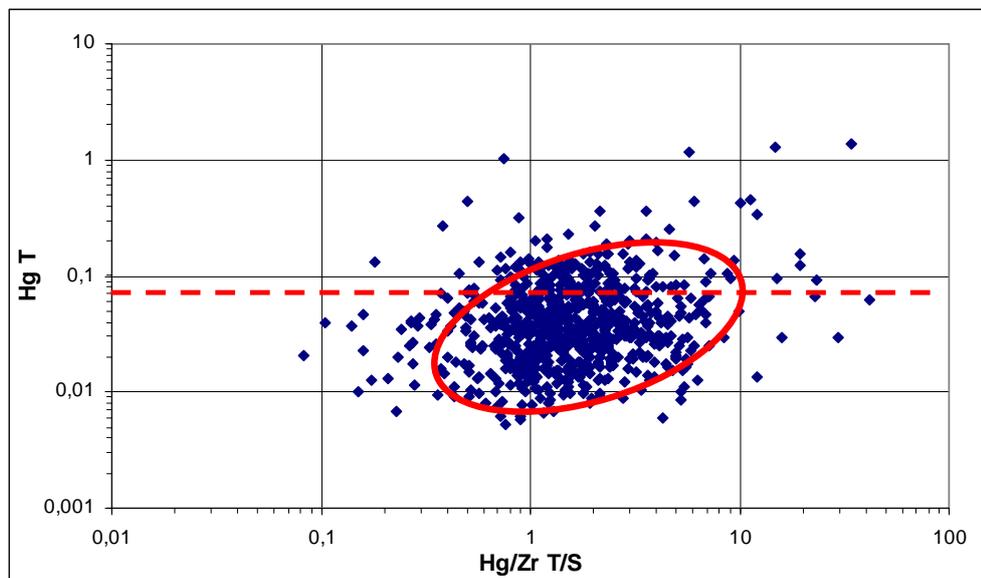


Figure 27 : Diagramme binaire $(\text{Hg}_T/\text{Zr}_T)/(\text{Hg}_T/\text{Zr}_T)$ versus Hg_T .

La distribution des valeurs du rapport $(\text{Hg}_T/\text{Zr}_T)/(\text{Hg}_T/\text{Zr}_T)$ présente un fond géochimique anormal (valeurs supérieures à 1) à l'échelle de l'Europe. Ces anomalies sont d'origine anthropique, marquant la forte volatilité du mercure. Les formations cristallines et cristallophylliennes du nord de l'Europe montrent la plus grande densité de rapports élevés. Cet état de fait relève de la faible teneur en Hg de la partie inférieure des sols de cette région, montrant un fort contraste avec la partie supérieure des sols polluée par les retombées atmosphériques. D'autres anomalies plus faibles, réparties en Europe centrale (Allemagne, Pays-Bas, Danemark), sont probablement liées à la présence, dans les sols agricoles, de matières organiques qui complexent le mercure. Les anomalies ponctuelles, moyennes à fortes, rencontrées en Espagne, en Italie et en Sardaigne sont liées aux pratiques minières. Certaines autres, dispersées, ont une origine probablement industrielle.

Il est à remarquer qu'une anomalie indéniable se dessine dans les plaines de l'Europe centrale probablement en liaison avec la plus grande richesse de ces sols en matières organiques (Figure 29).

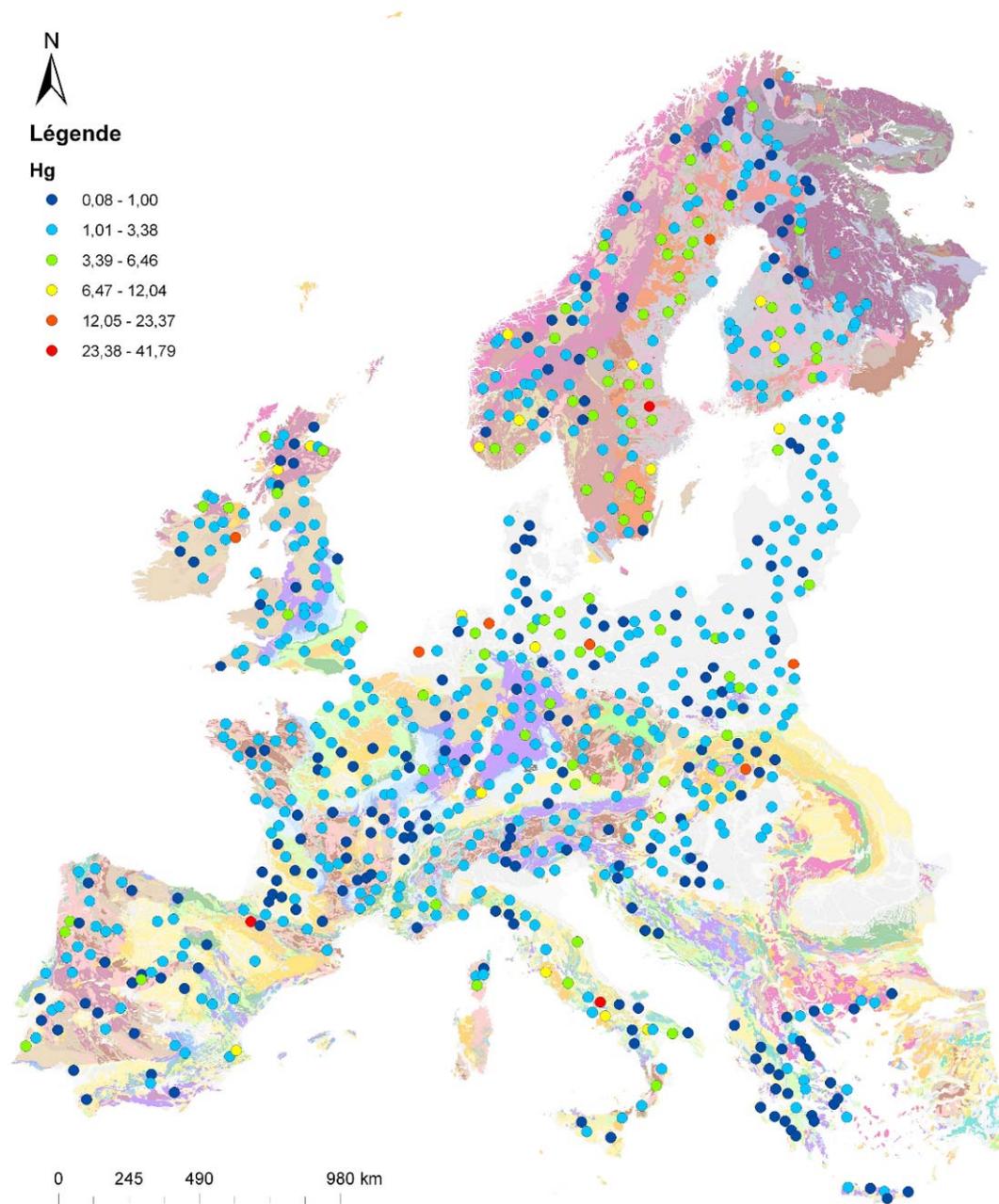


Figure 28 : Répartition des valeurs du rapport $(Hg_T/Zr_T)/(Hg_S/Zr_S)$ sur la carte géologique de l'Europe.

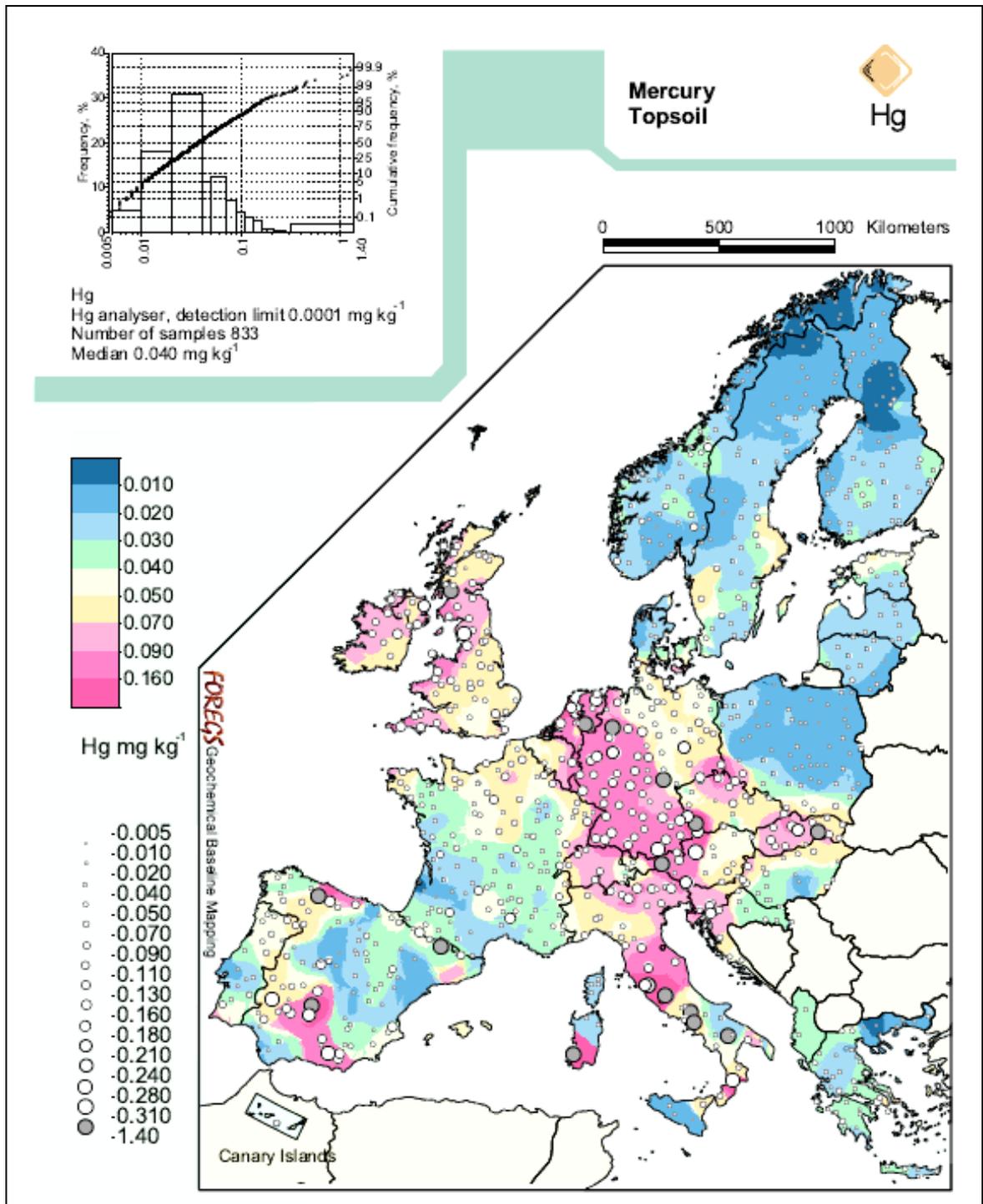


Figure 29 : Cartographie FOREGS, distribution du mercure en Europe.

7.6.2. Le plomb

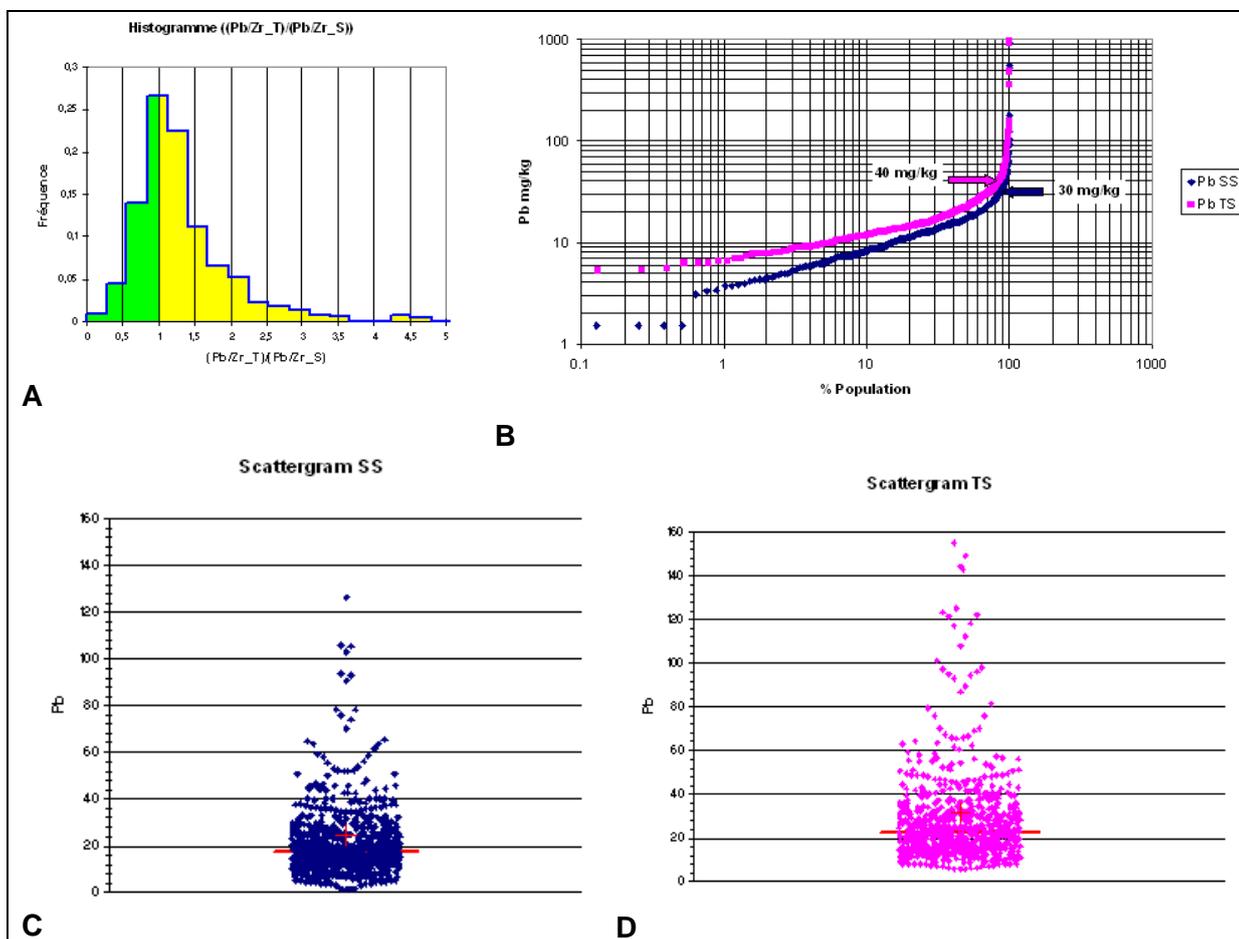


Figure 30 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du plomb.
A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en plomb des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le plomb est un élément commun du milieu naturel. Sur 452 espèces minérales contenant du plomb comme élément majeur ou constitutif, 37 % sont représentées par les sulfures (s.s.) et sulfosels illustrant le caractère chalcophile de ce métal, 19 % par des phosphates, 9 % par les oxydes (*s.l.*), 8 % par les halides et oxyhalides, 4 % par des sulfates, 3 % par les carbonates. À ce titre, on peut citer la galène [PbS], l'anglésite [PbSO₄], la cérusite [PbCO₃] et le minium [Pb₃O₄]. On le trouve aussi comme élément trace dans de nombreux minéraux tels que les feldspaths, les micas, le zircon et la magnétite. Le plomb est un métal très connu depuis l'Antiquité, particulièrement utilisé par les Romains pour l'adduction d'eau, la protection des agrafes de fer dans la construction des bâtiments et pour des usages domestiques. On peut considérer qu'une des premières pollutions industrielles environnementales « mondiales » a été provoquée par la civilisation romaine.

Dans les sols, le plomb est surtout associé aux minéraux argileux, adsorbé sur les oxydes et oxy-hydroxydes de Mn, Fe et Al. Dans certains cas, il peut être associé aux

carbonates et aux phosphates. Il semblerait que, dans de nombreux cas, le phosphate de plomb régule les concentrations du milieu naturel. Les bio-films sont aussi susceptibles d'adsorber le plomb et de contrôler ses concentrations en solution (Nelson *et al.*, 1995).

Le niveau de base pour les sols naturels a été estimé par Kabata-Pendias (2001) à 25 mg kg^{-1} , ce qui est très proche de la valeur estimée dans le présent document à partir des valeurs du FOREGS : 30 mg kg^{-1} . Au-dessus de cette valeur, une influence anthropique demeure possible, mais doit faire l'objet d'une analyse circonstanciée du contexte. Quoiqu'il en soit, dans le sol de surface comparé au sol profond, le fond en plomb est élevé, prouvant, pour de nombreuses régions, l'influence anthropique, surtout dans les zones minières et les zones à fort taux d'industrialisation. Le bruit de fond anthropique moyen estimé se situe à 40 mg/kg .

La carte de la Figure 31 permet de faire une distinction entre les pays du Nord de l'Europe et du reste de l'Europe.

La région finno-scandinave montre des anomalies faibles à moyennes en relation avec des formations géologiques cristallines et cristalloyphyllics peu minéralisées. Les zones périphériques de la mer Baltique et du Danemark présentent la même typologie liée aux dépôts glaciaires provenant de la zone finno-scandinave. Les quelques fortes anomalies locales notées dans cette zone sont dues au fond géochimique très faible modifié en surface par les activités anthropiques.

Pour le reste de l'Europe, les réponses sont plus contrastées. Elles sont dues d'une part aux gisements et aux activités minières connexes, et d'autre part aux activités industrielles (métallurgie du plomb). En général, la partie supérieure du sol est plus riche que la partie inférieure du sol.

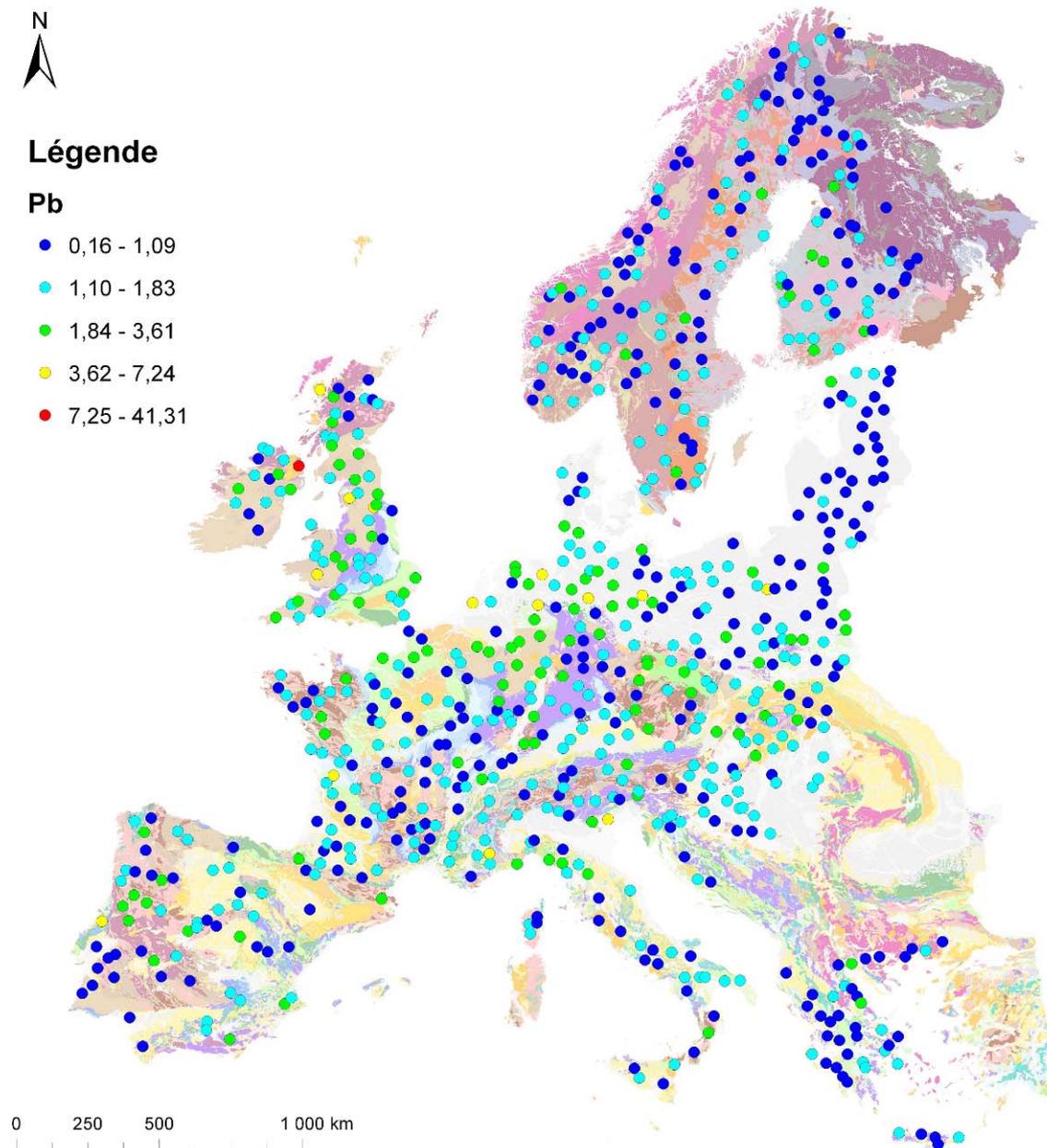


Figure 31 : Répartition des valeurs du rapport $(Pb_7/Zr_7) / (Pb_S/Zr_S)$ sur la carte géologique de l'Europe.

7.6.3. L'arsenic

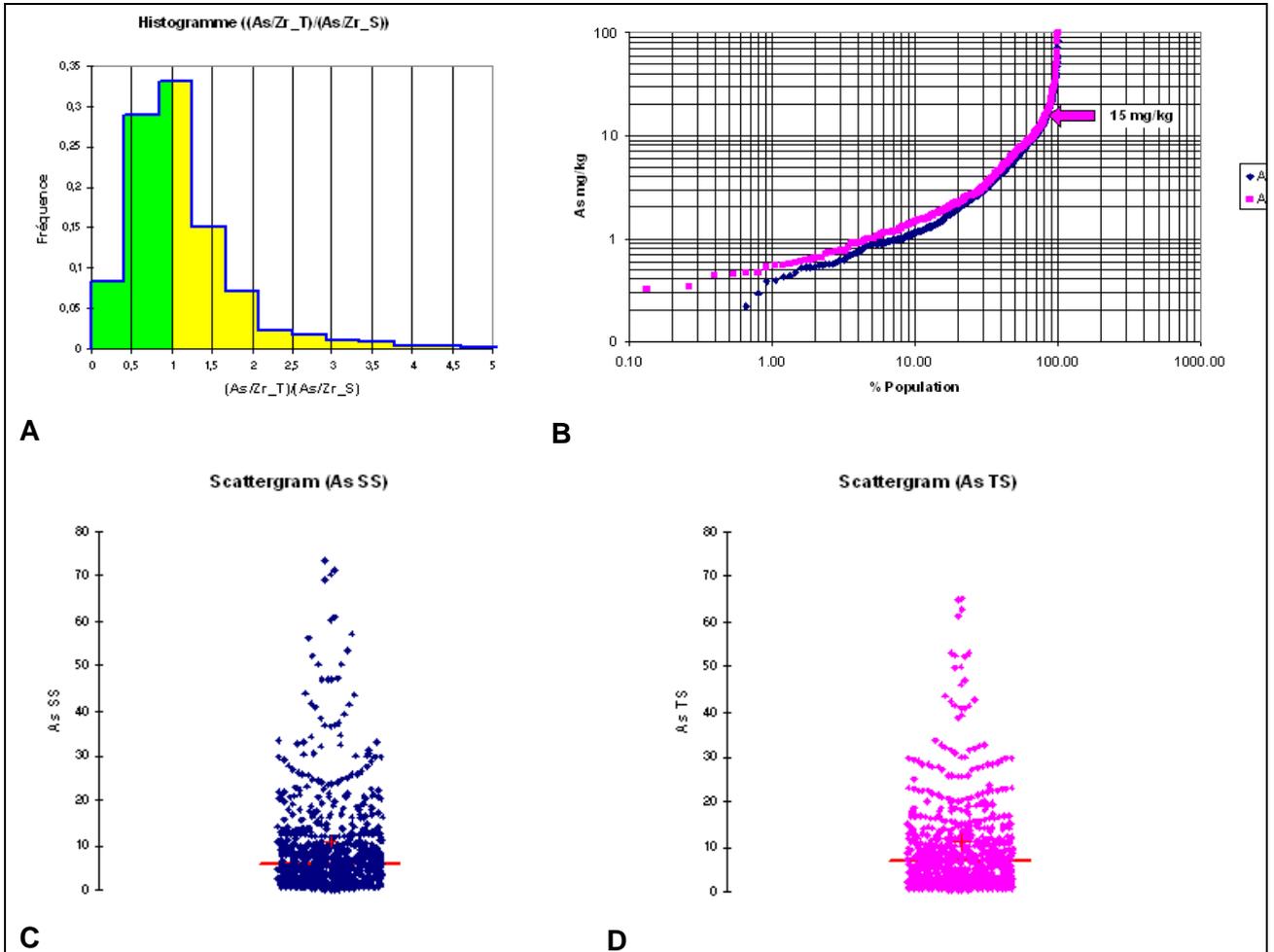


Figure 32 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas de l'arsenic. A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en arsenic des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

L'arsenic est un élément chalcophile. Sous sa forme As(-I) et As(-III), il peut prendre la place du soufre, comme dans l'arsénopyrite $[FeAs]$ ou dans certaines pyrites arséniées. Il se trouve associé aux gisements polymétalliques. Sous sa forme As(V), il constitue des groupements AsO_4^{3-} de géométrie très proche de PO_4^{3-} expliquant des substitutions fréquentes entre arsénates et phosphates. La forme As(V) est la plus toxique mais a la particularité de s'adsorber sur les oxy-hydroxydes de fer, les argiles et les matières organiques limitant de fait sa mobilité dans le milieu naturel et assurant une rétention limitant sa concentration dans l'hydrosphère.

Dans l'histogramme, on note quelques anomalies, probablement liées à l'activité minière et industrielle. On peut noter que l'arsenic est utilisé comme insecticide et fongicide, ce qui peut laisser supposer que certaines anomalies peuvent être en relation avec des pratiques agricoles.

Il existe un faible écart entre les valeurs de la partie inférieure et de la partie supérieure du sol. Un fond moyen peut être estimé à 15 mg/kg.

7.6.4. Le cuivre

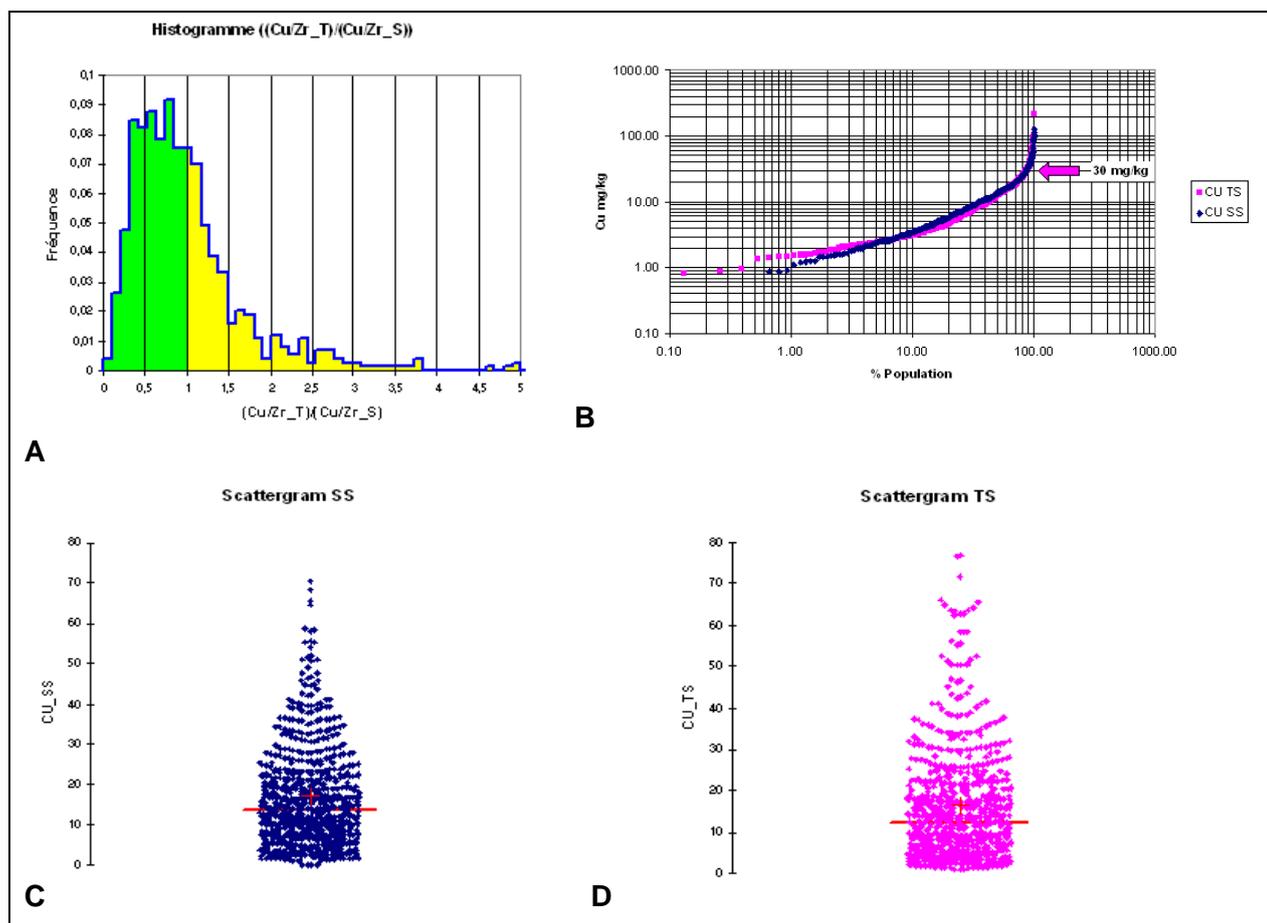


Figure 33 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du cuivre.

A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en cuivre des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le cuivre est essentiellement présent dans le milieu naturel sous forme de sulfures (37 % des espèces minérales), phosphates et sulfates. On le trouve essentiellement dans le milieu naturel sous deux valences Cu (I) et Cu (II). C'est un élément principalement chalcophile trouvé dans de nombreux gisements sulfurés mais les carbonates seuls peuvent, sous forme de malachite $[\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2]$ et d'azurite $[\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2]$, justifier la présence de concentrations exploitables localisées à la surface de gisements sulfurés. Plus de 90 % du cuivre dans les eaux est complexé par les matières organiques (Benedetti *et al.*, 1996). Les valeurs moyennes dans les sols varient de 13 à 24 mg/kg (Kabata-Pendias, 2000). L'historgramme présente quelques anomalies liées probablement aux activités anthropiques telles que la mine et

l'industrie et aux usages phytosanitaires du cuivre. Globalement, il n'existe pas de différence marquée entre les valeurs mesurées dans les parties supérieure et inférieure des sols. La valeur des fonds géochimiques confondus peut être évaluée à 30 mg/kg, ce qui est légèrement supérieur aux valeurs moyennes données par Kabata-Pendias (2001), comprises entre 13 et 24 mg/kg.

7.6.5. Le zinc

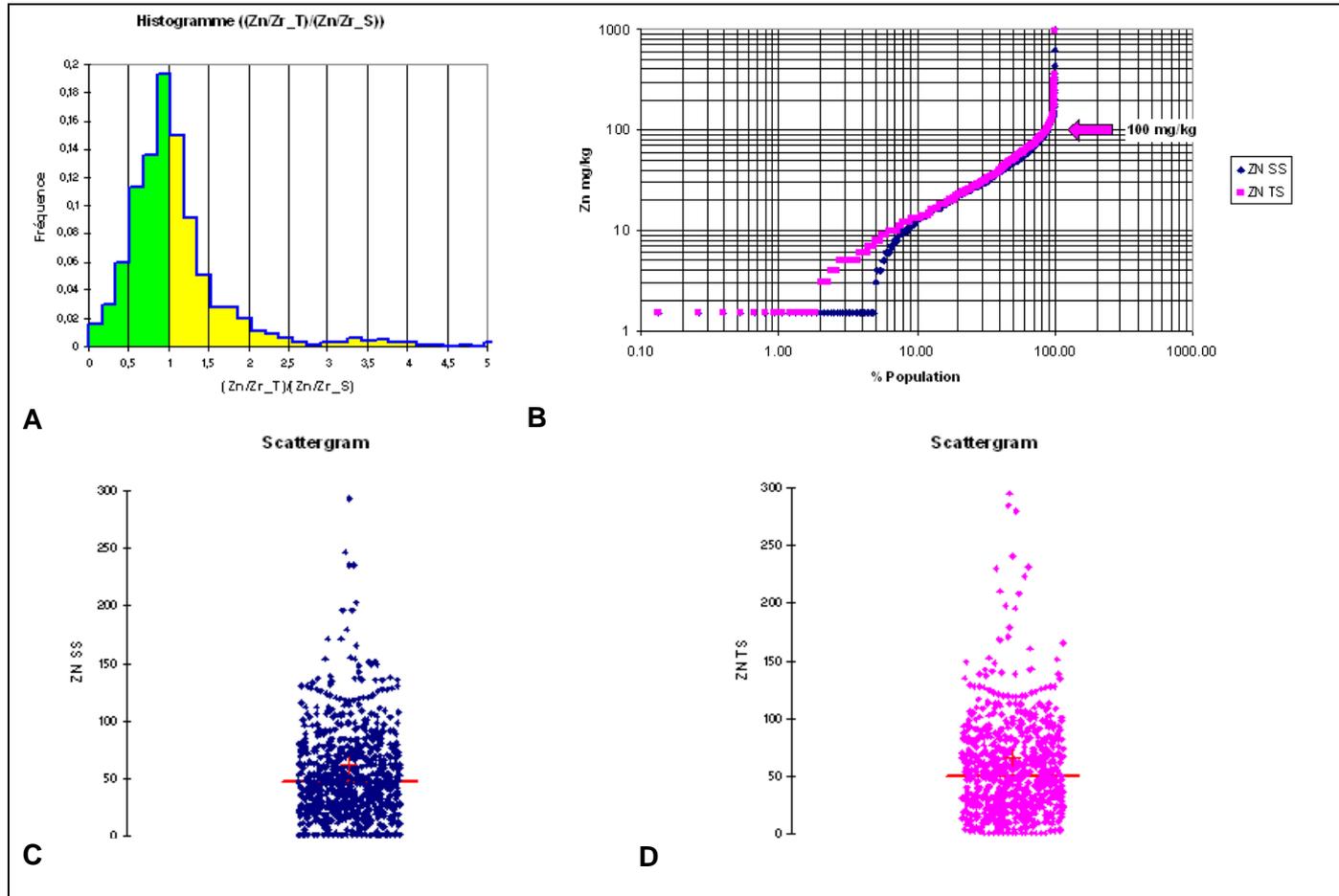


Figure 34 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du zinc. A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en zinc des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le zinc est un élément chalcophile qui forme des minéraux sulfurés communs comme la blende ZnS . On peut le trouver aussi sous forme de carbonates (smithsonite $ZnCO_3$) et sous forme d'oxyde (zincite ZnO). Il n'existe pas de différence entre la partie supérieure et la partie inférieure des sols pour des valeurs fortes. L'histogramme fait apparaître des anomalies liées à des activités industrielles telles que la mine, la combustion du charbon et l'incinération des déchets ménagers. La teneur moyenne des sols en zinc varie entre 10 et 300 mg/kg (Mihaljevic, 1999) avec une moyenne estimée à 64 mg/kg (Kabata-Pendias, 2001). Les valeurs obtenues à partir des

données du FOREGS donnent un fond commun aux deux parties du sol à 100 mg/kg ; il n'est pas possible de différencier la partie supérieure et la partie inférieure des sols.

7.6.6. Le chrome

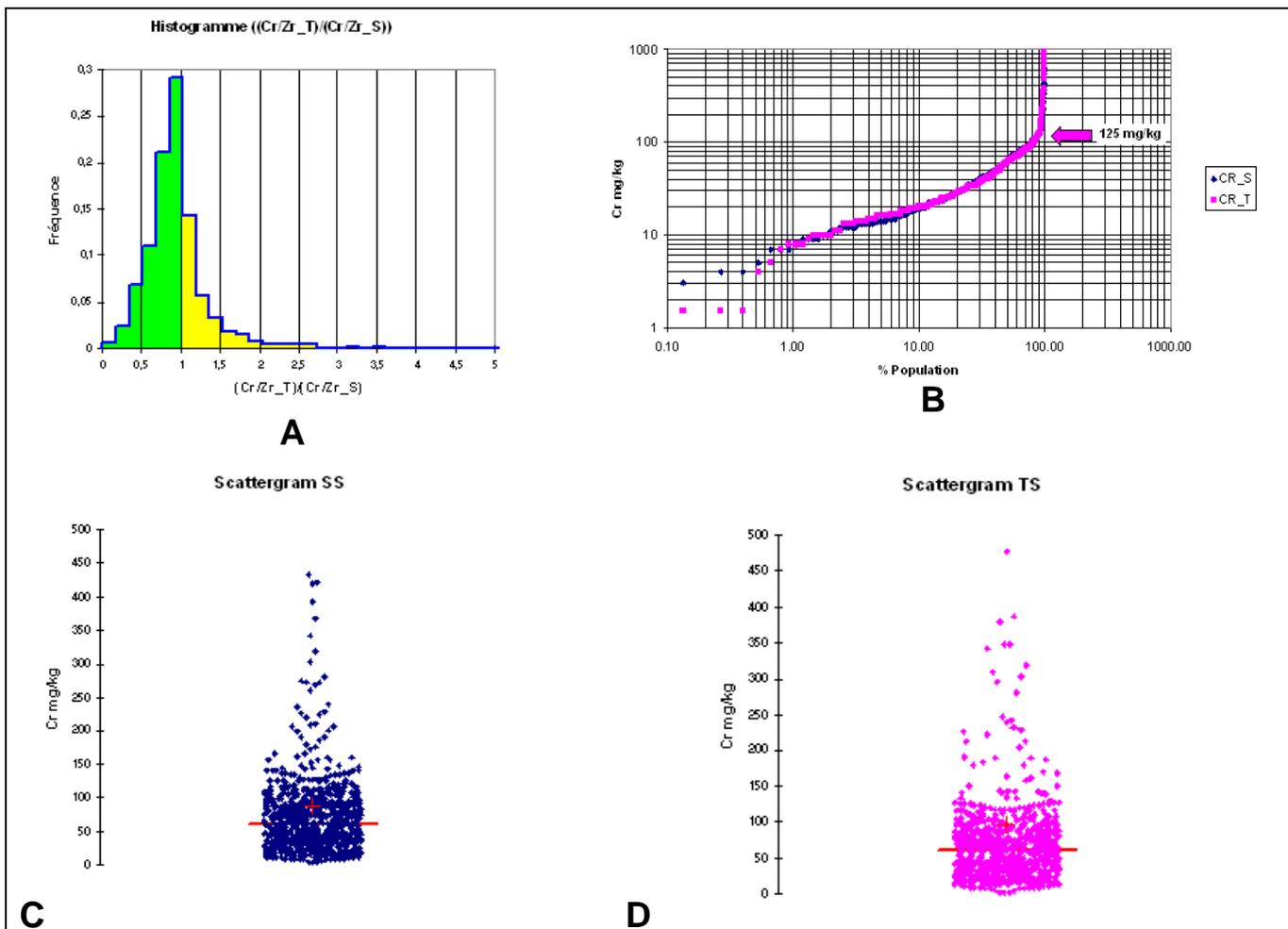


Figure 35 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du chrome. A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en chrome des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le chrome est essentiellement un élément lithophile, principalement concentré dans les oxydes de type spinelle (ABO_4). Il est enrichi dans les roches basiques à ultrabasiques (basaltes continentaux et océaniques) qui peuvent expliquer des anomalies en relation avec la nature des formations rocheuses.

L'histogramme $(Cr_T/Zr_T)/(Cr_S/Zr_S)$ centré sur 1 montre que cet élément est immobile et est très peu enrichi en surface.

Les valeurs en chrome obtenues à partir des données du FOREGS donnent un fond commun aux deux parties du sol à 125 mg/kg ; il n'est pas possible, comme pour le zinc, de différencier la partie supérieure et la partie inférieure des sols.

7.6.7. Le cadmium

Le cadmium tend à se volatiliser à haute température, constituant ainsi une voie d'entrée dans les mécanismes d'introduction anthropique dans le milieu naturel. L'usage de plus en plus fréquent de Zn dans les fertilisants et l'usage de phosphates naturel peuvent apporter des contaminations en Cd.

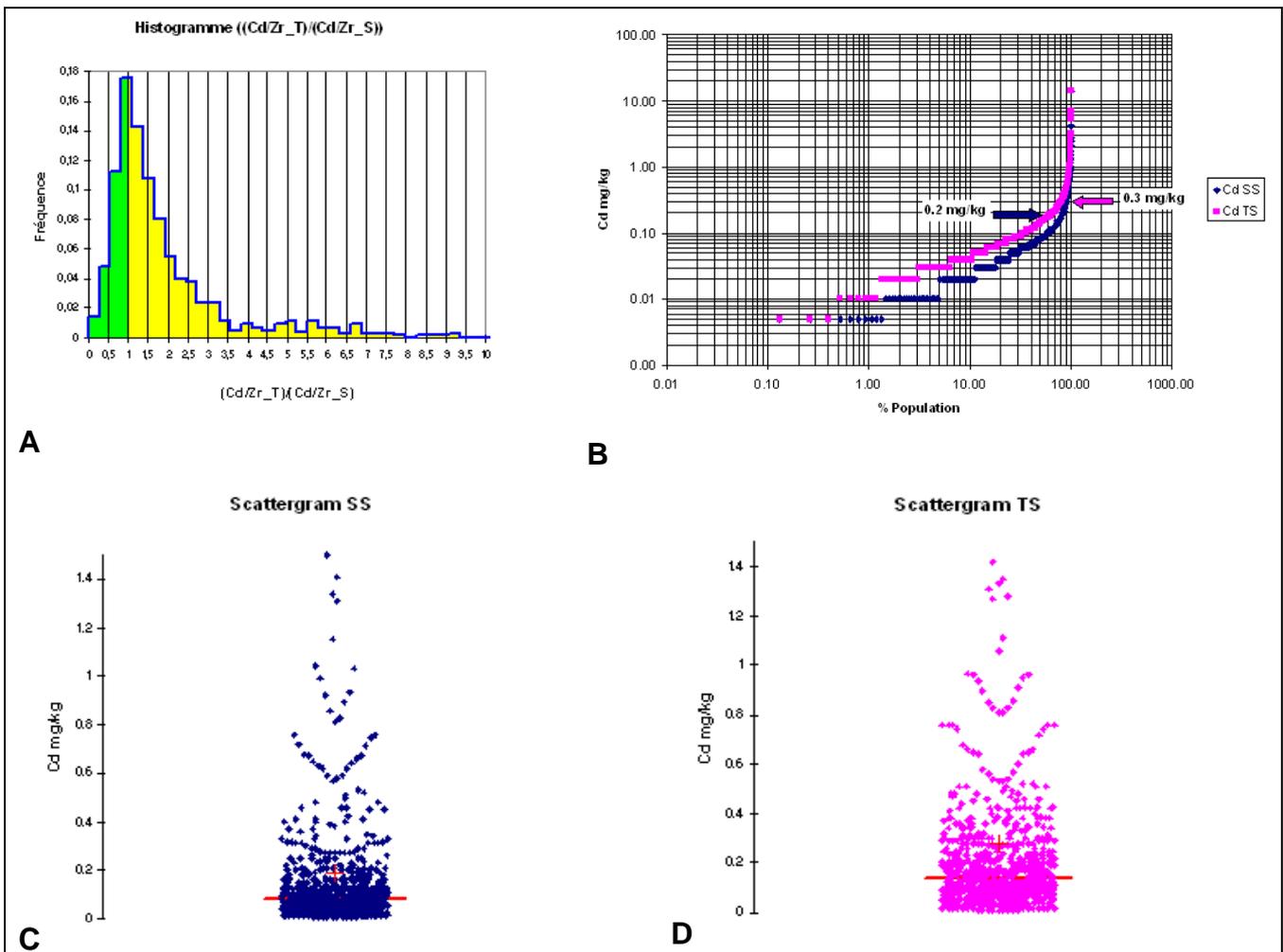


Figure 36 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du cadmium. A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en plomb des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Des apports sont aussi possibles par l'épandage des boues de station d'épuration. Le cadmium n'a pas de rôle essentiel dans les fonctions biologiques, mais il tend à

s'accumuler dans les plantes et la biomasse aquatique avec des conséquences toxiques.

Dans le milieu naturel, les minéraux de Cd sont rares ; seuls une vingtaine de minéraux ont été identifiés, dont neuf sulfures, trois phosphates, deux sulfates, un sélénite, un carbonate et un oxyde.

Conformément aux données cristallographiques qui démontrent une forte affinité entre le cadmium et le zinc, les sulfures de zinc (sphalérite [ZnS]) et les carbonates de zinc (smithsonite [ZnCO₃]) contiennent, dans beaucoup de gisements, des teneurs non négligeables de cadmium, respectivement comprises entre 70 et 18 500 ppm et 23 à 3 710 ppm. Ainsi, pour certains gisements sulfurés, le cadmium constitue une ressource secondaire exploitable ou une source de pollution non négligeable à cause de la toxicité de cet élément.

Le cadmium peut être dispersé en très faible quantité dans d'autres minéraux comme les phosphates tels que l'apatite [Ca₅(PO₄)₃(OH,F,Cl)] où il constitue une source potentielle de pollution lors de l'utilisation du phosphate de calcium comme matière première. Des études cristallographiques très poussées (spectroscopie d'adsorption X) montrent que le cadmium est localisé sur les mêmes sites que le calcium (Séry *et al.*, 1996). Il peut être associé au carbonate de calcium dans le réseau duquel il se substitue au calcium.

Malgré ses très faibles teneurs naturelles en Cd comprises entre 0 et 23 ppm, il semblerait que les carbonates de calcium jouent un rôle non négligeable dans la régulation du cadmium dans le milieu naturel (McBride, 1980 ; Lorens, 1981 ; Davis *et al.*, 1990 ; Papadopoulos et Rowell, 1988 ; Königsberger *et al.*, 1991 ; Zachara *et al.*, 1991 ; Stipp *et al.*, 1992 ; van der Weijden, 1995 ; Reeder, 1996 ; Tesoriero and Pankow, 1996 ; Chiarello *et al.*, 1997). Les mécanismes invoqués sont la chimisorption suivie par une lente incorporation au réseau (Martin-Garin *et al.*, 2003).

Les enrichissements relevés dans les sols de surface peuvent avoir plusieurs origines :

- une pollution anthropique en relation avec les exploitations minières, l'affinage des métaux, l'industrie chimique ;
- l'usage d'engrais (phosphates de calcium) contenant des traces de Cd ;
- une évolution naturelle dans les sols avec concentration par précipitation, notamment en association avec des phosphates ;
- le piégeage dans les matières organiques enrichies dans les sols de surface. La comparaison entre les mesures faites sur les sols de surface et les sols profonds montre deux niveaux de valeurs, respectivement 0,3 et 0,2 mg/kg.

7.7. LE MOLYBDÈNE

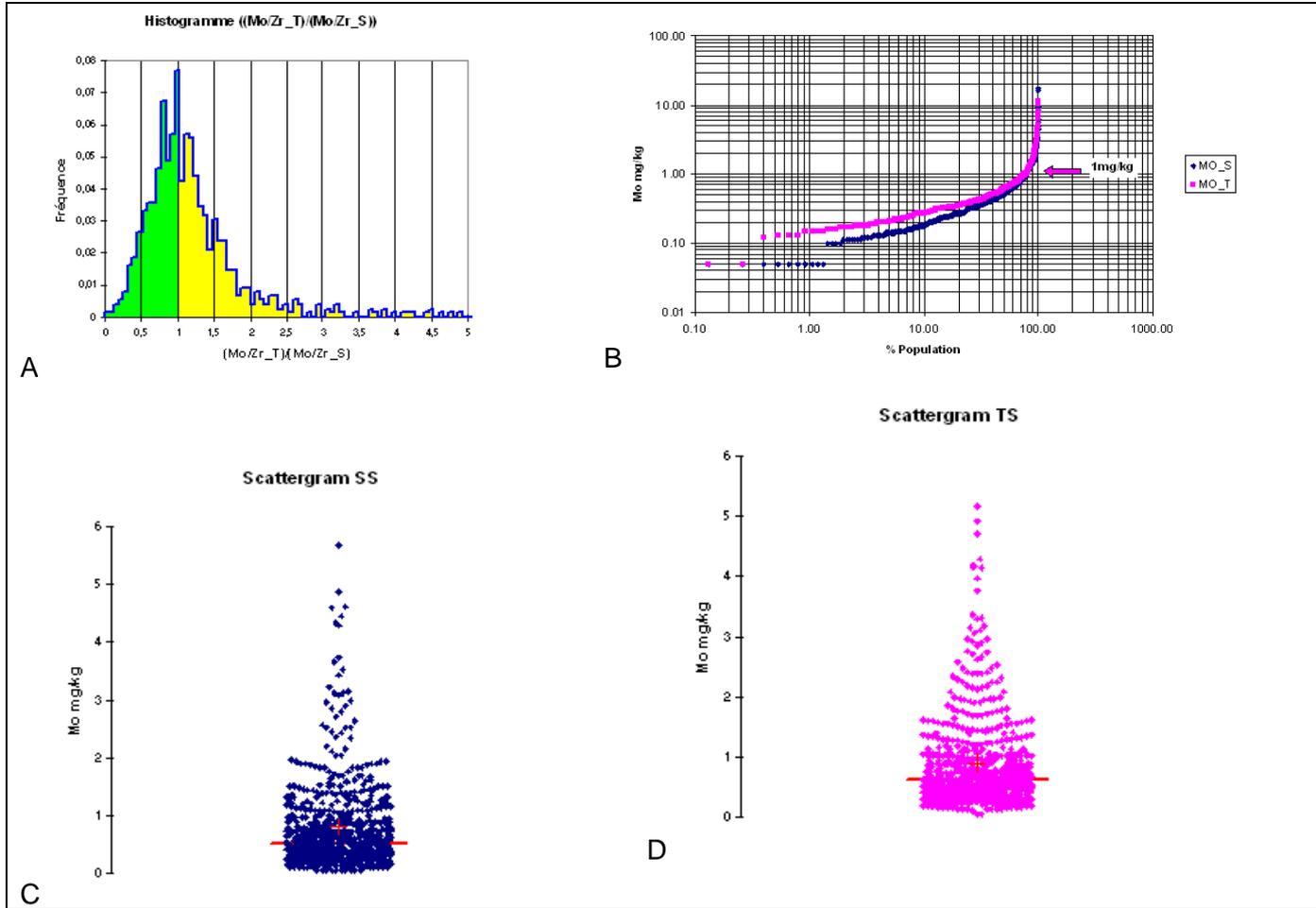


Figure 37 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du molybdène.

A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en molybdène des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le molybdène est un élément chalcophile et sidérophile donnant des sulfures (molybdénite MoS_2), des oxydes (wulfénite PbMo_4 et powellite $\text{Ca}(\text{Mo},\text{W})\text{O}_4$). Il est plus largement présent à des niveaux de traces en association avec les matières organiques et les sulfures.

Le fond moyen de la partie supérieure des sols est plus riche en molybdène que la partie inférieure. Le changement de distribution de la population (changement de pente de la courbe) montre, dans les deux cas, une valeur limite à 1 mg/kg. Les anomalies notées sont, dans la plupart des cas, dues aux exploitations minières et à la combustion des énergies fossiles.

7.7.1. Le nickel

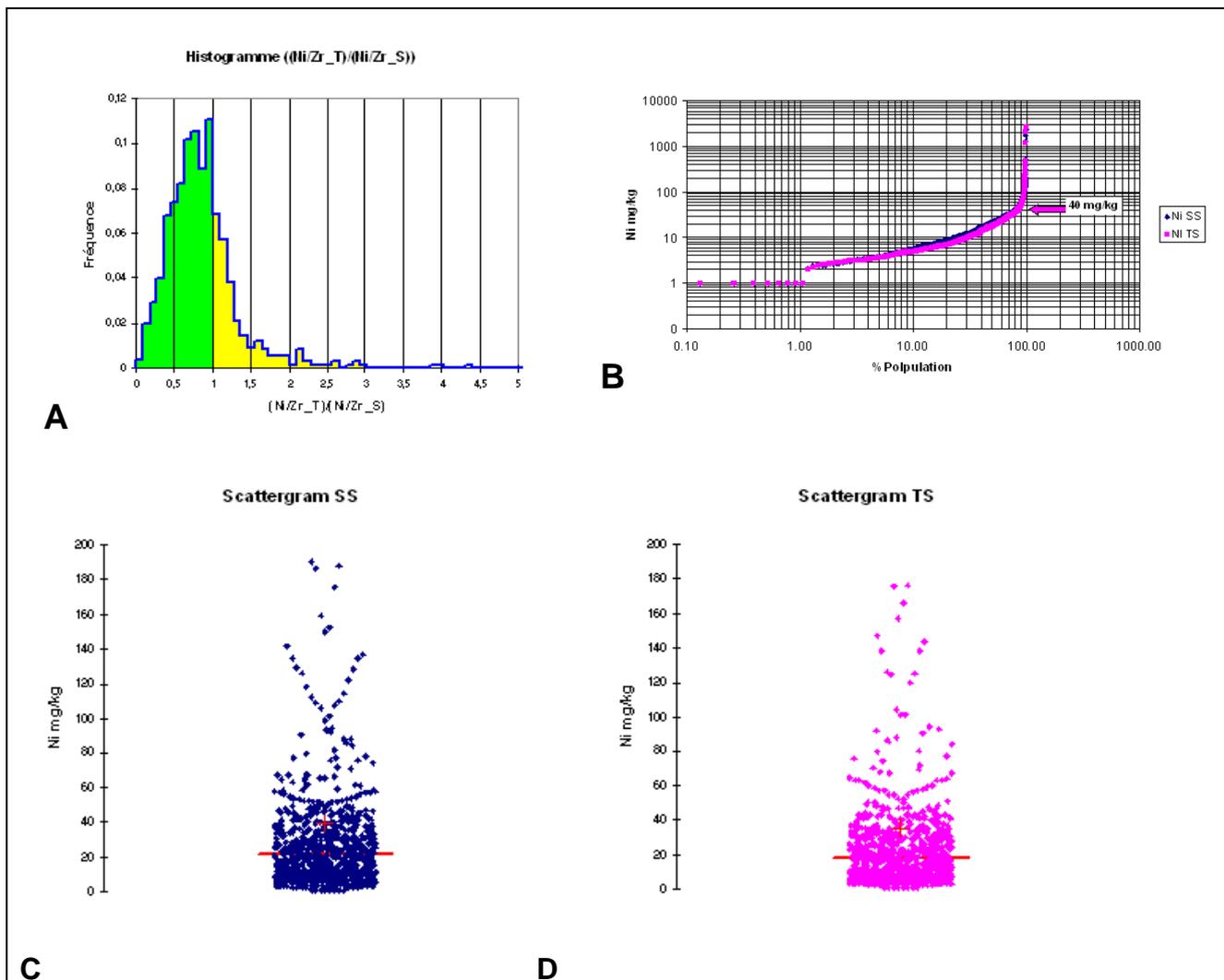


Figure 38 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du nickel.

A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en nickel des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le nickel est un élément sidérophile avec des affinités chalcophile et lithophile. Il forme des sulfures et est présent dans les silicates des roches basiques (olivine, pyroxène). Il est fortement enrichi dans les roches ultrabasiques à basiques. L’histogramme montre que le nickel est un élément peu mobile (plus de 70 % de la population inférieure à 1). Le fond moyen est estimé à 40 mg/kg. Il n’existe pas de différence entre les données de la partie supérieure et de la partie inférieure des sols.

7.7.2. Le cobalt

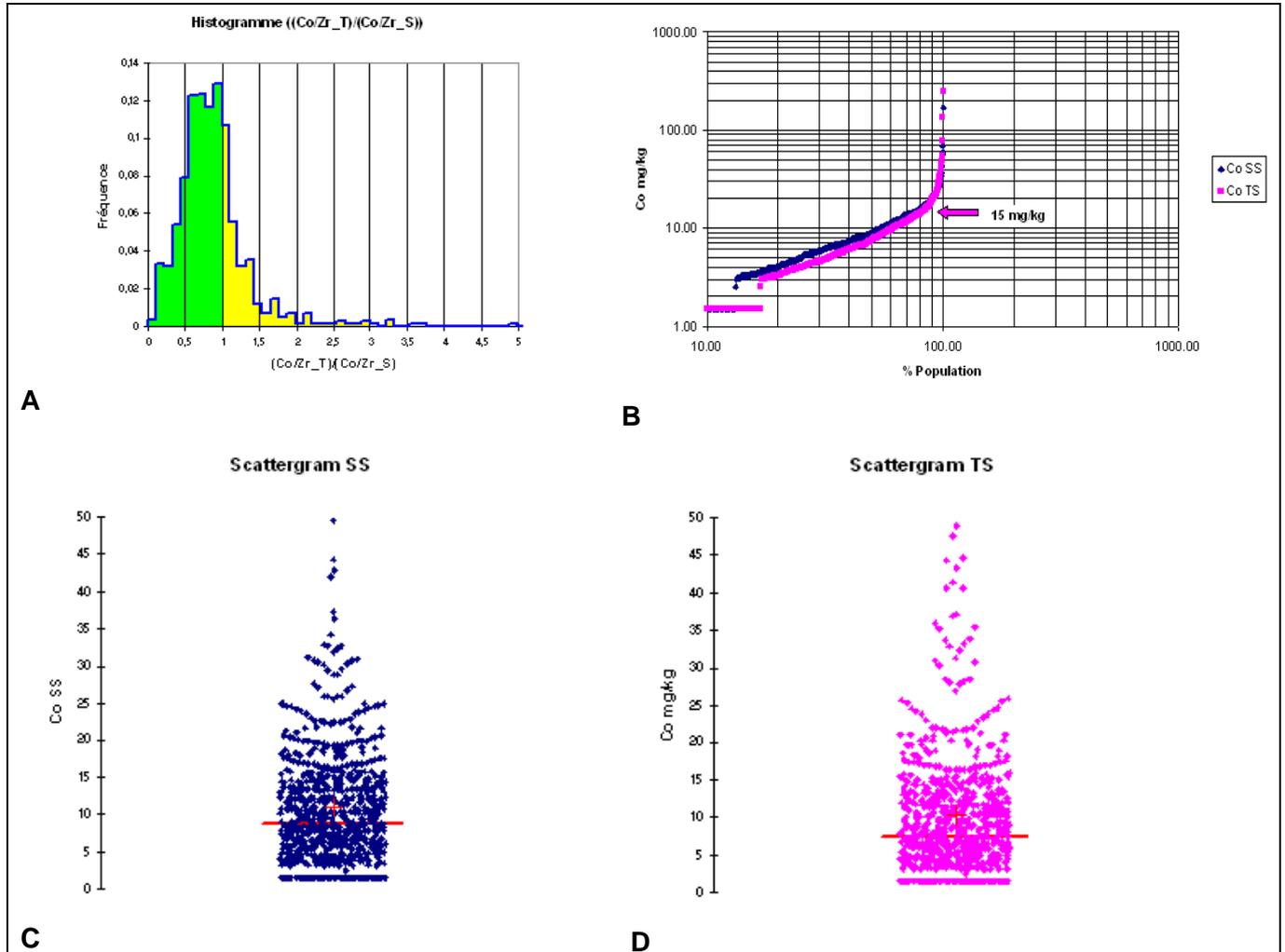


Figure 39 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du cobalt. A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en cobalt des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le cobalt est un élément chalcophile et sidérophile. Il forme rarement des sulfures. C'est un élément immobile (plus de 70 % de la population inférieur à 1, Figure 39-A). Il existe très peu de différence entre la partie supérieure et de la partie inférieure des sols. Le fond moyen est estimé à 15 mg/kg. Les sources anthropiques comprennent essentiellement la combustion du charbon, l'exploitation minière et les engrais.

7.7.3. L'argent

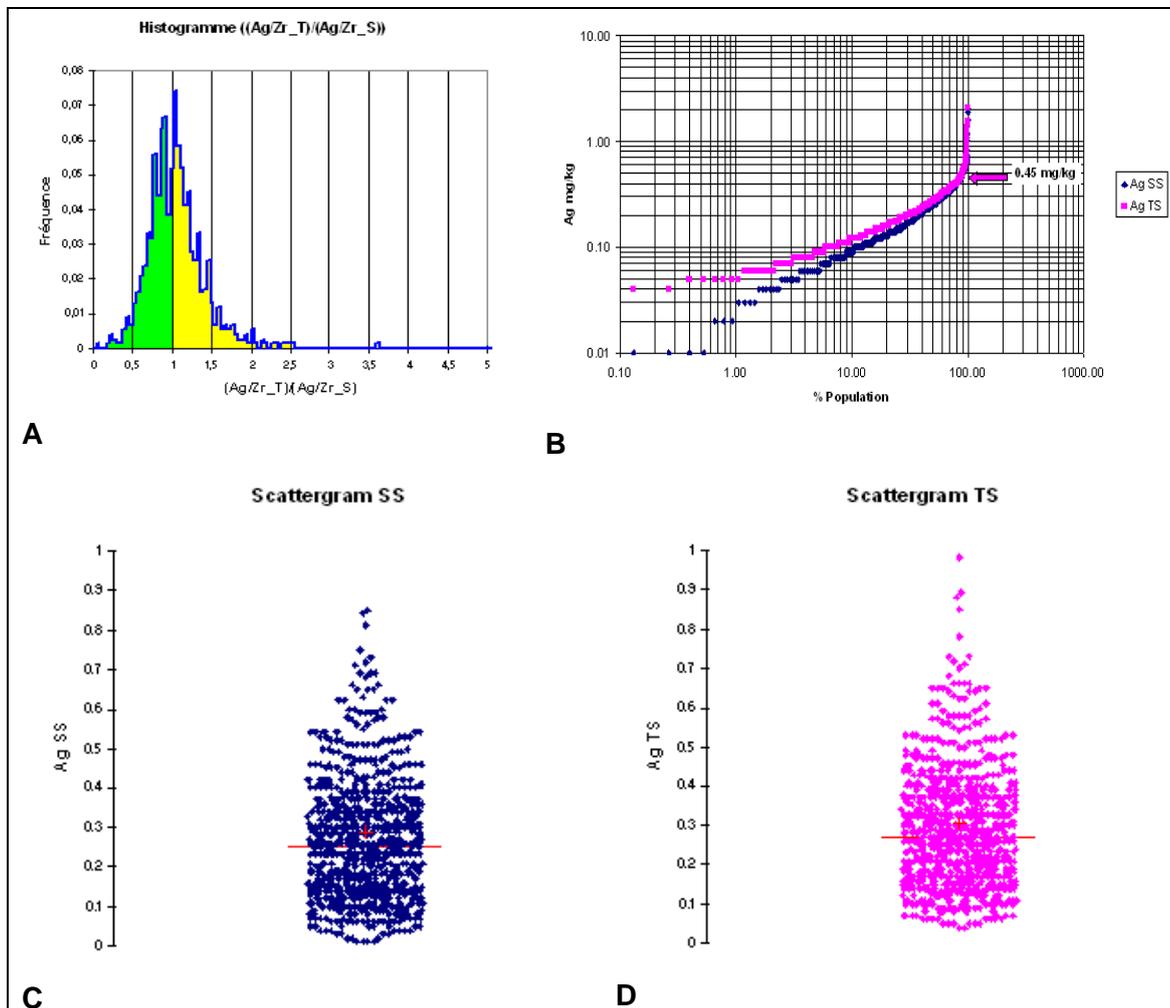


Figure 40 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas de l'argent.
 A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en cobalt des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

L'argent est un métal chalcophile souvent trouvé sous forme de traces dans les sulfures. Il existe un léger décalage entre les teneurs en argent des parties inférieure et supérieure du sol ; ceci s'explique par l'activité anthropique (dépôts aériens et fertilisation). Le fond moyen est estimé à 0,45 mg/kg.

7.7.4. Le thallium

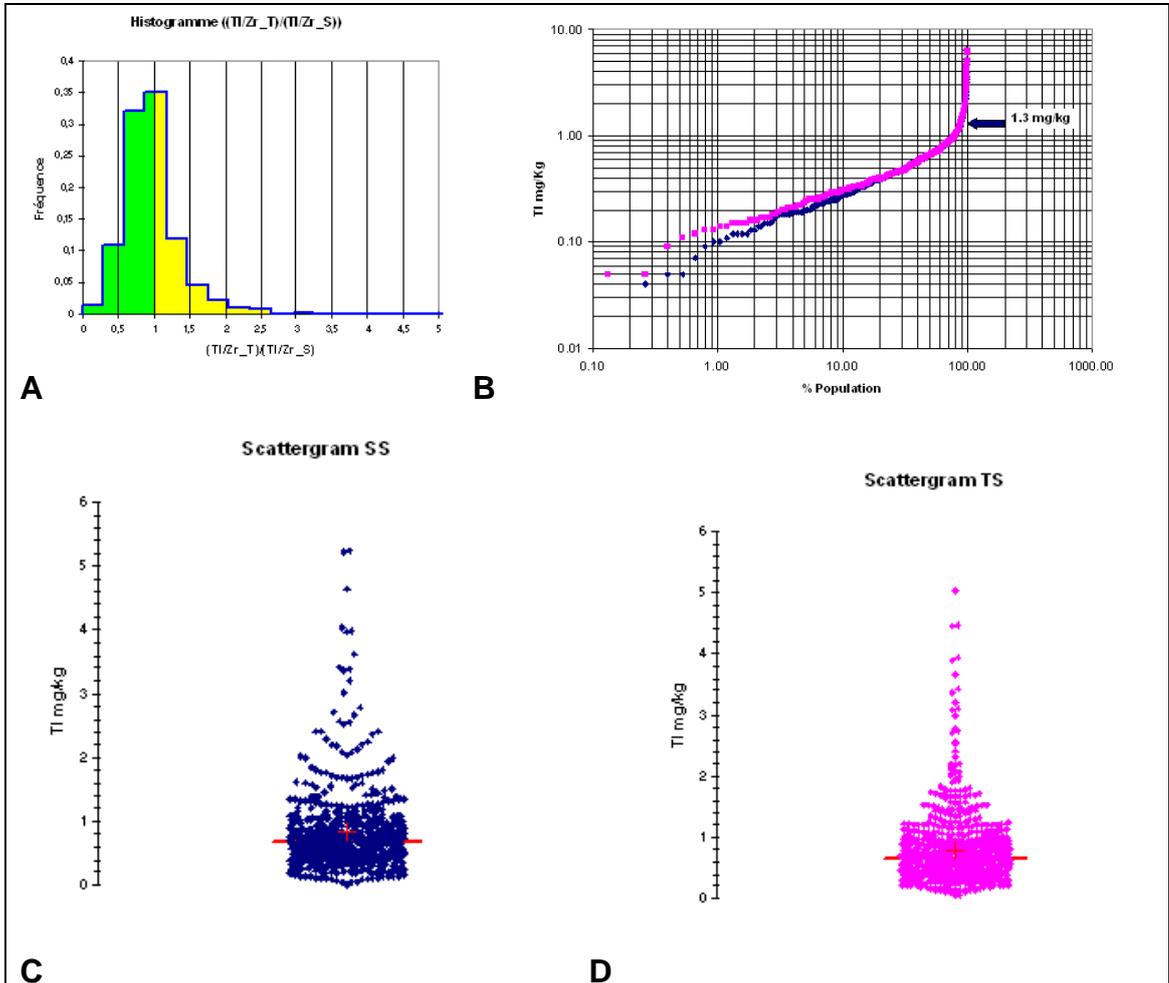


Figure 41 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas du thallium. A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en thallium des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le thallium est présent sous deux formes dans le milieu naturel : Tl(I) et Tl(III). Suivant l'activité du soufre dans le milieu, il peut avoir un comportement chalcophile (activité de S forte) ou lithophile (activité de S faible). Dans le premier cas, il aura tendance à se combiner dans les sulfures (pyrite FeS_2 , sphalérite $[\text{FeZnS}]$). Dans le second, il aura un comportement d'élément alcalin (Na, K...) et de fait, se substitue généralement au K ou Na des micas. Sa présence dans les sulfures peut expliquer des anomalies liées à l'activité de l'extraction des métaux par pyroméallurgie ou lors d'opérations de grillage liées à la production d'acide sulfurique, de clinker et au fonctionnement de centrales thermiques pour certains charbons (Ewers, 1988 ; Kanzantis, 2000).

Les valeurs dans la partie supérieure des sols sont légèrement supérieures à celles de la partie inférieure mais le bruit de fond est globalement identique (1,3 $\mu\text{g}/\text{kg}$).

7.7.5. Les phosphates

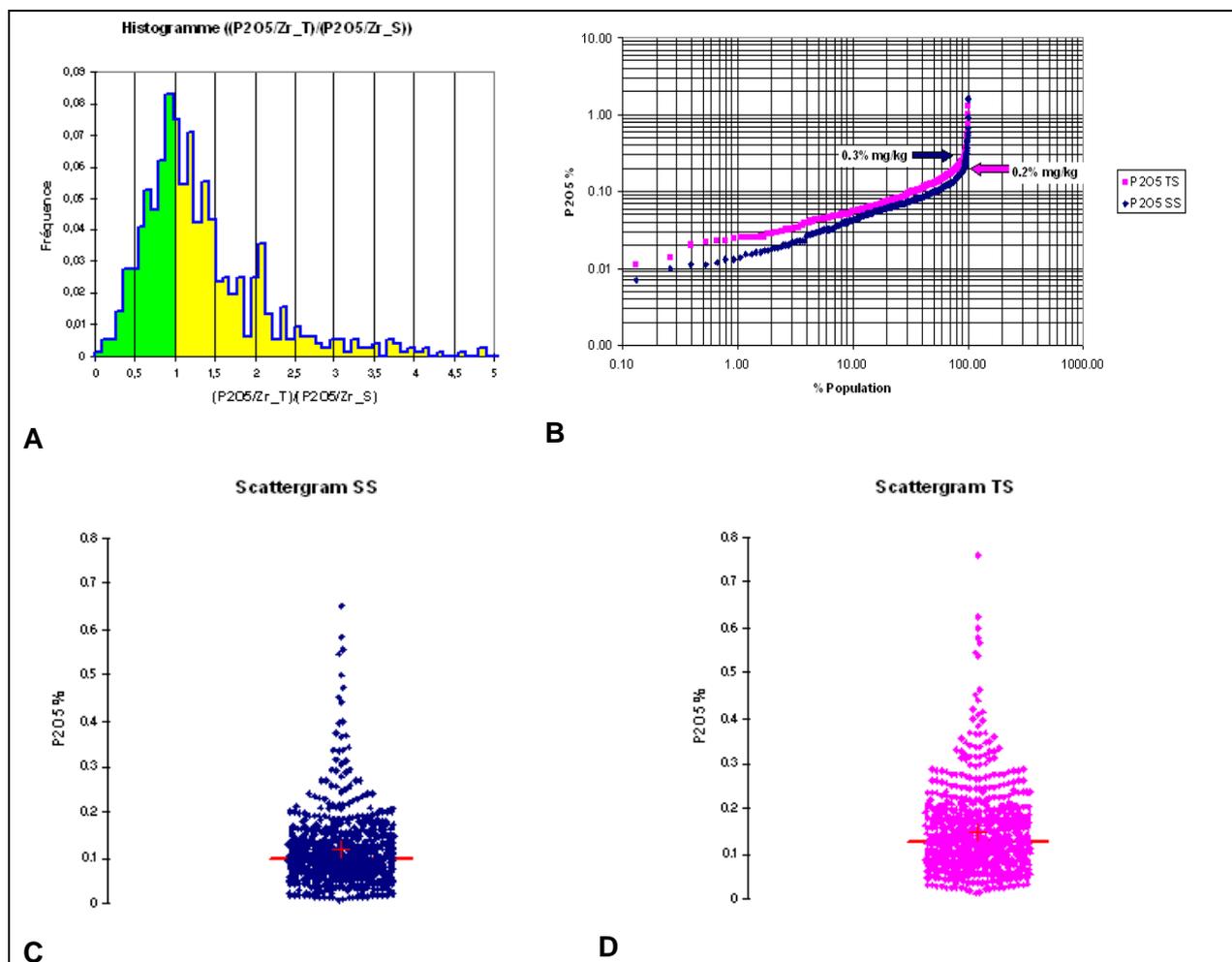


Figure 42 : Données issues du FOREGS (référentiel géochimique européen), cas des phosphates.

A) Histogramme de distribution du rapport R ; B) diagramme de distribution cumulée de la population versus les valeurs en phosphates des individus (TS : sol de surface, SS : sol profond) ; C) et D) diagramme de dispersion (Scattergram).

Le phosphore est le neuvième élément le plus abondant de la croûte terrestre. Il présente un comportement lithophile à sidérophile selon les conditions du milieu. Dans le milieu naturel il est surtout présent sous forme d'orthophosphate $[(\text{PO}_4)^{3-}]$, principalement sous forme d'apatite $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})]$, de monazite $[(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th}, \text{Sm})(\text{PO}_4, \text{SiO}_4)]$ et de xénotime $[\text{YPO}_4]$, mais aussi sous forme de nombreux minéraux secondaires comme les phosphates de plomb $[\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{OH})]$, les alumino-phosphates et les phosphates de fer. Les orthophosphates ont aussi une forte propension à piéger de nombreux ETM, soit en substitution des éléments alcalinoterreux qui les composent comme le calcium (Cd, Pb, Zn...), soit en substitution avec le groupement $[(\text{PO}_4)^{3-}]$ par $[(\text{AsO}_4)^{3-}]$, $[(\text{CrO}_4)^{2-}]$. Ces particularités font que le phosphore participerait à la fixation des ETM dans la partie superficielle des sols : l'exemple de la fixation du plomb issu de l'essence par de phosphates est patent

(Nriagu, 1973). La différence du bruit de fond entre la partie inférieure et la partie supérieure du sol peut être évaluée à environ 0,1 % avec une valeur de 0,2 % pour la partie inférieure du sol et 0,3 % pour la partie supérieure. Les sources anthropogéniques de phosphore comprennent les fertilisants, les eaux usées et les polyphosphates des détergents (Reimann and de Caritat 1998). Des concentrations élevées de phosphore sont constatées dans les régions où l'application des engrais est faite à grande échelle (plaines agricoles du Nord et du Nord-Est de l'Europe, Angleterre). Il faut aussi ajouter que le traitement des eaux usées apporte une quantité non négligeable de phosphore dans les eaux de rivières (Muscutt et Withers, 1996).

7.8. CONCLUSION

L'analyse comparée de la concentration des ETM les plus cités dans les sols (Hg, Pb, As, Cu, Zn, Cr, Cd, Mo, Ni, Co, Ag, Tl) montre qu'il existe partout des valeurs liées à l'activité anthropique et que le fond géochimique naturel n'est pas toujours discriminable.

Ainsi, les plus forts fonds « anthropisés » sont relevés par ordre d'importance de la population anormale pour le mercure, le cadmium, le molybdène, le plomb et l'argent. Pour le zinc, le cuivre et l'arsenic, bien que des valeurs marquées par l'activité humaine soient indéniables, il n'est pas possible de faire de différence entre le fond naturel et « anthropisé ».

Pour le chrome, le nickel et le cobalt, des valeurs « anthropisées » existent mais elles ne se démarquent pas ou peu des valeurs naturelles. Il n'existe aucune différence entre le fond naturel ou « anthropisé ».

Le terme « anthropisé » a été mis entre guillemets car au minimum deux cheminements aboutissant à la genèse d'anomalies de surface existent :

- à l'exemple du mercure, il est peu possible de douter que toutes les anomalies notées en surface sont d'origine anthropique en raison de sa volatilité et sa dispersion atmosphérique, ainsi que de sa concentration liée à des facteurs naturels comme sa complexation avec les matières organiques ;
- en revanche, pour un élément comme le plomb, bien qu'on ne puisse pas mettre en doute une bonne part de l'apport anthropique, sa concentration en surface est indéniablement liée au phosphore (moins aux carbonates). Mais le plomb a la triple particularité d'être apporté par l'homme lors de l'assolement, de s'accumuler naturellement en surface du fait de la « Vie »¹⁹ (cycle de la respiration des systèmes cellulaires, composé majeurs des ossements...), et d'être contenu dans des minéraux de phosphates stables quel que soit le pH du milieu. Ainsi la précipitation de phosphates de plomb explique pour partie la rémanence en surface de ce métal ;

¹⁹ « Vie » : au sens large.

- la même affinité du Cd pour le phosphore est relevée et sa présence sous forme de traces dans certains engrais phosphatés pose moins de questionnement sur son origine.

TOPSOIL														
Elément/Oxyde	P ₂ O ₅	Ag	Cd	Hg	As	Mo	Pb	Co	Ni	Cr	Cu	Zn	Fe	Tl
Unité	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
n	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758
Minimum	0,01	0,04	0,01	0,01	0,32	0,05	5,32	1,5	1	1,5	0,8	1,5	0,16	0,05
Maximum	1,30	2,06	14,10	1,35	282	11,5	970	249	2690	6234	215	2904	18,55	24
1 ^{er} Quartile	0,08	0,18	0,08	0,02	2,65	0,39	15,40	4	8,16	33,00	5,92	26,25	2,14	0,43
Médiane	0,13	0,27	0,14	0,04	6,7	0,62	22,15	7,49	17,6	60	12	51	3,47	0,66
3 ^{ème} Quartile	0,18	0,39	0,25	0,06	12,1	0,96	32,28	12,88	31,58	88	21	81	5,05	0,92
Moyenne	0,15	0,31	0,28	0,06	11,2	0,91	31,58	10,14	35,9	96	16,5	66	3,72	0,82
Variance (n)	0,01	0,04	0,52	0,01	403	1,26	3253	169	18539	87125	275	20471	4,75	1,11
Ecart-type (n)	0,10	0,20	0,72	0,10	20	1,12	57	12,99	136	295	16,6	143	2,18	1,05
Coef.Var.	0,71	0,64	2,61	1,72	1,79	1,24	1,81	1,28	3,79	3,08	1,01	2,17	0,59	1,28
SUBSOIL														
Elément/Oxyde	P ₂ O ₅	Ag	Cd	Hg	As	Mo	Pb	Co	Ni	Cr	Cu	Zn	Fe	Tl
Unité	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
n	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758
Minimum	0,007	0,00	0,005	0,001	0,00	0,00	1,5	0,1	1	3	0,000	1,5	0,11	0,000
Maximum	1,66	2,07	14,2	0,93	593	17,2	938	170	2400	2137	125	3062	15,6	21,3
1 ^{er} Quartile	0,07	0,15	0,05	0,01	2,42	0,32	12,6	5,03	10,50	34	7,20	26	2,4	0,44
Médiane	0,10	0,25	0,08	0,02	5,97	0,52	17,35	8,96	21,75	62	13,70	47	3,7	0,67
3 ^{ème} Quartile	0,14	0,36	0,15	0,04	12,05	0,90	24,9	14,48	37,35	95,00	21,80	75,00	5,43	0,97
Moyenne	0,12	0,29	0,19	0,04	10,91	0,82	23,5	11,1	39,6	87	16,9	61,5	4	0,82
Variance (n)	0,01	0,05	0,40	0,00	675	1,45	2056	110	15697	23592	219	15487	5,35	0,96
Ecart-type (n)	0,11	0,22	0,63	0,06	26	1,21	45,34	10,5	125	154	14,8	124	2,3	0,98
Coef.Var.	0,95	0,75	3,36	1,60	2,38	1,48	1,93	0,95	3,16	1,76	0,87	2,02	0,57	1,19

Tableau 2 : Paramètres statistiques élémentaires pour le sol supérieur (top soil) et sol inférieur (subsoil). En italique sont données les fourchettes pour les valeurs de sols ordinaires d'ASPITET (INRA).

8. Conclusions générales

La compilation de toutes les données disponibles à l'échelle du territoire français et européen montre la grande hétérogénéité des bases signalées et/ou disponibles sur le WEB. Cette grande diversité se marque aussi bien : i) dans l'objectif, recherche d'anomalies, surveillance de la qualité des sols ; que ii) dans la nature des échantillons analysés, pouvant aller d'un échantillon unique ou plusieurs échantillons prélevés sur une surface, différents niveaux, parfois regroupés en une prise unique ; iii) la nature de l'échantillon soumis à analyse, sol minéral et/ou organique, tamisé à des granulométries variables ; et enfin iv) que dans la variabilité intrinsèque des analyses faites aux laboratoires, protocoles (minéralisation partielle, minéralisation totale), méthodes analytiques mise en œuvres, composés et/ou éléments analysés.

Ainsi il apparaît nécessaire, *a minima* à l'échelle française, de favoriser la mise en place d'une structure publique permettant, d'une part, la mise à disposition des données par l'intermédiaire d'un portail et, d'autre part, la collecte et la mise en base des données géochimiques acquises sur les sols lors d'opérations publiques (recherche, état des lieux, prospection...) où à caractère réglementaire, dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués. L'état des lieux proposé dans cette étude doit constituer le socle de la discussion autour de laquelle des règles communes minimales (positionnement, données d'entrées, échantillonnage...) devraient être établies pour permettre d'autoriser une synergie pour en faciliter l'usage.

À partir de cette analyse, deux scénarios d'organisation d'un Système d'Information sur la géochimie des sols « Accessol » sont proposés. **Centralisé**, le plus lourd à mettre en place, par **l'établissement d'une base de données centralisée** à l'image de ADES avec la capitalisation des données existantes et des échanges de fichiers interopérables entre les différentes entités productrices de données. Un tel scénario s'appuie évidemment sur un pilotage très fort du système afin que chacun se responsabilise au regard de la fourniture de l'information. Des processus dédiés à la qualification de l'information publiée sont essentiels ainsi que des garanties sur les droits d'auteurs et droits *sui generis*. **Décentralisé**, plus souple et moins lourd pour la structure qui a la charge de sa gestion, **par la mise en place d'un portail d'accès à l'information géochimique** issue des différents partenaires en charge de la production et de l'acquisition. Ce scénario offre l'avantage d'être progressif, les partenaires adhérant en fonction de leurs capacités techniques. Par contre, s'il permet une vision globale de l'information géochimie, il est plus complexe de produire une information « unifiée ». Il est donc plus difficile pour les utilisateurs d'exploiter et revaloriser les données du portail car ces dernières sont éclatées dans les systèmes de base de données des partenaires. Ce scénario n'empêchera pas par la suite la mise en œuvre d'une base nationale en charge de l'alimentation/gestion des données non encore structurées par un acteur et un accès vers les données externes lorsqu'elles sont disponibles. Ce qui permet de se rapprocher progressivement du premier scénario.

À l'issue de l'étude de faisabilité, le référentiel géochimique européen (le seul complètement disponible sous forme de fichiers complètement « ouverts ») a été utilisé pour alimenter la réflexion sur l'usage des outils qui permettront d'analyser les grandes séries statistiques. Sur ce référentiel géochimique européen, des outils statistiques nécessaires pour assurer une analyse de la cohérence d'un set important de données (dans l'objectif de la bancarisation de données géochimiques), classer des populations, mettre en évidence des anomalies, des tendances, et proposer des démarches pour évaluer un « fond géochimique » ont été mis en œuvre. À l'issue de ces travaux, deux empreintes de fond géochimique à l'échelle de l'Europe ont été mises en évidence (Pb, Hg, Cd...) et une démarche calibrée pour faciliter cette recherche est discutée et proposée. Tout a été rédigé de manière assez détaillée pour fournir par la suite, d'une part, des schémas adaptables aux diverses situations de gestion du SI et, d'autre part, la matière à l'écriture de guides qui viendront en appui dans le cadre de la mise en œuvre de la méthodologie de gestion des sites pollués, à savoir la caractérisation géochimique de « l'état des lieux » d'un site.

La poursuite de ce travail ne pourra se faire sans une collaboration avec l'INRA qui, dans le cadre du Gis Sol créé en 2001 (MAAP, MEEDDM, INRA, ADEME, IRD), constitue et gère un système d'information sur les sols de France, le RMQS, qui est la plus importante base de données sur les sols en France. Elle devra aussi s'appuyer :

- sur les actions des Inspecteurs des Installations Classées (IC) qui ont pour missions, entre autres, les suivis de la réhabilitation des sols pollués, de l'article 30 de l'arrêté du 20 septembre 2002 sur la surveillance des incinérateurs, le suivi environnemental des IC dans le cas de changement d'activités... ;
- les actions locales ou régionales déterminées par les « syndicats territoriaux » dans l'objectif d'accomplir des bilans environnementaux à l'échelle de zones urbaines, ou de régions ;
- sur un dialogue avec les bureaux d'études pour optimiser la définition des outils et des démarches nécessaires pour la définition des anomalies et des fonds géochimiques.

9. Bibliographie

Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong-Brown S., Loveland P., Coulter B. (1998) - Soil monitoring networks in Europe. 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France, August 1998.

Bauer I., Bor J. (1993) - Vertikale Bilanzierung von Schwermetallen in Böden – Kennzeichnung der Empfindlichkeit der Böden gegenüber Schwermetallen unter Berücksichtigung von lithogenem Grundgehalt, pedogener An- und Abreicherung sowie anthropogener Zusatzbelastung, Teil 2. Texte 56 Umweltbundesamt, Berlin

Bauer I., Bor J. (1995) - Lithogene, geogene und anthropogene Schwermetallgehalte von Lössböden an den Beispielen von Cu, Zn, Ni, Pb, Hg und Cd. *Mainzer Geowiss Mitt* 24 : p. 47–70.

Bauer I., Sprenger M., Bor J. (1992) - Die Berechnung lithogener und geogener Schwermetallgehalte von Lössböden am Beispiel von Cu, Zn und Pb. *Mainzer Geowiss Mitt* 21, 7–34.

Benedetti M.F., Van Riemsdijk W.H., Koopal L.K., Kinniburgh D.G., Goody D.C., Milne C.J. (1996) - Metal ion binding by natural organic matter: From the model to the field. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(14): p. 2503-2513.

Bjerrum N. (1936) – Inorganic chemistry translated by R. P. Bell. London W. Heinemann, 817 p.

Brimhall G.H., Dietrich W.E. (1987) - Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51, 567–587.

Chiarello R.P., Sturchio N.C., Grace J.D., Geissbuhler P., Sorensen L.B., Cheng L. and Xu S. (1997) Otavite–calcite solid-solution formation at the calcite-water interface studied *in situ* by synchrotron X-ray scattering. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, p. 1467–1474.

Darmendrail D., Baize D., Barbier J., Freyssinet P., Mouvet C., Salpéteur I., Wavrer P. (2000) - Fonds géochimique naturel : État des connaissances à l'échelle nationale. Rapport BRGM/RP-50158-FR. 93 p.

Darnley A.G., Björklund A., Bølviken B., Gustavsson N., Koval P.V., Plant J.A., Steenfelt A., Tauchid M., Xuejing Xie., Garrett R.G. & Hall G.E.M. (1995) - A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management. Recommendations for International Geochemical Mapping – Final Report of IGCP Project 259. Earth Science Report 19. UNESCO Publishing, Paris, 122 p.

Davis J.A. and Kent D.B. (1990) - Surface complexation modeling in aqueous geochemistry. In *Mineral–Water Interface Geochemistry* (eds. M. F. Hochella and A. F. White), p. 177–260. *Reviews in Mineralogy* 23. American Mineralogical Society.

Egli M. et Fitze P. (2000) - Formulation of pedologic mass balance based on immobile elements: a revision. *Soil Science* 165, p. 437-443.

Egli M., Fitze P. et Mirabella A. (2001) - Weathering and evolution of soils formed on granitic, glacial deposits: results from chronosequences of Swiss alpine environments. *Catena*, 45, p. 19-47.

Ellert B.H. et Bettany J.R. (1995) - Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.*, 75, p. 529-538.

Erhardt W., Höpker K.A., Fischer I. (1998) - Verfahren zur Bewertung von immissionsbedingten Stoffanreicherungen in standardisierten Graskulturen. V : Auswertung und Darstellung von Meßergebnissen aus Bioindikationsverfahren. *Z Umweltchem Ökotox*, 8, p. 237–240.

Ewers U. (1988) - Environmental exposure to thallium. *Sci. Total Environ*, 71, p. 285-292.

F.A.O./ECE (1994) - International Workshop on Harmonisation of Soil Conservation Monitoring Systems. FAO-FAO/ECE-RISSAC. Budapest.

FOREGS Geochemical Baseline Mapping Programme
<http://www.gsf.fi/foregs/geochem/>

GIS SOL (2005) – La lettre du Gis Sol. N° 7, Novembre 2005.

GIS SOL (2006) – La lettre du Gis Sol. N° 9, Juillet 2006.

GIS SOL (2008) – La lettre du Gis Sol. N° 15, Juin 2008.

Graf U., Henning H.J. (1952)- Zum Ausreißerproblem. *Mitteilungsbl Math Statistik* 4, not paginated.

Kabata-Pendias A. (2000) - Trace elements in soils and plants. Third Edition, CRC Press, NY.

Kazantis G. (2000) - Thallium in the environment and health effects. *Environmental Geochemistry and Health* 22, p. 275-280.

King D. et Montanarella L. (2002) - Inventaire et surveillance des sols en Europe. *Etude et gestion des Sols*, 9, 2, p. 137-148.

Königsberger E., Hausner R. and Gamsjäger H. (1991) - Solid-solution phase equilibria in aqueous solution. V: The system CdCO₃-CaCO₃- CO₂-H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, p. 3505-3514.

Lepeltier C. (1969) – Simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*, 64, p. 538-550.

Lerouge C, Deschamps Y., Piantone P., Gilles C. and Breton J. (2007) - Metal-carrier accessory minerals associated with W ± Sn mineralization, La Châtaigneraie tungsten ore district, Massif Central, France. *Canadian Mineralogist*, 4, p. 875-889.

Lewis H. (1925) - The metabolism of sulphur : IX The effect of repeated administration of small amounts of cystine. *J. Biol. Chem.*, 65, p. 187-195.

Lorens R.B. (1981) - Sr, Cd, Mn and Co distribution coefficients in calcite as a function of calcite precipitation rate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, p. 553–561.

Martin-Garin A., Van Cappellen P., Charlet L. (2003) - Aqueous cadmium uptake by calcite: A stirred flow-through reactor study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, p. 2763-2774.

Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C. (2000) - Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology*, 39, p. 990-1000.

McBride M.B. (1980) - Chemisorption of Cd₂₊ on calcite surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, p. 26–28.

Mihaljevic M. (1999) - Zinc. In C.P. Marshall and R.W. Fairbridge, Eds., *Encyclopedia of Geochemistry*, p. 67-675. Kluwer, Dordrecht.

Morvan X., Richer de Forges A., Arrouays D., Le Bas C., Saby N. et al. (2008). Une analyse des stratégies d'échantillonnage des réseaux de surveillance de la qualité des sols en Europe. *Etude et gestion des Sols*, 14, 4, p. 317-325.

Mouline M.P. (1983) - Les accidents siliceux dans les calcaires lacustres du Castrais et de l'Albigeois. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7, t XXV(1): p. 51-56.

Muscutt A.D. et Withers P.J.A. (1996) - The phosphorus content of the rivers in England and Wales. *Water Res.*, 30, p. 1258-1268.

Nelson Y.M., Lo W., Lion L.W., Shuler M.L. & Ghiorse W.C. (1995) - Lead distribution in a simulated aquatic environment: effect of bacterial biofilms and iron oxide. *Water Res.* 29, p. 1934-1944.

Nriagu J.O. (1974) - Lead orthophosphate. II. Stability of chloropyromorphite at 25°C. *Geochim Cosmochim Acta*, 37, p. 367-377.

Papadopoulos P. and Rowell D.L. (1988) - The reaction of cadmium with calcium carbonate surfaces. *J. Soil Sci.* 39, p. 23-36.

Pearson R.G. (1963) - Hard and Soft Acids and Bases. *Journal Am. Chem. Soc.*, 25, p. 3533-3539.

Probst A., Hernandez L., Février-Vauleon C., Prudent P., Probst J.L., Party J.P. (2003) - Éléments traces métalliques dans les sols des écosystèmes forestiers français : distribution et facteurs de contrôle – Utilisation du réseau RENECOFOR. ONF, 69 p.

Puddephatt R.J. (1972) - The Periodic Table of the Elements, Oxford University Press, Oxford.

Reeder R.J. (1996) - Interaction of divalent cobalt, zinc, cadmium, and barium with the calcite surface during layer growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, p. 1543-1552.

Reimann C. et Caritat P. de (1998) - Chemical Elements in the Environment. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag, 398 p.

Séry A., Manceau A. et Greaves G.N. (1996) - Chemical state of Cd in apatite phosphate ores as determined by EXAFS spectroscopy, *Am Mineral* 81 p. 864-73.

Saby N., Schwartz C., Walter C., Arrouays D., Lemercier B., Roland N., Squividant H. (2004) - Base de Données des analyses de Terre : procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000, *Etude et gestion des Sols*, 11, 3 p. 235-254

Sénat français (2001) - Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport d'information au Sénat français N° 261, déposé le 5 avril 2001.

Sterckeman T., Douay F., Fourrier H. et Proix N. (2002) - Référentiel Pédogéochimique en région Nord – Pas-de-Calais. 130 p.

Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Schwartz C. (2004) - Factors affecting trace element concentrations in soils developed on recent marine deposits from northern France, *Applied Geochemistry*, 19: p. 89-103.

Stipp S.L., Hochella M.F., Parks G.A. and Leckie J.O. (1992) - Cd²⁺ uptake by calcite, solid-state diffusion, and the formation of solid solution: Interface processes observed with near-surface sensitive techniques (XPS, LEED, and AES). *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, p. 1941-1954.

Tesoriero A.J. and Pankow J.F. (1996) - Solid solution partitioning of Sr²⁺, Ba²⁺, and Cd²⁺ to calcite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, p. 1053-1063.

Thiry M., Delaunay A., Dewolf Y., Dupuis C., Ménillet F., Pellerin J., Rasplus L. (1983) - Les périodes de silicification au Cénozoïque dans le Bassin de Paris. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7(25): p. 31-40.

Villanneau E., Perry-Giraud C., Saby N., Jolivet C., Marot F., Maton D., Floch-Barneaud A., Antoni V. et Arrouays D. (2008) - Détection de valeurs anormales

d'éléments traces métalliques dans les sols à l'aide du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 15,3, 2008, p. 183-200.

Weijden R. van der (1995) - Interactions between cadmium and calcite. Ph.D. thesis. Utrecht University.

Zachara J.M., Cowan C.E. and Resch C.T. (1991) - Sorption of divalent metals on calcite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, p. 1549–1562.

Annexe 1

Modèle commun de base de données sols

Programme	Nom du programme			
	Nom des responsables			
	Financement			
	Institut			
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement			
	Profondeur base			
	Profondeur sommet			
	Commentaires			
	Photographies			
	Localisation échantillons stockés			
	Période d'acquisition			
	Laboratoire d'analyse			
	Date d'analyse			
	Contamination anthropique du site			
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés	
			Horizon	
			Profondeur, cm	
		Horizons de surface	Nomenclature	
			Profondeur, cm	
		Horizons de profondeur	Nomenclature	
	Profondeur, cm			
	Sol développé sur alluvions			
	Litière			
	Sédiments	Floodplain		
		Sédiment de berges		
		Fond de vallon sec		
Limons d'inondation				
Alluvions de ruisseau				
Sédiments de drain court				
Roche				
Prélèvement	Nombre de sites			
	Densité échantillonnage			
	Méthode de prélèvement	Surface		
		Profondeur		
Quantité matériel brut				
Localisation site	Département			
	Nom localité			
	Carte IGN			
	Carte géologique			
	X L2			
	Y L2			
Z				
Niveau de précision du géoréférencement				
Descriptif	Occupation	Cultivé	Épandage de boues	
			Aucun épandage	
			Sans contamination humaine	
			Non précisé	
		Non cultivé		
		Forêt		
	Marécages			
	Friche			
	prairie			
	autre			
	Lithologie environnante	Granite		
		Gneiss, schistes		
		Roche sédimentaire		
		Roche volcaniques		
		Roche volcano-sédimentaire		
Grès, schistes et poudingue houilliers				
Végétation environnante				
Hydromorphie	Sec			
	Humide			

		Non précisé				
	Nomenclature	FAO				
		Référentiel pédologique				
		Légende RP2				
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon					
	Pré-traitement granulométrique					
	Fraction analysée	> 2 mm				
		< 2 mm	granulométrie			
			broyage pour chimie			
		< 100 µm				
	Séchage	< 125 µm				
		Air				
		Etuve				
		Teneur en eau résiduelle après séchage à 105 °C				
Echantillonnage	Humidité					
	Réduction des échantillons composites après séchage					
Traitement matières organiques	autre					
	Conservées					
Granulométrie	5 fractions non décarbonaté		A 0-2 µm			
			LF 2-20 µm			
			LG 20-50 µm			
			SF 50-200 µm			
			SG 200-2000 µm			
	Granulométrie autre					
	Texture	Dominante				
		Secondaire				
		Classe texture FAO				
		Classe texture GEPPA				
Matière organique-	Méthode de	Anne-	Oxydation			
Paramètres pédologiques	carbone	dosage du carbone	MO par dichromate de K en milieu sulfurique, X 31-109			
			Oxydation par voie humide, Walkley-Black			
			Méthode combustion sèche			
			autre			
		Teneur en carbone organique				
		Méthode de dosage des matières humiques				
		Teneur en matières humiques				
		Perte au feu				
	Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau	Méthode pour C _{org} soluble				
		Méthode pour C _{tot} soluble				
		Teneur du carbone soluble dans l'eau	Carbone organique			
	Calcaire total	Méthode de dosage	Carbone total			
			Calcimétrie volumétrique			
	Calcaire actif	teneur	Autre ou non précisé			
	Carbonates	Méthode de dosage				
			teneur			
	Azote	Teneur en N _{tot}				
Méthode de dosage de N _{tot}			Kjeldahl			
		combustion sèche				
Teneur en N _{org}						
Méthode de dosage de N _{org}						
Teneur en N _{minéral}						
Méthode de dosage de N _{minéral}						
Teneur en N _{ammoniacal}						

	hydraulique	laboratoire	
--	-------------	-------------	--

Paramètres analytiques	Méthode de minéralisation	Type d'attaque	Norme	
	HF + HClO ₄ + HNO ₃			
	HF + HClO ₄ + HCl			
	HF + HClO ₄			
	Frittage Na ₂ O ₂			
	1g éch + HNO ₃			
	HCl+ HNO ₃ (eau régale)			
	Autre			
	Instrument de mesure			
	Quantomètre			
DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)				
ICP-AES			X	
Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)				
ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)				
ICP-MS			o	
Spectrométrie d'absorption atomique				
Fluorescence RX (XRF)				
Na ₂ O ₂ + Citrate				
Colorimétrie				
Potentiométrie				
Ionométrie / dosage par électrode spécifique				
Lab de Pathologie végétale, Essey-les-Nancy				
BRGM				

Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
Ag			
Au			
Al			
Al ₂ O ₃			
As			
B			
Ba			

Be			
Bi			
Br			
Ca			
CaO			
Cd			
Ce			
Cl			
Co			
Cr			
Cu			
Dy			
Er			
Eu			
Fe			
Fe ₂ O ₃			
Ga			
Gd			
Ge			
Hf			
Ho			
K			
K ₂ O			
In			
La			
Li			
Lu			
Mg			
MgO			
Mn			
MnO			
Mo			
Na			
Na ₂ O			
Nb			
Nd			
Ni			
P ₂ O ₅			
Pb			
Pr			

Rb			
Sb			
Se			
Sc			
SiO ₂			
Sm			
Sn			
Sr			
Ta			
Tb			
Th			
Ti			
TiO ₂			
Tl			
Tm			
U			
V			
W			
Y			
Yb			
Zn			
Zr			
Perte au feu			
F sol, ppm			
F sol, ppm			
F eau, ppb			
Indice phénols			
Hg			
CH ₂			
Cyanures totaux			
HAP			
PCB			
Paramètres statistiques élémentaires	Effectif		
	Minimum		
	Maximum		
	Moyenne		
	Médiane		
	1 ^{er} quartile		
	1 ^{er} décile		
2 ^{ème} quartile			
	3 ^{ème} quartile		
	9 ^{ème} décile		
	90 ^{ème} centile		
	Dernier quartile		
	Dernier décile		
	Indice de dispersion (max-min)/moy		
	Vibrisse inf		
Vibrisse sup			
Précautions d'usage			

Annexe 2

Base de données BDETM

		Humide			
		Non précisé			
	Nomenclature	FAO			
		Référentiel pédologique		X	
		Légende RP2			
		autre		X	
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon				
	Pré-traitement granulométrique				
	Fraction analysée	> 2 mm			
		< 2 mm	granulométrie		X
			broyage pour chimie		
		< 100 µm			
	< 125 µm				
	Séchage	Air			
		Etuve			
		Teneur en eau résiduelle après séchage à 105 °C			
Echantillonnage	Humidité				
	Réduction des échantillons composites après séchage				
Traitement matières organiques	autre				
	Conservées				
		Détruites			
Granulométrie	5 fractions non décarbonaté	A 0-2 µm	X		
		LF 2-20 µm	X		
		LG 20-50 µm	X		
		SF 50-200 µm	X		
		SG 200-2000 µm	X		
	Granulométrie autre				
	Texture	Dominante			
Secondaire					
Classe texture FAO					
Paramètres pédologiques	Classe texture GEPPA				
	Matière organique-carbone	Méthode de dosage du carbone	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique, X 31-109		
			Oxydation par voie humide, Walkley-Black		
			Méthode combustion sèche		
			autre		
			Non précisé	X	
		Teneur en carbone organique			
	Méthode de dosage des matières humiques				
	Teneur en matières humiques				
	Perte au feu				
	Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau	Méthode pour C _{org} soluble			
		Méthode pour C _{tot} soluble			
	Teneur du carbone soluble dans l'eau	Carbone organique			
		Carbone total			
	Calcaire total	Méthode de dosage	Calcimétrie volumétrique		
			Autre ou non précisé	X	
	teneur		X		
Calcaire actif	Méthode de dosage				
	teneur				
Carbonates	Méthode de dosage				
	teneur				
Azote	Teneur en N _{tot}				
	Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl			
		combustion sèche			
	Teneur en N _{org}				
Méthode de dosage de N _{org}					

		Teneur en N _{minéral}		
		Méthode de dosage de N _{minéral}		
		Teneur en N _{ammoniacal}		
		Méthode de dosage de N _{ammoniacal}		
	C/N			
	P ₂ O ₅ assimilable	Extractible méthode Joret-Hébert		
		Extractible méthode Dyer		
		Extractible méthode Olsen		
	pH sol	pH _{eau}	X	
		dilution	X	
		pH _{KCl}		
		dilution		
		pH _{CaCl2}		
		dilution		
	CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium	?
			Méthode Rhiem oxalate d'ammonium	
			CaCl2 0.1M	
			BaCl2(Mehlich) à pH 8.2	
			autre	
	CEC effective	Méthode de dosage	chlorure de cobaltihexamine	
			BaCl ₂	
			échange KCl	
			chlorure d'ammonium NH4Cl 0.5M	
			Non précisé	
		Valeur de CEC _{eff}		
	Cations échangeables	Méthodes	identique à dosage CEC	
			identique à dosage CEC _{eff}	
			KCl	
			Non précisé	
				Ca ²⁺ _{ech}
		K ⁺ _{ech}		
		Mg ²⁺ _{ech}		
		Na ⁺ _{ech}		
		H ⁺ _{ech}		
		Al ³⁺ _{ech}		
		Fe ²⁺ _{ech}		
		Mn ²⁺ _{ech}		
	Taux de saturation	Méthode de dosage teneur		
	Fer	Méthode de dosage du fer _{total}		
		Teneur en fer _{total}		
		Méthode de dosage du fer libre	Tamm	
			Mehra Jackson, CBD	
		autre		
		Teneur en Fer libre		
	Al	Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm	
			autre	
		Teneur en Al _{libre}		
		Méthode de dosage de Al _{extractible}		
		Teneur en Al _{extractible}		
	Cations extractibles EDTA	Méthode	Extraction EDTA	
			EDTA – BCR non tamponné, méthode INRA	
			autre	
		Cu _{ext}		
		Zn _{ext}		
		Mn _{ext}		
		Co _{ext}		
		Ni _{ext}		
	Pb _{ext}			
	B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau		
		teneur		
Propriétés physiques	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}		
		D _{app}		

	Conductivité hydraulique	Méthode de mesure	terrain	
			laboratoire	
		Conductivité hydraulique	terrain	
			laboratoire	

	Méthode de minéralisation	Type d'attaque	Norme
	HF + HClO ₄ + HNO ₃		
HF + HClO ₄ + HCl			
HF + HClO ₄		X, NF X 31-147	
Frittage Na ₂ O ₂			
1g éch + HNO ₃			
HCl + HNO ₃ (eau régale)		X, NF ISO 11466	
Autre			
	Instrument de mesure		
Paramètres analytiques	Quantomètre		
	DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)		
	ICP-AES		X
	Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)		
	ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)		
	ICP-MS		o
	Spectrométrie d'absorption atomique		
	Fluorescence RX (XRF)		
	Na ₂ O ₂ + Citrate		
	Colorimétrie		
	Potentiométrie		
	Ionométrie / dosage par électrode spécifique		
	Lab de Pathologie végétale, Essey-le-s-Nancy		
	BRGM		

Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
Ag			
Au			
Al			
Al ₂ O ₃			
P ₂ O ₅			
Pb	x		
Pr			
Rb			
Sb			
Se	x		
Sc			
SiO ₂			
Sm			
Sn			
Sr			
Ta			
Tb			
Th			
Ti			
TiO ₂			
Tl			
Tm			
U			
V			
W			
Y			
Yb			
Zn	x		
Zr			
Perte au feu			
F sol, ppm			
F sol, ppm			
F eau, ppb			
Indice phénols			
Hg	x		
CH ₂			
Cyanures totaux			
HAP			
PCB			
Paramètres statistiques élémentaires	Effectif	x	
	Minimum	x	
	Maximum	x	
	Moyenne	x	
	Médiane	x	

	1 ^{er} quartile	X	
	1 ^{er} décile		
	2 ^{ème} quartile		
	3 ^{ème} quartile	X	
	9 ^{ème} décile	X	
	90 ^{ème} centile		
	Dernier quartile		
	Dernier décile		
	Indice de dispersion (max-min)/moy		
	Vibrisse inf	x	
	Vibrisse sup	x	
Précautions d'usage		x	

Annexe 3

Base de données RMQS

Programme	Nom du programme		RMQS – financement GISSOL	
	Nom des responsables		Claudy Jolivet : claudy.jolivet@orleans.inra.fr	
	Financement		Fonds publics	
	Institut		INRA, Unité Infosol, Orléans	
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement		X	
	Profondeur base		X	
	Profondeur sommet		X	
	Commentaires		X	
	Photographies			
	Localisation échantillons stockés		Conservatoire national d'échantillons de sols, INRA d'Orléans	
	Période d'acquisition		X	
	Laboratoire d'analyse		INRA ARRAS	
	Date d'analyse		X	
	Contamination anthropique du site			
Données	Accessibilité - localisation		INRA Orléans, certains résultats accessibles par la base de données INDIQUASOL : http://indiquasol.orleans.inra.fr/geoindiquasol/index.php	
	Etat (brutes ou traitées)		Traitées, Les différentes sources de données, au format raster ou vecteur, sont croisées avec la grille de maille 16*16 km du RMQS à l'aide d'un Système d'Information Géographique. La valeur retenue est soit la valeur dominante de l'indicateur pour les données qualitatives, soit le résultat d'un calcul statistique (somme, moyenne, minimum, etc...) pour les données quantitatives.	
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés	
			Horizon	
			Profondeur, cm	
		Horizons de surface	Nomenclature	OF, OH et description avec code Munsell horizon labouré
			Profondeur, cm	X
Horizons de profondeur	Nomenclature	X		
Sédiments		Profondeur, cm	X, 30-50 cm	
		Sol développé sur alluvions		
		Litière		
		Floodplain		
		Sédiment de berges		
		Fond de vallon sec		
		Limos d'inondation		
	Alluvions de ruisseau			
Sédiments de drain court				
Roche				
Prélèvement	Nombre de sites		2150 sites, 295 horizons analysés	
	Densité échantillonnage		X	
	Méthode de prélèvement	Surface	Grille de maille carrée de 16 km de côté dans laquelle on définit des carrés de 20 m de côté, de sol naturel ou cultivé, avec au moins 1000 m ² homogènes (couleur, régime hydrique, précédents culturaux, couverture, végétation, topographie). Une fosse est creusée si possible jusqu'au matériau parent.	
		Profondeur		
Quantité matériel brut				
Localisation site	Département		X	
	Nom localité		X	
	Carte IGN		X	
	Carte géologique			
	X L2		X	
	Y L2		X	
Z				
Niveau de précision du géoréférencement		Les indicateurs environnementaux du RMQS sont calculés à partir de bases de données nationales (Corine land cover, Modèle Numérique d'Altitude, Carte Pédologique de la France au 1/1 M, Recensement Agricole 2000, Recensements INSEE, BASOL sites et sols pollués, Base de Données du Référentiel Hydrogéologique Français, etc...)		
Occupation	Cultivé	Epandage de boues	X	
		Aucun épandage	X	
		Sans contamination humaine	Avec ou sans	
		Non précisé		
Non cultivé		X		

Descriptif		Forêt			X	
		Marécages			X	
		Friche			X	
		prairie			X	
		autre				
	Lithologie environnante	Granite				X
		Gneiss, schistes				X
		Roche sédimentaire				X
		Roche volcaniques				X
		Roche volcano-sédimentaire				X
	Végétation environnante	Grès, schistes et poudingue houilliers				X
		X décrite				
	Hydromorphie	Sec				X
Humide					X	
Non précisé						
Nomenclature	FAO					
	Référentiel pédologique					
	Légende RP2					
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon					
	Pré-traitement granulométrique					
	Fraction analysée	> 2 mm				
		< 2 mm	granulométrie			X
			broyage pour chimie			
		< 100 µm				
	< 125 µm					
	Séchage	Air				Pendant 8 à 10 jours, après émottage, à 30 °C
		Etuve				Après avoir été pesés à l'état humide
		Teneur en eau résiduelle après séchage à 105 °C				X
Humidité						
Echantillonnage	Réduction des échantillons composites après séchage					
	autre					
Paramètres pédologiques	Traitement matières organiques	Conservées				
		Détruites				
	Granulométrie	5 fractions non décarbonaté	A 0-2 µm		X	Tamisage sous l'eau et pipette de Robinson, norme NF X 31-107
			LF 2-20 µm		X	
			LG 20-50 µm		X	
			SF 50-200 µm		X	
			SG 200-2000 µm		X	
	Granulométrie autre					
	Texture	Dominante				
		Secondaire				
		Classe texture FAO				
		Classe texture GEPPA				
	Matière organique-carbone	Méthode de dosage du carbone	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique, X 31-109			
			Oxydation par voie humide, Walkley-Black			
			Méthode combustion sèche		X, sur sol non décarbonaté	NF ISO 10694
			autre			
		Teneur en carbone organique				
		Méthode de dosage des matières humiques				
		Teneur en matières humiques				
		Perte au feu				
Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau		Méthode pour C _{org} soluble				
		Méthode pour C _{tot} soluble				
Teneur du carbone soluble dans l'eau	Carbone organique					
	Carbone total					
Calcaire total	Méthode de dosage	Calcimétrie volumétrique		X	NF ISO 10693	
		Autre ou non précisé				

		teneur			
Calcaire actif	Méthode de dosage				
	teneur				
Carbonates	Méthode de dosage				
	teneur				
Azote	Teneur en N _{tot}				
	Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl			
		combustion sèche	X	NF ISO 13878	
	Teneur en N _{org}				
	Méthode de dosage de N _{org}				
	Teneur en N _{minéral}				
	Méthode de dosage de N _{minéral}				
Teneur en N _{ammoniacal}					
Méthode de dosage de N _{ammoniacal}					
C/N					
P ₂ O ₅ assimilable	Extractible méthode Joret-Hébert				
	Extractible méthode Dyer				
	Extractible méthode Olsen		X	NF ISO 11263	
pH sol	pH _{eau}		X	NF ISO 10390	
	dilution		1/5		
	pH _{KCl}				
	dilution				
	pH _{CaCl2}				
CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium			
		Méthode Rhiem oxalate d'ammonium			
		CaCl2 0.1M			
		BaCl2(Mehlich) à pH 8.2			
		autre			
CEC effective	Méthode de dosage	chlorure de cobaltihexamine	X	NF X 31-130	
		BaCl ₂			
		échange KCl			
Cations échangeables		chlorure d'ammonium NH4Cl 0.5M			
		Non précisé			
		Valeur de CEC _{eff}			
	Méthodes	identique à dosage CEC			
		identique à dosage CEC _{eff}			
		KCl			
		Non précisé			
		Ca ²⁺ _{ech}			
		K ⁺ _{ech}			
		Mg ²⁺ _{ech}			
		Na ⁺ _{ech}			
		H ⁺ _{ech}			
		Al ³⁺ _{ech}			
	Fe ²⁺ _{ech}				
	Mn ²⁺ _{ech}				
	Taux de saturation	Méthode de dosage			
		teneur			
	Fer	Méthode de dosage du fer _{total}			
		Teneur en fer _{total}			
		Méthode de dosage du fer libre	Tamm	X	
Mehra Jackson, CBD			X		
autre					
Teneur en Fer libre					
Al	Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm			
		autre			
	Teneur en Al _{libre}				
	Méthode de dosage de Al _{extractible}				
Teneur en Al _{extractible}					
Cations extractibles EDTA	Méthode	Extraction EDTA			
		EDTA - BCR non tamponné, méthode INRA	X		
		autre			

Géochimie des sols, bases de données : Inventaire, proposition de démarches

		Cu _{ext}		X		
		Zn _{ext}		X		
		Mn _{ext}				
		Cd _{ext}		X		
		Cr _{ext}		X		
		Ni _{ext}		X		
		Pb _{ext}		X		
		B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau		Eau bouillante	
			teneur		X	
		Propriétés physiques	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}		
	D _{app}					
Conductivité hydraulique	Méthode de mesure		terrain			
			laboratoire			
	Conductivité hydraulique		terrain			
		laboratoire				

	Méthode de minéralisation	Type d'attaque	Norme
Paramètres analytiques	HF + HClO ₄ + HNO ₃		
	HF + HClO ₄ + HCl		
	HF + HClO ₄	X, 0 ?	NF ISO 14689-1
	Frittage Na ₂ O ₂		
	1g éch + HNO ₃		
	HCl+ HNO ₃ (eau régale)		
	Autre		
Instrument de mesure			
	Quantomètre		
	DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)		
	ICP-AES		X
	Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)		
	ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)		
	ICP-MS		o
	Spectrométrie d'absorption atomique		
	Fluorescence RX (XRF)		
	Na ₂ O ₂ + Citrate		
	Colorimétrie		
	Potentiométrie		
	Ionométrie / dosage par électrode spécifique		

	Lab de Pathologie végétale, Essey-les-Nancy	
	BRGM	

Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
Ag			
Au			
Al	x		
Al ₂ O ₃			
As			
B			
Ba			
Be			
Bi			
Br			
Ca	x		
CaO			
Cd	o		
Ce			
Cl			
Co	o		
Cr	o		
Cu	o		
Dy			
Er			
Eu			
Fe	x		
Fe ₂ O ₃			
Ga			
Gd			
Ge			
Hf			
Ho			
K	x		
K ₂ O			
In			
La			
Li			
Lu			
Mg	x		

MgO			
Mn	x		
MnO			
Mo			
Na	x		
Na ₂ O			
Nb			
Nd			
Ni	o		
P ₂ O ₅			
Pb	o		
Pr			
Rb			
Sb			
Se			
Sc			
SiO ₂			
Sm			
Sn			
Sr			
Ta			
Tb			
Th			
Ti			
TiO ₂			
Tl	o		
Tm			
U			
V			
W			
Y			
Yb			
Zn	o		
Zr			
Perte au feu			
F sol, ppm			
F sol, ppm			
F eau, ppb			
Indice phénols			
Hg			
CH2			
Cyanures totaux			
HAP			
PCB			
Paramètres statistiques élémentaires	Effectif		classement par quartiles des résultats des analyses RMQS grâce à l'outil INDIQUASOL
	Minimum		
	Maximum		
	Moyenne		
	Médiane		
	1 ^{er} quartile	x	
	1 ^{er} décile		
	2 ^{ème} quartile	x	
	3 ^{ème} quartile	x	
	9 ^{ème} décile		
	90 ^{ème} centile		
	Dernier quartile	x	
	Dernier décile		
	Indice de dispersion (max-min)/moy		
Vibrisse inf			
Vibrisse sup			
Précautions d'usage			

Annexe 4

Base de données BDAT

Programme	Nom du programme		BDAT, Base de Données Analyse des Terres		
	Nom des responsables		Nicolas Saby		
	Financement		Fonds publics		
	Institut		INRA, Unité Infosol, Orléans		
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement		X		
	Profondeur base				
	Profondeur sommet				
	Commentaires				
	Photographies				
	Localisation échantillons stockés		?		
	Période d'acquisition		1990-1994 ; 1995-1999		
	Laboratoire d'analyse		15 laboratoires d'analyses de sols agréés par le Ministère de l'Agriculture		
	Date d'analyse		X		
	Contamination anthropique		X		
Données	Accessibilité – localisation		INRA Orléans, http://bdat.orleans.inra.fr/geosol/index.php		
	Etat (brutes ou traitées)		Traitées, résultats agrégés par canton		
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés		
			Horizon		
			Profondeur, cm		
		Horizons de surface	Nomenclature	X	
			Profondeur, cm	X	
		Horizons de profondeur	Nomenclature		
			Profondeur, cm		
		Sol développé sur alluvions			
		Litière			
		Sédiments	Floodplain		
Prélèvement	Sédiment de berges				
	Fond de vallon sec				
	Limons d'inondation				
	Alluvions de ruisseau				
	Sédiments de drain court				
	Roche				
Prélèvement	Nombre de sites		Résultats pour 3451 cantons parmi les 3511 existants, dont 2800 sont exploitables pour des déterminations quasi-systématiques. 617 149 échantillons de sols, 464 010 analyses validées.		
	Densité échantillonnage		2400 cantons ont une résolution supérieure à 1 analyse par hectare – la résolution la plus adaptée est le 1/250 000		
	Méthode de prélèvement				
	Quantité matériel brut				
Localisation site	Département				
	Nom localité				
	Carte IGN				
	Carte géologique				
	X L2				
	Y L2				
	Z				
Niveau de précision du géoréférencement		Commune de la parcelle d'où provient l'échantillon – code INSEE			
Descriptif	Occupation	Cultivé	Épandage de boues		
			Aucun épandage		
			Sans contamination humaine		
			Non précisé	X, sans restriction	
		Non cultivé			
		Forêt			
		Marécages			
		Friche prairie			

Lithologie environnementale	autre			
	Granite			
	Gneiss, schistes			
	Roche sédimentaire			
	Roche volcaniques			
	Roche volcano-sédimentaire			
Végétation environnementale	Grès, schistes et poudingue houilliers			
Hydromorphie	Sec			
	Humide			
	Non précisé			
Nomenclature	FAO			
	Référentiel pédologique			
	Légende RP2			
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon			
	Pré-traitement granulométrique			
	Fraction analysée	> 2 mm		
		< 2 mm	granulométrie broyage pour chimie	
		< 100 µm		
		< 125 µm		
	Séchage	Air		
		Etuve		
		Teneur en eau résiduelle après séchage à 105 °C		
		Humidité		
	Echantillonnage	Réduction des échantillons composites		
		autre		
	Traitement matières organiques	Conservées		
Détruites				
Granulométrie	5 fractions non	A 0-2 µm	X	

Paramètres pédologiques	Texture	décarbonaté	LF 2-20 µm	X	
			LG 20-50 µm	X	
			SF 50-200 µm	X	
			SG 200-2000 µm	X	
			Granulométrie autre		
		Dominante	X		
		Secondaire	X		
		Classe texture FAO	X		
		Classe texture GEPPA	X		
	Matière organique- carbone	Méthode de dosage du carbone organique	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique, norme NF X31-109	X	
			Oxydation par voie humide, Walkley- Black		
			Méthode combustion sèche	X	
			autre		
		Teneur en carbone organique	X		
		Méthode de dosage des matières humiques			
		Teneur en matières humiques			
	Perte au feu	Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau	Méthode pour C _{org} soluble		
Méthode pour C _{tot} soluble					
Teneur du carbone soluble dans l'eau		Carbone organique			
		Carbone total			
Calcaire total		Méthode de dosage	Calcimétrie volumétrique	X	norme NF ISO 10693
	teneur	Non précisé			
Calcaire actif	Méthode de dosage		X ¹	norme NF X31-106	

¹ fraction du calcium des carbonates précipitée par une solution d'oxalate d'ammonium

		teneur		X		
Carbonates	Méthode de dosage					
	teneur					
Azote	Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl		X	NF ISO 11261	
		combustion sèche				
		non précisé				
	Teneur en N _{tot}				X	
	Méthode de dosage de N _{org}					
	Teneur en N _{org}					
	Méthode de dosage de N _{minéral}					
C/N	Teneur en N _{minéral}					
	Méthode de dosage de N _{ammoniacal}					
	Teneur en N _{ammoniacal}					
P ₂ O ₅ assimilable	Extractible méthode Joret-Hébert			X		
	Extractible méthode Dyer			X		
	Extractible méthode Olsen			X		
pH sol	pH _{eau}			X	norme NF ISO 10390	
	dilution			1/5		
	pH _{KCl}			X	norme NF ISO 10390	
	dilution			1/5		
	pH _{CaCl2}					
CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium		X	NF X31-130	
		Méthode Rhiem oxalate d'ammonium		X		
		CaCl ₂ 0.1M				
		BaCl ₂ (Mehlich) à pH 8.2				
		autre				
CEC effective	Méthode de dosage	chlorure de cobaltihexamine				
		BaCl ₂				
		échange KCl				
		chlorure d'ammonium NH ₄ Cl				

		0.5M			
		Non précisé			
	Valeur de CEC _{eff}				
Cations échangeables	Méthodes	identique à dosage CEC			
		identique à dosage CEC _{eff}			
		KCl			
		Non précisé			
		Ca ²⁺ _{ech}	X		acétate d'ammonium norme NF X31-108
		K ⁺ _{ech}	X		
		Mg ²⁺ _{ech}	X		
		Na ⁺ _{ech}	X		
	H ⁺ _{ech}	X			
	Al ³⁺ _{ech}				
	Fe ²⁺ _{ech}				
	Mn ²⁺ _{ech}				
Taux de saturation	Méthode de dosage				rapport entre la quantité de cations échangeables sur son complexe adsorbant (CEC) et la somme des quatre cations éch(Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , K ⁺ et Na ⁺).
	teneur			X	
Fer	Méthode de dosage du fer _{total}				
	Teneur en fer _{total}				
	Méthode de dosage du fer libre	Tamm			
		Mehra Jackson, CBD			
autre					
Teneur en Fer libre					
Mn	Méthode	Tamm			
	Non précisé				
Teneur en Mn total					
Al	Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm			
		autre			
	Teneur en Al _{libre}				
	Méthode de dosage de Al _{extractible}				
Teneur en Al _{extractible}					

Cations extractibles	Méthode	Extraction EDTA	X, dans une solution d'acétate d'ammonium à 1,0 mol/L ajustée à pH 7 (norme NF X31-120)	
		EDTA – BCR non tamponné, méthode INRA		
		autre		
		CU _{ext}		X
		Zn _{ext}		X
		Fe _{ext}		X
		Mn _{ext}		X
		Co _{ext}		
		Cr _{ext}		
		Ni _{ext}		
		Pb _{ext}		
B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau	par ébullition	norme NF X31-122	
	teneur		X	
Propriétés physiques	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}		
		D _{app}		
	Conductivité hydraulique	Méthode de mesure	terrain	
		Conductivité hydraulique	terrain	
		laboratoire		

Paramètres analytiques	Méthode de minéralisation	Type d'attaque	Norme
	HF + HClO ₄ + HNO ₃		
	HF + HClO ₄ + HCl		
	HF + HClO ₄		
	Frittage Na ₂ O ₂		
	1g éch + HNO ₃		
	HCl+ HNO ₃ (eau régale)	X	
	Autre	X HF	
	Instrument de mesure		
	Quantomètre		
	DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)		
	ICP-AES		
	Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)		

	ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrochimique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)	
	ICP-MS	
	Spectrométrie d'absorption atomique	
	Fluorescence RX (XRF)	
	Colorimétrie	
	Potentiométrie	
	Ionométrie / dosage par électrode spécifique	
	Lab de Pathologie végétale, Essey-les-Nancy	
	BRGM	

Élément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
Ag			
Au			
Al			
Al ₂ O ₃			
As			
B			
Ba			
Be			
Bi			
Br			
Ca			
CaO			
Cd			
Ce			
Cl			
Co	X		
Cr	X		
Cu	X		
Dy			
Er			
Eu			

Fe			
Fe ₂ O ₃			
Ga			
Gd			
Ge			
Hf			
Ho			
K			
K ₂ O			
In			
La			
Li			
Lu			
Mg			
MgO			
Mn	X		
MnO			
Mo			
Na			
Na ₂ O			
Nb			
Nd			
Ni			
P ₂ O ₅			
Pb	X		
Pr			
Rb			
Sb			
Se			
Sc			
SiO ₂			
Sm			
Sn			
Sr			
Ta			
Tb			
Th			
Ti			
TiO ₂			
Tl			
Tm			
U			
V			
W			
Y			
Yb			
Zn	X		
Zr			
Perte au feu			
F sol, ppm			
F sol, ppm			
F eau, ppb			
Indice phénols			
Hg			
CH ₂			
Cyanures totaux			
HAP			
PCB			
Paramètres statistiques élémentaires	Effectif	X	
	Minimum		
	Maximum		
	Moyenne		
	Médiane	X	
	1 ^{er} quartile	X	
	1 ^{er} décile	X	
	2 ^{ème} quartile	X	
	3 ^{ème} quartile	X	
	9 ^{ème} décile	X	
9 ^{ème} centile			
Dernier quartile	X		

	Dernier décile	X	
	Indice de dispersion (max-min)/moy		
	Vibrisse inf		
	Vibrisse sup		
Précautions d'usage	<p>Référence bibliographique : Saby N., Schwartz C., Walter C., Arrouays D., Lemerrier B., Roland N., squidant H. (2004). Base de Données des analyses de Terre : procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000, Etude et gestion des Sols, 11, 3 235-254.</p> <p>Cette banque de données est un outil pertinent pour l'étude à moyenne échelle de questions pédologiques, agronomiques ou environnementales impliquant l'horizon de surface des sols ou le suivi dans le temps de ses caractéristiques. Il s'agit donc d'un outil complémentaire des approches de surveillance du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) et d'Inventaire pédologique (IGCS).</p> <p>L'étude d'évolutions éventuelles est rendue possible par comparaisons de jeux de données acquis à des dates différentes.</p> <p>Les analyses de pH, C, P, K, Ca, Mg sont quasi systématiques et concernent 2800 cantons mais celles du calcaire, de la granulométrie et des oligo-éléments ne concernent que 1400 cantons.</p> <p>Ces données ne peuvent pas être utilisées de façon pertinente pour des études réalisées à une échelle supérieure au 1/250000^{ème}.</p>		

Annexe 5

Base de données ASPITET

Programme	Nom du programme		ASPITET - Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces - financement AIP INRA		
	Nom des responsables		Denis Baize		
	Financement		Fonds publics		
	Institut		INRA, Unité Infosol, Orléans		
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement		X		
	Profondeur base				
	Profondeur sommet				
	Commentaires		Couverture pédologique dans les zones de sols cultivés ou forestiers		
	Photographies				
	Localisation échantillons stockés		INRA Orléans		
	Période d'acquisition		1993 - 2005		
	Laboratoire d'analyse		INRA ARRAS		
	Date d'analyse		X		
	Contamination anthropique du site				
Données	Accessibilité - localisation Etat (brutes ou traitées)				
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés	2 à 5	
			Horizon	L1, L2, L3, EB	
			Profondeur, cm	X	
		Horizons de surface	Nomenclature	X	types de sols et matériaux géologiques très variés
			Profondeur, cm	X	
		Horizons de profondeur	Nomenclature	X	
			Profondeur, cm	X	
		Sol développé sur alluvions			
Litière					
Sédiments	Floodplain				
	Sédiment de berges				
	Fond de vallon sec				
	Limos d'inondation				
	Alluvions de ruisseau				
	Sédiments de drain court				
	Roche				
Prélèvement	Nombre de sites		1200		
	Densité échantillonnage				
	Méthode de prélèvement	Surface	X	Plusieurs horizons sont prélevés dans des fosses Chaque " individu " (au sens statistique du terme) est un horizon pédologique prélevé dans une fosse (plus rarement prélevé à la tarière pour certains horizons profonds) ; - en chaque site, les principaux horizons des solums ont été analysés. Il est donc possible d'observer les variations verticales des teneurs pour 2 à 5 horizons superposés selon les cas. Le contexte géologique et pédologique est, à chaque fois, parfaitement connu.	
		Profondeur	X		
Quantité matériel brut					
Localisation site	Département	40 ^{ème} , France entière			
	Nom localité				
	Carte IGN				
	Carte géologique				
	X L2				
	Y L2				
Z					
Niveau de précision du géoréférencement	?		Echantillons prélevés dans une quarantaine de départements répartis irrégulièrement, principalement dans les régions sédimentaires du Bassin parisien s.l.. Les échantillons analysés proviennent surtout des départements : Yonne, Vienne, Indre, Côte d'Or, Seine et Marne, Loiret, Indre et Loire, Val d'Oise.		
Occupation	Cultivé	Epannage de			
Descriptif			Les prélèvements ne		

		boues			concernent que des sols de zones rurales. Aucun échantillon n'a été prélevé dans des secteurs urbains ou industriels. Cette population comprend des sols cultivés et des sols forestiers.
		Aucun épandage			
		Sans contamination humaine	X		
		Non précisé			
		Non cultivé			
		Forêt	X		
		Marécages			
	Friche				
	prairie				
	autre				
	Lithologie environnante	Granite			
		Gneiss, schistes			
		Roche sédimentaire			
		Roche volcaniques			
		Roche volcano-sédimentaire			
Végétation environnante	Grès, schistes et poudingue houilliers				
Hydromorphie	Sec				
	Humide				
	Non précisé				
Nomenclature	FAO				
	Référentiel pédologique				
	Légende RP2				
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon				
	Pré-traitement granulométrique				
	Fraction analysée	> 2 mm		Analysé séparément	
		< 2 mm	granulométrie broyage pour chimie	oui	
		< 100 µm		Oui, à 315 µm	
< 125 µm					
Séchage	Air		oui		
		Etuve			
		Teneur en eau résiduelle après séchage à 105°C			
		Humidité			
	Echantillonnage	Réduction des échantillons composites			
		autre			
Traitement matières organiques	Conservées				
	Détruites				
Paramètres pédologiques	Granulométrie	5 fractions non décarbonaté	A 0-2 µm	X	5 fractions non décarbonaté, pipette – dispersion par l'hexaméthaphosphate
			LF 2-20 µm	X	
			LG 20-50 µm	X	
			SF 50-200 µm	X	
			SG 200-2000 µm	X	
	Granulométrie autre				
	Texture	Dominante			
		Secondaire			
		Classe texture FAO			
		Classe texture GEPPA			
	Matière organique-carbone	Méthode de dosage du carbone organique	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique	X	X 31-109
			Oxydation par voie humide, Walkley-Black		
			Méthode combustion sèche		
Non précisé					
Teneur en carbone organique		X			
Méthode de dosage des matières humiques					

		Teneur en matières humiques			
		Perte au feu			
		Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau	Méthode pour C _{org} soluble		
			Méthode pour C _{tot} soluble		
		Teneur du carbone soluble dans l'eau			
		Carbone organique			
		Carbone total			
Calcaire total	Méthode de dosage	Calcimétrie volumétrique		X	
		non précisé			
		teneur		X	
Calcaire actif	Méthode de dosage				
	teneur				
Carbonates	Méthode de dosage				
	teneur				
Azote	Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl			
		combustion sèche			
	non précisé				
	Teneur en N _{tot}				
	Méthode de dosage de N _{org}				
	Teneur en N _{org}				
	Méthode de dosage de N _{minéral}				
	Teneur en N _{minéral}				
C/N	Méthode de dosage de N _{ammoniacal}				
	Teneur en N _{ammoniacal}				
P ₂ O ₅ assimilable	Extractible méthode Joret-Hébert				
	Extractible méthode Dyer				
	Extractible méthode Olsen				
pH sol	pH _{eau}			X	NF ISO 10390
	dilution			1/2.5	
	pH _{KCl}				
	dilution				
	pH _{CaCl2}				
		dilution			
CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium		X	NF 31-130
		Méthode Rhiem oxalate d'ammonium			
		CaCl2 0.1M			
		BaCl2(Mehlich) à pH 8.2			
		autre			
CEC effective	Méthode de dosage	chlorure de cobaltihexamine			
		BaCl ₂			
		échange KCl			
		chlorure d'ammonium NH4Cl 0.5M			
		Non précisé			
Cations échangeables	Méthodes	identique à dosage CEC			
		identique à dosage CEC _{eff}			
		KCl			
		Non précisé			
		Ca ²⁺ _{ech}			
		K ⁺ _{ech}			
		Mg ²⁺ _{ech}			
		Na ⁺ _{ech}			
		H ⁺ _{ech}			
		Al ³⁺ _{ech}			
Fe ²⁺ _{ech}					
Mn ²⁺ _{ech}					
Taux de saturation	Méthode de dosage				
	teneur				
Fer	Méthode de dosage du fer _{total}				
	Teneur en fer _{total}				
	Méthode de	Tamm			

		dosage du fer libre	Mehra Jackson, CBD	X			
			autre				
	Mn	Teneur en Fer libre					
		Méthode	Tamm				
			Non précisé				
	Al	Teneur en Mn total					
		Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm				
			autre				
		Teneur en Al _{libre}					
	Cations extractibles EDTA	Méthode de dosage de Al _{extractible}					
		Teneur en Al _{extractible}					
		Méthode	Extraction EDTA				
			EDTA – BCR non tamponné, méthode INRA		X		
			autre				
Cu _{ext}			X				
Zn _{ext}			X				
Mn _{ext}							
Cd _{ext}			X				
Cr _{ext}			X				
Ni _{ext}			X				
Pb _{ext}			X				
B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau			Eau bouillante			
	teneur			X			
Propriétés physiques	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}					
		D _{app}					
	Conductivité hydraulique	Méthode de mesure	terrain				
			laboratoire				
	Conductivité hydraulique	terrain					
		laboratoire					

Paramètres analytiques	Méthode de minéralisation	Type d'attaque	Norme	
	HF + HClO ₄ + HNO ₃			
	HF + HClO ₄ + HCl			
	HF + HClO ₄	X e	AFNOR X31-147	
	Frittage Na ₂ O ₂			
	1g éch + HNO ₃			
	HCl+ HNO _{3b} (eau régale)			
	Autre			
	Instrument de mesure			
	Quantomètre			
	DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)			
	ICP-AES			
	x			
	Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)			
	O			
ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrochimique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)				
e				
ICP-MS				
Spectrométrie d'absorption atomique				
Fluorescence RX (XRF)				
Na ₂ O ₂ + Citrate				
Colorimétrie				
Potentiométrie				
Ionométrie / dosage par électrode spécifique				
Lab de Pathologie végétale, Essey-les-Nancy (BRGM)				

Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
Ag			
Au			
Al			
Al ₂ O ₃			
As	?		
B			
Ba			
Be			

Bi			
Br			
Ca			
CaO			
Cd	e		
Ce			
Cl			
Co	e		
Cr	X		
Cu	X		
Dy			
Er			
Eu			
Fe	o		
Fe ₂ O ₃			
Ga			
Gd			
Ge			
Hf			
Ho			
K			
K ₂ O			
In			
La			
Li			
Lu			
Mg			
MgO			
Mn	o		
MnO			
Mo			
Na			
Na ₂ O			
Nb			
Nd			
Ni	e		
P ₂ O ₅			
Pb	e		
Pr			
Rb			
Sb			
Se			
Sc			
SiO ₂			
Sm			
Sn			
Sr			
Ta			
Tb			
Th			
Ti			
TiO ₂			
Tl	?		
Tm			
U			
V			
W			
Y			
Yb			
Zn	o		
Zr			
Perte au feu			
F sol, ppm			
F sol, ppm			
F eau, ppb			
Indice phénols			
Hg	X		
CH ₂			
Cyanures totaux			
HAP			

PCB			
Paramètres statistiques élémentaires	Effectif	X	
	Minimum	X	
	Maximum	X	
	Moyenne	X	
	Médiane	X	
	1 ^{er} quartile	X	
	1 ^{er} décile	X	
	2 ^{ème} quartile	X	
	3 ^{ème} quartile	X	
	9 ^{ème} décile	X	
	9 ^{ème} centile		
	Dernier quartile		
	Dernier décile		
	Indice de dispersion (max-min)/moy		
Vibrisse inf			
Vibrisse sup			
Précautions d'usage	<p>Les objectifs étaient de :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. fournir des références sur les teneurs en éléments traces métalliques mesurés dans divers sols français 2. transmettre des informations utiles entre ces teneurs et d'autres données pédologiques et géologiques 3. proposer et expliquer des démarches d'interprétation applicables partout. <p>Les données acquises peuvent être utilisées pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la connaissance des « fonds géochimiques naturels » locaux et de leur déterminisme pédo-géologique - une détermination des gammes de valeurs couramment rencontrées dans les sols français et des valeurs naturelles modérément et fortement anormales - des stratégies d'interprétation des concentrations en ETM mesurées dans les sols - des études de la qualité des sols et de la qualité des produits agricoles nécessitant un raisonnement par séries de sols - une aide à la fixation de valeurs seuils « sols » à l'échelon national ou européen - une cartographie des métaux lourds et de la matière organique dans les sols d'Europe 		
	<p>Les zones sédimentaires sont sur-représentées par rapport aux zones cristallines.</p> <p>Intégration dans la base de données ASPITET de données en provenance d'autres programmes dont GESSOL-La Châtre et QUASAR.</p>		

Annexe 6

Base de données de l'IMN

Programme	Nom du programme		IMN, SNEAP		
	Nom des responsables				
	Financement		Fonds publics		
	Institut		BRGM		
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement		X		
	Profondeur base				
	Profondeur sommet				
	Commentaires				
	Photographies				
	Localisation échantillons stockés				
	Période d'acquisition		X		
	Laboratoire d'analyse		BRGM Orléans		
	Date d'analyse		X		
	Contamination anthropique du site				
Données	Accessibilité - localisation		Stockées dans la base de données du sous-sol (BSS) à CDG au BRGM à Orléans ou via Infoterre		
	Etat (brutes ou traitées)				
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés		
			Horizon		
			Profondeur, cm		
		Horizons de surface	Nomenclature	X	Sous l'horizon humifère
		Profondeur, cm	X		
	Horizons de profondeur	Nomenclature			
		Profondeur, cm			
	Sol développé sur alluvions				
	Litière				
	Sédiments	Floodplain			
Sédiment de berges					
Fond de vallon sec		X	en tête de ruisseaux, demi-douzaine de prises réparties sur quelques mètres environ		
Limons d'inondation					
Alluvions de ruisseau		X			
Sédiments de drain court					
Roche					
Nombre de sites	X				
	Densité échantillonnage		2 à 4 échantillons par km2, localement pouvant atteindre 400 éch par km2. - densité à l'échelle régionale de 1 à 5 éch par km2 pour les sols - 2 éch par km2 à 1 éch pour 10 km2 pour les alluvions (éch représentatif du bassin versant, sans maille régulière)		
	Méthode de prélèvement		Surface	X (sols)	En tête de ruisseaux, demi-douzaine de prises réparties sur quelques mètres environ. Pour les sols, le prélèvement a été fait juste sous la litière de feuilles ou sous les racines des plantes herbacées
			profondeur		
Quantité matériel brut					
Localisation site	Département				
	Nom localité				
	Carte IGN		X, 1/50000		
	Carte géologique		X		
	X L2		X		
	Y L2		X		
	Z				
Niveau de précision du géoréférencement					
Descriptif	Occupation	Cultivé	Epandage de boues		
			Aucun épandage		
			Sans contamination humaine		
			Non précisé		
			Non cultivé		
		Forêt			
	Marécages				
	Friche				
	prairie				
	autre				
Lithologie environnante	Granite		X	Massifs hercyniens, Bretagne, Massif central, Vosges, Alpes, Pyrénées, < 20 % du territoire	
	Gneiss, schistes		X		
	Roche sédimentaire		X		
	Roche volcaniques		X		

		Roche volcano-sédimentaire		X	français	
		Grès, schistes et poudingue houilliers		X		
	Végétation environnante					
	Hydromorphie	Sec				X
		Humide				Zones hydromorphes évitées
		Non précisé				
	Nomenclature	FAO				
		Référentiel pédologique				
		Légende RP2				
	Mode de préparation de l'échantillon					
	Pré-traitement granulométrique	Démotage par pilon puis tamisage				
	Fraction analysée	> 2 mm				
		< 2 mm	granulométrie			
			broyage pour chimie			
< 100 µm						
< 125 µm				X		
Séchage	Air				X	
	Etuve				50-60°C	
	Teneur en eau résiduelle après séchage à 105 °C					
	autre					
Echantillonnage	Réduction des échantillons composites					
	autre					
Traitement matières organiques	Conservées					
	Détruites				Par chauffage à 450°C	
Granulométrie	5 fractions non décarbonaté	A 0-2 µm				
		LF 2-20 µm				
		LG 20-50 µm				
		SF 50-200 µm				
		SG 200-2000 µm				
	Granulométrie autre					
Texture	Dominante					

Paramètres pédologiques		Secondaire			
		Classe texture FAO			
		Classe texture GEPPA			
	Matière organique-carbone	Méthode de dosage du carbone organique	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique		
			Oxydation par voie humide, Walkley-Black		
			Méthode combustion sèche		
			autre		
		Teneur en carbone organique			
		Méthode de dosage des matières humiques			
		Teneur en matières humiques			
		Perte au feu			
		Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau	Méthode pour C _{org} soluble		
			Méthode pour C _{tot} soluble		
	Teneur du carbone soluble dans l'eau	Carbone organique			
		Carbone total			
	Calcaire total	Méthode de dosage	Calcimétrie volumétrique		
			Non précisé		
	teneur				
	Calcaire actif	Méthode de dosage			
		teneur			
	Carbonates	Méthode de dosage			
		teneur			
Azote	Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl			
		combustion sèche			
		non précisé			
	Teneur en N _{tot}				
Méthode de dosage de N _{org}					
Teneur en N _{org}					

		Méthode de dosage de N _{minéral}			
		Teneur en N _{minéral}			
		Méthode de dosage de N _{ammoniacal}			
		Teneur en N _{ammoniacal}			
C/N					
P ₂ O ₅ assimilable		Extractible méthode Joret-Hébert			
		Extractible méthode Dyer			
		Extractible méthode Olsen			
pH sol		pH _{eau}			
		dilution			
		pH _{KCl}			
		dilution			
		pH _{CaCl2}			
		dilution			
CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium			
		Méthode Rhiem oxalate d'ammonium			
		CaCl2 0.1M			
		BaCl2(Mehlich) à pH 8.2			
CEC effective	Méthode de dosage	autre			
		chlorure de cobalthexamine			
		BaCl ₂			
		échange KCl			
		chlorure d'ammonium NH4Cl 0.5M			
		Non précisé			
Cations échangeables	Valeur de CEC _{eff}				
	Méthodes	identique à dosage CEC identique à dosage CEC _{eff} KCl Non précisé			
		Ca ²⁺ _{ech}			
		K ⁺ _{ech}			
		Mg ²⁺ _{ech}			
		Na ⁺ _{ech}			
		H ⁺ _{ech}			
		Al ³⁺ _{ech}			
		Fe ²⁺ _{ech}			
		Mn ²⁺ _{ech}			
	Taux de saturation	Méthode de dosage			
		teneur			
	Fer	Méthode de dosage du fer _{total}			
		Teneur en fer _{total}			
		Méthode de dosage du fer libre	Tamm		
			Mehra Jackson, CBD autre		
	Teneur en Fer libre				
	Mn	Méthode	Tamm Non précisé		
		Teneur en Mn total			
Al	Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm autre			
	Teneur en Al _{libre}				
	Méthode de dosage de Al _{extractible}				
Cations extractibles	Méthode	Extraction EDTA			
		EDTA – BCR non tamponné, méthode INRA			
		autre			
	Cu _{ext}				
	Zn _{ext}				
	Fe _{ext}				
	Mn _{ext}				
	Cd _{ext}				
	Cr _{ext}				

		Ni _{ext}		
		Pb _{ext}		
	B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau		
		teneur		
Propriétés physiques	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}		
		D _{app}		
	Conductivité hydraulique	Méthode de mesure	terrain	
			laboratoire	
	Conductivité hydraulique	terrain		
		laboratoire		

	Appareil	Type d'attaque	Méthode de minéralisation	Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup				
	Quantomètre	Poudre totale		Ag	X X		40				
				Al ₂ O ₃	X X	3	50				
				As	X X	20	1300				
				B	X X	10	1800				
				Ba	X X	5	5000				
				Be	X X						
				Bi	X X						
				Br	X						
				CaO	X X	3	100				
				Cd	X X	4	250				
				Cl	X						
				Co	X X	10	4000				
				Cr	X X	10	3000				
				Cu	X X	3	1000				
				Fe ₂ O ₃	X X	1	100				
				Ga	X						
				Ge	X						
				K ₂ O	X X	1	16				
				In	X						
				La	X X	200	5000				
				Li	X						
				MgO	X X	1	50				
				MnO	X X		1				
				Mo	X X	3	5000				
				Na ₂ O	X	1	16				
				Nb	X	200	10 000				
								Ni	X X	5	4000
								P ₂ O ₅	X X		2
Pb	X X	15	3000								
Sb	X X	50	2000								
SiO ₂	X X	3	100								
Sn	X X	20	3000								
Sr	X X										
TiO ₂	X X										
V	X X	5	5000								
W	X X	50	2000								
Y	X	75	15000								
Zn	X X	5	600								
Zr	X X										
Perte au feu	X										
DCP (1973-1983)	Attaque partielle	HF + HClO ₄ + NHO ₃						Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
								Ag	X	0.2	100
								As	X	10	1000
								B	X	10	1000
								Ba	X	10	1000
								Be	X	1	100
				Cd	X	1	250				
				Co	X	1	1000				
				Cr	X	10	1000				
				Cu	X	10	1000				
				Fe ₂ O ₃	X	0.1	23				
				MnO	X	0.01					
				Mo	X	2	250				
				Nb	X	10	1000				
				Ni	X	10	1000				
				P ₂ O ₅	X	10					
				Pb	X	10	1000				
				Sb	X	20	1000				
Sn	X	20	1000								
V	X	10	1000								

			W	X	10	1000			
			Y	X	5	200			
			Zn	X	10	1000			
Absorption atomique			Elément	Conc	Seuil inf	Seuil sup			
			Ag	X					
			Au	X					
			As	X					
			Bi	X					
			Cu	X					
			Mo	X					
			Pb	X					
			Sb	X					
			W	X					
			Zn	X					
			ICP (à partir de 1981)	Frittage Na ₂ O ₂ attaque totale		Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
						Ag	X		300
Al ₂ O ₃	X	1				100			
As	X	20				50000			
B	X	10				18000			
Ba	X	10				3500			
Bi	X	10				10000			
Cd	X	2				5000			
Co	X	5				25000			
Cr	X	10				13000			
Cu	X	5				8000			
Fe ₂ O ₃	X	1				100			
MgO	X	1				50			
MnO	X					20			
Mo	X	5				7500			
Nb	X	20				15000			
Ni	X	10				18000			
P ₂ O ₅	X					8			
Pb	X	10				6000			
Sb	X	10				25000			
SiO ₂	X	1				100			
Sn	X	10				20000			
V	X	10				4000			
W	X	10				15000			
Y	X	20				15000			
						Zn	X	5	20000
						Zr	X	20	13000
						F sol, ppm	X	X	X
			F eau, ppb	X	X	X			
			Au						
			Indice phénol						
			Hg						
			CH ₂						
			Cyanures totaux						

Paramètres statistiques élémentaires	Effectif		
	Minimum		
	Maximum		
	Moyenne		
	Médiane		
	1 ^{er} quartile		
	1 ^{er} décile		
	2 ^{ème} quartile		
	3 ^{ème} quartile		
	9 ^{ème} décile		
	90 ^{ème} centile		
	Dernier quartile		
	Dernier décile		
	Indice de dispersion (max-min)/moy		
Vibrisse inf			
Vibrisse sup			
Précautions d'usage	<p>Les raisons de cette base de données : repérer toutes les anomalies géochimiques susceptibles de correspondre à des gîtes d'intérêt économique potentiel.</p> <p>1. Influence de la nature des échantillons Les données couvrent 20 % du territoire national. Deux grands types de prélèvements ont été réalisés, en sols et dans les alluvions. Les parties fines des alluvions et celles des sols sont de composition sinon identique, du moins très voisine. La seule différence notable est due à un phénomène de piégage, suite à un enrichissement en oxydes-hydroxydes de fer ou de manganèse accompagné d'une augmentation des teneurs en As, Co, Ni et Zn, à partir d'eaux de milieux réducteurs.</p>		

	<p>Le type d'échantillonnage n'a pas d'influence notable sur le fond géochimique naturelle à l'échelle régionale.</p> <p>2. Influence de l'attaque chimique des échantillons Les données obtenues au quantomètre ne couvrent qu'une petite partie du territoire. Cette technique ne nécessite pas de mise en solution mais certains paramètres peuvent influencer sur les mesures comme la granulométrie de la poudre ou son état cristallin et à la quantité de matière excitée.</p> <p>Pour la spectrométrie à plasma, la mise en solution est partielle dans le cas de la DCP (attaque triacide) et totale pour l'ICP. Pour certains éléments liés à des minéraux réfractaires (Cr par exemple), les niveaux de teneurs ne sont pas tout à fait comparables d'une technique à l'autre. Ainsi, les fonds géochimiques que l'on peut calculer à partir de l'une ou l'autre des techniques d'analyse, peuvent présenter des écarts sensibles. Les écarts de signal nécessitent des corrections et une harmonisation des données sur la base de critères statistiques.</p> <p>3. Autres sources d'erreurs Plusieurs facteurs sont à prendre en compte : - la technique analytique utilisée dont les réponses peuvent varier significativement d'un élément trace à un autre ; - le mode de mise en solution - les évolutions de protocole analytique pouvant induire des dérives dans le signal mesuré.</p> <p>4. Conséquences sur l'emploi des données Tout travail gagnera à ne prendre en compte que les résultats obtenus au moyen d'une seule et même technique analytique. Les cartes de teneurs à partir des mesures obtenues en DCP, qui constituent l'essentiel de la base de données, montrent une excellente concordance avec les unités géologiques. Il en découle que : - on peut combiner les analyses de sols ou d'alluvions qui apparaissent équivalentes en intensité et distribution du signal géochimique ; - au point de vue méthodologique, l'absence de repérage des horizons de sols (non prise en compte des niveaux pédologiques) ne paraît pas influencer la qualité des données à ces échelles de cartographie.</p> <p>La bonne concordance entre le substratum géologique et certains éléments traceurs marqueurs de la lithologie (Ba, Cr, Ni, Li, Zr) signifie aussi que les données géochimiques de l'IMN décrivent dans leur très grande majorité le fond géochimique naturel. C'est le cas où les sols se sont développés in situ sur le substratum. Dans le cas où un écran est venu s'interposer entre la roche et la surface topographique ; comme des dépôts de loess, les échantillonnages traduisent la géochimie des loess. Dans d'autres cas de figure, le fond géochimique régional est déterminé par des phénomènes géologiques liés à des altérations hydrothermales, des accidents crustaux, du métamorphisme, des minéralisations... Des éléments comme As, cu, Pb, Zn, Cd, Mo, Sn, Sb, Li, B, W, Se... peuvent alors montrer des enrichissements importants à l'échelle régionale.</p> <p>5. Recommandations sur l'utilisation des données L'échantillonnage ayant été fait en fonction des limites IGN, en l'occurrence les coupures géographiques à 1/50 000, on peut demander les données correspondant aux coupures du quadrillage 1/50 000 de l'IGN. Les données de l'IMN peuvent être utilisées pour un report de points pour travail à l'échelle locale. A l'échelle régionale elles peuvent montrer les grandes variations du fond géochimique naturel et localiser les zones d'anomalies.</p>
--	--

Annexe 7

Base de données du RNPC

Programme	Nom du programme		Référentiel Nord Pas de Calais	
	Nom des responsables		T. Sterckeman, INPL INRA ?	
	Financement		Fonds publics	
	Institut		INRA, Orléans et Arras, ISA Lille, USTL et DRAF	
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement		X	
	Profondeur base		X	
	Profondeur sommet		X	
	Commentaires		outil de gestion des sols fournissant une estimation de la teneur originelle des sols en ETM, pour mieux évaluer les contaminations, élaborer des références pour la mise ne place de normes, à l'échelle nationale ou européenne. Bibliographie : Sterckeman et al. (2004)	
	Photographies			
	Localisation échantillons stockés			
	Période d'acquisition		X	
	Laboratoire d'analyse		INRA ARPAS	
	Date d'analyse		X	
	Contamination anthropique du site		Le moins possible	
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés	X, horizon cultivé et 1-3 horizons profonds
			Horizon	X
			Profondeur, cm	X
	Sol	Horizons de surface	Nomenclature	
			Profondeur, cm	
		Horizons de profondeur	Nomenclature	
			Profondeur, cm	
	Sol développé sur alluvions			
	Litière			
	Sédiments	Floodplain		
Prélèvement	Sédiment de berges			
	Fond de vallon sec			
	Limons d'inondation			
	Alluvions de ruisseau			
	Sédiments de drain court			
	Roche			
Prélèvement	Nombre de sites	26		
	Densité échantillonnage			
	Méthode de prélèvement	Surface	prélèvements en commençant par la base des sola	
		Profondeur		
Quantité matériel brut				
Localisation site	Département	X		
	Nom localité	X		
	Carte IGN			
	Carte géologique			
	X L2			
	Y L2			
	Z			
Niveau de précision du géoréférencement				
Descriptif	Occupation	Cultivé	Epandage de boues	
			Aucun épandage	
			Sans contamination humaine	attendu, loin des zones potentielles de contamination
		Non précisé	X	
		Non cultivé		
		Forêt		
	Marécages			
	Friche			
	prairie			
	autre			
Lithologie environnante	Granite	Prend en compte la nature de la roche mère =		
	Gneiss, schistes	Loess		

		Roche sédimentaire			
		Roche volcaniques			
		Roche volcano-sédimentaire			
		Grès, schistes et poudingue houilliers			
	Végétation environnante				
	Hydromorphie	Sec		X	
		Humide		X	
		Non précisé			
	Nomenclature	FAO			
		Référentiel pédologique	X		
		Légende RP2			
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon				
	Pré-traitement granulométrique	Tamisage à 2 mm			
	Fraction analysée	> 2 mm			
		< 2 mm	granulométrie		
			broyage pour chimie	à 0.250 mm pour dissolution totale	NF ISO 11464
		< 100 µm			
		< 125 µm			
	Séchage	Air		X	NF ISO 11464
		Etuve			
		Teneur en eau résiduelle après séchage à 105°C		X	NF ISO 11465
Humidité					
Echantillonnage	Réduction des échantillons composites après séchage				
	autre				
Traitement matières organiques	Conservées				
	Détruites				
Granulométrie	5 fractions non décarbonaté	A 0-2 µm			
		LF 2-20 µm			
		LG 20-50 µm			
		SF 50-200 µm			
Paramètres pédologiques		SG 200-2000 µm			
		Granulométrie autre	X	sédimentation (0-50 µm) et tamisage > 50 µm, NF X 31-107	
	Texture	Dominante			
		Secondaire			
		Classe texture FAO			
		Classe texture GEPPA			
	Matière organique-carbone	Méthode de dosage du carbone	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique, X 31-109		
			Oxydation par voie humide, Walkley-Black		
			Méthode combustion sèche	X	NF ISO 10694
			autre	Oxydation sulfochromique si CaCO ₃ > 50 g/kg	NF ISO 14235
		Teneur en carbone organique			
		Méthode de dosage des matières humiques			
		Teneur en matières humiques			
		Perte au feu			
Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau		Méthode pour C _{org} soluble			
		Méthode pour C _{tot} soluble			
Teneur du carbone soluble dans l'eau	Carbone organique				
	Carbone total				
Calcaire total	Méthode de dosage	Calcimétrie volumétrique	X	NF ISO 10693	
	teneur	Autre ou non précisé			
Calcaire actif	Méthode de dosage				
	teneur				

	Carbonates	Méthode de dosage			
		teneur			
	Azote	Teneur en N _{tot}			
		Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl		
			combustion sèche		
		Teneur en N _{org}			
		Méthode de dosage de N _{org}			
		Teneur en N _{minéral}			
		Méthode de dosage de N _{minéral}			
	Teneur en N _{ammoniacal}				
	Méthode de dosage de N _{ammoniacal}				
	C/N				
	P ₂ O ₅ assimilable	Extractible méthode Joret-Hébert		X	NF 31-161
		Extractible méthode Dyer			
		Extractible méthode Olsen			
	pH sol	pH _{eau}		X	NF ISO 10390
		dilution			
		pH _{KCl}			
		dilution			
		pH _{CaCl2}			
CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium	X	NF X 31-130	
		Méthode Rhiem oxalate d'ammonium			
		CaCl2 0.1M			
		BaCl2(Mehlich) à pH 8.2			
		autre			
CEC effective	Méthode de dosage	chlorure de cobalthexamine			
		BaCl ₂			
		échange KCl			
		chlorure d'ammonium NH4Cl 0.5M			
Cations échangeables	Valeur de CEC _{eff}	Non précisé			
	Méthodes	identique à dosage CEC	X	NF X 31-108	
		identique à dosage CEC _{eff}			
		KCl			
		Non précisé			
		Ca ²⁺ _{éch}	X		
		K ⁺ _{éch}	X		
		Mg ²⁺ _{éch}	X		
	Na ⁺ _{éch}	X			
	H ⁺ _{éch}				
	Al ³⁺ _{éch}				
	Fe ²⁺ _{éch}				
	Mn ²⁺ _{éch}				
	Taux de saturation	Méthode de dosage			
		teneur			
Fer	Méthode de dosage du fer _{total}				
	Teneur en fer _{total}				
	Méthode de dosage du fer libre	Tamm			
		Mehra Jackson, CBD			
		autre			
Teneur en Fer libre					
Al	Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm			
	autre				
	Teneur en Al _{libre}				
Cations extractibles EDTA	Méthode de dosage de Al _{extractible}				
	Teneur en Al _{extractible}				
	Méthode	Extraction EDTA			
EDTA - BCR non tamponné, méthode INRA					
autre					
Cu _{ext}					
Zn _{ext}					

Géochimie des sols, bases de données : Inventaire, proposition de démarches

		Mn _{ext}		
		Cd _{ext}		
		Cr _{ext}		
		Ni _{ext}		
		Pb _{ext}		
	B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau		
Propriétés physiques	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}		
	Conductivité hydraulique	Méthode de mesure	terrain	
			laboratoire	
		Conductivité hydraulique	terrain	
		laboratoire		

Paramètres analytiques	Méthode de minéralisation	Type d'attaque	Norme
	HF + HClO ₄ + HNO ₃		
	HF + HClO ₄ + HCl		
	HF + HClO ₄	X à 180°C	NF ISO 14869-1
	Frittage Na ₂ O ₂		
	1g éch + HNO ₃		
	HCl+ HNO ₃ (eau régale)		
	Autre	o, pour Hg, As et Se, attaque H ₂ SO ₄ -HNO ₃ , analyse par CVAFS pour Hg, CVAAS pour As et Se	Méthode INRA
Instrument de mesure			
	Quantomètre		
	DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)		
	ICP-AES		X
	Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)		
	ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)		
	ICP-MS		o
	Spectrométrie d'absorption atomique		
	Fluorescence RX (XRF)		
	Na ₂ O ₂ + Citrate		
	Colorimétrie		
	Potentiométrie		
	Ionométrie / dosage par électrode spécifique		
	Lab de Pathologie végétale, Essey-les-Nancy		
	BRGM		

Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
Ag			
Au			
Al	X		
Al ₂ O ₃			
As	o		
B			
Ba			
Be			
Bi	X		
Br			
Ca			
CaO			
Cd	X		
Ce			
Cl			
Co	X		
Cr	X		
Cu	X		
Dy			
Er			
Eu			
Fe	X		
Fe ₂ O ₃			
Ga			
Gd			
Ge			
Hf			
Ho			
K			
K ₂ O			
In	X		
La			

Li			
Lu			
Mg			
MgO			
Mn	X		
MnO			
Mo	X		
Na			
Na ₂ O			
Nb			
Nd			
Ni	X		
P ₂ O ₅			
Pb	X		
Pr			
Rb			
Sb	X		
Se	o		
Sc			
SiO ₂			
Sm			
Sn	X		
Sr			
Ta			
Tb			
Th			
Ti			
TiO ₂			
Tl	X		
Tm			
U			
V	X		
W			
Y			
Yb			
Zn	X		
Zr			
Perte au feu			
F sol, ppm			
F sol, ppm			

F eau, ppb			
Indice phénols			
Hg	X		
CH ₂			
Cyanures totaux			
HAP			
PCB			
Paramètres statistiques élémentaires	Effectif		Distributions de fréquences, tests de distribution, matrices de corrélations calculés avec Statistica software
	Minimum		
	Maximum		
	Moyenne		
	Médiane		
	1 ^{er} quartile		
	1 ^{er} décile		
	2 ^{ème} quartile		
	3 ^{ème} quartile		
	9 ^{ème} décile		
	Centile (0.5, 0.5, 0.59)	X	
	Dernier quartile		
	Dernier décile		
Indice de dispersion (max-min)/moy			
Vibrisse inf			
Vibrisse sup			
Précautions d'usage			

Annexe 8

Base de données RENECOFOR

Programme	Nom du programme		RENECOFOR – financement UE, ONF, Ministère de l'Agriculture et ADEME REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers de l'Office National des Forêts, partie française du suivi permanent des écosystèmes forestiers dans 34 pays européens		
	Nom des responsables		Erwin Ulrich : erwin.ulrich@onf.fr		
	Financement		Publics...		
	Institut		ONF		
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement		X		
	Profondeur base		X		
	Profondeur sommet		X		
	Commentaires				
	Photographies				
	Localisation échantillons stockés		Stockés		
	Période d'acquisition		1993-1995		
	Laboratoire d'analyse				
	Date d'analyse				
	Contamination anthropique du site				
Données	Accessibilité - localisation		ONF - Fontainebleau		
	Etat (brutes ou traitées)		33 millions de données brutes dans la bdd centrale (fin 2001), brutes		
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés		
			Horizon		
			Profondeur, cm		
		Horizons de surface	Nomenclature	OL, OF, OH	Analyses systématiques sur OH, analyses complémentaires sur 11 sites et 34 horizons organominéraux OL+OF+OH (si OH<1) ou OL+OF et OH (si OH>1cm)
			Profondeur, cm	0-10, 10-20, 20-40	
		Horizons de profondeur	Nomenclature		
			Profondeur, cm		
Sol développé sur alluvions					
Litière		X			
Sédiments	Floodplain				
Prélèvement	Sédiment de berges				
	Fond de vallon sec				
	Limons d'inondation				
	Alluvions de ruisseau				
	Sédiments de drain court				
	Roche				
Prélèvement	Nombre de sites		23 + 11 :		
	Densité échantillonnage		Description de 2 profils de sol par parcelle		
	Méthode de prélèvement	Surface	Par horizons, grappes carrées de 13.5 m de côté, disposées aux 4 coins de la placette et en son centre. Dans chaque grappe, 5 points de prélèvement ont été tirés au sort parmi les 16 intersections définies par un maillage de 4.5 m de côté. En chaque point, 4 à 5 niveaux sont échantillonnés.		
		Profondeur			
Quantité matériel brut					
Localisation site	Département				
	Nom localité				
	Carte IGN				
	Carte géologique				
	X L2				
	Y L2				
	Z				
Niveau de précision du géoréférencement		Le réseau français est constitué de 102 placettes forestières permanentes de surface de 2 hectares, dont la partie centrale de 0.5 ha est clôturée			
Descriptif	Occupation	Cultivé	Épandage de boues		
			Aucun épandage		
			Sans contamination humaine		
			Non précisé		
		Non cultivé			
Forêt		X			

		Marécages				
		Friche				
		prairie				
		autre				
	Lithologie environnante	Granite				
		Gneiss, schistes				
		Roche sédimentaire				
		Roche volcaniques				
		Roche volcano-sédimentaire				
	Végétation environnante					
Hydromorphie	Sec					
	Humide					
Nomenclature	Non précisé					
	FAO					
	Référentiel pédologique					
	Légende RP2					
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon					
	Pré-traitement granulométrique					
	Fraction analysée	> 2 mm				
		< 2 mm	granulométrie broyage pour chimie			
		< 100 µm				
		< 125 µm				
	Séchage	Air				
		Etuve				
		Teneur en eau résiduelle après séchage à 105°C				
		Humidité				
Echantillonnage	Réduction des échantillons composites				Pour chaque niveau de prélèvement, un composite est constitué par le regroupement à volume égal des 5 prélèvements de la grappe.	
	autre					
	Traitement matières organiques	Conservées				
		Détruites				
Paramètres pédologiques	Granulométrie	5 fractions non décarbonaté	A 0-2 µm			
			LF 2-20 µm			
			LG 20-50 µm			
			SF 50-200 µm			
			SG 200-2000 µm			
	Granulométrie autre					
	Texture	Dominante				
		Secondaire				
		Classe texture FAO				
		Classe texture GEPPA				
	Matière organique- carbone	Méthode de dosage du carbone organique	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique			
			Oxydation par voie humide, Walkley- Black			
			Méthode combustion sèche			
			autre			
		Teneur en carbone organique				
		Méthode de dosage des matières humiques				
		Teneur en matières humiques				
Perte au feu						
Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau		Méthode pour C _{org} soluble				
		Méthode pour C _{tot} soluble				
Teneur du carbone soluble dans l'eau	Carbone organique					
	Carbone total					
Calcaire total	Méthode de dosage	Calcimétrie volumétrique				
		Non précisé				

		teneur			
Calcaire actif	Méthode de dosage				
	teneur				
Carbonates	Méthode de dosage			Non précisée	
	teneur			X, si pH _{CaCl2} >6	
Azote	Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl		X (10-20 et 20-40 cm)	
		combustion sèche			
		non précisé		X (0-10 cm)	
	Teneur en N _{tot}			X (0-10, 10-20, 20-40)	
	Méthode de dosage de N _{org}				
	Teneur en N _{org}				
	Méthode de dosage de N _{minéral}				
	Teneur en N _{minéral}				
Méthode de dosage de N _{ammoniacal}					
Teneur en N _{ammoniacal}					
C/N					
P ₂ O ₅ assimilable	Extractible méthode Joret-Hébert				
	Extractible méthode Dyer			X	
	Extractible méthode Olsen				
pH sol	pH _{eau}			X	
	dilution				
	pH _{KCl}				
	dilution				
	pH _{CaCl2}			X	
dilution					
CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium			
		Méthode Rhiem oxalate d'ammonium			
		CaCl2 0.1M			
		BaCl2(Mehlich) à pH 8.2			
		autre			
CEC effective	Méthode de	chlorure de			
Cations échangeables	dosage	cobaltihexamine			
		BaCl ₂			
		échange KCl			
		chlorure d'ammonium NH4Cl 0.5M			
		Non précisé		X	
		Valeur de CEC _{eff}		X	
	Méthodes	identique à dosage CEC	identique à dosage CEC		
			identique à dosage CEC _{eff}		
			KCl		
			Non précisé		
		Ca ²⁺ _{ech}		X	
			K ⁺ _{ech}	X	
			Mg ²⁺ _{ech}	X	
			Na ⁺ _{ech}		
	H ⁺ _{ech}		X		
		Al ³⁺ _{ech}	X		
		Fe ²⁺ _{ech}			
		Mn ²⁺ _{ech}	X		
	Taux de saturation	Méthode de dosage			
		teneur			
Fer	Méthode de dosage du fer _{total}				
	Teneur en fer _{total}				
	Méthode de dosage du fer libre	Tamm			
		Mehra Jackson, CBD			
		autre			
Teneur en Fer libre					
Mn	Méthode	Tamm			
		Non précisé			
Teneur en Mn total					
Al	Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm			
		autre			
	Teneur en Al _{libre}				
	Méthode de dosage de Al _{extractible}				

		Teneur en Al _{extractible}		
Cations extractibles	Méthode	Extraction EDTA		
		EDTA – BCR non tamponné, méthode INRA		
		autre		
	Cu _{ext}			
	Zn _{ext}			
	Fe _{ext}			
	Mn _{ext}			
	Cd _{ext}			
	Cr _{ext}			
	Ni _{ext}			
Pb _{ext}				
B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau			
	teneur			
Propriétés physiques	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}		
		D _{app}	X	
	Conductivité hydraulique	Méthode de mesure	terrain	
			laboratoire	
	Conductivité hydraulique	terrain		
		laboratoire		

	Méthode de minéralisation	Type d'attaque	Norme
Paramètres analytiques	HF + HClO ₄ + HNO ₃		
	HF + HClO ₄ + HCl		
	HF + HClO ₄		
	Frittage Na ₂ O ₂		
	1g éch + HNO ₃		
	HCl + HNO ₃ (eau régale)		
	Autre		
Instrument de mesure			
	Quantomètre		
	DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)		

	ICP-AES	
	Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)	
	ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)	
	ICP-MS	
	Spectrométrie d'absorption atomique	
	Fluorescence RX (XRF)	
	Na ₂ O ₂ + Citrate	
	Colorimétrie	
	Potentiométrie	
	Ionométrie / dosage par électrode spécifique	
	Lab de Pathologie végétale, Essey-les-Nancy (BRGM)	

Elément	Conc ppm ou % pour oxydes	Seuil inf	Seuil sup
Ag			
Au			
Al			
Al ₂ O ₃			
As			
B			
Ba			
Be			
Bi			
Br			
Ca			
CaO			
Cd		X	
Ce			
Cl			
Co			
Cr			
Cu		X	
Dy			
Er			

Eu			
Fe			
Fe ₂ O ₃			
Ga			
Gd			
Ge			
Hf			
Ho			
K			
K ₂ O			
In			
La			
Li			
Lu			
Mg			
MgO			
Mn			
MnO			
Mo			
Na			
Na ₂ O			
Nb			
Nd			
Ni		X	
P ₂ O ₅			
Pb		X	
Pr			
Rb			
Sb			
Se			
Sc			
SiO ₂			
Sm			
Sn			
Sr			
Ta			
Tb			
Th			
Ti			
TiO ₂			
Tl			
Tm			
U			
V			
W			
Y			
Yb			
Zn		X	
Zr			
Perte au feu			
F sol, ppm			
F sol, ppm			
F eau, ppb			
Indice phénols			
Hg			
CH ₂			
Cyanures totaux			
HAP			
PCB			
Paramètres statistiques élémentaires	Effectif	X	
	Minimum	X	
	Maximum	X	
	Moyenne	X	
	Médiane		
	1 ^{er} quartile		
	1 ^{er} décile		
	2 ^{ème} quartile		
	3 ^{ème} quartile		
	9 ^{ème} décile		
Centiles (0.1, 0.5, 0.9)		X	
	Dernier quartile		
	Dernier décile		
	Indice de dispersion (max- min)/moy		
	Vibrisse inf		
	Vibrisse sup		
Précautions d'usage	Les Stocks de nécromasse, terre fine et éléments ont été évalués pour chaque niveau de prélèvement comme pour l'ensemble des couches minérales ou des couches holograniques. Les stocks de chaque couche ont été rapportés au stock 0-40cm		

Annexe 9

Base de données FOREGS

Programme	Nom du programme		FOREGS - Forum of European Geological Survey			
		Nom des responsables		X		
	Financements		Par chaque service européen			
	Institut		X			
Informations sur l'échantillon	Nom-numéro du prélèvement		X			
	Profondeur base					
	Profondeur sommet					
	Commentaires		X Nom de l'échantillonneur			
	Photographies		X			
	Localisation échantillons stockés		X			
	Période d'acquisition		1999-2002			
	Laboratoire d'analyse		X			
	Date d'analyse					
	Contamination anthropique du site					
Données	Accessibilité - localisation		X, Geochemical Atlas of Europe, part 1 - Background Information, Methodology and Maps - G.S. of Finland, Espoo 2005			
	Etat (brutes ou traitées)					
Type échantillon	Sol	Solum	Nombre d'horizons échantillonnés		X	
			Horizon			
			Profondeur, cm			
		Horizons de surface	Nomenclature	X		
			Profondeur, cm	X		
		Horizons de profondeur	Nomenclature	X		
	Profondeur, cm		X			
	Sol développé sur alluvions					
	Litière		X			
	Sédiments	Floodplain	X			
Sédiment de berges		X				
Fond de vallon sec		X				
Limons d'inondation		X				
		Alluvions de ruisseau	X			
		Sédiments de drain court	X			
Prélèvement	Roche					
	Nombre de sites	X				
	Densité échantillonnage	X				
	Méthode de prélèvement	X				
	Quantité matériel brut	X				
Localisation site	Département	X				
	Nom localité	X				
	Carte IGN	X				
	Carte géologique					
	X L2	X (L2 ?)				
	Y L2	X (L2 ?)				
	Z	X				
Niveau de précision du géoréférencement	X					
Descriptif	Occupation	Cultivé	Epandage de boues	X		
			Aucun épandage			
			Sans contamination humaine			
			Non précisé			
		Non cultivé	X			
		Forêt	X			
	Marécages	X				
	Friche prairie	X				
	autre	X				
	Lithologie environnante	Granite	X	Indication de la lithology du bedrock		
		Gneiss, schistes	X			
Roche sédimentaire		X				
Roche volcaniques		X				
Roche volcano-sédimentaire		X				

		Grès, schistes et poudingue houilliers	X	
	Végétation environnante	X (paysage et topographie)		
	Hydromorphie	Sec		
		Humide		
		Non précisé		
	Nomenclature	FAO		
		Référentiel pédologique		
		Légende RP2		
Préparation analytique	Mode de préparation de l'échantillon			
	Pré-traitement granulométrique			
	Fraction analysée	> 2 mm		
		< 2 mm	granulométrie	
			broyage pour chimie	
	Séchage	< 100 µm		
		< 125 µm		
		Air		
		Etuve		
Teneur en eau résiduelle après séchage à 105 °C				
Echantillonnage	Humidité		X	
	Réduction des échantillons composites			
Traitement matières organiques	autre			
	Conservées			
	Détruites			
Granulométrie	5 fractions non décarbonaté	A 0-2 µm		
		LF 2-20 µm		
		LG 20-50 µm		
		SF 50-200 µm		
		SG 200-2000 µm		
	Granulométrie autre		Grain size analysis	
Paramètres pédologiques	Texture	Dominante		
		Secondaire		
		Classe texture FAO		
		Classe texture GEPPA		
		Non précisé	X	
	Matière organique-carbone	Méthode de dosage du carbone organique	Anne, Oxydation MO par dichromate de K en milieu sulfurique, X 31-109	
			Oxydation par voie humide, Walkley-Black	
			Méthode combustion sèche	
			autre	
		Teneur en carbone organique		
		Méthode de dosage des matières humiques		
		Teneur en matières humiques		
		Perte au feu		
		Méthode de dosage du carbone soluble dans l'eau	Méthode pour C _{org} soluble	
			Méthode pour C _{tot} soluble	
	Teneur du carbone soluble dans l'eau	Carbone organique		
	Calcaire total	Méthode de dosage	Carbone total	
			Calcimétrie volumétrique	
		Non précisé		
	teneur			
	Calcaire actif	Méthode de dosage		
	teneur			
	Carbonates	Méthode de dosage		
	teneur			
	Azote	Méthode de dosage de N _{tot}	Kjeldahl	
			combustion sèche	
			non précisé	

		Teneur en N _{tot}		
		Méthode de dosage de N _{org}		
		Teneur en N _{org}		
		Méthode de dosage de N _{minéral}		
		Teneur en N _{minéral}		
		Méthode de dosage de N _{ammoniacal}		
		Teneur en N _{ammoniacal}		
	C/N			
	P ₂ O ₅ assimilable	Extractible méthode Joret-Hébert		
		Extractible méthode Dyer		
		Extractible méthode Olsen		
	pH sol	pH _{eau}		
		dilution		
		pH _{KCl}		
		dilution		
		pH _{CaCl2}		
		dilution		
	CEC	Méthode de dosage	Méthode Metson à pH 7, acétate d'ammonium	
			Méthode Rhiem oxalate d'ammonium	
			CaCl2 0.1M	
			BaCl2(Mehlich) à pH 8.2	
		autre		
	CEC effective	Méthode de dosage	chlorure de cobalthexamine	
			BaCl ₂	
			échange KCl	
			chlorure d'ammonium NH4Cl 0.5M	
			Non précisé	
		Valeur de CEC _{eff}		
	Cations	Méthodes	identique à dosage CEC	
	échangeables		identique à dosage CEC _{eff}	
			KCl	
			Non précisé	
			Ca ²⁺ _{ech}	
			K ⁺ _{ech}	
			Mg ²⁺ _{ech}	
			Na ⁺ _{ech}	
			H ⁺ _{ech}	
			Al ³⁺ _{ech}	
			Fe ²⁺ _{ech}	
		Mn ²⁺ _{ech}		
	Taux de saturation	Méthode de dosage		
		teneur		
	Fer	Méthode de dosage du fer libre	Méthode de dosage du fer _{total}	
			Teneur en fer _{total}	
			Tamm	
			Mehra Jackson, CBD	
		autre		
		Teneur en Fer libre		
	Mn	Méthode	Tamm	
			Non précisé	
		Teneur en Mn total		
	Al	Méthode de dosage de Al _{libre}	Tamm	
			autre	
			Teneur en Al _{libre}	
		Méthode de dosage de Al _{extractible}		
		Teneur en Al _{extractible}		
	Cations extractibles	Méthode	Extraction EDTA	
			EDTA – BCR non tamponné, méthode INRA	
			autre	
		Cu _{ext}		
		Zn _{ext}		

		Fe _{ext}			
		Mn _{ext}			
		Co _{ext}			
		Cr _{ext}			
		Ni _{ext}			
		Pb _{ext}			
Propriétés physiques	B	Méthode de dosage du B soluble à l'eau		teneur	
	Densité apparente	Méthode de dosage de D _{app}		D _{app}	
Propriétés physiques	Conductivité hydraulique	Méthode de mesure	terrain		
			laboratoire		
		Conductivité hydraulique	terrain		
		laboratoire			
Paramètres analytiques	Méthode de minéralisation	Type d'attaque		Norme	
	HF + HClO ₄ + HNO ₃	X (stream and floodplain sediments, top and subsoils)			
	HF + HClO ₄ + HCl				
	HF + HClO ₄				
	Frittage Na ₂ O ₂				
	1g éch + HNO ₃				
	HCl+ HNO ₃ (eau régale)				
	Autre				
	Instrument de mesure				
	Quantomètre				
DCP (spectrométrie d'émission à plasma couplé direct)					
ICP-AES			X (stream and floodplain sediments, top and subsoils)		
Flamme AAS (spectrométrie d'absorption atomique en flamme)					
ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique et correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium)					
	ICP-MS			X (stream and floodplain sediments, if values of XRF < calibration range), esp Pb	
	Spectrométrie d'absorption atomique				
	Fluorescence RX (XRF)			X (stream and floodplain sediments, top and subsoils)	
	Na ₂ O ₂ + Citrate				
	Colorimétrie				
	Potentiométrie				
	Ionométrie / dosage par électrode spécifique				
	Lab de Pathologie végétale, Essey-les-Nancy				
BRGM					

	Floodplain sediment		Humus	Soil				Stream sediment		Stream w
	aqua regia	total		Sub soil		Top soil		aqua regia	total	
				aquaregia	total	aquaregia	total			
Ag					X		X			
Al										X
Al ₂ O ₃		X			X		X		X	
As	X	X		X	X	X	X	X	X	X
B										X
Ba	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Be		X			X		X		X	X
Bi					X		X			X
Br										X
Ca										X
CaO		X			X		X		X	
Cd		X	X		X		X		X	X
Ce		X			X		X		X	X
Cl ⁻										X
Co	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cr	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Cs		X			X		X		X	X
Cu	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DOC										X
Dy		X			X		X		X	X
EC										X
Er		X			X		X		X	X
Eu		X			X		X		X	X
F										X
Fe	X			X		X		X		X
Fe ₂ O ₃		X			X		X		X	
Ga		X	X		X		X		X	X
Gd		X			X		X		X	X
Ge										X
Grains 0.002					X		X			
Grains 0.06					X		X			
Grains D50%					X		X			
Grains Sort Index					X		X			
HCO ₃ ⁻										X
Hf		X			X		X		X	X
Hg		X	X		X		X		X	
Ho		X			X		X		X	X
I					X		X			X
In					X		X			X
K										X
K ₂ O		X			X		X		X	
La		X	X		X		X		X	X
Li		X							X	X
Lu		X			X		X		X	X
Mg										X
MgO		X			X		X		X	
Mn	X			X		X		X		X
MnO		X			X		X		X	
Mo		X			X		X		X	X
Na										X
Na ₂ O		X			X		X		X	
Nb		X			X		X		X	X
Nd		X			X		X		X	X
Ni	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NO ₃ ⁻										X
P ₂ O ₅		X			X		X		X	
Pb	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pH					X		X			X
Pr		X			X		X		X	X
Rb		X	X		X		X		X	X
S	X			X		X		X		
Sb		X			X		X		X	X
Sc					X		X			

Se									X
SiO ₂	X			X		X		X	X
Sm	X			X		X		X	X
Sn	X			X		X		X	
SO ₄ ²⁻									X
Sr	X	X		X		X		X	X
Ta	X			X		X		X	X
Tb	X			X		X		X	X
Te				X		X			X
Th	X			X		X		X	X
Ti									X
TiO ₂	X			X		X		X	
Tl	X			X		X		X	X
Tm	X			X		X		X	X
TOC	X			X		X		X	
U	X			X		X		X	X
V	X	X	X	X	X	X	X	X	X
W	X			X		X		X	X
Y	X			X		X		X	X
Yb	X			X		X		X	X
Zn	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Zr	X			X		X		X	X

Paramètres statistiques élémentaires	Effectif	X
	Minimum	X
	Maximum	X
	Moyenne	X
	Mediane	X
	1 ^{er} quartile	
	1 ^{er} décile	
	2 ^{ème} quartile	
	3 ^{ème} quartile	
	9 ^{ème} décile	
	Dernier quartile	
	Dernier décile	
	90 ^{ème} centile	X
	Déviacion standard	X
Indice de dispersion (max-min)/moy		
Vibrisse inf		
Vibrisse sup		
Précautions d'usage		

Annexe 10

Éléments Traces Métalliques (ETM), définition et portée

Ces trente dernières années, le terme de « métaux lourds » a été largement utilisé. Il est souvent usité pour décrire des métaux et semi-métaux (ou encore métalloïdes) qui sont généralement associés à des contaminations en raison de leur toxicité ou écotoxicité potentielle (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Zn...). Au même moment, à travers les textes réglementaires, des listes de métaux étaient spécifiées. Toutefois, de telles listes peuvent varier d'un pays à l'autre et, parfois, seule la terminologie de « métaux lourds » est donnée sans établir de liste précise

Bien qu'une nouvelle appellation, « élément trace métallique (ETM) », ait pris la place de la précédente, sa signification reste une notion relativement floue car aucune définition scientifique, technique ou juridique est unanimement reconnue. À titre d'exemple, un rapport d'information au Sénat français intitulé « Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé » indiquait : « L'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique, ni application juridique ».

Ainsi, même si une nouvelle terminologie, comme « ETM », est utilisée, il ne faut pas omettre les définitions fondamentales pour mieux définir le comportement des métaux dans le milieu naturel. Au cours de l'histoire et en fonction des spécialités s'adressant à la chimie, diverses définitions pour les « métaux » ont été ou sont utilisées, le Tableau 1 de l'annexe 10 en propose un résumé.

Ces définitions fondamentales sont fournies en première approche par différents concepts, tels que la classification périodique (occupation de la dernière couche électronique), l'échelle de comportement acide de Lewis complétée par la démarche de Pearson (1963) se rapprochant de l'ancienne classification géochimique donnant aux éléments constitutifs de la croûte terrestre (Goldschmidt) des caractères lithophiles (préférentiellement associés au silicium), sidérophiles (préférentiellement associés au fer), ou chalcophile (préférentiellement associés au soufre). De telles classifications résument l'appréhension du comportement des éléments et permettent une prédiction grossière de la toxicité des éléments métalliques.

À travers la classification périodique, on peut approcher la réactivité des éléments et son incidence sur le substrat biologique :

- groupe s : les métaux alcalins sont très mobiles, faiblement complexés, jouant le rôle d'électrolytes. Les éléments alcalins forment des complexes plus stables et présentent des rôles fonctionnels plus spécialisés comme initiateurs de structures et activateurs d'enzymes. Aucun des groupes n'a de rôle significatif dans la chimie de l'oxydo-réduction dans le milieu vivant ;
- groupe p : quelques couples redox (par exemple, Pb^{4+}/Pb^{2+}) compliquent l'action de ces métaux. Les éléments de ce groupe forment généralement des complexes plus stables que ceux du groupe précédent. Les éléments de ce groupe, ayant le nombre atomique le plus élevé, présentent une préférence à se lier fortement avec le soufre. Ceci est une cause majeure de leur toxicité ;
- groupe d : présente une très large possibilité de comportement redox et de complexation, expliquant leur rôle catalytique dans l'action des enzymes ;

Terme usité	Définition
Métal	Les métaux peuvent être définis par leurs propriétés physiques comme éléments ayant un éclat métallique, la particularité de conduire la chaleur, l'électricité (liaison par bande) et de former des ions positifs par perte d'électrons.
Métalloïde	Voir semi-métal
Semi-métal	Se dit d'un élément ayant la plupart des propriétés et l'apparence physique d'un métal. Certains éléments possèdent quelques propriétés des métaux, mais pas toutes (qui ressemblent aux métaux).
Métal léger	La définition très imprécise se réfère en même temps à l'élément et à ses composés. À l'origine, le terme était utilisé pour des métaux ayant une densité inférieure à 4 g/cm ³ (Bjerrum, 1936).
Métal lourd	Se dit d'un élément métallique ayant une densité comprise en 3,5 g/cm ³ et 7 g/cm ³ (très variable suivant les auteurs), un poids atomique élevé (< 40 g/mol) et un nombre atomique compris entre 21 (Sc) et 92 (U). Élément communément utilisé dans l'industrie et génériquement toxique pour les animaux et l'activité biologique aérobie et anaérobie car ayant la particularité de se concentrer dans la chaîne alimentaire et provoquant des dommages même à faible dose. Terme souvent appliqué aux métaux de transition tels que Cu, Pb, Zn.
Métal essentiel	En première approche, c'est un métal nécessaire à la vie d'un organisme et dont la carence induit des symptômes spécifiques.
Métal bénéfique	Terme désuet qui implique un métal non essentiel qui peut améliorer la santé. Exemple : l'arsenic qui, à faible dose, aurait des effets sur les maladies auto-immunes.
Métal toxique	Terme imprécis issu des règles fondamentales de toxicologie de Paracelsus (1493-1541) qui disaient que toute substance incluant du carbone ou tout autre élément ou produits dérivés peut être toxique à une dose suffisamment élevée. Ce degré de toxicité est très variable d'un métal à l'autre, d'un organisme à l'autre. Les métaux purs sont rarement, voire jamais, toxiques (à l'exception des poudres très fines pouvant affecter les poumons). La toxicité doit être définie en référence à une relation dose-réponse pour le composé et l'espèce considérée.
Métal abondant	À l'exemple du fer ou de l'aluminium, ce terme fait couramment référence à un élément qui est en proportion non négligeable dans l'écorce terrestre (lithosphère) et par extension à tout autre milieu (hydrosphère...).
Métal disponible	Se dit d'un métal présent dans le milieu naturel sous une forme le rendant facilement assimilable par les organismes vivants.
Métal trace Élément Trace Métallique	Se dit d'un métal présent dans le milieu naturel (sol, plantes, organe biologique...) à des concentrations de l'ordre du mg/kg. Parfois confondu à tort avec un oligo-élément.
Micro-nutriment	Terme récent permettant de décrire un élément utile, à faible dose, au bon fonctionnement d'un organisme vivant.

Tableau 1 : Terminologies des métaux les plus souvent utilisées.

- groupe f : les lanthanides et actinides montrent un large champ de réactions redox et de complexation. Généralement, leur comportement dans les réactions biochimiques est limité, à l'exception des actinides qui sont des polluants très significatifs.

Les interactions entre les éléments métalliques et les systèmes vivants sont dominées par leurs propriétés. Par exemple, les propriétés des acides de Lewis (1925) définis comme espèce élémentaire ayant une couche réactive présentant une vacance électronique ou bien présentant une couche électronique plus interne avec une vacance électronique, qui entraîne sa réactivité. Plus simplement, un acide de Lewis peut accepter une paire d'électrons et une base peut fournir une paire d'électrons. Dans la classification originelle, les ions métalliques sont classés en trois groupes A, B, et intermédiaire (limite, border line), selon les affinités qu'ils présentent pour différents ligands (Tableau 2). La théorie de Pearson (Tableau 3) dur/mou, acide/base vient compléter cette approche (A, dur ; B, mou). Ces deux approches reposent sur la relation existant entre la charge ionique (z) et le rayon ionique (r) tel que z/r apparaît comme une fonction du second potentiel d'ionisation de transition de E^+ vers E^{2+} . Ainsi les ions A (« acides ») durs, non polarisables, préfèrent se lier à des ligands (« base ») non polarisables durs, particulièrement des donneurs d'oxygène, donnant surtout des complexes ioniques très mobiles ; les ions B (« acides ») préfèrent se lier à des ligands (« base ») polarisables mous donnant plutôt des liaisons covalentes plus solides. Ainsi, en croisant les données des théories de Pearson et Lewis et la classification organisée selon l'occupation de la dernière couche électronique des métaux, il est possible de prédire grossièrement le comportement des ions métalliques.

Pour les métaux difficilement classables du fait de plusieurs états de valence, chaque état d'oxydation devra être considéré à part. Ainsi le Fe^{3+} est généralement considéré comme A, se liant préférentiellement à un ligand donneur d'oxygène comme les groupes phénolates ou carboxylates des acides humiques ou fulviques, alors que le Fe^{2+} est considéré comme difficilement classable ayant une forte affinité pour les ligands mous comme les groupements sulfures et thiols des ferrédoxines.

En conclusion de ce paragraphe, une liste d'ETM correspondant à l'énumération la plus commune est proposée : **Fe, Pb, Hg, U, Cr, Cu, Ag, Zn, Ti, Ni**. D'après ce qui précède, il est évident que cette liste n'est en aucun cas immuable et devra être reconsidérée en fonction des milieux abordés, de la nature des supports constituant la sphère géologique, des activités industrielles passées ou en cours, et des populations exposées.

The periodic table is divided into s, d, and p blocks. Lewis classification categories are indicated by colored boxes: Class A (orange), Class B (light blue), Borderline (yellow), Lithophile (red), Siderophile (green), Chalcophile (blue), and Lithophile/Chalcophile (purple). The f block (lanthanides and actinides) is shown below the main table.

Tableau 2 : Classification périodique des éléments présentant une synthèse des classifications, utiles pour la prévision du comportement des éléments : s, d, p, f blocks (orbitales), classification basée sur la dernière couche électronique occupée : Class A, B, borderline, classification de Lewis : Lithophile, Chalcophile, Siderophile, classification géochimique de Goldschmidt.

Hard	Borderline	Soft
Acids H^+ $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$ $Be^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+}$ $Al^{3+} > Ga^{3+}$ $Sc^{3+} > Y^{3+}; REE^{3+} (Lu^{3+} > La^{3+});$ Ce^{4+}, Sn^{4+} $Ti^{4+} > Tl^{3+}, Zr^{4+} \approx Hf^{4+}$ $Cr^{6+} > Cr^{3+}, Mo^{6+} > Mo^{5+} >$ $Mo^{4+}, W^{6+} > W^{4+}, Nb^{5+}, Ta^{5+};$ $Re^{7+} > Re^{6+} > Re^{4+}, V^{6+} > V^{5+} >$ $V^{4+}, Mn^{4+}, Fe^{3+}, Co^{3+}, As^{5+}, Sb^{5+}$ $Th^{4+}, U^{6+} > U^{4+}$ $PGE^{6+} > PGE^{4+}, etc. (Ru, Ir, Os)$	Acids $Fe^{2+}, Mn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+},$ $Cu^{2+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Sn^{2+},$ $As^{3+}, Sb^{3+}, Bi^{3+}$	Acids $Au^+ > Ag^+ > Cu^+$ $Hg^{2+} > Cd^{2+}$ $Pt^{2+} > Pd^{2+}$ other PGE ²⁺ $Tl^+ > Tl^3+$
Bases $F^-; H_2O, OH^-, O^{2-}, NH_3, NO_3^-;$ $CO_3^{2-} > HCO_3^-; SO_4^{2-} > HSO_4^-;$ $PO_4^{3-} > HPO_4^{2-} > H_2PO_4^-;$ carboxylates (i.e., acetate, oxalate, etc.); MoO_4^{2-}, WO_4^{2-}	Bases Cl^-	Bases $I^- > Br^-; CN^-; CO;$ $S^{2-} > HS^- > H_2S;$ organic phosphines (R_3P); organic thiols (RP); polysulfide (S_nS^{2-}); thiosulfate ($S_2O_3^{2-}$); sulfite (SO_3^{2-}); $HSe^-, Se^{2-}, HTe^-, Te^{2-};$ $AsS_2^-; SbS_2^-$

Tableau 3 : Classification des métaux et des ligands selon le principe Hard/Soft, Acid/Base (HSAB) de Pearson (1963) et Lewis (1923).

Les métaux « ultra-durs » de la série s n'ont qu'une très faible affinité pour les ligands « durs » et formeront des complexes essentiellement ioniques. Les métaux de la série p, au contraire seront plus « mous », et présenteront une plus forte affinité pour les ligands mous comme les donneurs d'électrons tels que les sulfures et le soufre, formant ainsi des liaisons fortement covalentes stables. Ainsi, ces métaux seront relativement immobiles dans le milieu naturel et difficilement excrétés par les organismes vivants, fait qui explique leur plus forte toxicité. Pour mémoire, la classification de Lewis/Pearson rappelle une classification géochimique plus ancienne où les ions métalliques (s.l.) étaient classés en quatre groupes : les éléments lithophiles, sidérophile, chalcophiles et atmophiles (Puddephatt, 1972).

Pour terminer, il faut remarquer que beaucoup d'ETM ont une utilité dans les processus biologiques. Par exemple, le fer est un composant essentiel de l'hémoglobine, le zinc et le cuivre sont des oligo-éléments indispensables. Enfin, tous les éléments traces métalliques sont par définition présents naturellement à l'état de traces dans le sol. L'activité humaine peut avoir renforcé cette présence car nombre d'ETM jouent un rôle important dans la vie quotidienne.

L'impact toxicologique des ETM dépend de leur forme chimique (nommée « espèce chimique »), de leur concentration, du contexte environnemental et de la possibilité de passage dans la chaîne du vivant.

Annexe 11

Analyses statistiques des données géochimiques de la partie supérieure du sol (subsoil) du FOREGS

INTRODUCTION

L'approche faite dans le cadre de ce chapitre est basée sur les seules données géochimiques disponibles sans réserve sur le WEB (FOREGS). Les données proviennent des analyses chimiques d'une couche de 25 cm d'épaisseur prélevée dans l'horizon C à une profondeur comprise entre 50 et 200 cm correspondant au sol inférieur (subsoil) et ne prenant en compte que les analyses faites sur « roche totale » (exclusion de l'attaque à l'eau régale). La partie analysée est de taille inférieure à 2 µm. Les sols sélectionnés sont ceux des forêts et des zones non utilisées, des prairies et, en dernier recours, des zones agricoles non cultivées.

Elle a pour but premier de dérouler une méthode d'exploration de données (data mining) et de valider la démarche dans le cas où une approche similaire devait être utilisée pour d'autres bases de données pour en valider le contenu : validation de la cohérence des données, éviter les redondances à l'échelle des éléments (éléments ayant un comportement commun, par exemple le Zr et le Hf portés par les mêmes minéraux), élimination des individus ayant des anomalies hors normes...

Dans le cas du FOREGS, la démarche statistique avait deux objectifs : i) analyser les tendances d'une population d'analyses géochimiques ; ii) et ainsi de voir si les tendances trouvées peuvent être raisonnablement cartographiées à l'échelle du territoire considéré, en tenant compte de la faible densité ponctuelle des prélèvements et superposées de manière cohérente avec la carte géologique de l'Europe.

Bien que la maille de l'échantillonnage du FOREGS ne soit pas adaptée aux objets géologiques abordés à l'échelle de l'Europe, la méthode d'exploration de données (data mining) présente des résultats, globalement satisfaisants, qui montrent l'efficacité de la méthode appliquée aux populations de données géochimiques étendues. Les regroupements d'éléments trouvés sont cohérents avec les connaissances acquises sur le milieu naturel : affinités cristallogéniques, minéralogiques et géochimiques entre éléments constitutifs de l'écorce terrestre.

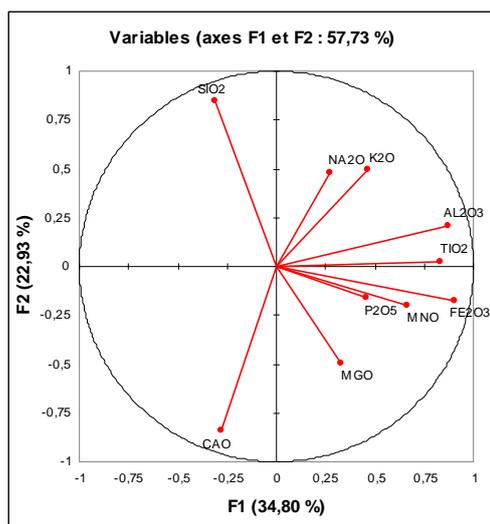
LES ÉLÉMENTS MAJEURS

L'analyse en composantes principales des éléments majeurs (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O et P₂O₅) pour les sols du FOREGS est décrite ci-après.

Variabes	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1	-0,169	-0,221	-0,366	-0,234	-0,449	-0,769	0,180	0,092	-0,224
TiO ₂		1	0,680	0,782	0,475	0,154	-0,273	0,123	0,215	0,284
Al ₂ O ₃			1	0,725	0,385	0,142	-0,334	0,358	0,605	0,226
Fe ₂ O ₃				1	0,625	0,354	-0,177	0,071	0,174	0,360
MnO					1	0,215	-0,075	-0,010	0,119	0,325
MgO						1	0,183	-0,004	-0,034	0,058
CaO							1	-0,281	-0,375	-0,021
Na ₂ O								1	0,348	0,045
K ₂ O									1	0,101
P ₂ O ₅										1

Tableau 1 : Matrice de corrélation de Pearson obtenue à partir des éléments majeurs exprimés en oxydes.

Les deux premiers axes de l'ACP représentent 57 % de la variabilité (Figure 1). La faible représentativité constatée s'explique par la grande variabilité des données étudiées. Le premier axe F1 représente 34,8 % de la variabilité. Les plus fortes contributions au premier axe sont Fe_2O_3 , Al_2O_3 et TiO_2 puis MnO dans une moindre mesure. Les variables expliquant le plus l'axe F2 sont SiO_2 et CaO à plus de 30 %, puis K_2O , Na_2O et MgO à 10 %.



	F1	F2	F3	F4	F5
Variance (%)	34,80	22,93	10,98	8,85	7,33
% cumulé	34,80	57,73	68,71	77,56	84,89
Coordonnées des variables					
	F1	F2	F3	F4	F5
SiO_2	-0,308	0,851	-0,323	-0,145	0,178
TiO_2	0,829	0,026	-0,217	-0,148	-0,128
Al_2O_3	0,872	0,206	0,236	-0,009	-0,238
Fe_2O_3	0,903	-0,179	-0,165	-0,157	-0,014
MnO	0,668	-0,202	-0,346	-0,029	0,076
MgO	0,327	-0,494	0,313	-0,450	0,464
CaO	-0,278	-0,843	0,281	0,208	-0,163
Na_2O	0,271	0,481	0,545	0,144	0,425
K_2O	0,462	0,492	0,444	0,190	-0,294
P_2O_5	0,454	-0,160	-0,269	0,717	0,338

Figure 1 : ACP des sols du FOREGS, éléments majeurs projection des variables dans le plan F1-F2 expliquant 58 % de la variance de la population.

Les coefficients de corrélation les plus importants concernent les couples $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (Figure 1). Ils témoignent, d'une part, de la coexistence des éléments dans des phases d'oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, parfois riches en titane, et, d'autre part, des micas résiduels et argiles. Le manganèse, quant à lui, co-précipite préférentiellement avec les phases ferrifères. La corrélation Al/Ti est

généralement induite par la présence d'oxydes de titane associés aux minéraux phyllosilicatés (argiles, micas). L'association Fe/Al est probablement due à leur association dans les argiles et les micas ferrifères. La corrélation K_2O/Al_2O_3 semblerait dépendante de la chimie des micas moins solubles.

Le calcium est anti-corrélé avec le silicium par antinomie : les roches d'origine détritique résiduelle ou silicatée profonde, riches en silice, s'opposent aux roches d'origine chimique marine ou lacustre (carbonate de calcium).

Le comportement faiblement à partiellement corrélé entre Na_2O et K_2O (vérifié sur un diagramme binaire) s'explique par le comportement cristalochimique de ces deux éléments qui peuvent se substituer l'un à l'autre dans les minéraux : diamètre de l'ion proche et environnement électronique identique.

Une classification ascendante hiérarchique (CAH) basée sur 8 classes a permis d'identifier au mieux les relatives contributions (Figure 2).

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8
n	57	12	109	223	2	106	144	134
SiO ₂	26.95	30.01	57.74	66.07	38.05	62.16	71.98	87.12
TiO ₂	0.28	0.33	0.96	0.64	0.54	0.81	0.47	0.32
Al ₂ O ₃	5.73	6.89	15.92	10.80	10.57	16.77	12.71	5.06
Fe ₂ O ₃	2.34	4.79	7.37	4.24	6.78	5.37	3.20	1.54
MnO	0.05	0.08	0.16	0.08	0.15	0.07	0.05	0.03
MgO	0.96	12.23	2.22	1.46	0.81	1.40	1.05	0.32
CaO	30.20	15.34	2.36	4.10	3.15	0.73	1.81	0.58
Na ₂ O	0.21	0.34	1.53	0.79	0.25	1.27	2.94	0.52
K ₂ O	0.87	1.00	2.11	2.07	0.85	3.32	2.68	1.39
P ₂ O ₅	0.09	0.08	0.15	0.13	1.61	0.14	0.10	0.06

Dendrogramme

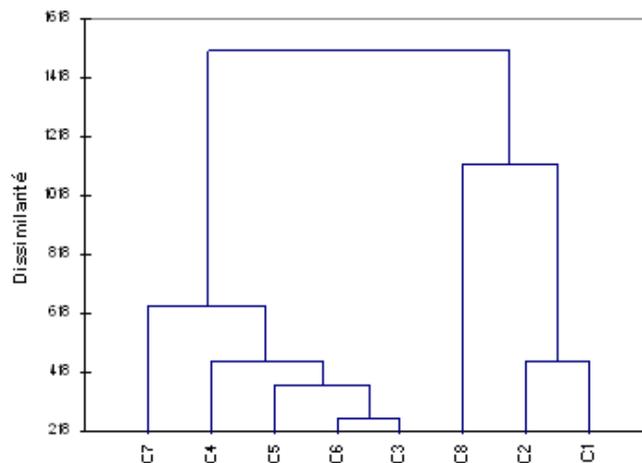


Figure 2 : CAH sur 8 classes, dendrogramme et moyennes sur les classes individualisées.

La projection des points des classes obtenues par la CAH sur les axes F1 et F2 de l'ACP réalisée sur les majeurs permet de distinguer des groupes de sols caractérisés par des teneurs importantes en un élément (Figure 3) :

- les classes 1 et 2 sont expliquées par CaO et MgO (sols sur substratum carbonaté) ;
- la classe 3 est expliquée par TiO₂, Fe₂O₃, MnO, Na₂O Al₂O₃, et en moindre mesure Al₂O₃, K₂O (sol sur substratum cristallin de nature acide) ;
- la classe 4 qui est mal discriminée par les axes de projections choisis ;
- la classe 5 composée de deux individus souligne des anomalies marquées par des teneurs exceptionnelles en phosphore ;
- la classe 6 est expliquée par Al₂O₃ et K₂O (sol sur substratum cristallin potassique) ;
- la classe 7 est partiellement expliquée par Na₂O, K₂O et en moindre mesure SiO₂ ;
- la classe 8 est expliquée 1) par SiO₂ et comporte les plus fortes valeurs en SiO₂ mais aussi 2) par un effet de dilution par la silice qui l'oppose aux autres tendances (sédiments essentiellement siliceux) ;
- la classe 4 et une partie de la classe 7 ne sont expliquées par aucun des deux axes choisis.

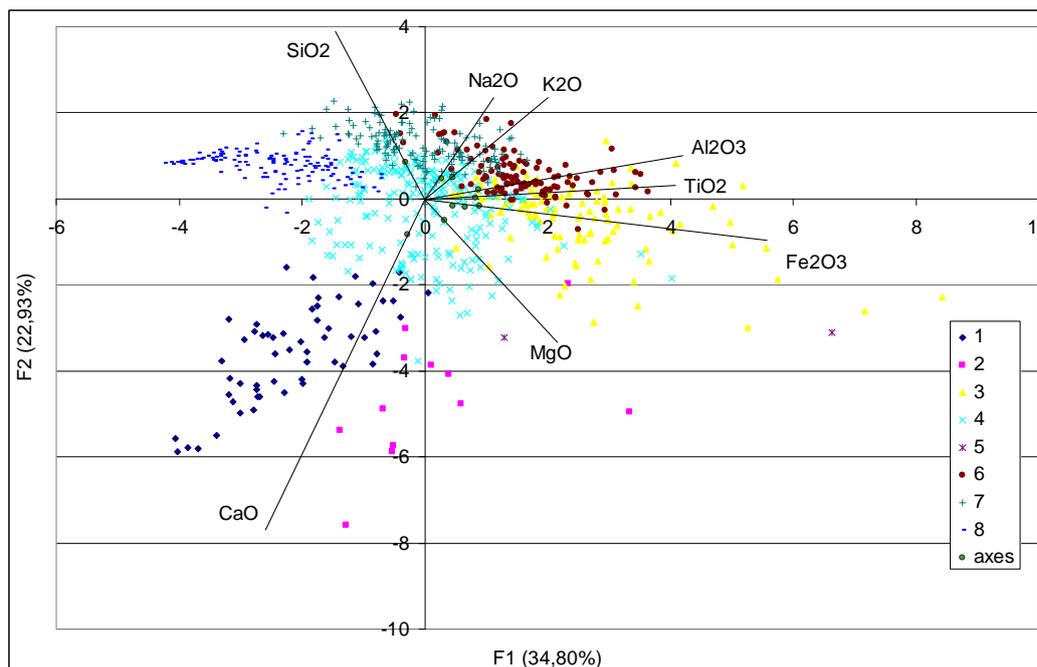


Figure 3 : Projection des points des classes obtenues par la CAH sur les axes F1 et F2 de l'ACP sur les majeurs.

Afin de préciser les variables qui pourraient expliquer mieux l'ensemble des points groupés autour de l'origine, une ACP est réalisée sur l'ensemble des points répartis

autour de l'origine et qui appartiennent essentiellement aux classes 4, 7 et en moindre mesure 6. Les points sont choisis tels que : $-1 < x_{F1} < 1$ et $-2 < y_{F2} < 2$ (Figure 4).

	F1	F2	F3	F4	F5
Variance expliquée (%)	29.563	18.339	13.713	9.963	8.221
% cumulé	29.563	47.902	61.616	71.579	79.800
SiO ₂	-0.661	0.662	-0.088	-0.205	0.085
TiO ₂	0.437	0.451	0.584	0.004	-0.056
Al ₂ O ₃	-0.349	-0.452	0.653	0.312	0.150
Fe ₂ O ₃	0.686	0.195	0.399	0.251	0.314
MnO	0.534	0.337	-0.225	-0.076	0.067
MgO	0.496	-0.515	0.093	-0.386	0.218
CaO	0.635	-0.601	-0.280	-0.089	-0.190
Na ₂ O	-0.611	-0.292	-0.048	-0.277	0.610
K ₂ O	-0.607	-0.343	0.008	0.387	-0.287
P ₂ O ₅	0.242	0.081	-0.545	0.636	0.385

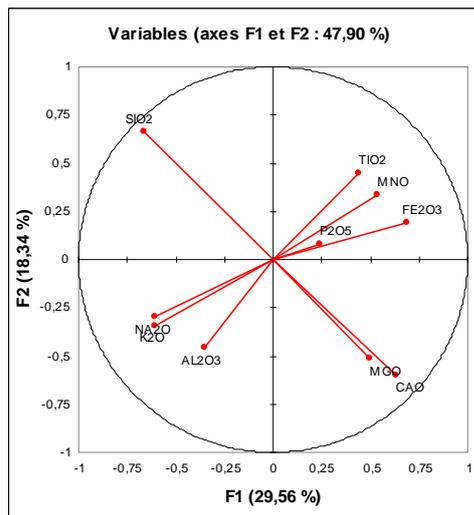


Figure 4 : ACP réalisée sur l'ensemble des points de la figure 3 d'abscisse $-1 < x_{F1} < 1$ et d'ordonnée $-2 < y_{F2} < 2$ et tableau des contributions des variables.

La projection des points sur les axes de l'ACP aide à distinguer 3 groupes de points (Figure 5) :

- le groupe 9 est expliqué par CaO et MgO ;
- le groupe 10 est expliqué par Na₂O et K₂O ;
- le groupe 11 est expliqué par SiO₂ et TiO₂.

Les classes de points des éléments majeurs obtenues par une CAH et expliquées par l'ACP sont représentées sur la carte géologique européenne (Figure 6).

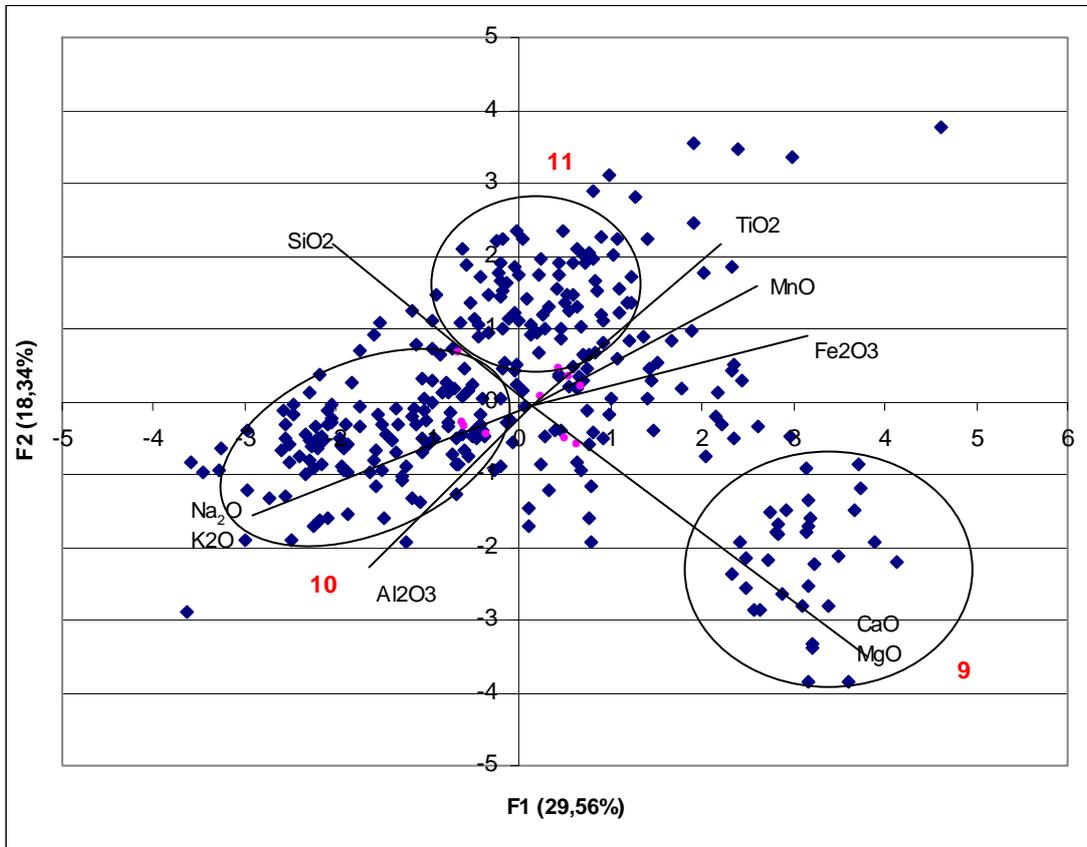


Figure 5 : Projection des points d'abscisse $-1 < x_{F1} < 1$ et d'ordonnée $-2 < y_{F2} < 2$ sur les axes de l'ACP.

Malgré la faible adéquation entre la maille de prélèvement et la variabilité géologique de certains territoires comme la majeure partie méridionale de l'Europe, des affinités apparaissent entre certains groupes classés et la géologie avec :

- groupe 10, pour une bonne partie du bouclier finno-scandinave, un pôle sodique en relation avec les roches cristallines de composition granitiques d'âge Protérozoïque ;
- groupe 8, les plaines du Nord de l'Europe avec une signature Si essentiellement liée aux dépôts détritiques glaciaires et périglaciaires en relation avec les grandes périodes de glaciation, signature que l'on retrouve aussi pour des raisons d'affinité chimique (roches sédimentaires détritiques riches en quartz) dans les Bassins parisien et aquitain ;
- groupe 6, rassemblant les formations alumino-potassiques liées aux roches cristallines et cristallophylliennes d'âge Hercynien .
- groupe 1 ayant une signature Ca dispersée dans différentes parties de l'Europe méridionale, marquant les dépôts carbonatés d'âge Secondaire à Tertiaire.

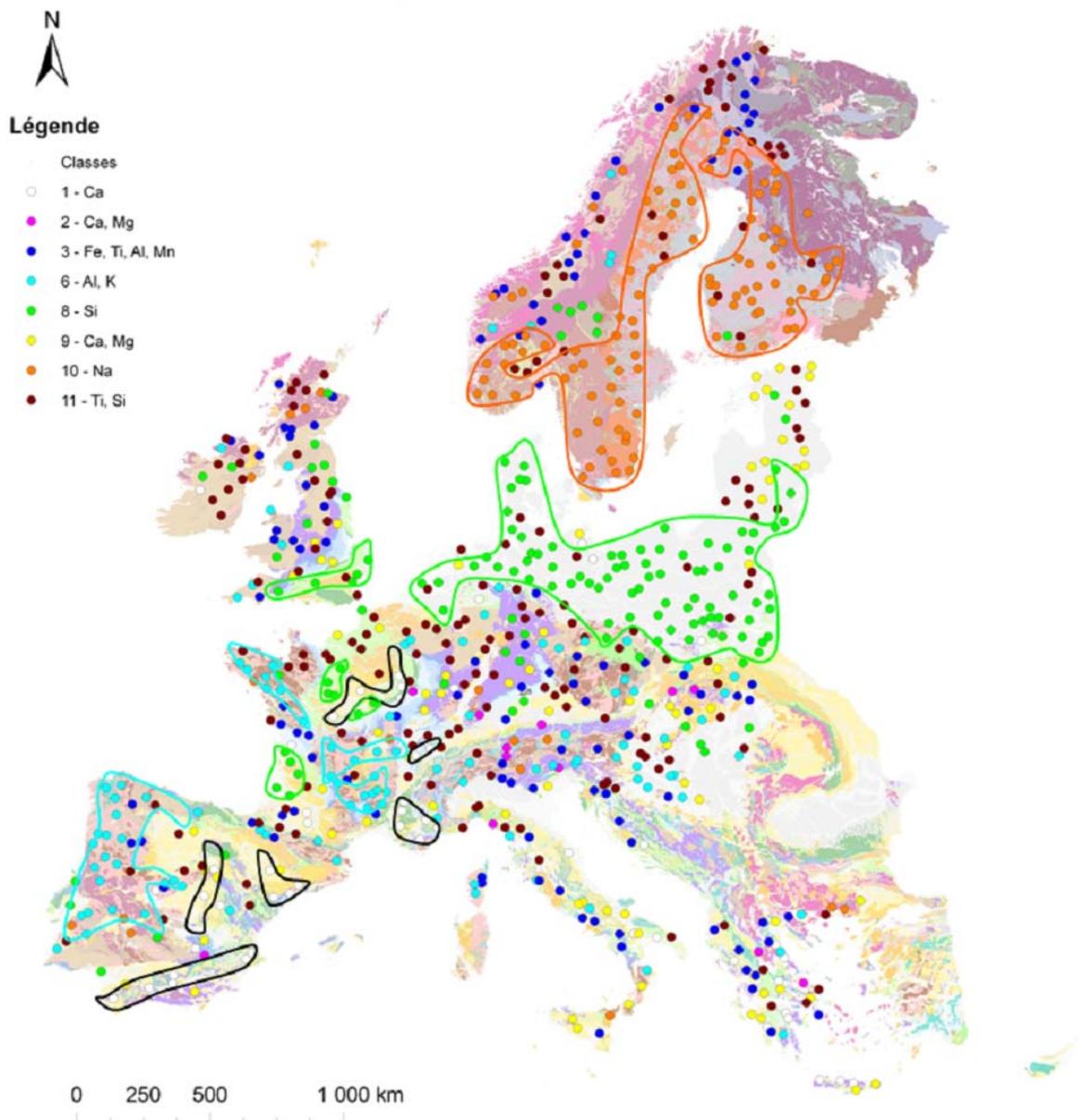


Figure 6 : Éléments majeurs de la partie inférieure des sols du FOREGS, projection des classes issues de l'analyse statistique croisée (ACP et CAH) sur la carte géologique européenne.

Malgré la faible adéquation entre la maille de prélèvement et la variabilité géologique de certaines régions, un essai d'interprétation des données a été tenté sur le Bassin parisien.

Le Bassin parisien sédimentaire carbonaté (Figure 7) contient de nombreux points des classes 1 (Ca) ou 2 et 9 (Ca-Mg). Ces points sont très bien représentés dans les zones de craie. Les bassins contiennent également des points des classes 6 et 11 (Si et Si-Ti). Ceci peut s'expliquer par la présence importante de loëss ou de marnes et argiles

(en particulier les argiles à silex du nord ouest du Bassin parisien) mais aussi par la présence de silicifications de surface associées à des plateformes structurales de calcaires lacustres, comme les meulière du bassin d'Aquitaine (Mouline, 1983) et du bassin de Paris (Thiry *et al.*, 1983). Il existe aussi des tables de grès disposées au sein des sables et liées à des niveaux de nappes phréatiques, comme pour les grès de Fontainebleau associés aux sables du Stampien (Thiry *et al.*, 1983).

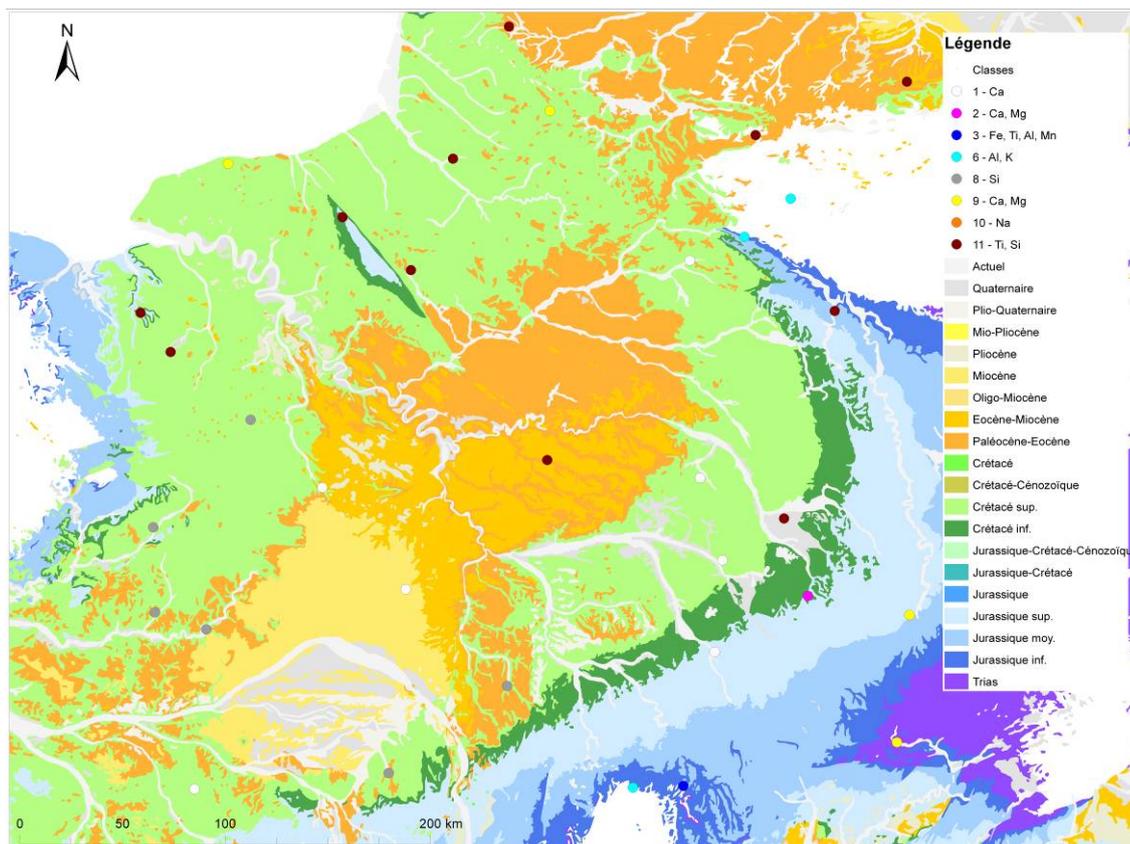


Figure 7 : Carte géologique du Bassin parisien et classes des points FOREGS.
En blanc, sur les bords de la carte, apparaissent les limites des terrains anté-triasiques.

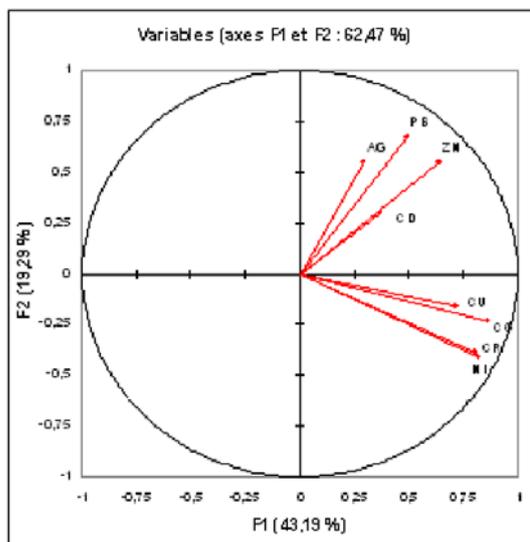
LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETM)

Une étude analogue à celle faite sur les éléments majeurs a été menée sur les éléments traces métalliques (ETM), dans le but de faire apparaître un lien entre les minéralisations et les teneurs en éléments traces du sol.

L'ACP faite sur les huit métaux traces les plus cités (Tableau 2 et Figure 8) montre deux groupes qui se distinguent de part et d'autre de l'axe F1 (expliquant 40 % de la variance), discriminés par l'axe 2 (29 % de la variance). L'association Cr, Co et Ni s'explique par les roches basiques, les minéralisations accompagnées en Cu (à l'exemple de Chypre) et un groupement Pb, Zn, Cd, Ag en relation avec des minéralisations en liaison avec le magmatisme acide (granite *s.l.*).

Variables	Cr	Zn	Co	Ni	Pb	Ag	Cd	Cu
Cr	1	0,236	0,675	0,897	0,258	0,068	0,132	0,436
Zn	0,236	1	0,443	0,269	0,649	0,242	0,309	0,376
Co	0,675	0,443	1	0,693	0,197	0,168	0,200	0,691
Ni	0,897	0,269	0,693	1	0,198	0,043	0,198	0,476
Pb	0,258	0,649	0,197	0,198	1	0,352	0,202	0,120
Ag	0,068	0,242	0,168	0,043	0,352	1	0,122	0,167
Cd	0,132	0,309	0,200	0,198	0,202	0,122	1	0,193
Cu	0,436	0,376	0,691	0,476	0,120	0,167	0,193	1

Tableau 2 : Matrice de corrélation de Pearson (n) et contributions des variables obtenues après une ACP portant sur une sélection d'éléments traces métalliques.



	F1	F2	F3	F4	F5
Variance (%)	43,18	19,28	11,15	10,18	8,90
% cumulé	43,18	62,47	73,62	83,80	92,70

Coordonnées des variables :					
	F1	F2	F3	F4	F5
Cr	0,805	-0,389	-0,128	-0,243	0,274
Zn	0,639	0,550	0,078	-0,181	-0,379
Co	0,860	-0,232	-0,036	0,172	-0,154
Ni	0,821	-0,408	-0,030	-0,190	0,241
Pb	0,497	0,672	-0,169	-0,419	0,002
Ag	0,297	0,548	-0,435	0,504	0,401
Cd	0,372	0,302	0,806	0,147	0,314
Cu	0,716	-0,159	0,030	0,453	-0,391

Figure 8 : ACP des sols du FOREGS sur les ETM et projection des variables dans le plan F1-F2 expliquant 62,47 % de la variance de la population.

Une CAH (8 classes) est réalisée sur les données où 5 points à très fortes teneurs ont été enlevés (Figure 9).

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8
n	473	75	166	1	11	2	48	6
Cr	51	160	91	149	558	326	45	90
Zn	34	90	85	133	98	596	66	395
Co	7	22	15	28	40	17	8	21
Ni	17	80	37	92	298	131	17	50
Pb	16	28	25	40	30	545	35	91
Ag	0,22	0,34	0,29	0,54	0,28	1,05	0,79	0,41
Cd	0,09	0,36	0,19	14,20	0,51	1,45	0,15	1,15
Cu	10	42	24	36	55	19	13	28

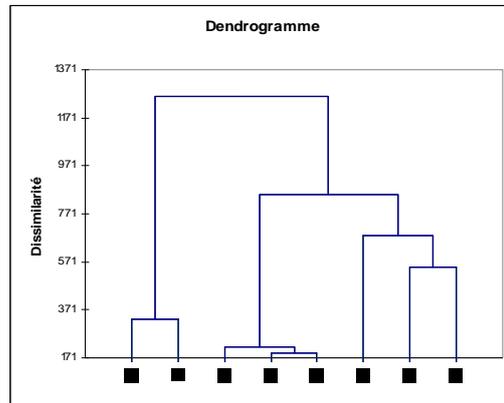


Figure 9 : Dendrogramme de la CAH réalisée sur les ETM et moyennes sur les classes individualisées.

La projection des classes d'ETM obtenues par la CAH sur les axes de l'ACP est présentée Figure 10.

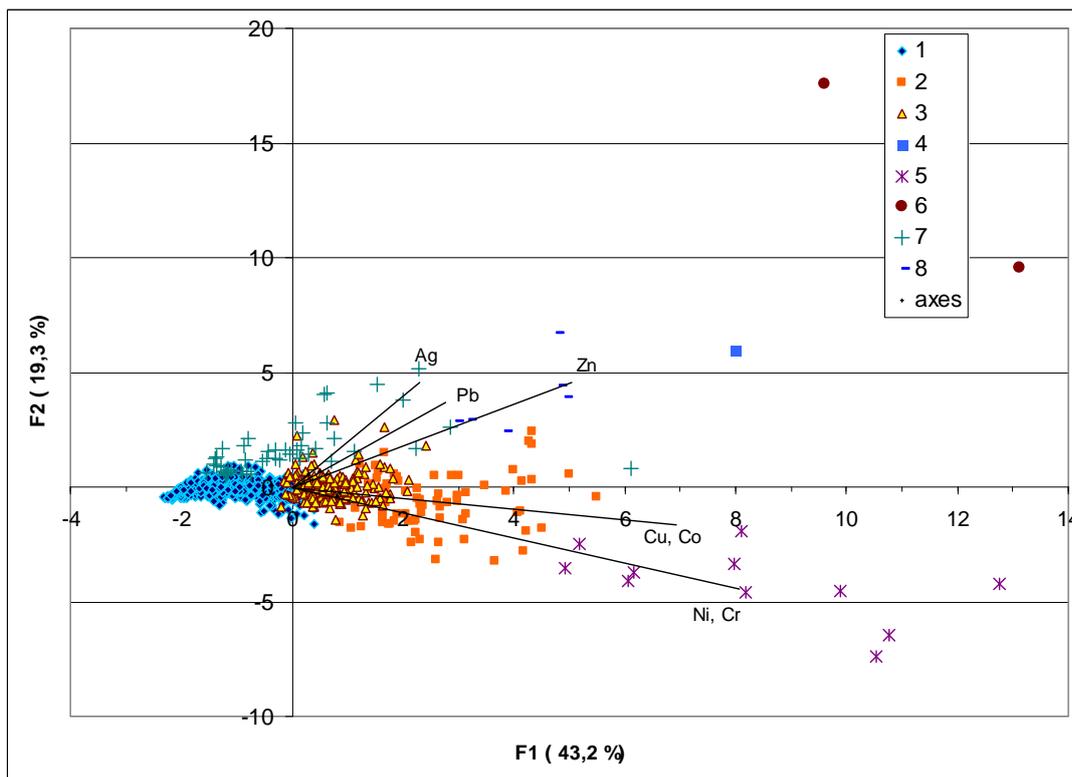


Figure 10 : Projection des classes obtenues par la CAH sur les axes de l'ACP pour les éléments traces métalliques.

La distribution des points par classes montre :

- un groupe 1 qui constitue le fond moyen exempt de minéralisation ;

- deux groupes, le groupe 2 dont la dispersion est surtout expliquée par Cu, Co et dans une moindre mesure par Ni et Cr, et le groupe 3 plus proche de l'origine, influencé par des facteurs identiques mais à un moindre degré ;
- un groupe 4, représentant un point, est surtout expliqué par le Cd accompagné de Zn ;
- un groupe 5 est expliqué par Ni et Cr (roches ultrabasiques, par exemple la Grèce-GR) ;
- un groupe 6, regroupant 2 points très anomaux, est expliqué par Pb et Zn accompagnés d'Ag, Cd et Ni ;
- un groupe 7 est expliqué par Ag (les points ont des valeurs supérieures à la moyenne de l'ensemble des points et des valeurs faibles pour les autres métaux) ;
- un groupe 8 est expliqué par Zn, Pb et Cd (où se trouvent des points à fortes teneurs).

Les classes de points des ETM obtenues par une CAH et expliquées par l'ACP sont représentées sur la carte géologique européenne (Figure 11).

La classe 1 se distribue essentiellement dans les épandages détritiques quaternaires et les grands bassins sédimentaires d'âge secondaire à tertiaire qui sont peu minéralisés, ainsi qu'une partie du bouclier finno-scandinave peu riche en minéralisations métalliques.

CONCLUSIONS

Bien que la maille de l'échantillonnage du FOREGS ne soit pas adaptée aux objets géologiques abordés à l'échelle de l'Europe, la méthode d'exploration de données (data mining) présente des résultats, globalement satisfaisants, qui montrent l'efficacité de la méthode appliquée aux populations de données géochimiques étendues. Les regroupements d'éléments trouvés sont cohérents avec les connaissances acquises sur le milieu naturel : affinités cristallogéniques, minéralogiques et géochimiques entre éléments constitutifs de l'écorce terrestre.

La base de données ainsi évaluée paraît cohérente et les quelques données projetées sur le support géologique présentent une correspondance certaine, que l'échelle d'échantillonnage et de cartographie ne permet pas d'affiner.

Une démarche identique menée sur les données des analyses faites sur le sol supérieur (topsoil) donne des résultats très proches dans l'analyse du comportement des éléments et leur distribution.

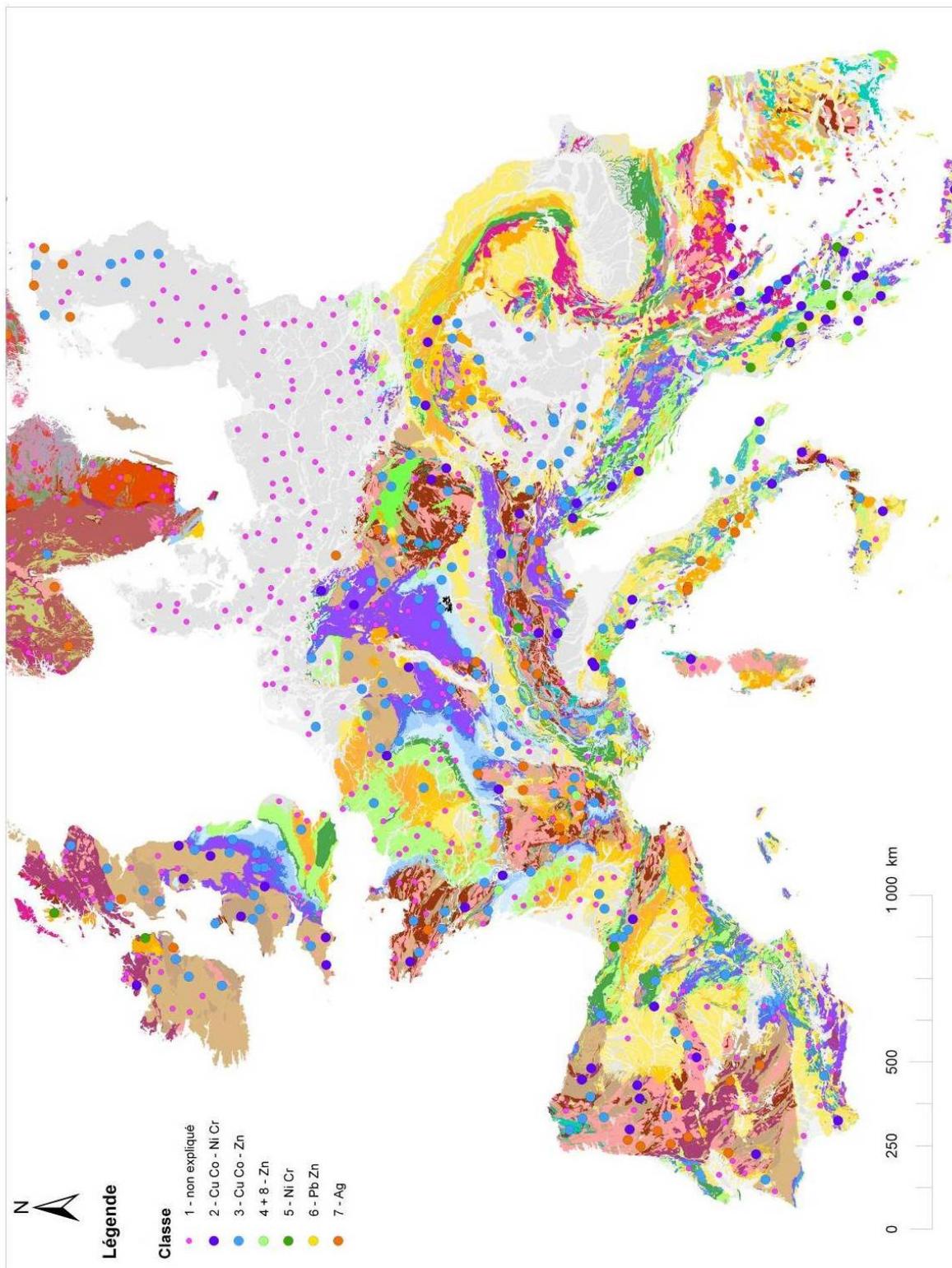


Figure 11 - Projection des classes définies par la CAH pour les éléments traces métalliques.



Centre scientifique et technique
Service environnement industriel et procédés innovants
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34