



HAL
open science

Rapport final financement du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) pour l'année 2010 dans le cadre du groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS SOL). Juillet 2012

Claudy C. Jolivet, Line Boulonne, Dominique D. Arrouays, Michel Brossard

► To cite this version:

Claudy C. Jolivet, Line Boulonne, Dominique D. Arrouays, Michel Brossard. Rapport final financement du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) pour l'année 2010 dans le cadre du groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS SOL). Juillet 2012. [Rapport Technique] 2012. hal-02804279

HAL Id: hal-02804279

<https://hal.inrae.fr/hal-02804279>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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



RAPPORT FINAL
FINANCEMENT DU RÉSEAU DE MESURES DE LA QUALITÉ DES SOLS (RMQS)
POUR L'ANNÉE 2010 DANS LE CADRE
DU GROUPEMENT D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE SOL (GIS SOL)

FINAL REPORT
FINANCING OF THE FRENCH MONITORING NETWORK FOR SOIL QUALITY (RMQS)
FOR YEAR 2010 WITHIN THE FRAMEWORK OF
THE GROUP OF SCIENTIFIC INTEREST SOL (GIS SOL)

juillet 2012

INRA US 1106 InfoSol

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'Unité de Service InfoSol de l'INRA.

Contrat ADEME N°0975C0045 – INRA (A)33000161

Coordination technique :

Antonio Bispo, Département Gestion Biologique et Sols (DGBS) – Direction Déchets et Sols (DDS)
– ADEME (Angers)

Comité de pilotage

Antonio Bispo, Dominique Arrouays, Claudy Jolivet

Comité de suivi administratif

Agnès Triballat, ADEME (Angers)
Monique Soler, INRA (Orléans)

Auteurs

Claudy Jolivet, Line Boulonne et Dominique Arrouays, INRA, US 1106 InfoSol, F-45075 Orléans
Michel Brossard, IRD, UMR Eco&Sols, F-34394 Montpellier

Contributeurs : Céline Ratié, Nicolas Saby, Benjamin Louis, Philippe Berché, Bertrand Ortolland,
Nicolas Soler, Didier Laloua, Johannic Ferrand, Maud George et Elodie Voisin - INRA, US 1106
InfoSol, F-45075 Orléans

Remerciements

Nous remercions les Chambres d'Agriculture de la Région Centre qui ont participé à la mise en place des sites RMQS durant la phase de test.

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

www.ademe.fr

Copyright

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Sommaire

1	Introduction.....	6
2	Plan d'action 2010-2011 du RMQS.....	6
2.1	Interprétation, valorisation et diffusion des résultats du RMQS.....	6
2.2	Étude de faisabilité du RMQS dans les territoires d'Outre mer (ROM-COM et TAAF) ...	7
2.3	Collecte et analyse des besoins des utilisateurs des données « sol ».....	7
2.4	Préparation de la deuxième campagne du RMQS.....	7
3	Résultats et Bilan des actions menées.....	9
3.1	Interprétation, valorisation et diffusion des résultats du RMQS.....	9
3.2	Étude de faisabilité du RMQS dans les territoires d'Outre mer (ROM-COM et TAAF) .	11
3.2.1	Mayotte.....	12
3.2.2	La réunion	12
3.2.3	La Nouvelle-Calédonie	13
3.2.4	La Guyane.....	14
3.2.5	Les îles subantarctiques (archipels des Kerguelen et de Crozet, îles St Paul et Amsterdam)	14
3.2.6	Estimation des coûts de mise en place des sites dans les ROM-COM et proposition de calendrier de mise en oeuvre	19
3.3	Collecte et analyse des besoins des utilisateurs des données « sol ».....	20
3.4	Préparation de la deuxième campagne du RMQS.....	22
3.4.1	Les sites sélectionnés pour le test	22
3.4.2	Modalités de mise en œuvre.....	25
3.4.3	Bilan de faisabilité du test	32
3.4.4	Bilan de l'évolution des occupations et des pratiques culturelles	34
3.4.5	Résultats analytiques.....	35
3.4.6	Bilan du test et recommandations pour la prochaine campagne RMQS.....	68
4	Conclusions	69
5	Références bibliographiques.....	70

Liste des figures

Figure 1 - Le Rapport sur l'état des Sols de France et sa synthèse	9
Figure 2 - La France d'Outre-mer (source http://fr.wikipedia.org/wiki/France_d'outre-mer)	11
Figure 3 – a) carte topographique de l'île de Mayotte (source http://fr.wikipedia.org/wiki/Mayotte) ; b) évolution de l'occupation des sols de l'île de Mayotte entre 1949 et 2002 (source Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte).....	12
Figure 4 – a) carte des sols à 1/100 000 de la Réunion (source ISRIC) ; b) répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x16 km	13
Figure 5 – a) carte des formations sur péridotites de Nouvelle-Calédonie ; b) répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x16 km	13
Figure 6 – a) carte des sols de la frange côtière de Guyane ; b) répartition des Terres Hautes sur roches métamorphisées et sur roches ignées (en vert) ; c) répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x16 km	14
Figure 7 – Carte du Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises (source : Institut polaire français Paul-Émile Victor - IPEV).....	15
Figure 8 – Morphologie des îles subantarctiques (source : IPEV).....	16
Figure 9 – Répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x 16 km sur l'archipel des Kerguelen.....	18
Figure 10 – Occupations et matériaux parentaux des sols des sites sélectionnés.....	24
Figure 11 - Dispositif d'échantillonnage.....	27
Figure 12 - Représentation 2 à 2 des teneurs en As, Fe, Ni et Al totaux et V, Fe et Cr totaux (mg/kg) mesurées sur les échantillons de surface de la première campagne et coefficients de corrélation associé.	42
Figure 13 - Teneurs en chrome et plomb total : ré-analyses vs analyses initiales de la campagne 1.....	45
Figure 14 - Teneurs en chrome et en plomb total : campagne test vs analyses initiales de la campagne 1.....	48
Figure 15 - Teneurs en chrome et en plomb total : campagne test vs ré-analyses de la campagne 1	49
Figure 16 - Schéma du calcul des bornes inférieure et supérieure qui contient 90% des valeurs susceptibles d'appartenir à la première bissectrice. La figure de droite correspond à un zoom de la figure de gauche	51
Figure 17 - Teneurs en carbone organique des horizons de surface (horizons 1) et de sub-surface (horizon 2) pour les trois séries de mesures	54
Figure 18 - Teneurs en plomb total des horizons de surface (horizons 1) et de sub-surface (horizon 2) pour les trois séries de mesures.....	55
Figure 19 - Teneurs en nickel extrait par CaCl ₂ , NaNO ₃ et NH ₄ NO ₃ en fonction du pH eau	60
Figure 20 - Pourcentage de variance expliquée par chacun des axes factoriels.....	61
Figure 21 - Coordonnées des groupes sur les plans factoriels 1-2 (à gauche) et 2-3 (à droite).....	62
Figure 22 - Cercles des corrélations sur le plan factoriel 1-2.....	64
Figure 23 - Cercles des corrélations sur le plan factoriel 2-3.....	65
Figure 24 - Nuage des individus projetés selon les plans factoriels 1-2 (à gauche) et 2-3 (à droite).....	66
Figure 25 - Valeurs du pH eau pour les composites de surface de la campagne test.....	67

Liste des tableaux

Tableau 1- Chronogramme de réalisation du Rapport sur l'état des sols de France.....	10
Tableau 2 – Quelques données sur les îles subantarctiques (source IPEV)	15
Tableau 3 - Estimations des coûts de mise en place du RMQS dans les DOM-TOM.....	19
Tableau 4 - Occupations des sols agricoles en Région Centre et nombre de sites correspondant	23
Tableau 5 - Répartition des sites par matériau parental (transcrit selon la nomenclature de la base de données géographiques des sols de France au 1/1 000 000e (BDGSF)	25
Tableau 6 - Répartition des sites par type de sol (Référentiel Pédologique 1995).....	25
Tableau 7 - Menus analytiques	30

Tableau 8 - Statistiques des écarts d'implantation du dispositif d'échantillonnage entre la première campagne et la campagne test	34
Tableau 9 - Statistiques descriptives des nouveaux éléments analysés sur les échantillons composites de surface de la campagne test	36
Tableau 10 - Statistiques descriptives des nouveaux éléments analysés sur les échantillons composites de sub-surface de la campagne test	36
Tableau 11 - Valeurs de références en As, Hg et Se, issues de population ASPITET (D. Baize, http://etm.orleans.inra.fr/gammes3.htm).....	37
Tableau 12 - Teneurs minimales, maximales et médianes en As, Hg, Sb, Se, Sn, V, issues du RPG Nord-Pas-de-Calais classées selon différents usages.....	37
Tableau 13 – Statistiques des écarts relatifs entre analyses initiales et ré-analyses de la première campagne pour le plomb et le thallium total.....	45
Tableau 14 – Paramètres des modèles de comparaison linéaire entre les trois séries de données pour la variable carbone organique des horizons de surface (H1) et de sub-surface (H2).....	53
Tableau 15 – Paramètres des modèles de comparaison linéaire entre les trois séries de données pour la variable plomb total des horizons de surface (H1) et de sub-surface (H2).....	56
Tableau 16 - Résumé statistique des teneurs en éléments traces biodisponibles des échantillons de surface de la campagne 1	58
Tableau 17 - Résumé statistique des teneurs en éléments traces biodisponibles des échantillons de surface de la campagne test	58
Tableau 18 - Distances Lg.....	63
Tableau 19 - Distances RV.....	63

Liste des annexes

- Annexe 1 : Carte de zonage du schéma directeur de l'aménagement agricole et rural de Mayotte (source Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte)
- Annexe 2 : liste des sites sélectionnés et caractéristiques pédologiques
- Annexe 3 : cartogrammes des paramètres analysés durant la campagne test
- Annexe 4 : Diagrammes de dispersion des paramètres analysés : ré-analyses campagne 1 vs analyse initiale campagne 1
- Annexe 5 : Diagrammes de dispersion des paramètres analysés : analyses campagne test vs analyse initiale campagne 1
- Annexe 6 : Diagrammes de dispersion des paramètres analysés : analyses campagne test vs ré-analyses campagne 1
- Annexe 7 : Diagrammes de dispersion des paramètres analysés avec intégration des incertitudes et du modèle de comparaison linéaire
- Annexe 8 : Interprétation des diagrammes de dispersion des paramètres analysés avec intégration des incertitudes et des paramètres du modèle de comparaison linéaire

Résumé

Ce rapport présente le travail réalisé par l'unité InfoSol dans le cadre de la convention ADEME N° 0975C0045. Les travaux réalisés dans le cadre de cette convention ont permis : 1) de poursuivre le traitement et la valorisation des données du RMQS et de publier en novembre 2011 le premier bilan national de l'état des sols français intitulé « Rapport sur l'état des sols de France » ; 2) de réaliser une étude de faisabilité de la poursuite de la mise en place du RMQS dans les territoires français d'outre-mer (Réunion, Mayotte, Nouvelle-Calédonie, Guyane et îles subantarctiques) incluant un chiffrage des coûts de mise en place et un calendrier de mise en œuvre ; 3) d'analyser les besoins des utilisateurs de données sur les sols collectés à l'occasion de la deuxième Conférence d'Orientation du Gis Sol, organisée en juin 2010 ; 4) d'initier la réflexion sur la préparation de la deuxième campagne RMQS, en réalisant un test en vraie grandeur de réinstallation d'une quarantaine de sites en Région Centre. Les données du test ont été acquises et un premier examen des résultats a été réalisé. Ce test a permis de tirer plusieurs conclusions et recommandations pour la deuxième campagne, relatives à la mise en place des sites et au menu analytique.

Mots clefs : sols, qualité, RMQS, ROM-COM, TAAF, campagne test

Summary

This report presents the work realized by the InfoSol unit within the framework of the agreement ADEME N° 0975C0045. The works realized allowed: 1) to pursue the treatment and the valuation of the RMQS data and to publish in November, 2011 the first national assessment of the state of the French soils entitled " Rapport sur l'état des sols de France "; 2) to realize a feasibility study of the continuation of the implementation of the RMQS in French overseas territories (La Réunion, Mayotte, New Caledonia, Guyana and sub Antarctic islands) including a calculation of the costs and a calendar of implementation; 3) to analyze the needs of the users of data on soils collected on the occasion of the second Conference of Orientation of the Gis Sol, organized in June, 2010; 4) To introduce the reflection on the preparation of the second campaign of the RMQS, by realizing a test in the real size of reinstalment of about forty sites in the Centre region. The data of the test were acquired and a first examination of the results was realized, which have lead to partial conclusions and recommendations for the second RMQS campaign.

Key words: soils, quality, RMQS, ROM-COM, TAAF, test campaign

1 INTRODUCTION

La protection des sols n'a jusqu'ici été que peu prise en compte dans les politiques publiques. Longtemps considérés par les décideurs et les aménageurs comme un bien privé et un simple support à la production agricole, les sols viennent aujourd'hui au centre des préoccupations à la faveur d'une récente prise de conscience. En position d'interface, les sols jouent en effet des rôles clés dans l'environnement : dans le changement climatique en tant que puits ou source de gaz à effet de serre, dans la protection de la qualité de la ressource en eau en tant que filtre de nombreuses matières contaminantes, dans la protection contre les inondations en tant que réservoir tampon vis-à-vis des eaux pluviales, dans le maintien de la biodiversité en tant que milieu de vie d'un patrimoine génétique encore largement inconnu, etc. La récente communication de la Commission européenne sur les sols confirme l'émergence d'une nouvelle politique environnementale de protection des sols (Commission européenne, 2002). Une future directive européenne sur les sols devrait en représenter la concrétisation.

Face au constat que la France ne disposait pas, contrairement à d'autres pays européens (le Royaume-Uni, la Suisse, la Hongrie par exemple), d'outil permettant d'évaluer et de suivre la qualité des sols (King et al. 1999), le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) finance depuis l'année 2000, la mise en place et la valorisation du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Ce réseau constitue un cadre national pour l'observation à long terme de l'évolution de la qualité des sols. Il produira des données quantitatives pour caractériser l'état des sols et mesurer l'évolution de leur qualité afin qu'ils puissent être pris en compte dans les décisions environnementales et territoriales et être gérés durablement (Arrouays et al., 2002).

La première campagne de prélèvements du RMQS s'est achevée en juin 2009. Deux mille deux cent sites ont été mis en place et échantillonnés. La France dispose donc désormais d'un réseau de surveillance de la qualité des sols couvrant la France métropolitaine, la Guadeloupe et la Martinique. Le plan d'action de la période 2010-2011 du RMQS comprend quatre objectifs : i) interpréter, valoriser et diffuser les résultats acquis durant la première campagne, ii) réaliser une étude approfondie de faisabilité de la poursuite de la mise en place du RMQS dans les territoires français d'Outre mer (ROM-COM et TAAF), iii) évaluer les besoins des utilisateurs des données « sols » et iv) préparer la prochaine campagne du RMQS. Après une description détaillée des actions prévues durant cette période, ce rapport présente les résultats et le bilan de ce plan d'action.

2 PLAN D'ACTION 2010-2011 DU RMQS

La description du plan d'action 2011-2012 est extraite de la Convention N°0975C0045.

2.1 INTERPRÉTATION, VALORISATION ET DIFFUSION DES RÉSULTATS DU RMQS

L'unité InfoSol s'investira pleinement dans le traitement des données collectées par le RMQS afin que le GIS Sol puisse produire un bilan complet et cartographique de l'état des sols de France,

tel qu'il pourra être appréhendé au travers des paramètres mesurés et observés par le RMQS. Il est notamment envisagé les traitements suivants : des données statistiques générales sur les sols de France, des cartogrammes de teneurs en surface et sub-surface, des traitements « à façon » réalisés à partir du site web du Gis Sol, des statistiques spatialisées à l'aide de différents types de modèles. Ces travaux conduiront à la publication d'un rapport sur l'état des sols de France.

2.2 ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU RMQS DANS LES TERRITOIRES D'OUTRE MER (ROM-COM ET TAAF)

Un cahier des charges et une évaluation financière de la mise en place du RMQS sur une deuxième tranche des ROM-COM (Réunion, Guyane, Nouvelle-Calédonie, Mayotte) et dans les TAAF (terres australes et antarctiques françaises) seront produits en 2010. Cette évaluation sera conduite avec l'appui de l'IRD pour la partie ROM-COM et avec l'appui de l'IPEV (Institut polaire français Paul-Émile Victor) pour la partie TAAF.

2.3 COLLECTE ET ANALYSE DES BESOINS DES UTILISATEURS DES DONNÉES « SOL »

Sur la base des résultats de la conférence d'Orientation du Gis Sol (programmée avant l'été 2010), un recensement des demandes en données « sol » sera réalisé. Il s'agit notamment de recueillir les besoins en termes de paramètres à caractériser mais également de cartographie et de typologie des restitutions. Ces informations seront utilisées pour orienter la deuxième campagne du RMQS.

2.4 PRÉPARATION DE LA DEUXIÈME CAMPAGNE DU RMQS

Une analyse comparative des stratégies de rééchantillonnage des sites du RMQS pour préparer la deuxième campagne de prélèvements sera réalisée en 2010-2011. Celle-ci nécessite des essais méthodologiques de rééchantillonnage sur un nombre représentatif de sites prélevés lors des premières années de mise en place du RMQS. Quarante sites de la région Centre seront rééchantillonnés à deux profondeurs en 2010 avec la participation de partenaires régionaux. Les 80 échantillons prélevés lors de cette nouvelle campagne seront analysés et une comparaison des résultats obtenus pour les deux campagnes sera réalisée, sur la base du menu analytique standard. Simultanément, les 80 échantillons issus des 40 sites prélevés lors de la première campagne seront réanalysés afin de vérifier l'absence de dérive analytique et d'évolution liée au stockage. De nouvelles déterminations seront également testées sur les échantillons des deux campagnes : nouveaux éléments totaux, nouveaux extractants, nouvelle méthode de mesure de la granulométrie (les analyses proposées sont listées ci-après). Pour ces nouveaux paramètres, cet essai permettra d'orienter la suite des travaux et de conclure à la possibilité de réanalyser les échantillons archivés au conservatoire (ou s'il convient d'utiliser de nouveaux échantillons frais).

Liste des analyses réalisées (menu standard)

- Humidité résiduelle à 105°C
- Granulométrie 5 fractions sans décarbonatation
- Carbone (C) organique et azote (N) total

- pH eau
- Calcaire (CaCO₃) total
- Phosphore (P₂O₅) méthode Olsen
- Extraction au chlorure de cobaltihexammine
- Capacité d'échange cationique cobaltihexammine (spectrocolorimétrie)
- Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al échangeables à la cobaltihexammine (ICP-AES)
- Bore (B) soluble à l'eau bouillante (ICP-AES)
- Extraction selon la méthode Tamm en obscurité
- Fer (Fe), méthode Tamm en obscurité (ICP-AES)
- Extraction selon la méthode Mehra-Jackson
- Fer (Fe), méthode Mehra-Jackson (ICP-AES)
- Mise en solution totale par HF
- ICP1-éléments traces totaux HF : Co, Cr, Cu, Ni, Zn (ICP-AES)
- ICP2-éléments traces totaux HF : Pb, Cd, Tl, Mo (ICP-MS)
- ICP3-éléments totaux HF : Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na (ICP-AES)
- Extraction à l'EDTA, méthode BCR
- Chrome (Cr) extractible à l'EDTA (BCR) (AAET)
- ICP5-éléments extraits à l'EDTA (BCR) : Cd, Cu, Ni, Pb, Zn (ICP-AES)

Déterminations supplémentaires :

Éléments traces classiques avec extractants doux : CaCl₂, NaNO₃, NH₄NO₃ (composites 0-30 cm)

- Extraction au **CaCl₂** à 0,01 mol/L
- Dosage de : Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn, Pb, Tl
- Extraction au **NaNO₃** à 0,1 mol/L.
- Dosage de : Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn, Pb, Tl
- Extraction au **NH₄NO₃** à 1 mol/L
- Dosage de : Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn, Pb, Tl

Nouveaux éléments totaux :

- Mercure (Hg) total combustion sèche
- Sélénium (Se) total
- Arsenic (As) total HF (ICP-MS)
- Mise en solution totale par HF
- Césium (Cs) total HF (EAF)
- Etain (Sn) total HF (ICP-MS)
- Strontium (Sr) total HF (ICP-AES)
- Thorium (Th) total HF (ICP-MS)
- Uranium (U) total HF (ICP-MS)
- Vanadium (V) total HF (ICP-AES)
- Antimoine (Sb) total HF (ICP-MS)
- Mise en solution par fusion alcaline
- Silicium (Si) total après fusion alcaline (ICP-AES)

Analyse granulométrique par diffraction laser :

- Comparaison par le LAS à titre gratuit avec la méthode pipette de Robinson classique

Enfin l'unité poursuivra également la mise en place de programmes complémentaires d'observation, d'analyse ou de recherche fondés sur le dispositif RMQS et/ou les échantillons du Conservatoire national d'échantillons de sols. Il diffusera et mettra à disposition, via Internet et tout autre support, les résultats du RMQS, sous une forme qui respectera les législations concernant la diffusion des informations géographiques, environnementales et nominatives.

3 RÉSULTATS ET BILAN DES ACTIONS MENÉES

3.1 INTERPRÉTATION, VALORISATION ET DIFFUSION DES RÉSULTATS DU RMQS

Le traitement et la valorisation des données du RMQS se sont poursuivis en 2010 et 2011. Outre la publication de ces résultats dans plusieurs revues scientifiques (Arrouays *et al.*, 2011 ; Lacarce *et al.*, 2012 ; Marchant *et al.*, 2010 ; Martin *et al.*, 2011 ; Saby *et al.*, 2011), les résultats de ces travaux ont conduit à la publication en novembre 2011 du Rapport sur l'état des Sols de France (Figure 1). Ce document, fondé sur les résultats des programmes menés par le Gis Sol dont le RMQS, met à la disposition d'un large public le premier état des lieux sur la qualité des sols de France métropolitaine et d'outre-mer. Le Tableau 1 présente le chronogramme de réalisation de ce rapport. Ce tableau montre que deux années complètes ont été nécessaires pour aboutir à la publication du rapport et de sa synthèse.



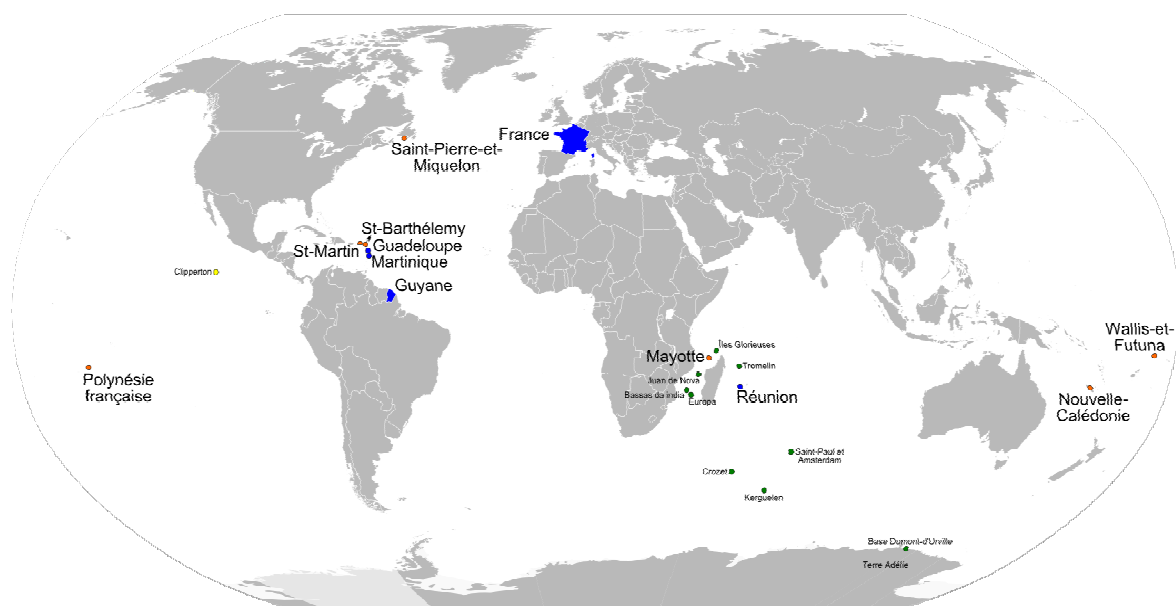
Figure 1 - Le Rapport sur l'état des Sols de France et sa synthèse

Tableau 1- Chronogramme de réalisation du Rapport sur l'état des sols de France

Actions	2010												2011											
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Première élaboration du plan du rapport	■	■	■																					
Contact des auteurs et des relecteurs externes		■	■	■																				
Plan détaillé du rapport				■	■	■																		
Écriture des chapitres							■	■	■	■	■	■												
Relectures et corrections internes (Groupe Giscom)									■	■	■	■	■	■	■									
Nouvelle version des chapitres											■	■	■	■	■									
Finalisation des figures												■	■	■	■	■								
Relectures externes														■	■	■	■							
Version 3 des chapitres																■	■	■						
Assemblage																	■	■	■					
Soumission aux membres du Gis Sol																		■	■	■				
Corrections																			■	■	■			
Maquettage																				■	■			
Écriture de la synthèse																					■	■		
Soumission de la synthèse au Gis Sol																						■	■	
Correction de la synthèse																						■	■	
Maquettage synthèse																							■	■
Vérifications/correction des maquettes																								■
Impression																								■
Diffusion																								■

3.2 ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU RMQS DANS LES TERRITOIRES D'OUTRE MER (ROM-COM ET TAAF)

La mise en place du RMQS en Guadeloupe (2006) et Martinique (2007) durant la première campagne a montré que l'extension du RMQS aux territoires français ultramarins est techniquement possible et scientifiquement fondée. En effet, des collaborations sont envisageables avec des instituts de recherche français ayant des centres installés dans ces territoires (INRA, IRD, CIRAD), facilitant la mise en place des sites. En outre, ces territoires sont confrontés à des problématiques environnementales qui impactent les sols et justifient la mise en place d'un réseau de suivi, avec toutefois des adaptations nécessaires des paramètres mesurés aux spécificités des sols et au contexte environnemental ultramarin. Parmi les adaptations souhaitables, figure également une densification de la maille du réseau qui est insuffisante pour couvrir toute la diversité des combinaisons type de sol – occupation, notamment dans les îles volcaniques (Antilles françaises, Réunion) qui associent une grande diversité de sols sur de petites surfaces.



Légende :

■ La France métropolitaine et les départements-régions d'outre-mer (DOM-ROM)

■ Les Collectivités d'Outre-Mer (COM) et la Nouvelle-Calédonie

■ Les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF)

■ Clipperton, propriété domaniale de l'État français

Nomenclature en grands caractères : territoire habité en permanence.

Nomenclature en petits caractères : territoire non-habité en permanence, principalement par des missions scientifiques.

A noter : depuis 2011, Mayotte possède un statut de département

Figure 2 - La France d'Outre-mer (source http://fr.wikipedia.org/wiki/France_d'outre-mer).

En 2010-2011, une étude de faisabilité a été réalisée pour cinq nouveaux territoires ultra-marins : la Guyane, la Réunion, la Nouvelle-Calédonie, Mayotte et les îles subantarctiques (archipels des Kerguelen et de Crozet, îles de St Paul et Amsterdam) qui font partie des Terres australes et antarctiques françaises (TAAF). Les autres territoires ultra-marins (Polynésie, Wallis et Futuna, St Barthélemy, St Martin, Iles éparses), n'ont pas été intégrés à cette étude de faisabilité (Figure 2).

3.2.1 MAYOTTE

Mayotte : ensemble insulaire de 376 km², constitué par un vaste bouclier volcanique ancien (neuf millions d'années) de lave alcaline, entouré de récifs coralliens (Figure 3a). La connaissance pédologique y est ancienne mais peu fouillée (1950). Compte tenu de la surface des îles, seulement 3 sites RMQS sont à installer, dont la localisation reste à définir précisément. Une densification de la maille du réseau serait à étudier pour couvrir la diversité des combinaisons type de sol – occupation de l'île et prendre en compte l'évolution rapide de l'occupation des sols (Figure 3b) et carte de zonage du schéma directeur de l'aménagement agricole et rural de Mayotte en Annexe 1).

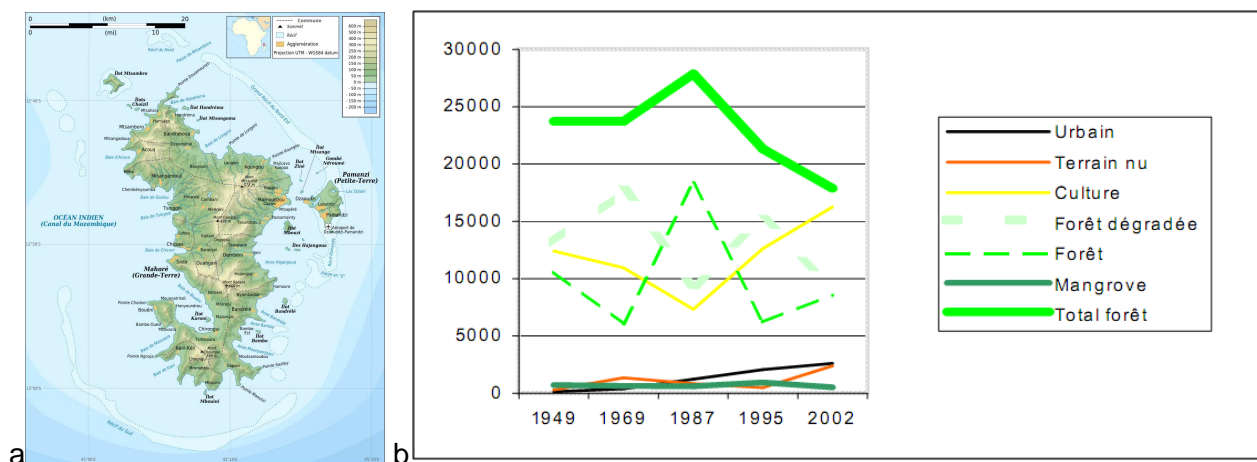


Figure 3 – a) carte topographique de l'île de Mayotte (source <http://fr.wikipedia.org/wiki/Mayotte>) ; b) évolution de l'occupation des sols de l'île de Mayotte entre 1949 et 2002 (source Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte)

3.2.2 LA RÉUNION

L'île de la Réunion : 2.510 km². Un volcanisme actif dans une partie de l'île, associant des sols très jeunes à des sols de plus de 430.000 ans. L'inventaire pédologique est complet, avec une carte des sols à 1/100 000 publiée dans les années 1960 (Figure 4a). Le Référentiel régional pédologique est en cours de constitution avec une révision de la carte existante (IRD, CIRAD).

La grille RMQS 16 x 16 km couvre le territoire réunionnais avec 12 points RMQS (Figure 4b), dont 8 facilement accessibles et 4 difficilement accessibles. Une densification de la maille du réseau serait à étudier pour couvrir la diversité des combinaisons type de sol – occupation de l'île.

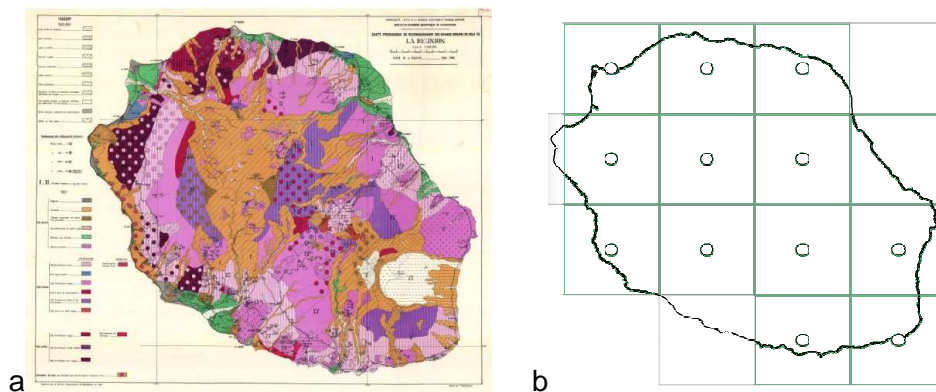


Figure 4 – a) carte des sols à 1/100 000 de la Réunion (source ISRIC) ; b) répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x16 km

3.2.3 LA NOUVELLE-CALÉDONIE

La Nouvelle-Calédonie : 18.575 km². D'une assez grande complexité géologique, elle se caractérise en particulier par l'existence de massifs de péridotites qui occupent un tiers de la superficie de l'île (Figure 5a) et qui sont actuellement largement prospectés par l'industrie minière. Le Référentiel régional pédologique est achevé (IRD). La grille RMQS 16 x 16 km couvre le territoire calédonien avec 90 points (Figure 5b), dont 72 points sur la grande île.

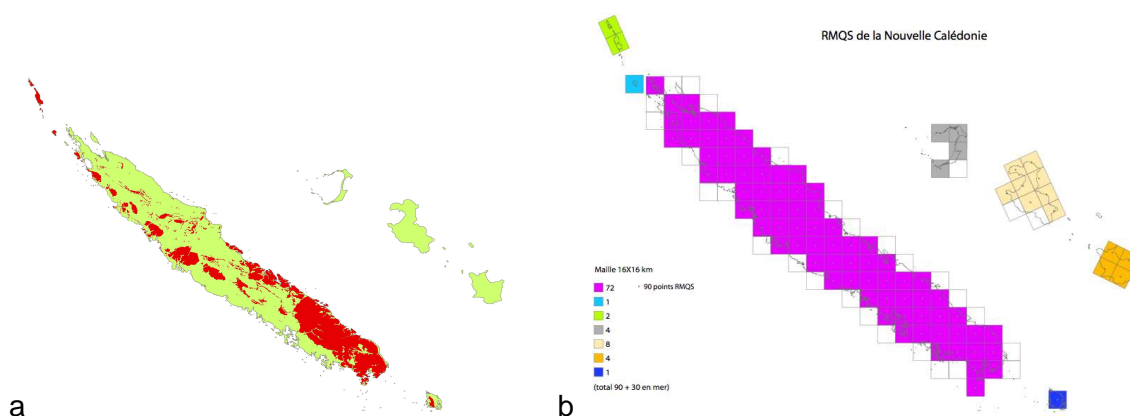


Figure 5 – a) carte des formations sur péridotites de Nouvelle-Calédonie ; b) répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x16 km

Nous proposons un tirage afin de traiter un tiers des points, de la grande île, soit 24 points distribués en zig-zag ce qui permettrait de couvrir assez régulièrement le territoire. En ce qui concerne les petites îles, Ouvéa peut être laissée de côté, par contre un site pourrait être installé sur Maré

et Lifou (îles coralliennes assez homogènes) et l'île des Pins (au sud de la grande île). Cette configuration aboutirait à un total de 27 sites RMQS.

3.2.4 LA GUYANE

La Guyane : 82.000 km². Des sols développés sur un socle précambrien, avec des altérations anciennes. Le Référentiel régional pédologique est en cours de réalisation (IRD) sur la frange côtière qui a été cartographiée ($\pm 11\%$ de l'ensemble, Figure 6a). La grille RMQS 16 x 16 km couvre le territoire guyanais avec 282 points (Figure 6c). Cependant, seuls sont relativement accessibles les territoires depuis la commune d'Apatou au nord-ouest sur le fleuve Maroni jusqu'à la commune d'Oyapoc à l'est. La Figure 6b représente en vert les Terres Hautes sur roches métamorphisées et sur roches ignées, ces paysages morphopédologiques correspondent aux séries aurifères qui sont en ligne de mire des développements miniers.

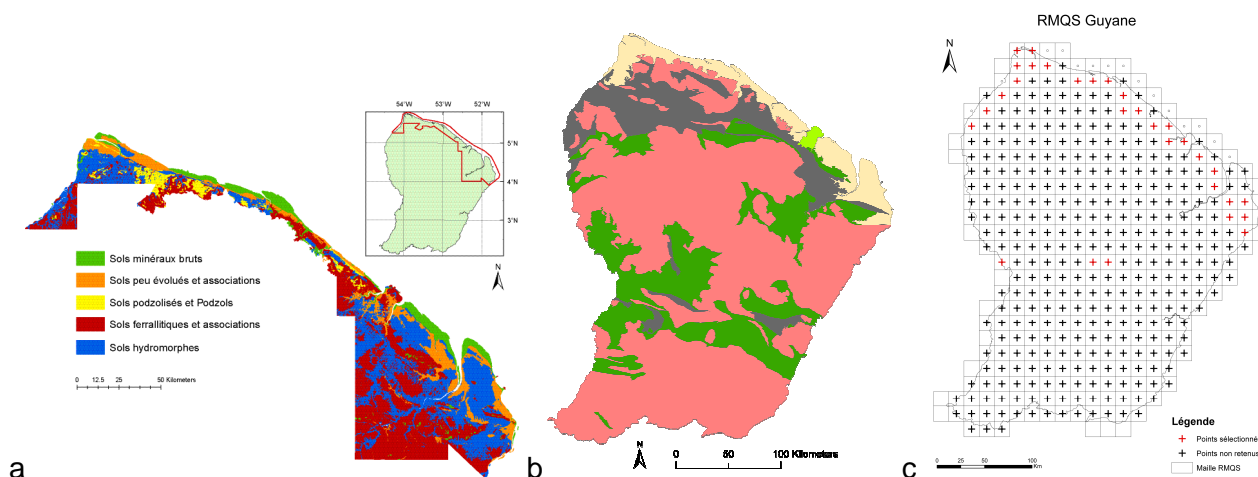


Figure 6 – a) carte des sols de la frange côtière de Guyane ; b) répartition des Terres Hautes sur roches métamorphisées et sur roches ignées (en vert) ; c) répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x16 km

Compte tenu de la surface de la Guyane et de l'accessibilité limitée à l'intérieur des terres, la mise en place du RMQS pourrait être limitée à un total de 35 sites : 25 sites sur la frange côtière qui est la zone la plus sujette aux pressions actuelles (augmentation démographique entraînant des changements d'usage des sols) ; 10 sites répartis à l'intérieur du territoire pour prendre en compte l'évolution de l'occupation suite à la mise en place du parc naturel qui va segmenter et organiser la « colonisation » intérieure.

3.2.5 LES ÎLES SUBANTARCTIQUES (ARCHIPELS DES KERGUELEN ET DE CROZET, ÎLES ST PAUL ET AMSTERDAM)

Présentation des îles subantarctiques

Situées à la limite des océans Indien et Austral, les îles françaises de Crozet, Kerguelen, Amsterdam et Saint-Paul ont le statut de Territoire d'Outre-Mer (Figure 7 ; Tableau 2 ; Figure 8). Elles sont organisées en trois districts dans lesquels la souveraineté est exercée par le Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF).

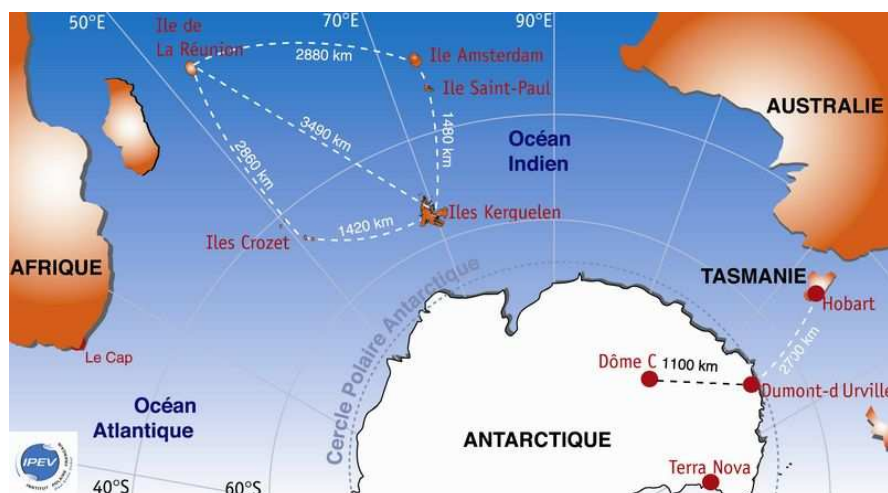


Figure 7 – Carte du Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises (source : Institut polaire français Paul-Émile Victor - IPEV)

Tableau 2 – Quelques données sur les îles subantarctiques (source IPEV)

	<u>Saint-Paul</u>	<u>Amsterdam</u>	<u>Crozet</u>	<u>Kerguelen</u>
Position	38°43'S 77°31'E	37°50'S 77°31'E	45°95' / 46°50'S 50°33' / 52°58'E	48°35' / 49°54'S 68°43' / 70°35'E
Distance de la Réunion	2.880 km	2.880 km	2.860 km	3.490 km
Superficie totale	7 km ²	58 km ²	342 km ²	7.215 km ²
Organisation des îles	Saint-Paul est à 85 km au sud d'Amsterdam		2 groupes d'îles (3+2) distants de 110 km	une grande île et environ 300 îlots
Ile principale (superficie)	<i>id.</i>	<i>id.</i>	Île de la Possession (150 km ²)	La Grande Terre (6.675 km ²)
Caractéristiques	- Origine volcanique - Îles les plus isolées au monde		- Origine volcanique - Îles escarpées- Grandes colonies d'oiseaux	- Origine volcanique - Plus grand archipel austral français
Point culminant	Crête de Novara (268 m)	Mont de la Dives (881 m)	Pic Marion-Dufresne île de l'Est (1.090 m)	Mont Ross (1.850 m)
Base	/	Martin-de-Viviès	Alfred Faure	Port-aux-Français

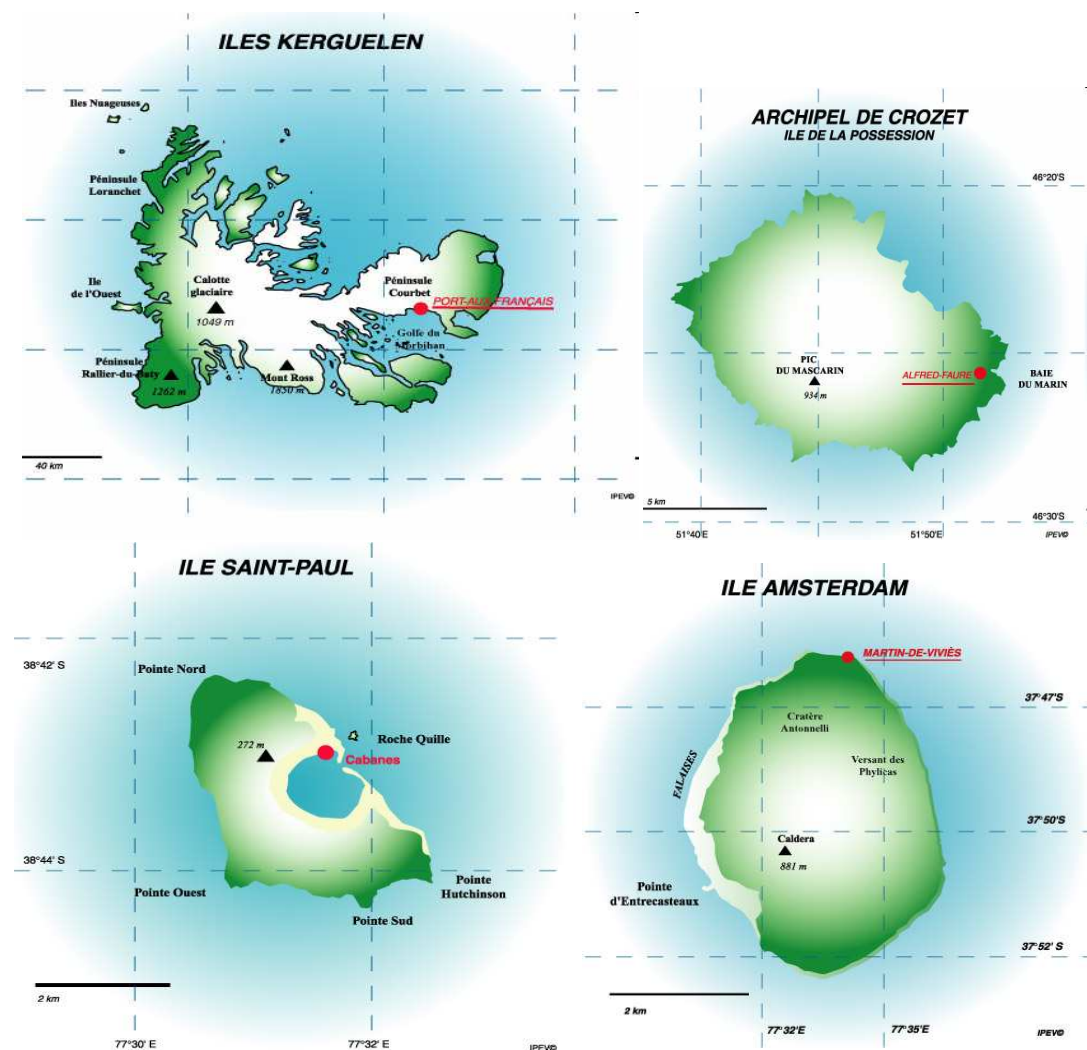


Figure 8 – Morphologie des îles subantarctiques (source : IPEV)

Intérêt scientifique justifiant la mise en place du RMQS dans les îles subantarctiques

Les îles subantarctiques, caractérisées par une faible biodiversité et par une extraordinaire abondance de certaines espèces sont des observatoires uniques de l'évolution du climat et des écosystèmes. Qualifiées d'îles « sentinelles », elles sont intégrées dans plusieurs réseaux internationaux de surveillance : niveau de la mer, sismologie, champ magnétique terrestre, gaz à effet de serre, météorologie, etc. Elles constituent une « zone atelier » labellisée (Zone Atelier de Recherches sur l'Environnement Antarctique et Subantarctique), impliquant de nombreuses équipes de recherches françaises et internationales permettant d'envisager l'acquisition sur le long terme de données écologiques permettant d'analyser l'évolution de la biodiversité des îles subantarctiques françaises. Sur le plan international, les recherches sont intégrées au programme RiSCC (Regional sensitivity to climate change in antarctic terrestrial ecosystems) mis en place par le SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research). La mise en place du RMQS dans ces territoires permettrait de développer un observatoire des sols sur les thématiques environnementales suivantes :

- évaluation des niveaux de contamination des sols par retombées atmosphériques à l'échelle planétaire (éléments traces, micropolluants organiques, contaminants émergents) en utilisant les sols comme témoins des contaminations passées et actuelles,
- impact du changement climatique sur les propriétés des sols dans un contexte particulièrement sensible et isolé, en particulier le rôle des sols dans les émissions de gaz à effet de serre à travers une évaluation de la dynamique des stocks de carbone des sols,
- évaluation de la biodiversité des sols dans des isolats géographiques (ADN microbien),
- impact sur les sols des espèces invasives introduites dans ces îles.

L'IPEV est un GIP chargé de coordonner et de soutenir les recherches scientifiques menées dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF). Cet institut fonctionne par appel d'offre à projet de recherche. Lorsqu'un projet est accepté, l'IPEV prend en charge le financement et assure l'intégralité de la logistique du projet. La politique actuelle de l'IPEV est de soutenir la mise en place d'observatoires de longue durée.

Yves Frenot est le directeur actuel de l'IPEV. C'est un scientifique qui a mené de nombreuses études dans ces territoires sur des thématiques sol et biodiversité. Pédologue, il a notamment cartographié les sols de plusieurs îles australes. De fait, il est particulièrement intéressé et soutiendra le dépôt d'un projet ayant pour objectif la mise en place du RMQS dans les îles subantarctiques.

Premières discussions sur la faisabilité du projet

1/ Accessibilité des territoires des Kerguelen, Crozet, St Paul et Amsterdam :

Le trajet se fait par bateau depuis l'île de la Réunion, et dure 10 à 15 jours (donc 20 à 30 jours pour l'aller et le retour). Il y a 4 bateaux par an durant l'été austral : novembre, décembre, janvier/février et mars/avril. Par conséquent, la mise en place des sites dans les différentes îles doit faire l'objet de campagnes successives, d'où la nécessité de monter un projet pluriannuel. Certaines îles sont des réserves intégrales ou ne sont pas accessibles. Chaque campagne suppose une mission de 2 mois minimum à 4 mois maximum.

2/ Stratégie d'échantillonnage :

L'implantation du RMQS selon un réseau de 16 km x 16 km permettrait la mise en place d'une trentaine de sites sur les Kerguelen (Figure 9). Cependant, l'île principale présente des zones très difficiles d'accès, montagneuses, ou sans couverture pédologique (glacier, rochers). Par conséquent, une réflexion sur la stratégie la plus adaptée au contexte de ces territoires doit être menée (densité d'échantillonnage, stratification, rattachement à des sites de référence étudiés par d'autres équipes). Un bateau est présent aux Kerguelen durant l'été austral pour les déplacements autour de l'île. La récupération des échantillons peut se faire par hélicoptère si les conditions le permettent. Mis à part les Kerguelen, les autres îles subantarctiques sont de petite taille, avec un site au plus si on se cale sur la maille 16 km x 16 km. Par conséquent la même réflexion sur la stratégie d'échantillonnage doit être menée.

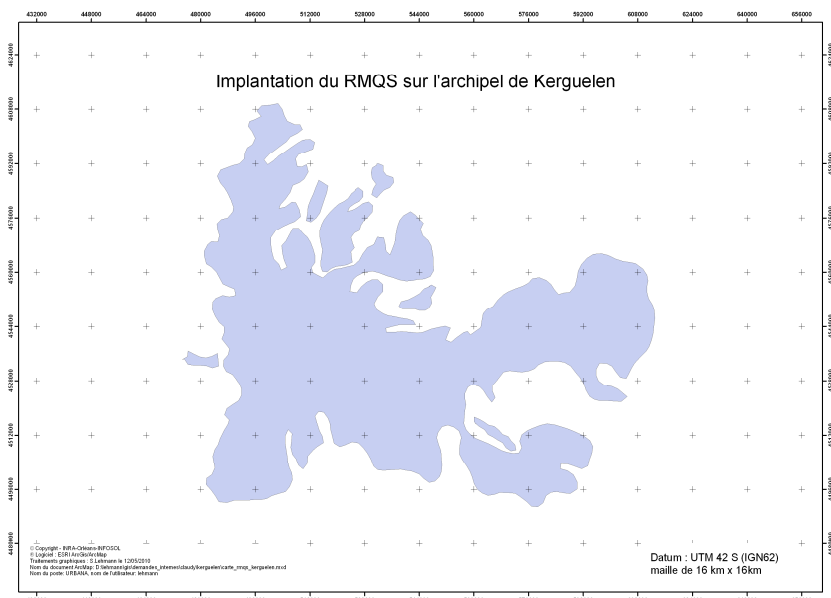


Figure 9 – Répartition des sites RMQS selon la grille 16 km x 16 km sur l'archipel des Kerguelen

3/ Personnel pour les campagnes

Du personnel est présent dans ces îles durant l'été austral et en moindre effectif durant l'hiver mais il est déjà engagé dans des projets de recherche à plein temps. Il faudra donc privilégier des opérations « coup de poing » avec une équipe de 4 personnes (dont au moins un pédologue) pour chaque campagne. Plusieurs pédologues de divers organismes partenaires se sont déjà portés volontaires pour participer à une telle mission si celle-ci était organisée.

Procédure et calendrier des appels d'offre

La procédure est longue. Les appels d'offre pour les campagnes de l'année n démarrent l'année n-1. Ainsi, l'appel à projets pour les campagnes 2012-2013 s'est achevé en septembre 2011. La décision de la commission scientifique qui évalue les projets a été rendue en novembre 2011 et le démarrage des projets est prévu un an après, en novembre 2012. Les projets déposés peuvent être pluriannuels.

Bilan

- Projet présentant un intérêt scientifique fort qui permettrait d'intégrer le suivi des sols dans des réseaux nationaux et internationaux de surveillance de l'environnement développés sur ces îles qualifiées de « sentinelles »,
- accueil très favorable du projet par l'IPEV et soutien du directeur pour monter un RMQS dans les îles subantarctiques,
- prise en charge intégrale des coûts de logistique par l'IPEV si le projet est retenu (du départ au retour en métropole),
- budget à mobiliser par le GIS Sol limité au salaire des personnels engagés dans l'opération (titulaires InfoSol ou dépendant d'autres organismes ou CDD), et au coût de gestion et des analyses des échantillons de sol.

3.2.6 ESTIMATION DES COÛTS DE MISE EN PLACE DES SITES DANS LES ROM-COM ET PROPOSITION DE CALENDRIER DE MISE EN OEUVRE

Les coûts de mise en place du RMQS ont été estimés en détail pour la Réunion, la Nouvelle-Calédonie, la Guyane et Mayotte. Ces estimations sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Estimations des coûts de mise en place du RMQS dans les DOM-TOM

	Réunion : 12 sites	N-Calédonie : 27 sites	Guyane : 35 sites	Mayotte : 3 sites	TOTAL
	cout total	cout total	cout total	cout total	
Mission organisation/formation					
Billets avion métropole/ personne	3 000	4 600	2 000		9 600
Per diem / jour / personne	1 260	1 260	1 260		3 780
sous-total	4 260	5 860	3 260		13 380
Mise en place des sites					
Sous-traitance installation d'un site	12 600	28 350	36 750	3 150	80 850
Billets avion métropole/ personne	6 000	13 800	12 000	3 000	34 800
Per diem / jour / personne	5 400	13 680	38 880	2 160	60 120
Location véhicule / jour	1 200	3 420	9 720	540	14 880
Combustible (1500 km)	200	350	260	0	810
Personnel temporaire local / jour	1 260	2 835	7 560	630	12 285
Petit matériel de terrain	500	700	700	500	2 400
Fret aérien (échantillons)	3 000	6 750	8 750	750	19 250
Fret aérien (matériel)	1 000	1 000	1 000	1 000	4 000
Frais helico			10 000		10 000
sous-total	31 160	70 885	125 620	11 730	239 395
Analyses de sols					
Préparation au conservatoire	1 680	3 780	4 900	140	10 500
Analyses classiques (menu RMQS 1)	7 968	17 928	23 240	996	50 132
Analyses complémentaires pédo	1 680				1 680
Analyses complémentaires RMQS 1 bis	6 512	14 653	18 995	1 628	41 788
sous-total	17 840	36 361	47 135	2 764	104 100
TOTAL € HT	53 260	113 106	176 015	14 494	356 875
TOTAL € TTC	63 699	135 275	210 513	17 335	426 822
Cout par site € HT	4 438	4 189	5 029	4 831	

La mise en place du RMQS dans les îles subantarctique n'a pas été chiffrée mais son coût serait probablement très inférieur à celui des autres DOM-TOM, compte tenu de la prise en charge par l'IPEV des frais de logistique dans le cadre de ses projets de recherche.

La mise en place des sites pourrait être réalisée selon le calendrier suivant :

- 2012 Réunion et Mayotte
- 2013 Guyane
- 2014 Nouvelle Calédonie

Ce calendrier pourrait être révisé en fonction de la disponibilité des équipes sur place, en particulier en ce qui concerne la Guyane et la Nouvelle-Calédonie. Le nombre de sites à mettre en place sur ces deux territoires étant assez important, leur mise en place pourrait être envisagée sur deux années dans chaque territoire. En ce qui concerne les îles australes, il n'est pas envisageable d'établir un calendrier à ce stade, mais il faut garder à l'esprit que la procédure de dépôt de projet est longue.

3.3 COLLECTE ET ANALYSE DES BESOINS DES UTILISATEURS DES DONNÉES « SOL »

La deuxième conférence d'Orientation du Gis Sol a permis d'organiser un recensement des demandes en données « sol ». Pour mémoire, cette conférence a pour but de réunir tous les trois ans les utilisateurs des données sur les sols, pour leur présenter l'état d'avancement et les résultats des programmes du Gis Sol : la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT), le programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) et le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Sur les 58 participants à cette conférence, 37 représentaient des ministères et organismes partenaires du Gis Sol (Ademe, IFN, Inra, IRD, Maap, Meeddm), tandis que les 21 autres participants représentaient des administrations déconcentrées, des gestionnaires du monde agricole, des associations environnementales, des bureaux d'études, des groupements et des organismes publics travaillant sur les milieux environnementaux connexes aux sols.

Après une présentation des programmes du Gis Sol et des exemples d'applications, les participants ont été conviés à participer à l'un des trois ateliers de réflexion et d'échange (voir encadrés ci-après) dont les thèmes abordés traitaient : des services environnementaux rendus par les sols (21 participants), des usages et de la gestion des sols face au changement climatique (16 participants) et des sols et de la santé (21 participants). Les échanges ont été fructueux et ont permis de faire remonter les besoins futurs des utilisateurs. Une synthèse de cette conférence a été publiée dans la « Lettre du Gis Sol » numéro 21 de septembre 2010. Les principales conclusions de cette lettre sont reprises dans ce rapport (http://www.gissol.fr/lettre/lettre_GisSol_N21.pdf).

ATELIER " SOLS ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES " : LES APPORTS DU GIS SOL, QUELS BESOINS SUPPLÉMENTAIRES ?

Les sols sont essentiels au fonctionnement des écosystèmes et sont à la base des biens et services fournis par ces écosystèmes. Les données acquises par les programmes du Gis Sol permettent d'en spatialiser certains, mais des besoins nouveaux émergent...

Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) classe les services écosystémiques en quatre groupes. Les services de support (production primaire, formation des sols, recyclage des nutriments) permettent la mise en place des services d'approvisionnement (nourriture, bois, fibres, eau douce, ressources génétiques, pharmaceutiques), de régulation (qualité de l'air, du climat, de l'eau, l'érosion) et les services culturels, religieux et récréatifs. Le MEA place la biodiversité comme la force motrice de la mise en place de ces services. La biodiversité du sol est donc de première importance.

Les travaux du Gis Sol répondent aux interrogations sur le rôle des sols dans la mise en place des services écosystémiques. Ses programmes fournissent des informations sur les variabilités spatiale et temporelle des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Ils permettent d'étudier chaque groupe de service : caractéristiques des sols et production primaire (support), aptitudes culturales des terres ou choix des variétés de maïs en fonction de l'état hydrique des sols (approvisionnement), régulation et épuration des eaux ou aptitude des sols à l'épandage d'effluents organiques (régulation), faisabilité de la réintroduction du lapin de garenne ou zone potentiellement humide (culture).

Les participants à l'atelier ont suggéré que des efforts soient faits pour mieux définir la variabilité spatiale et temporelle d'autres paramètres biologiques (biodiversité, dénitrification, minéralisation, puits/sources de carbone), physiques (transferts hydriques, tassement) ou physico-chimiques (mobilisation/immobilisation des éléments traces métalliques). Les pressions sur les sols (besoin en agrocarburants, urbanisation, changement climatique) et les impacts sur les services devraient également être étudiés par le Gis Sol.

Le sol rend des services écosystémiques..

Les services écosystémiques rendus par les sols Adapté de MEA (2005)

Par ailleurs, beaucoup d'utilisateurs du Gis Sol sont demandeurs d'informations à des échelles plus fines, d'une capitalisation de l'information et d'un partage d'expériences. Enfin, les liens avec la recherche (programme GESSOL, etc.) seraient à renforcer, par exemple autour de la monétarisation des services rendus par les sols et de la réglementation sur leur protection.

*Eric.Blanchart@ird.fr
Antonio.Bispo@ademe.fr*

ATELIER " USAGE ET GESTION DES SOLS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE "

L'atelier a abordé les questions se posant au Gis Sol au regard des enjeux climatiques. Après un exposé sur la gestion des sols et les bilans de gaz à effet de serre (GES), ainsi que des études menées sur les émissions/projections de GES, les 16 participants ont discuté des points suivants.

Quelles données acquérir pour quel usage ?

Ont été cités le protoxyde d'azote, la fertilisation azotée, les caractéristiques hydrodynamiques, la spatialisée des textures et des profondeurs, la nature du carbone des sols et les impacts du changement climatique sur les sols et vice-versa.

Quelles applications semblent prioritaires ?

Les modèles (à calibrer) établissent des prévisions via différents scénarios. Des prédictions avec les données du programme IGCS¹ permettraient d'estimer les stocks profonds et les perturbations liées au changement climatique ou d'usage des sols.

Y-a-t-il des oubliés ? La maille utilisée par le Gis Sol n'est pas assez fine pour analyser les zones humides et le méthane.

Les attentes par rapport au Gis Sol ?

Où restaurer les puits de carbone, où protéger les stocks existants ? Des questions délicates auxquelles les pouvoirs publics doivent répondre. L'inventaire des sols français est donc à améliorer et à affiner pour définir précisément les stocks et flux de carbone, ainsi que les actions d'atténuation des émissions de GES et d'adaptation, en vue des négociations internationales et des engagements à atteindre au niveau mondial (protocole de Kyoto), européen (Paquet énergie climat) et national (Grenelle de l'environnement). La mise en œuvre des mesures à l'échelle infranationale²⁻³ nécessitera des données locales spatialisées des variations des stocks de carbone des sols, l'évaluation des gisements de biomasse (projet Qualisol), une carte des déficits de saturation et des pertes en carbone pour orienter les changements d'usage des terres. L'approche décloisonnée

des couverts végétaux permettrait de mieux quantifier les stocks de carbone du sol, en couplant la BDAT⁴, le RMQS et d'autres outils (Nopolu - transfert de pollution). Les microorganismes attestent du bon fonctionnement des sols et pourraient donc être utilisés comme indicateurs de suivi de leur qualité et servir à évaluer l'effet du changement climatique ou du prélèvement du bois-énergie (objectifs Grenelle). Enfin, la quantification de la biodiversité des sols (projet RMQS BioDiv⁵) doit être développée avec une approche écosystémique, couvrant la diversité des sols agricoles et sylvicoles.

Maryline.Loquet@agriculture.gouv.fr

¹ Inventaire, Gestion et Conservation des Sols

² Schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie

³ Plans Climat Energie Territoriaux

⁴ Base de données analyses de terre

⁵ Lettre du Gis Sol n°12

ATELIER "LES SOLS ET LA SANTÉ"

Les discussions ont concerné trois points. A quelle échelle mener les études ? Quelles substances considérer pour la seconde campagne de prélèvement du Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) et comment les hiérarchiser ? Quels paramètres acquérir pour mieux appréhender l'exposition aux sols ?

L'importance de mettre en cohérence les objectifs d'une étude et l'échelle d'acquisition des données a été rappelée. Les analyses concernant la population générale ou la qualité des écosystèmes peuvent s'effectuer à petite échelle, contrairement à l'étude des sols pollués ou de points noirs environnementaux.

Concernant les substances à mesurer, il serait pertinent de définir des critères de sélection et de hiérarchisation des composés à caractériser, comme la biodisponibilité et la mobilité, la toxicité ou l'écotoxicité. Quant aux perturbateurs endocriniens, il est recommandé d'attendre les résultats de travaux comme le programme "résidus de médicament dans l'eau" de la Direction générale de la santé. Enfin, la traduction des concentrations en stocks est importante.

Au sujet des paramètres à acquérir, il a été proposé de caractériser,

notamment pour les métaux et à terme pour les composés organiques, la fraction bio-accessible pour approcher au mieux la concentration de l'élément dans le sol à laquelle les individus sont exposés. Il a donc été proposé de réaliser une étude de faisabilité sur la base d'un panel d'échantillons de la première campagne du RMQS.

L'atelier s'est conclu sur des aspects de valorisation portant sur la combinaison des données du Gis Sol et des données sur la qualité d'autres milieux environnementaux. Ceci permettrait de renseigner les expositions multimédia (sols, air, eau, végétaux) aux contaminants. Cette valorisation pourra fortement contribuer aux objectifs du Plan national santé environnement 2 (PNSE2) de définition des inégalités environnementales ou répondre à des attentes réglementaires définies par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). En marge, l'importance du Conservatoire d'échantillons de sol en appui à des programmes de recherche sur la métrologie dans les sols a été évoquée.

Les contaminants des sols :
priorités, projets, perspectives

US 1106 InfoSol Inra Orléans

Conférence d'orientation du Gis Sol - Paris - 08 Juin 2010

Support de formation

Sebastien.Denys@inra.fr

L'analyse des besoins exprimés par les participants à cette conférence fait ressortir les principaux points suivants :

1. Promouvoir l'acquisition de nouveaux paramètres (arsenic, mercure, microorganismes, radionucléides, polluants organiques persistants) ou le développement de nouveaux indicateurs (biodiversité, tassement).
2. Mieux intégrer les problématiques liées au changement climatique : évaluation précise des stocks et des flux de carbone, des émissions de gaz à effet de serre, actions d'atténuation et d'adaptation.
3. Mieux définir la variabilité spatiale et temporelle des paramètres biologiques (biodiversité, dénitrification, minéralisation, puits/sources de carbone), physiques (transferts hydriques, tassement) et chimiques (mobilisation/immobilisation des éléments traces métalliques).
4. Traduire les concentrations mesurées en stocks d'éléments.
5. Développer l'acquisition de données à des échelles plus fines, et renforcer la capitalisation de l'information et le partage d'expériences.
6. Prendre en compte les autres pressions s'exerçant sur les sols (besoin en agrocarburants, urbanisation) et leurs impacts sur les services rendus par les sols.
7. Développer des approches permettant d'évaluer l'exposition des populations aux contaminants : caractériser les fractions biodisponibles des contaminants minéraux et organiques, croiser les données du Gis Sol avec des données sur la qualité d'autres milieux environnementaux pour intégrer les expositions multimédia (sols, air, eau, végétaux).
8. Renforcer les liens avec la recherche (programme GESSOL, etc.) autour de la monétarisation des services rendus par les sols et de la réglementation sur leur protection.

3.4 PRÉPARATION DE LA DEUXIÈME CAMPAGNE DU RMQS

Le lancement de la deuxième campagne du RMQS nécessite une réflexion approfondie sur ses modalités de mise en œuvre : quelle stratégie d'échantillonnage ? Quelle stratégie de partenariat ? Quels modes opératoires et nouvelles techniques utiliser ? Quelles analyses de sol privilégier ? Etc. Pour répondre à certaines de ces questions, un test a été mis en œuvre sur une quarantaine de sites du RMQS en Région Centre, afin de simuler une deuxième campagne. Ce test a consisté à remettre en place les sites, à conduire les prélèvements et les observations avec des équipes partenaires, à tester un certain nombre de nouveaux outils et de nouvelles analyses de sol.

3.4.1 LES SITES SÉLECTIONNÉS POUR LE TEST

3.4.1.1 Région sélectionnée

La région sélectionnée pour le test de réimplantation est la Région Centre. Ce choix a été motivé par des critères de proximité et de temporalité :

- le test a été réalisé avec le concours systématique du personnel d'InfoSol situé à Orléans, le choix de la région Centre a permis de limiter les temps de déplacement ;
- la Région Centre comprend les premiers sites mis en place lors de la première campagne, ce qui a permis de respecter un intervalle de temps suffisant entre la première campagne et la campagne test.

3.4.1.2 Nombre de sites

Le nombre de sites retenus pour le test est un compromis entre le coût de mise en place, le délai de réalisation (6 mois) et un nombre suffisant pour que le test soit probant. Nous avons retenu 42 sites sur les 160 sites que compte la région, soit un quart des sites.

3.4.1.3 Critères de sélection des sites

La sélection des sites résulte de la combinaison de 2 critères :

- géographique : la répartition des sites retenus couvre l'ensemble de la région de façon régulière et selon une distribution similaire entre les 6 départements ;
- représentativité : la distribution de l'occupation des sites sélectionnés est représentative de la distribution régionale des occupations, dont la référence retenue est la base de données statistiques TERUTI 2006 (Tableau 4).

Les sites RMQS faisant partie du réseau BIOSOIL n'ont pas été retenus car ayant été installés en 2006-2007, un retour sur ces sites en 2010 aurait été trop précoce.

Tableau 4 - Occupations des sols agricoles en Région Centre et nombre de sites correspondant

Occupation TERUTI 2006	% SAU hors forêts	Nombre théorique de sites correspondants	Nombre de sites retenus
Grandes cultures	72%	26	25
Prairies temporaires	5%	2	3
Prairies permanentes	16%	6	7
Vignes et vergers	1%	1	1
Jachères permanentes et friches	5%	1	2
Légumes et Jardins familiaux	1%	1	0
Total (agricole)	100%		38
<i>Forêts</i>			4
Total			42

Étant donnée l'importance de la forêt dans la région (23% du territoire) et les enjeux liés à cette occupation, notamment par rapport au stockage de carbone, 4 sites forestiers RMQS ont été retenus (hors BIOSOIL) dans la sélection. Malgré ces 4 sites, l'occupation « forêt » est sous représentée dans le jeu de données (Figure 10).

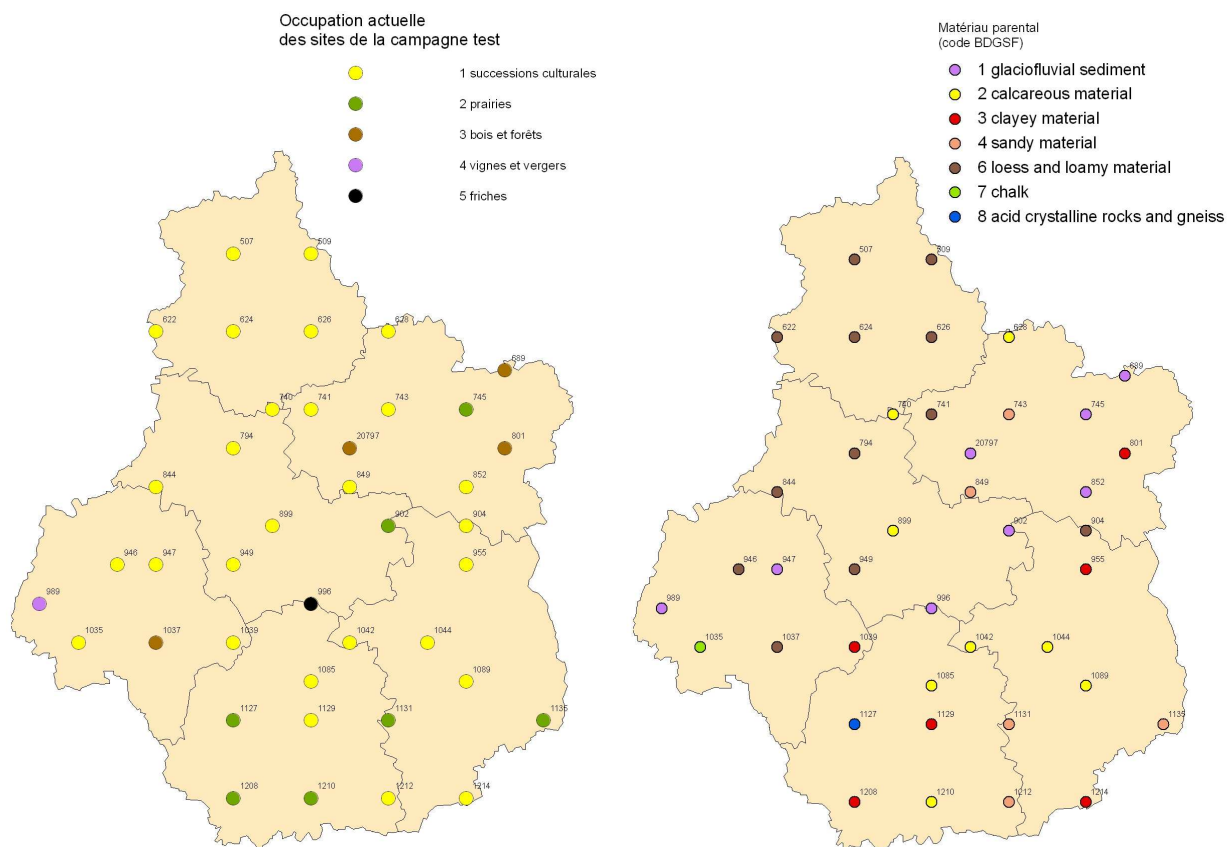


Figure 10 – Occupations et matériaux parentaux des sols des sites sélectionnés

3.4.1.4 Caractéristiques pédologiques des sites sélectionnés

La Région Centre est située principalement en milieu sédimentaire. Les 42 sites sont répartis sur 7 types de matériaux parentaux (Tableau 5 et Figure 10) et 9 types de sols (Tableau 6), avec une dominante de sols limoneux plus ou moins lessivés et de sols carbonatés. L'Annexe 2 présente la liste des sites sélectionnés et leurs caractéristiques pédologiques.

Tableau 5 - Répartition des sites par matériau parental (transcrit selon la nomenclature de la base de données géographiques des sols de France au 1/1 000 000e (BDGSF))

Matériau parental	Nombre de sites
sédiments glaciofluviaux	7
matériau calcaire	9
matériau argileux	6
matériau sableux	5
loess et matériau limoneux	12
craie	1
roches cristallines acides et gneiss	1

Tableau 6 - Répartition des sites par type de sol (Référentiel Pédologique 1995)

Type de sol (Référentiel Pédologique 1995)	Nombre de sites
ALOCRISSOL	1
BRUNISSOL	8
CALCISOL	4
CALCOSOL	6
COLLUVIOSOL	1
LUVISOL	6
LUVISOL-REDOXISOL	1
NEOLUVISOL	6
PLANOSOL	6
PODZOSOL	1
REDUCTISOL	1

3.4.2 MODALITÉS DE MISE EN ŒUVRE

3.4.2.1 Partenariat

L'unité InfoSol s'appuie sur un réseau de partenaires régionaux pour assurer la mise en place du RMQS sur le territoire français. Ce réseau est constitué d'équipes appartenant à des structures régionales possédant des compétences en pédologie et l'infrastructure nécessaire pour prendre

en charge l'installation sur le terrain des sites du réseau (chambres d'agriculture, établissements d'enseignement supérieur, bureaux d'études, associations, etc.). Les 6 Chambres Départementales d'Agriculture de la Région Centre ont donc été sollicitées pour fournir leur appui à la réalisation de ce test. Ce partenariat a fait l'objet de conventions de partenariat et s'est appuyé sur un nouveau cahier des charges rédigé pour ce test.

Missions des CDA

Les CDA ont été chargées de contacter les exploitants ou propriétaires des parcelles du RMQS afin de les informer du test et d'obtenir leur accord pour une intervention. Elles ont eu pour mission de collecter les données sur les pratiques culturales, les aménagements éventuels réalisés sur les parcelles, dans le cadre d'une enquête réalisée auprès de l'exploitant (« enquête sur les pratiques de gestion et l'historique des parcelles du RMQS »). L'enquête a concerné la période intermédiaire entre les 2 campagnes. La collecte de ces données a été réalisée en s'appuyant sur les données collectées durant la première campagne, de façon à assurer la continuité des informations et à vérifier la cohérence des informations entre les 2 campagnes.

Les CDA ont également apporté le concours de deux personnes pour la mise en œuvre des opérations de terrain sur chaque site. A la fin de l'opération, elles ont été chargées de restituer les résultats d'analyses aux exploitants ou propriétaires des parcelles.

Missions d'InfoSol

L'Unité InfoSol a supervisé et a participé à la mise en place du test, avec le concours systématique d'une personne de l'Unité sur chaque site. Elle a fourni le matériel d'observation et de prélèvement. Elle a assuré également la formation des partenaires à la mise en place des dispositifs. Une équipe renforcée de 2 ou 3 personnes est intervenue en outre dans les situations particulières (sites sous forêt, essais méthodologiques ponctuels, ...). Un cahier des charges pour la mise en place des sites sur le terrain, selon un dispositif et un protocole adaptés à la campagne test, a été rédigé et diffusé.

L'Unité InfoSol a fourni aux partenaires la liste des sites et leur localisation, les coordonnées des exploitants, à charge pour les CDA de retrouver les coordonnées des nouveaux exploitants en cas de changement. Après un premier contact téléphonique établi par les CDA, InfoSol a informé par courrier tous les exploitants concernés des modalités du test.

InfoSol a également fourni les fiches de terrain standardisées pour les observations, ainsi que les questionnaires d'enquête. Ces documents créés lors de la première campagne ont fait l'objet d'une mise à jour complète. Les partenaires des CDA ont été associés à la révision des formulaires d'enquête.

3.4.2.2 Dispositif d'échantillonnage et protocole de mise en place

Le dispositif d'échantillonnage mis en place et le protocole appliqué s'appuient sur ceux établis lors de la première campagne (Manuel du RMQS, Jolivet *et al.*, 2006), en intégrant les modifications liées à cette nouvelle campagne (Figure 11) :

- La surface d'échantillonnage de 20 m par 20 m est identique à celle de la première campagne et réimplantée strictement au même endroit de la parcelle, à l'aide du matériel GPS, avec une précision inférieure à 50 cm (*cf.* paragraphe 3.4.2.5).
- Les prélèvements d'échantillons composites sont réalisés dans les 25 placettes numérotées « 2 » (placettes « 1 » lors de la première campagne) selon le même protocole. Comme pour la première campagne, selon les sols, 1 à 3 séries d'échantillons composites ont été prélevées par site (horizon holorganique, couches de surface et de subsurface).
- Une fosse pédologique a été creusée pour la description du profil de sol sur 7 sites pour lesquels les observations pédologiques ou les échantillons d'horizons étaient incomplets lors de la première campagne.
- Une petite fosse a été ouverte à 5 m du côté ouest de la surface d'échantillonnage, pour réaliser des prélèvements volumétriques (mesure de la densité apparente), selon 3 répétitions par couche de prélèvement composite, et selon 1 à 3 méthodes (méthode du cylindre, méthode à l'eau et test d'une nouvelle méthode de prélèvement, détaillée plus bas).

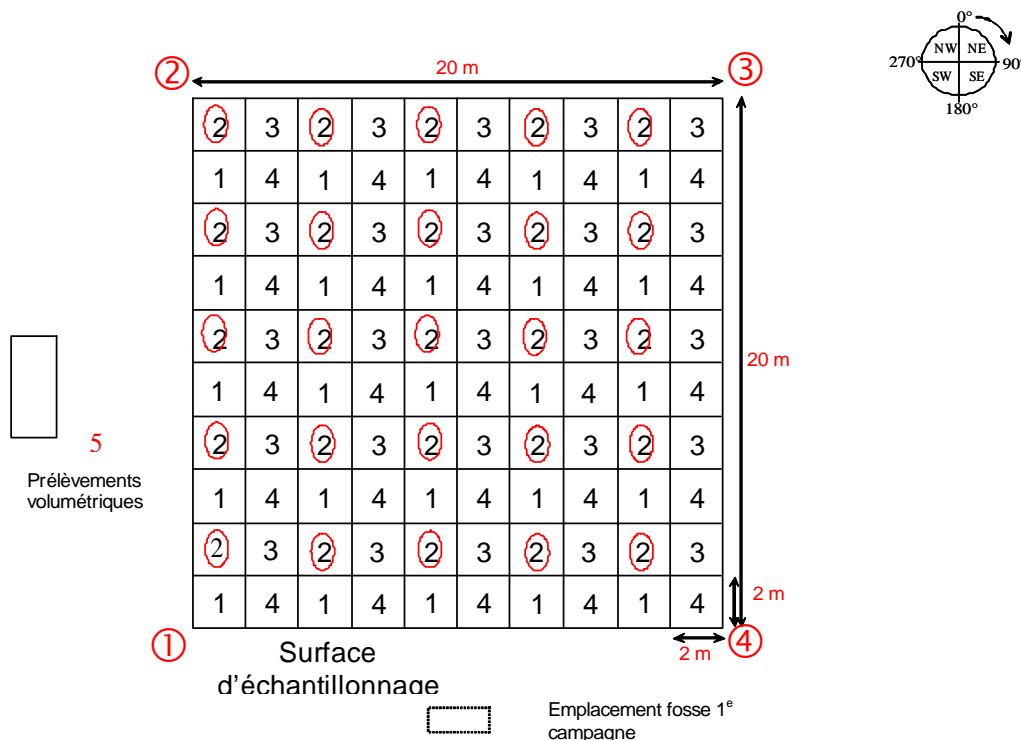


Figure 11 - Dispositif d'échantillonnage

3.4.2.3 Prélèvements réalisés

Plusieurs types d'échantillons ont été prélevés :

- Prélèvements d'échantillons composites à la tarière sur 25 placettes dans l'épaisseur de la couche travaillée ou entre 0 et 30 cm sous forêt et en sol non travaillé (composites de surface ou composites 1).
- Prélèvements d'échantillons composites à la tarière sur 25 placettes sous la couche travaillée jusqu'à 50 cm ou entre 30 et 50 cm sous forêt et en sol non travaillé (composites de sub-surface ou composites 2).
- Prélèvements volumétriques selon la méthode du cylindre (500 ml) ou la méthode à l'eau (méthode par excavation). Trois répétitions sont réparties sur l'épaisseur de sol correspondant à chaque couche des prélèvements composites. Dans le cas où la méthode à la tarière cylindrique est mise en œuvre, 3 répétitions par couche sont également réalisées à proximité (voir ci-après).
- Sous forêt, lorsqu'un humus d'épaisseur suffisante (> 1 cm) est présent de façon continue, un prélèvement au cylindre de l'humus est réalisé sur chacune des 25 placettes. L'épaisseur de chaque prélèvement est mesurée pour calculer la densité apparente de l'ensemble du prélèvement.

Les échantillons composites ont été prélevés strictement aux profondeurs déterminées lors de la première campagne de prélèvements. Ce point avait fait l'objet d'une réflexion particulière au préalable : quelle profondeur choisir dans le cas où la profondeur de travail du sol a changé ou dans le cas d'un changement d'occupation. Le choix de respecter les profondeurs de prélèvement de la première campagne a été motivé par la nécessité de disposer de couches de sol identiques entre deux campagnes, afin de pouvoir comparer les stocks et des teneurs en éléments.

3.4.2.4 Observations réalisées

Les observations réalisées comprennent :

- Une description de l'environnement du site : il s'agit, comme dans la première campagne, de noter les sources de contamination pouvant avoir un impact sur le site et l'occupation environnante. Par rapport à la première campagne, nous nous sommes attachés à noter les changements ou bien à compléter la description de la première campagne. Cette description est complétée par les prises de vues de l'environnement du site selon 8 directions cardinales.
- Des informations utiles à l'interprétation des levés GPS (nombre et localisation des levés, présence de masques, incidents aux levés).
- Un schéma de localisation des bornes pour les sites bornés, sous forêt.
- Une description pédologique pour 7 sites.

3.4.2.5 Test de nouvelles méthodes

Test d'une nouvelle méthode de prélèvement d'échantillons volumétriques

Cette campagne a permis de tester une nouvelle méthode de prélèvement d'échantillons volumétriques, à l'aide d'une tarière cylindrique. Son avantage est de pouvoir réaliser les prélèvements dès la surface du sol, sans nécessiter une ouverture de fosse.

Le principe repose sur le prélèvement d'un échantillon non perturbé, continu jusqu'à 50 cm de profondeur. La tarière est constituée d'un long cylindre dans lequel est glissée une gaine ouverte à une extrémité. La tarière est enfoncée verticalement à la main ou à l'aide d'un maillet. L'échantillon prélevé est conservé dans la gaine après extraction.

Les contraintes d'utilisation de cette méthode sont liées aux caractéristiques du sol. Son utilisation est réduite aux sols non caillouteux, peu compacts, dont l'humidité est proche de la capacité au champ. L'enfoncement peut être difficile dans les sols de texture de type « argile lourde ».

Test d'un nouveau capteur GPS pour la réimplantation des sites

Dans le cadre du test, nous avons utilisé un nouveau matériel GPS, © Trimble, pour réimplanter précisément les 4 points de la surface d'échantillonnage. Ce matériel, à la différence de celui utilisé lors de la première campagne, dispose d'un système de correction de la position en temps réel. Il a permis de retrouver par navigation instantanée sur la parcelle, la localisation exacte des 4 points avec une précision inférieure à 50 cm. Le positionnement précis de la surface d'échantillonnage est une condition pour ne pas introduire un biais lié à la variabilité spatiale dans la parcelle et permettre de détecter des évolutions de teneurs d'une campagne à l'autre.

Le matériel a fait l'objet de tests avant le début de la campagne, sa précision a été vérifiée à l'aide d'une borne géoréférencée sur le Centre INRA. Sur chaque site, nous avons également réalisé des levés après réimplantation à 3 moments de la journée, pour évaluer les variations de précision d'implantation au cours d'une journée.

3.4.2.6 Préparation et enregistrement des échantillons

Tous les échantillons prélevés ont été préparés avant analyses par le Conservatoire des sols, selon des modes opératoires identiques à la première campagne. Les prélèvements composites ont été séchés à l'air. Une fraction est émottée à la main et tamisée à 2mm pour analyses.

Les prélèvements volumétriques sont pris en charge par le Conservatoire : les étapes de mesure comprennent une pesée humide, un séchage à 105°C pendant 48h et une pesée sèche. A partir de ces prélèvements et en appliquant une méthode de tamisage à l'eau, la teneur en éléments grossiers est également déterminée sur chaque échantillon.

Les données récoltées, les observations, les mesures sur échantillons volumétriques, les résultats analytiques ainsi que les prélèvements eux-mêmes, ont été enregistrés dans la base DONESOL.

3.4.2.7 Menus analytiques

Les analyses ont toutes été réalisées par le Laboratoire d'Analyses des Sols (LAS) de l'INRA d'Arras. Les menus analytiques appliqués sur les échantillons du test (Tableau 7) avaient pour objectifs de :

- disposer des mêmes déterminations que celles réalisées durant la première campagne afin d'évaluer l'effet du stockage à long terme des échantillons et de l'évolution des méthodes d'analyse. Les menus analytiques appliqués sur les échantillons de la première campagne ont été appliqués aux échantillons de la campagne test et ont été réappliqués aux échantillons de la première campagne stockés à la pédothèque ;
- tester de nouvelles déterminations, qui pourraient être recommandées pour la deuxième campagne ou être appliquées aux échantillons de la première campagne afin de compléter le jeu de données analytiques.
 - Une partie de ces nouvelles déterminations concerne des éléments traces ou majeurs d'intérêt environnemental, mesurés en extraction totale : Arsenic (As), Césium (Cs), Mercure (Hg), Antimoine (Sb), Sélénium (Se), Silicium (Si), Étain (Sn), Strontium (Sr), Thorium (Th), Uranium (U) et Vanadium (V).
 - Une seconde partie de ces déterminations concerne des éléments traces extraits par sels neutres. Ont été testés l'extraction de 9 ETM extraits avec 3 extractants différents : CaCl₂, NaNO₃, NH₄NO₃.

Tableau 7 - Menus analytiques

NB : La série 1 correspond aux analyses réalisées entre 2001 et 2006 sur les échantillons de la première campagne, la série 2 correspond à la réanalyse en 2010 des échantillons de la première campagne et la série 3 correspond aux analyses réalisées en 2010 sur les échantillons de la campagne test.

Paramètre	Méthode	Unité	Séries analysées	Composites analysés
Teneur en eau résiduelle	Séchage à 105°C	g/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Granulométrie 5 fractions	Méthode Pipette de Robinson sans décarbonatation	g/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
pH eau	Dilution 1/5		Séries 1,2,3	Composites 1 et 2

Paramètre	Méthode	Unité	Séries analysées	Composites analysés
Calcaire total	Méthode volumétrique	g/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Carbone et azote total	Combustion sèche	g/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Phosphore assimilable	Olsen	g/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
CEC et cations échangeables Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al	Extraction au chlorure de cobalt-hexammine	cmol+/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Bore soluble	Eau bouillante	mg/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Fer libre	Tamm et Mehra-Jackson	g/100 g	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Éléments majeurs totaux Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Mn	Mise en solution totale par HF dosage ICP-AES	g/100g	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Si total	Fusion alcaline	g/100g	Séries 2 et 3 uniquement	Composites 1 et 2
Éléments traces métalliques Co, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, Cd, Ti, Mo	Mise en solution totale par HF dosage ICP-AES ou ICP-MS	mg/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Éléments traces métalliques Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Extraction à l'EDTA	mg/kg	Séries 1,2,3	Composites 1 et 2
Éléments traces métalliques Hg, Se	Extraction totale non HF	mg/kg	Séries 2 et 3 uniquement	Composites 1 et 2
Éléments traces métalliques As, Cs, Sb, Sn, Sr, U, V, Th	Mise en solution totale par HF dosage ICP-MS ou ICP-AES	mg/kg	Séries 2 et 3 uniquement	Composites 1 et 2
Éléments traces métalliques Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn, Pb, Ti	3 extractants sels neutres - CaCl ₂ - NH ₄ NO ₃ - NaNO ₃	µg/kg	Séries 2 et 3 uniquement	Composites 1 uniquement

Remarque : Pour 5 échantillons issus des composites 2 de la première campagne, les analyses ont été réduites aux seuls éléments majeurs et traces totaux nouveaux non analysés lors de la première campagne, en raison de stocks faibles.

Corrections des teneurs

Les teneurs mesurées sont données par unité de masse de terre. Les échantillons analysés après séchage à l'air, contiennent toujours une fraction d'eau dite eau résiduelle, qui est comprise dans l'unité de masse de terre. Il faut donc corriger les teneurs pour obtenir des teneurs comparables, exprimées par unité de masse de terre séchée à 105°C, selon la formule suivante :

$$\text{Teneur corrigée} = \text{teneur} * \frac{1000}{1000 - \text{teneur eau résiduelle}}$$

Où la teneur en eau résiduelle est exprimée en g/kg.

N.B. cette correction n'est pas faite pour le pH

3.4.3 BILAN DE FAISABILITÉ DU TEST

3.4.3.1 Prise de contact et acceptation du test par les exploitants

Tous les exploitants des parcelles ont été identifiés. Pour 6 sites sur les 42, l'exploitant avait changé. Tous ont accepté une nouvelle intervention sur la parcelle.

3.4.3.2 Réalisation des enquêtes

Il est demandé aux partenaires, aussi bien dans le cadre de la première campagne que dans celui de la campagne test, de réaliser les enquêtes préalablement à l'intervention sur le terrain. Cette précaution est importante pour tenir compte des hétérogénéités parcellaires et être informé des aménagements réalisés sur la parcelle. Elle est également indispensable pour prendre connaissance du calendrier d'intervention de l'exploitant, et pouvoir réaliser les prélèvements dans de bonnes conditions, en sol « retassé » et dans une parcelle accessible (par exemple, il est malaisé d'intervenir sur colza ou céréales à pailles à la période de la floraison). Même si les enquêtes n'ont pas pu être réalisées en totalité avant le début des prélèvements, les partenaires avaient rassemblé les informations nécessaires concernant les interventions culturelles prévues.

Environ la moitié des enquêtes avaient été réalisées complètement et transmises à InfoSol avant l'intervention sur le terrain. Il est beaucoup plus difficile ensuite d'obtenir les questionnaires après la fin de la campagne, en raison de la moindre disponibilité du partenaire et de l'exploitant. Il est également beaucoup plus difficile d'obtenir des informations complémentaires le cas échéant.

Les enquêtes ont été réalisées en général avec beaucoup de soin et ont suscité peu d'interrogation de la part des enquêteurs, néanmoins des demandes de compléments d'information ont pu être faites par InfoSol.

3.4.3.3 Période d'intervention

La campagne de mise en place des 42 sites s'est déroulée du 5 février au 5 mai 2010. Le premier site (20797) mis en place sur le Centre INRA d'Orléans a permis de caler les opérations de réimplantation et de former en interne l'équipe dédiée aux interventions de terrain.

La période a été choisie afin d'offrir les meilleures conditions de prélèvement sur le terrain en termes d'humidité du sol et de disponibilité des parcelles. Le calendrier d'intervention, établi assez tôt avec les partenaires, a permis de respecter la contrainte de terminer les prélèvements en mai. Le faible nombre de sites proposé par département a été un facteur facilitateur pour établir ce calendrier. En outre, le nombre limité de capteurs GPS (2 capteurs ont été acquis pour ce test) et le délai imparti pour la mise en place des sites, compte tenu des disponibilités des partenaires, aurait rendu l'opération délicate si le nombre de sites avait été plus élevé.

Au final, 41 sites ont été rééchantillonnés. Un site (0945 Mazières de Touraine - 37) n'a pas pu être mis en place en raison des conditions d'engorgement hivernal puis de sécheresse printanière, le fonctionnement hydrique particulier de la parcelle offrant un créneau d'intervention très réduit.

3.4.3.4 Réimplantation des dispositifs

Les dispositifs ont été réimplantés avec succès grâce au matériel © Trimble avec correction en temps réel. La réimplantation du dispositif par GPS sur la parcelle est la condition nécessaire pour pouvoir intervenir avant toute autre opération. Dans certaines situations de mauvaise réception du signal, l'implantation du dispositif a dû être retardée de façon conséquente. Cependant, ces cas se sont présentés rarement, le matin faisant partie souvent des fenêtres favorables. Le système de correction en temps réel fonctionnant par GSM, des difficultés à la réimplantation sont possibles dans les secteurs mal couverts par le réseau. Dans ce cas, le relai est assuré par une liaison satellite, mais avec une moindre précision (métrique).

Le Tableau 8 donne un résumé statistique de la répartition des écarts (en mètres) calculés entre la position du lever réalisé lors de la première campagne et celle du lever réalisé lors de la campagne test, sur l'ensemble des points, entre les deux campagnes.

L'écart maximum observé est de 1,84 mètre et la médiane est de 0,26 mètre, ce qui témoigne des bonnes performances des levers par rapport aux données de localisation fournies à l'appareil. Les écarts les plus élevés sont liés à une moins bonne perception du signal GPS et de la précision de la correction en temps réel, au moment de la réimplantation (réseau GSM vs. signal satellite). Il est important de noter que ces écarts ne tiennent compte que de l'imprécision des levers à la réimplantation et des biais liés à l'installation du dispositif sur le terrain lors de la campagne test mais n'intègrent pas l'imprécision des levers de la première campagne.

Le bornage des sites forestiers est une précaution nécessaire mais non suffisante pour retrouver un site lorsque le couvert végétal ne permet pas un levé GPS précis. Ainsi le bornage du site de Dordives (0689), passé en coupe rase mécanisée peu avant l'intervention de 2010, a été complé-

tement arraché, ce qui n'a pas permis une réimplantation précise du site. Pour les sites forestiers, un système de localisation plus pérenne devra être implanté lors de la deuxième campagne (puce électronique ou objet métallique enterré en profondeur par exemple).

Tableau 8 - Statistiques des écarts d'implantation du dispositif d'échantillonnage entre la première campagne et la campagne test

paramètre	écart (m)
minimum	0,02
premier quartile	0,15
médiane	0,26
moyenne	0,39
dernier quartile	0,49
maximum	1,84
nombre de points	148

3.4.3.5 Mise à jour du système d'enregistrement des données et des échantillons (DONESOL)

La campagne test et donc la simulation d'une deuxième campagne du RMQS, a permis de mettre en évidence la nécessité de faire évoluer la structure de la base de données pour l'adapter à la nouvelle campagne ; même si le schéma conceptuel et la structure actuelle de la base de données DONESOL avaient déjà intégré les futures campagnes. Nous avons saisi l'opportunité de cette nouvelle campagne pour apporter des améliorations à l'enregistrement des interventions et des échantillons.

3.4.4 BILAN DE L'ÉVOLUTION DES OCCUPATIONS ET DES PRATIQUES CULTURALES

Nous présenterons ici brièvement les évolutions majeures ayant pu se produire entre les 2 campagnes, en termes d'occupations et de pratiques culturelles, qui pourraient avoir un impact sur les résultats analytiques.

Changement d'exploitants

7 sites sur 41 (soit 20 % environ) ont fait l'objet d'un changement d'exploitant. Il est à noter, que lors de la prochaine campagne du RMQS, il faudra prévoir la réalisation d'enquêtes à la fois chez le précédent exploitant et le nouvel exploitant, en cas de changement d'exploitation de la parcelle.

Changement d'occupation

En termes de grand mode d'occupation, un seul changement majeur d'occupation s'est produit sur les 41 sites. La parcelle du site 1212 Champillet, en grandes cultures jusqu'en 2007, a été convertie en prairie non exploitée mais entretenue.

Il est à signaler également pour le site 946 Fondettes, un changement mineur de statut, le site passant de jachère entretenue à prairie fauchée, ce qui influe peu sur les pratiques.

Changement des pratiques

- Les rotations ont évolué sur 3 sites (2 d'entre eux ayant changé d'exploitant) avec l'introduction dans la rotation de nouvelles cultures.
- Le non-labour occasionnel ou systématique a été adopté sur 7 sites, ce qui porte à 13 sur 25 le nombre de sites en grandes cultures concernés par cette technique de travail du sol simplifié. Cela signifie que d'une campagne à l'autre, la proportion de sites où le non-labour occasionnel ou systématique est mis en œuvre est passée de 25% à 50%.
- Pour 4 sites, des apports organiques nouveaux (effluents d'élevage ou enfouissement des pailles) ont été signalés. Dans un cas, les fréquences d'apports organiques ont été augmentées.
- Les pratiques concernant la couverture du sol ont progressé : des cultures intermédiaires ont été introduites sur 2 sites et les rangs du site sous verger ont été enherbés.
- Deux parcelles forestières ont fait l'objet de travaux d'exploitation : la parcelle forestière de Vou (1037) a subi des coupes sélectives importantes (sans dessouchage) consécutives à une tempête, qui ont concerné le site. La peupleraie de Dordives (0689) est passée en coupe rase mécanisée peu avant l'intervention de 2010, ce qui a entraîné la disparition du bornage du dispositif.

Aménagements sur la parcelle

En termes d'aménagements majeurs pouvant perturber la parcelle, il est à signaler que le site 904 a été drainé en 2009.

Au final, 5% des parcelles ont subi un changement majeur d'occupation ou de pratique, et 38% des parcelles ont subi un changement mineur, mais susceptible d'avoir des conséquences sur les propriétés du sol.

3.4.5 RÉSULTATS ANALYTIQUES

3.4.5.1 Nouvelles déterminations

Les résultats des analyses réalisées sur les échantillons de la campagne test sont présentés pour tous les éléments analysés sous forme de cartogrammes consultables en Annexe 3 de ce rapport. Le Tableau 9 et le Tableau 10 présentent un résumé statistique des nouveaux éléments analysés sur les échantillons composites de surface et de sub-surface de la campagne test.

Tableau 9 - Statistiques descriptives des nouveaux éléments analysés sur les échantillons composites de surface de la campagne test

COMPOSITE 1	Si total g/100g	As total mg/kg	Cs total mg/kg	Hg total mg/kg	Sb total mg/kg
minimum	13.20	2.81	1.99	0.02	0.48
premier quartile	32.48	6.43	3.70	0.03	0.77
moyenne	34.44	11.85	7.17	0.04	0.94
médiane	35.60	8.71	5.33	0.04	0.85
troisième quartile	37.93	14.98	7.20	0.04	1.00
maximum	41.60	40.90	32.10	0.08	2.39
vibrisse supérieure	46.10	27.80	12.45	0.06	1.35
nombre d'outliers supérieurs	0	3	4	3	3

COMPOSITE 1	Se total mg/kg	Sn total mg/kg	Sr total mg/kg	Th total mg/kg	U total mg/kg	V total mg/kg
minimum	0.10	1.68	28.00	5.72	1.08	11.50
premier quartile	0.15	2.31	46.75	7.65	1.85	35.83
moyenne	0.20	2.91	65.86	9.69	2.18	53.94
médiane	0.17	2.78	60.50	10.10	2.16	48.70
troisième quartile	0.22	3.40	71.75	10.98	2.44	64.05
maximum	0.75	5.04	189.00	14.70	3.68	159.00
vibrisse supérieure	0.34	5.03	109.25	15.96	3.32	106.39
nombre d'outliers supérieurs	5	1	2	0	2	3

Tableau 10 - Statistiques descriptives des nouveaux éléments analysés sur les échantillons composites de sub-surface de la campagne test

COMPOSITE 2	Si total g/100g	As total mg/kg	Cs total mg/kg	Hg total mg/kg	Sb total mg/kg
minimum	19.2	4.93	2.93	0.02	0.31
premier quartile	30.6	8.27	4.36	0.022	0.72
moyenne	32.76	13.16	8.50	0.03	0.93
médiane	33.6	11.3	5.74	0.026	0.85
troisième quartile	35.9	15.5	9.94	0.036	0.96
maximum	40	40.6	40.1	0.059	3.79
vibrisse supérieure	43.85	26.35	18.31	0.06	1.32
nombre d'outliers supérieurs	0	2	2	0	3

COMPOSITE 2	Se total mg/kg	Sn total mg/kg	Sr total mg/kg	Th total mg/kg	U total mg/kg	V total mg/kg
minimum	0.115	1.73	21.2	5.93	1.16	15.6
premier quartile	0.167	2.29	50.5	9.31	1.93	40.2
moyenne	0.25	2.96	71.96	10.87	2.27	63.40
médiane	0.216	2.61	61.9	11.4	2.29	59
troisième quartile	0.361	3.28	75.2	12.2	2.49	79.1
maximum	0.682	7.44	187	14.9	4.42	143
vibrisse supérieure	0.65	4.77	112.25	16.54	3.33	137.45
nombre d'outliers supérieurs	1	1	4	0	2	2

Remarques : Pour produire ces statistiques descriptives, les valeurs en deçà du seuil de détection ont été remplacées par la valeur du seuil de détection. La vibrisse supérieure est calculée en ajoutant au 3ème quartile 1,5 fois la distance interquartile qui correspond à la différence entre la valeur du premier quartile et celle du troisième quartile. Un outlier supérieur est une valeur supérieure à la vibrisse supérieure.

Nous avons confronté nos résultats à trois bases de données de référence :

- La BDETM (<http://etm.orleans.inra.fr/webtabet.htm>), constituée à partir de la collecte depuis 1998 de données provenant d'analyses de sol règlementaires réalisées pour toute demande d'autorisation d'épandage de boues en sol agricole. Les 73000 horizons de surface labourés réunis dans cette base de données sont répartis dans toute la France.
- La base de données du programme ASPITET (Tableau 11) qui réunit une population de 1874 échantillons (horizons de surface et horizons profonds) issus de sols agricoles et forestiers (<http://etm.orleans.inra.fr/gammes3.htm>).
- le Référentiel Pédo-Géochimique du Nord-Pas-de-Calais (Sterckeman et al, 2002), qui présente la plus grande diversité de paramètres analysés dans des sols (Tableau 12), mais dont la comparaison avec nos données est plus délicate dans la mesure où ce référentiel porte sur un nombre restreint de types de sols et de matériaux parentaux, comparables avec ceux de la Région Centre.

Tableau 11 - Valeurs de références en As, Hg et Se, issues de population ASPITET (D. Baize, <http://etm.orleans.inra.fr/gammes3.htm>)

mg/kg	As total	Hg total	Se total
gammes de valeurs ordinaires	1 à 25	0,02 à 0,10	0,10 à 0,70
gammes anomalies modérées	30 à 60	0,15 à 2,30	0,8 à 2,0
gammes anomalies fortes	60 à 284	-	2,0 à 4,5

Tableau 12 - Teneurs minimales, maximales et médianes en As, Hg, Sb, Se, Sn, V, issues du RPG Nord-Pas-de-Calais classées selon différents usages

	<i>horizons de surface</i>			<i>horizons de sub-surface</i>		
	cultures	prairies	forêts	cultures	prairies	forêts
As (mg/kg)						
minimum	1,4	4,1	1,6	<0,5	1,8	1
médiane	8,2	9,5	7,8	8,1	10,8	7,7
maximum	110,2	18,5	21,9	124,1	18,8	33
Hg (mg/kg)						
minimum	<0,02	0,031	0,061	<0,02	<0,02	<0,02
médiane	0,061	0,061	0,159	0,025	0,02	0,02
maximum	0,489	0,435	0,459	0,515	0,085	0,05
Sb (mg/kg)						

minimum	0,05	0,46	0,68	< 0,05	0,18	0,29
médiane	0,68	0,81	1,70	0,46	0,61	0,51
maximum	2,61	2,51	3,48	4,40	0,99	0,74
Se (mg/kg)						
minimum	< 0,10	0,19	0,36	< 0,10	< 0,10	< 0,10
médiane	0,27	0,31	0,57	0,14	0,13	0,23
maximum	3,13	0,59	0,96	12,66	1,16	0,64
Sn (mg/kg)						
minimum	0,92	1,38	1,22	0,06	0,81	0,53
médiane	2,02	2,28	2,35	1,64	2,19	1,47
maximum	6,73	8,57	4,19	4,24	3,90	2,51
V (mg/kg)						
minimum	17,3	33,7	19,7	< 2,0	25,6	18,4
médiane	58,1	66,9	51,0	68,1	76,2	58,8
maximum	369,8	134,8	76,4	522,1	143,7	120,0

Arsenic (As)

Les teneurs mesurées varient de 2 à 41 mg/kg et correspondent pour la grande majorité à la gamme de valeurs courantes de la population ASPITET (1 à 25 mg/kg). Les gammes de valeurs sont comparables d'un niveau de prélèvement à l'autre. Seuls 2 sites (composites 1 et 2) situés en milieu calcaire au sud de la Région Centre correspondent à une anomalie modérée.

Les anomalies relevées pour le site 1210 Cluis, dont le sol est issu d'un calcaire du Sinémurien (Jurassique Inférieur -Lias) sont connues (Denis Baize, communication personnelle) et cohérentes avec les teneurs en Arsenic mesurées dans ce secteur de la Châtre. Une synthèse sur les travaux de R&D sur la thématique de l'Arsenic réalisée en 2004 par le BRGM (Dictor *et al.*, 2004) cite les calcaires jurassiques ainsi que les marges sédimentaires des massifs cristallins, comme le secteur de la Châtre, parmi les roches pouvant contenir des teneurs élevées.

Mercure (Hg)

Les valeurs mesurées (0,02 à 0,08 mg/kg) sont généralement assez faibles et correspondent à la gamme de valeurs courantes de la population ASPITET (0,02 à 0,10 mg/kg).

Duigou et al, 2011 obtiennent une vibrisse supérieure du mercure à 0,1 mg/kg, pour un jeu de données portant sur la Région Centre (5913 sites, 4795 à 5893 analyses de l'horizon de surface), issu de la BDETM. La vibrisse supérieure de notre jeu de données est de 0,06 mg/kg.

Le RPG donne des valeurs médianes de 0,02 à 0,06 mg/kg, quel que soit le matériau parental. Les médianes de notre jeu de données sont similaires (0,03 à 0,04 mg/kg). Les teneurs les plus élevées du RPG concernent les alluvions et certains limons loessiques, ce qui correspond également dans notre jeu de données aux teneurs maximales mesurées dans les composites de surface.

Sélénium (Se)

Les teneurs des 41 sites (0,10 à 0,75 mg/kg) sont comprises dans la gamme des valeurs courantes des sols en France (0,1 à 0,7 mg/kg pour la population ASPITET) et sont proches des valeurs médianes du RPG (0,13 à 0,57 mg/kg pour tout horizon et tout matériau).

Antimoine (Sb)

Les teneurs des 41 sites varient entre 0,5 et 3,8 mg/kg. Les références disponibles pour comparer nos données sont celles du RPG Nord Pas de Calais : pour l'ensemble des matériaux parentaux, les teneurs médianes de surface se situent entre 0,6 et 0,8 mg/kg (1,70 mg/kg sous forêt), et à 0,5-0,6 mg/kg pour les horizons sous-jacents. Les teneurs médianes de notre jeu de données se distribuent donc à un niveau comparable avec 0,85 mg/kg pour les 2 composites.

Les matériaux présentant les médianes les plus élevées dans le RPG sont les matériaux alluviaux, les limons loessiques, et les calcaires primaires. Les valeurs du test les plus élevées, dépassant 2 mg/kg, pour les deux niveaux de prélèvement, faisant figure d'anomalies, correspondent à des sols issus d'argiles détritiques tertiaires.

Césium (Cs)

Il existe peu de références concernant la distribution des teneurs en césium dans les sols français. L'isotope stable du césium (^{133}Cs) existe naturellement, avec des concentrations allant de 0,3 à 25 mg/kg dans les sols. Le césium possède plusieurs isotopes radioactifs (dont le ^{137}Cs) d'origine artificielle, en lien avec l'industrie nucléaire civile ou militaire. Le césium est en général considéré comme un élément très peu mobile dans la majorité des sols, en forte interaction avec les minéraux argileux (Beaugelin-Seiller et al., 2005).

Compte tenu de la distribution des teneurs en césium dans notre jeu de données, la valeur du dernier quartile est relativement faible avec 7 mg/kg pour le composite 1 et 9 mg/kg pour le composite 2, comparée aux valeurs les plus élevées dépassant respectivement 25 mg/kg pour le composite 1 et 34 mg/kg pour le composite 2.

La distribution par matériau parental montre que la médiane est faible pour la craie et les limons et plus élevée pour les matériaux sableux. Les outliers correspondent à deux sols : le 745 issu de molasse du Gâtinais et le 1210 issu de calcaire Sinémurien.

Etain (Sn)

Les teneurs des 41 sites varient entre 1,2 et 7,4 mg/kg, avec des médianes de 2,3 et 2,6 mg/kg pour les composites 1 et 2. Le RPG donne des teneurs médianes similaires avec, quels que soient les matériaux parentaux, de 2 à 2,35 mg/kg en surface, et de 1,47 à 2,19 mg/kg dans les horizons sous-jacents.

Les valeurs les plus élevées de notre jeu de données (5,04 et 7,44 mg/kg) correspondent à un matériau alluvial (947) et un matériau détritique (1208). Les teneurs maximales relevées dans le Nord-Pas-de Calais concernent également des alluvions mais aussi des limons loessiques, et essentiellement des horizons de surface.

Strontium (Sr)

Il existe peu de références concernant la distribution des teneurs en strontium dans les sols français. Le strontium existe à l'état naturel dans les matériaux parentaux des sols, à raison d'une dizaine de mg/kg dans les grès et jusqu'à 450 mg/kg dans les roches carbonatées. La concentration moyenne du strontium dans les sols est de 240 mg/kg et peut varier de moins de 10 à plus de 1 000 mg/kg ; il est assez fortement retenu sur les argiles et la matière organique, avec une fraction labile allant de 0,1 à 1 %. Le strontium possède plusieurs isotopes radioactifs d'origine artificielle, dont le principal est le ^{90}Sr , produit par l'industrie nucléaire civile ou militaire (Roussel-Debet et Beaugelin, 2005).

La distribution des teneurs en strontium de notre jeu de données est étendue pour les deux composites avec des teneurs variant entre 21 à 189 mg/kg.

Thorium (Th)

Il existe peu de références concernant la distribution des teneurs en thorium dans les sols français. Le thorium est 3 à 4 fois plus abondant que l'uranium dans la croûte terrestre. Sa teneur moyenne dans les sols est de 9 à 12 mg/kg. Il est présent sous forme d'oxydes, sulfates ou de phosphates et il est exploité dans diverses régions du monde dans les sables à monazite (phosphate) où il peut atteindre des concentrations de 3 à 10%. L'origine de cet élément est exclusivement naturelle avec une redistribution liée aux activités anthropogéniques (industrie nucléaire civile et utilisation agricole d'engrais phosphatés issus de phosphates naturels contenant du thorium) susceptibles d'enrichir en thorium certains compartiments de la biosphère comme les sols, les sédiments ou les eaux continentales. Dans les sols, le thorium est fortement lié aux argiles, aux oxy-hydroxydes de fer et à la matière organique. Ainsi, et du fait de sa très faible solubilité, la mobilité de cet élément est conditionnée à l'existence de colloïdes organo-minéraux complexants et mobiles dans de sol. (Henner et Garcia-Sanchez, 2002).

Sur l'ensemble des sites analysés et pour les deux composites, les teneurs varient de 6 à 15 mg/kg. Aucun outlier n'apparaît dans la distribution. L'examen de la répartition des teneurs par matériau parental ne met pas en évidence une origine géogène nette, cependant les moyennes de teneurs, les plus élevées, correspondent aux matériaux calcaires et aux limons éoliens. Les teneurs maximales de surface correspondent aux deux sites au sud de l'Indre, déjà mentionnés, 1210 Cluis pour la teneur maximale en arsenic et césium, et 1208 Prissac pour la teneur maximale en uranium. Les teneurs maximales de sub-surface concernent également ces deux sites ainsi que le site 955 issu de colluvions argileux à silex et le site 741 issu d'un limon des plateaux (teneur maximale).

Uranium (U)

Il existe peu de références concernant la distribution des teneurs en uranium dans les sols français. Dans la lithosphère, la teneur moyenne en uranium est de 3 à 4 mg/kg mais l'éventail est très large selon les matériaux. Les teneurs en uranium (mg/kg) sont de l'ordre de 1 à 13 pour les schistes, de 1 à 80 dans les schistes carburés, de 3 à 27 dans les bauxites, de 0,1 à 9 dans les roches carbonatées, de 1 à 350 dans les phosphates. L'uranium a une mobilité moyenne dans les sols. En condition aérobie, il se complexe facilement avec la matière organique, les carbonates, les phosphates et les sulfates. Ces composés, plus ou moins solubles, ainsi que les oxy-

hydroxydes de fer déterminent pour une grande part la mobilité de l'uranium dans les sols. L'uranium est constitué à 99% d' ^{238}U , dont l'origine est exclusivement naturelle (minéral) avec une redistribution dans l'environnement liée aux activités anthropogéniques. Trois sources principales d'activité sont susceptibles d'enrichir les sols en uranium : les retombées liées à l'industrie nucléaire civile et militaire, la combustion du charbon et l'utilisation agricole d'engrais phosphatés issus de phosphates naturels riches en uranium (Garnier-Laplace et al., 2001).

Les teneurs en uranium de notre jeu de donnée sont relativement faibles, avec une distribution similaire dans le composite 1 et le composite 2, les teneurs variant entre 1,1 et 4,4 mg/kg. Les outliers s'écartent peu de la valeur de la vibrisse supérieure. Les 2 outliers de la distribution (947 Vernou issu d'alluvions de la Loire et 1208 Prissac issu d'argiles à silex détritiques du sud de l'Indre) pourraient être expliqués par l'origine détritique du matériau en lien avec le Massif Central, mais les médianes des valeurs par matériau parental ne permettent pas d'établir de relation claire avec le matériau parental.

Vanadium (V)

Les teneurs des 41 sites varient entre 11 et 159 mg/kg, avec des médianes de 49 et 59 mg/kg pour les composites 1 et 2. Les références dont nous disposons pour le vanadium sont celles du RPG, dont les valeurs médianes sont comparables avec, tous matériaux parentaux confondus, des valeurs variant de 51 à 76 mg/kg. Les valeurs du RPG peuvent dépasser 200 mg/kg pour les formations marneuses et calcaires jurassiques. Dans notre jeu de données, les teneurs les plus élevées sont liées au matériau parental calcaire jurassique et correspondent aux mêmes sites en situation d'anomalie d'origine géogène que l'arsenic (1210 Cluis sur calcaire sinémurien et 1044 Berry-Bouy issu de calcaire lacustre). Il est à noter également un outlier pour un composite 2 du site 1039 Villeloin-Coulangé sur argile à silex.

Silicium

Les éléments concernant la teneur en silicium dans les sols et leurs formes et leur origine sont largement exposés dans Datnoff *et al.* 2001. Il est admis que la teneur en silice dans les sols varie de 5 à 40 %. Le silicium est abondant dans les silicates (phyllosilicates, quartz).

La teneur en silicium des 41 sites varie en surface entre 13 et 42 %, avec une médiane à 36 % et entre 19 et 40 % en sub-surface avec une médiane à 34%. Les teneurs observées sont comparables d'un matériau à l'autre, compte tenu de la présence de silicates dans tous les matériaux parentaux. Elles sont de façon attendue légèrement plus faibles dans les matériaux carbonatés.

Conclusions

Les teneurs en nouveaux éléments mesurées dans les échantillons de sols de la campagne test correspondent aux gammes de valeurs courantes mesurées par ailleurs dans les sols français ou relevées dans la littérature. Les teneurs se différencient peu entre composites de surface et de sub-surface. Il y a peu de valeurs anormales, elles sont modérées au regard des références utilisées. Les anomalies relevées peuvent dans un certain nombre de cas être expliquées par une origine géogène (As, V, Si, Hg), notamment pour le site 1210 dans le secteur de la Châtre. Pour d'autres paramètres (Cs, Sb, Se et Sn), les valeurs anormales ou les valeurs maximales sont plus difficilement interprétables, notamment du fait d'un manque de données de référence

dans les sols français. Le jeu de données acquis grâce au test permet d'améliorer la connaissance des teneurs des sols de France en certains éléments peu analysés par ailleurs. Cependant ce jeu de données est insuffisant pour analyser les déterminants de la distribution de ces paramètres (matériaux parentaux des sols, occupations, etc.) ou pour spatialiser les résultats.

3.4.5.2 Relations entre paramètres

Le lien entre matériau parental et teneurs dans les sols a pu être confirmé par la mise en évidence de relations entre paramètres. Ces relations sont liées aux phases porteuses des éléments traces métalliques, c'est -à-dire à la composition des minéraux. Cette partie est encore en voie d'exploration. La

Figure 12 montre quelques exemples de relations entre éléments totaux : As, Fe, Ni, Al d'une part et V, Fe, Cr d'autre part.

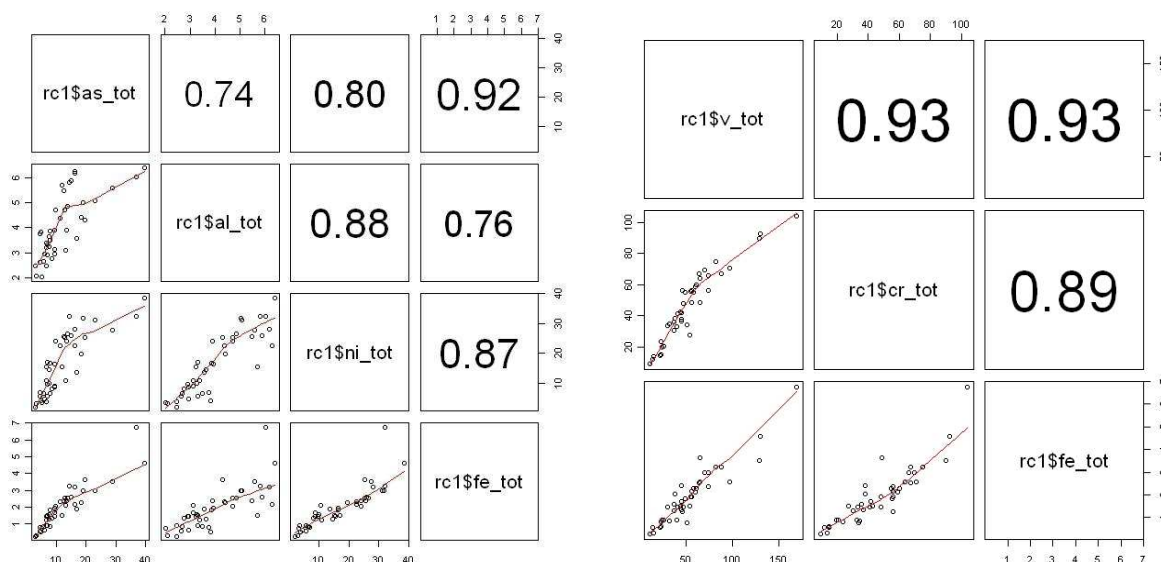


Figure 12 - Représentation 2 à 2 des teneurs en As, Fe, Ni et Al totaux et V, Fe et Cr totaux (mg/kg) mesurées sur les échantillons de surface de la première campagne et coefficients de corrélation associé.

3.4.5.3 Analyse comparative des données de première campagne (analyse initiale et réanalyse) et de la campagne test

La campagne test avait pour objectif de simuler une deuxième campagne du RMQS et d'en tirer des enseignements sur la possibilité de comparer deux jeux de données acquis avec 10 ans d'écart. Pour mener cette simulation et pouvoir dissocier les effets du stockage des échantillons,

l'évolution des méthodes d'analyse et l'évolution réelle des propriétés des sols, nous avons utilisé trois jeux de données :

- l'analyse initiale des échantillons de la première campagne,
- la ré-analyse des échantillons de la première campagne menée simultanément à l'analyse des échantillons de la campagne test,
- l'analyse des échantillons de la campagne test.

Nous avons dans un premier temps confronté deux à deux ces trois jeux de données sous forme de diagrammes de dispersion simples afin de vérifier la concordance ou les écarts entre les séries. Les composites de surface et de profondeur sont représentés pour chaque paramètre sur le même diagramme. Dans un second temps, nous avons intégré à cette comparaison les incertitudes associées aux résultats analytiques fournis par le laboratoire d'analyse de sols lorsqu'elles étaient disponibles. Ces incertitudes sont en cours d'établissement par le laboratoire et ne sont pas encore disponibles pour tous les éléments. Les incertitudes relatives aux analyses initiales de la première campagne n'étant pas disponibles, nous avons affecté à cette série de mesure les incertitudes actuelles. Enfin nous avons utilisé un modèle de comparaison linéaire pour tester les séries entre elles. L'intégration des incertitudes de mesure ne permet plus la représentation des deux composites sur le même graphe, les comparaisons sont donc présentées séparément.

3.4.5.3.1 Comparaison entre analyses initiales et ré-analyses des échantillons de la première campagne : influence du stockage et des méthodes d'analyse

Un des objectifs du test était de vérifier si un stockage à long terme des échantillons dans les conditions actuelles du Conservatoire est susceptible d'engendrer une évolution significative des paramètres du sol. Les échantillons de la première campagne sont archivés au Conservatoire après séchage à l'air, à l'état non émotté, dans des seaux en plastique alimentaire, hermétiquement fermés. Ils sont conservés dans une salle dont la température varie de 9 à 25 °C et dont l'hygrométrie varie de 40 à 80 %.

Un second objectif était de vérifier si l'évolution des méthodes analytiques utilisées par le laboratoire d'analyses de sol est susceptible de poser des problèmes d'interprétation lors de la comparaison des résultats de deux campagnes de mesure. Ce phénomène, qualifié de « dérive analytique » peut s'observer lorsque les modes opératoires ou les techniques de dosages changent ou encore lorsque l'amélioration de ces techniques entraîne une diminution des seuils de détection ou de quantification.

Pour répondre à ce double objectif d'évaluation des conditions de stockage et de vérification de la reproductibilité des mesures, les échantillons de surface et de sub-surface des 41 sites échantillonnés lors de la première campagne, ont été déstockés et re-préparés pour être ré-analysés selon le même menu analytique que celui qui avait mis en œuvre lors de la première campagne. L'intervalle de temps séparant l'analyse initiale lors de la première campagne et la ré-analyse des échantillons en 2010 varie de 6 à 10 ans.

La comparaison des deux séries de mesures permet de distinguer 3 groupes de paramètres ayant un comportement différent :

- invariance effective pour la majorité des échantillons
- variations non structurées pour la majorité des échantillons (dispersion aléatoire)
- variations structurées pour la majorité des échantillons (biais systématique)

Les diagrammes de dispersion présentant pour chaque paramètre la teneur mesurée après ré-analyses en fonction de la teneur mesurée lors de l'analyse initiale sont consultables en Annexe 4. Seuls quelques exemples types sont présentés ci-après.

1) Invariance effective pour la majorité des échantillons

Dans ce groupe, sont regroupés les paramètres pour lesquels les écarts entre teneurs initiales et teneurs après ré-analyse sont faibles. Les paramètres figurant dans ce groupe sont :

- la teneur en argile, en limons fins et grossiers
- le carbone organique et l'azote total
- le calcaire total
- la CEC et le Ca échangeable
- les éléments majeurs totaux Ca, Mn, Na,
- les éléments traces totaux Cd, Co, Ni, Zn

Cette comparaison a permis de détecter quelques erreurs analytiques initiales confirmées après vérification des résultats par de nouvelles analyses réalisées sur les reliquats d'échantillons issus des préparations pour les analyses initiales. Ces erreurs concernent les teneurs en carbone organique, azote total et cadmium total de deux échantillons.

2) variations non structurées pour la majorité des échantillons (dispersion aléatoire)

Dans ce groupe, sont regroupés les paramètres pour lesquels les écarts entre teneurs initiales et teneurs après ré-analyse sont plus importants et non structurés. Les écarts sont dispersés de manière aléatoire. Les paramètres figurant dans ce groupe sont :

- La teneur en sables fins
- Le sodium (Na) échangeable
- Le thallium (Tl) total (voir Tableau 13)

3) variations structurées pour la majorité des échantillons (biais systématique)

Dans ce groupe, sont regroupés les paramètres pour lesquels les écarts entre teneurs initiales et teneurs après ré-analyse sont importants et structurés. Les écarts montrent un biais systématique positif ou négatif. Les paramètres figurant dans ce groupe sont :

- Biais systématique positif : Cr, Cu, Fe, K, Al et Mg totaux, Ca, Mg, Mn et K échangeables, bore soluble

Le chrome total montre un biais systématique positif important entre teneurs initiales et teneurs après ré-analyse en 2010, quel que soit le composite (Figure 13). Ce biais est lié à une modification de la méthode d'analyse, qui nous a été confirmé par le laboratoire. Les valeurs mesurées après ré-analyse sont majoritairement plus élevées, avec des augmentations médianes de 16,2% et 18% respectivement pour les échantillons de surface et de sub-surface.

Un biais positif important concerne les teneurs en Mn échangeable. Ce biais pourrait être dû à l'oxydation du Mn durant le stockage, en lien avec le type de sol. Des essais sont en cours avec le laboratoire afin de tester la validité de cette hypothèse.

Un biais positif est également observé dans une moindre mesure pour une partie des éléments majeurs totaux (Fe, Al, K, Mg), pour le cuivre total, et pour les cations échangeables Ca, Mg et K.

- Biais systématique négatif : Pb total et teneur en eau résiduelle

Le plomb total est un paramètre associé à une forte variabilité analytique. Cependant, la comparaison entre les deux séries de données montre un biais systématique négatif important, quel que soit le composite (Figure 13). Les valeurs mesurées après ré-analyse sont majoritairement moins élevées que les valeurs initiales, avec un écart relatif médian de -8% (Tableau 13).

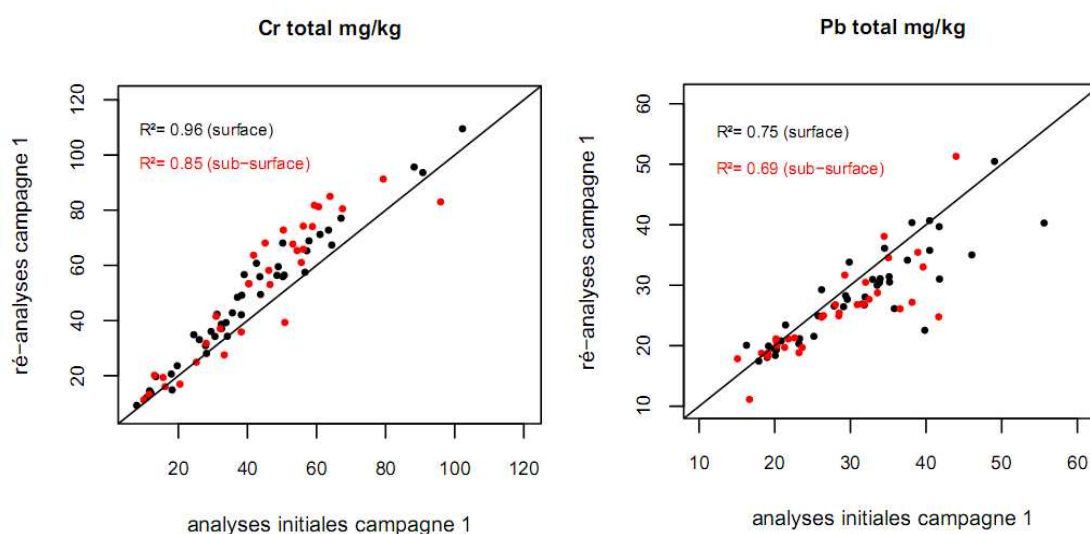


Figure 13 - Teneurs en chrome et plomb total : ré-analyses vs analyses initiales de la campagne 1

Tableau 13 – Statistiques des écarts relatifs entre analyses initiales et ré-analyses de la première campagne pour le plomb et le thallium total

	Pb total Composite 1	Pb total Composite 2	TI total Composite 1	TI total Composite 2
Minimum	-43%	-40%	-32%	-30%
Premier quartile	-12%	-16%	-3%	-6%

Médiane	-8%	-8%	2%	2%
Troisième quartile	1%	-1%	12%	10%
Maximum	24%	18%	53%	56%

*L'écart correspond à : (teneur ré-analyse – teneur initiale) / teneur initiale * 100*

La teneur en eau résiduelle présente également un biais systématique négatif, quel que soit le composite. Les valeurs mesurées après ré-analyse sont majoritairement moins élevées que les valeurs initiales, ce qui témoigne probablement d'une légère dessiccation des échantillons durant le stockage au conservatoire. Ce point souligne l'importance d'analyser la teneur en eau résiduelle des échantillons pour chaque nouvelle analyse, afin de corriger les teneurs si l'on souhaite faire des comparaisons.

Conclusions

Pour une majorité d'éléments, éléments traces (Cd, Co, Ni, Zn), éléments majeurs totaux Ca, Mn, Na, carbone organique et azote total, fraction argile, CEC et Ca échangeable, calcaire total, les teneurs initiales et après ré-analyse sont très proches, à quelques exceptions près, notamment pour le carbone et le cadmium, du fait d'erreurs analytiques initiales ponctuelles.

Pour un certain nombre d'éléments on constate un biais systématique plus ou moins important pouvant être positif (Cr, Cu, Fe, K, Al et Mg totaux, Ca, Mg, Mn et K échangeables) ou négatif (Pb total, teneur en eau résiduelle). Un changement dans la méthode de mesure est à l'origine de l'un d'entre eux (le chrome total), mais pour l'essentiel, la recherche de l'origine de ces biais est à poursuivre, notamment en concertation avec le laboratoire d'analyse.

3.4.5.3.2 Comparaison des analyses d'une campagne à l'autre et conséquence sur la détection d'une évolution

D'une campagne à l'autre, nous faisons l'hypothèse que les éléments analysés en teneurs totales, ne varient pas, sauf contamination ponctuelle majeure. De même, des paramètres physiques tels que la granulométrie des échantillons sont censés être invariants.

En revanche des paramètres tels que le pH ou le carbone sont susceptibles de varier selon les conditions de prélèvement ou avec l'évolution des pratiques agricoles. Dans le cas du carbone, il est peu probable que les évolutions les plus significatives soient liées au nombre d'années écoulées entre deux campagnes, mais plutôt à des changements d'usage ou de pratiques intervenus sur les parcelles échantillonnées.

Pour comparer les résultats de deux campagnes, nous disposerons des résultats des analyses réalisées lors de chaque campagne. Mais ces comparaisons peuvent être délicates du fait de l'évolution des méthodes analytiques. Dans le cadre de ce test, nous avons ré-analysé les échantillons de la première campagne simultanément à ceux du test, dans les mêmes conditions de mesure. Il est donc possible de s'affranchir des biais liés à de possibles changements de méthode d'analyse, en utilisant les résultats des ré-analyses des échantillons de la première campagne plutôt que les analyses initiales. En outre, la confrontation des trois jeux de données (ana-

lyse initiale et ré-analyse des échantillons de la première campagne, analyses de la campagne test) permet d'évaluer l'influence de la dérive analytique.

Les diagrammes de dispersion présentant pour chaque paramètre, d'une part, la teneur mesurée sur les échantillons de la campagne test en fonction de la teneur mesurée lors de l'analyse initiale des échantillons de la première campagne, et d'autre part, la teneur mesurée sur les échantillons de la campagne test en fonction de la teneur mesurée après ré-analyses des échantillons de la première campagne sont consultables en Annexes 5 et 6. Seuls quelques exemples types sont présentés ci-après.

Comparaison analyse initiale campagne 1 – campagne test

Pour un certain nombre d'éléments, on observe tout d'abord une dispersion plus importante des analyses des échantillons de sub-surface par rapport aux échantillons de surface. C'est le cas par exemple pour la fraction « argile », les éléments majeurs totaux Fe, Al, Mg, et les éléments traces totaux Cd, Co, Ni, Zn. Ces écarts plus importants dans le composite 2 pourraient être liés à une variabilité spatiale de ces éléments plus importante dans cette couche de sol non travaillée qu'en surface. Une analyse des données en fonction des usages et des pratiques ainsi que la confrontation avec les résultats des essais de répétabilité réalisés sur quelques sites (Aldana-Jague, 2011) permettraient de confirmer ou non cette hypothèse.

Quelques erreurs analytiques ont été ensuite détectées lors de cette comparaison notamment pour les teneurs en carbone, nickel, manganèse, cadmium et plomb.

Enfin, la comparaison des deux séries de mesures permet de distinguer 3 groupes de paramètres ayant un comportement différent :

- Faible dispersion pour la majorité des échantillons.

C'est le cas des fractions « argile », « limons fins » et limons grossiers », de la CEC, du Ca échangeable, des éléments majeurs totaux K, Na, Mg, Mn, Fe, et des éléments traces totaux Cd, Ni, Zn.

- Dispersion modérée pour la majorité des échantillons

La dispersion est modérée pour le pH, le carbone organique et l'azote total, la fraction sable grossier, l'aluminium total, le magnésium échangeable, le phosphore assimilable et les éléments traces totaux Co, Cu et Tl.

- Forte dispersion pour la majorité des échantillons

La dispersion est forte pour la teneur en eau résiduelle, la fraction sable fin, les cations échangeables K, Na, Mn et les éléments traces totaux Cr et Pb (Figure 14).

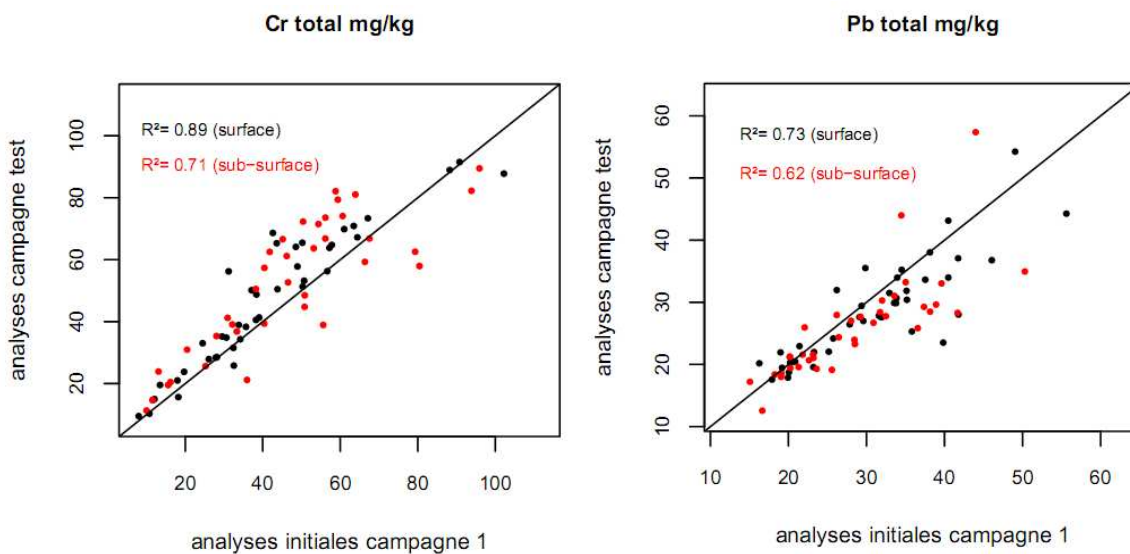


Figure 14 - Teneurs en chrome et en plomb total : analyses de la campagne test vs analyses initiales de la campagne 1

Comparaison ré-analyse campagne 1 – campagne test

Cette comparaison donne des résultats similaires à la précédente, mais on constate une réduction systématique de la dispersion pour la quasi-totalité des éléments. L'analyse simultanée des deux séries d'échantillons permet donc d'éliminer la variabilité liée à la dérive analytique. Les biais systématiques positifs (chrome total) ou négatifs (plomb total) disparaissent. En revanche, la moindre dispersion des échantillons de surface par rapport aux échantillons de sub-surface se maintient.

Pour le pH eau, les écarts maximum sont inférieurs à 0,5 unité en surface. Les écarts sont plus importants en surface qu'en sub-surface et sont probablement liés à des variations saisonnières ou aux conséquences d'amendements organiques ou calcaires sur la parcelle.

Concernant le plomb, en dépit de la forte variabilité spatiale et donc d'une incertitude analytique relativement élevée pour cet élément, on observe une dispersion finalement modérée des résultats, accompagnée d'une disparition du biais systématique négatif observé lors des comparaisons avec les résultats d'analyse initiale de la première campagne. De la même manière, le biais systématique positif constaté pour le chrome total disparaît (Figure 15). Ces biais sont donc très probablement liés aux processus analytiques.

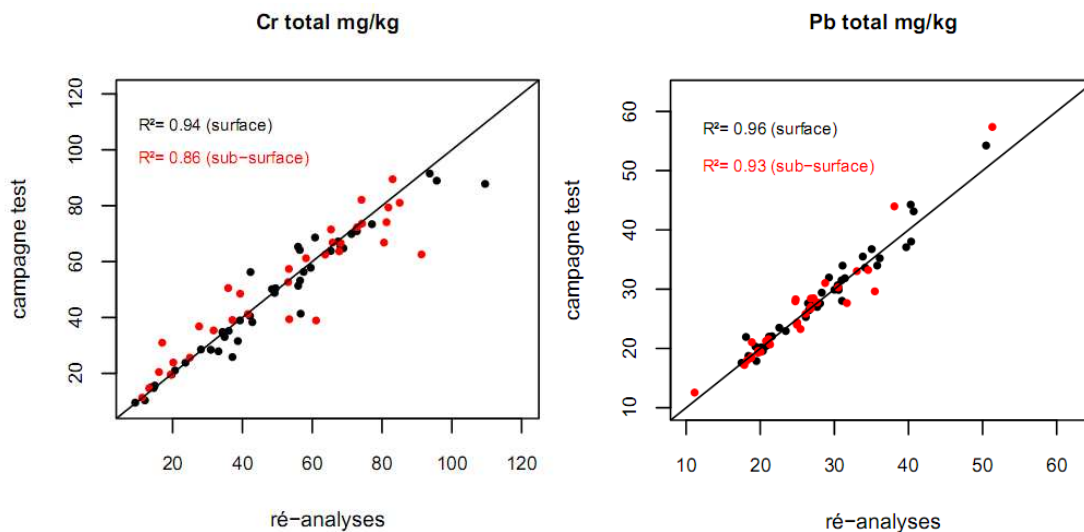


Figure 15 - Teneurs en chrome et en plomb total : analyses de la campagne test vs ré-analyses de la campagne 1

Pour les nouveaux éléments analysés, on observe :

- une erreur analytique manifeste pour le césium
- une très faible dispersion pour As, Cs, Sr, V.
- une dispersion modérée pour Se, U.
- une forte dispersion pour Si, Hg, Sn, Th.

Si et U sont probablement des éléments sensibles à la matrice analysée : dans le cas du silicium, les écarts les plus importants concernent les sols sableux et dans le cas de l'uranium, ce sont les sols limoneux qui forment un groupe de sols aux écarts importants entre les 2 séries.

Conclusions

La comparaison de ces deux séries d'analyses montre que plusieurs facteurs sont susceptibles d'engendrer une dispersion des valeurs : la variabilité spatiale de l'élément ou de sa phase porteuse, un effet matrice rendant difficile l'extraction d'un élément, ou une dérive analytique. Ces facteurs peuvent masquer le signal d'une évolution potentielle du paramètre suivi. La dérive analytique, qui semble avoir une importance particulière pour certains éléments comme le plomb ou le chrome, impacte cependant la majorité des éléments, avec notamment l'apparition de biais systématiques.

3.4.5.3.3 Intégration des incertitudes analytiques et de la modélisation linéaire dans la comparaison des trois séries

Les comparaisons précédentes n'intègrent pas de données sur l'incertitude analytique associée aux mesures. Or, depuis quelques années, l'incertitude de reproductibilité est fournie certains paramètres par le laboratoire. L'incertitude associée à chaque teneur a été intégrée aux jeux de données afin de pouvoir tester la significativité des écarts constatés entre les trois séries d'analyses. Les tableaux commentés et les diagrammes de dispersion présentant pour chaque paramètre, les comparaisons des trois séries de données sont consultables en Annexes 7 et 8. Seuls deux exemples types (carbone organique et plomb total) sont présentés ci-après.

Incertitudes utilisées

Les incertitudes utilisées sont celles données par le laboratoire d'analyse d'Arras. On utilise les incertitudes de reproductibilité avec un seuil de 95% (IR95). Ainsi, pour une variable donnée mesurée à une teneur V , la vraie valeur a une probabilité de 95% d'être dans l'intervalle $V \pm IR95(V)$. L'incertitude de reproductibilité se calcule à l'aide d'une fonction affine dépendante de la valeur mesurée: $IR95(V) = a \cdot V + b$ où a et b sont les paramètres fournies par le laboratoire d'analyse.

Si les séries de valeurs à comparer sont identiques, alors les valeurs seront graphiquement alignées sur la première bissectrice d'un repère orthonormé. Les incertitudes de mesure analytique peuvent dévier les points de cette droite. Il est possible de construire un intervalle autour de la première bissectrice qui contient $95\% \cdot 95\% \approx 90\%$ (erreur sur x multiplié par l'erreur sur y avec hypothèse d'indépendance des erreurs de mesure) des mesures susceptibles d'appartenir à la première bissectrice (égalité parfaite des teneurs).

Pour calculer cet intervalle, il faut distinguer la borne supérieure de la borne inférieure.

Borne supérieure:

Prenons un couple de valeurs mesurées (x,y) d'une variable V situé au-dessus de la première bissectrice. Les incertitudes de reproductibilité associées à ce couple sont $ir(x) = a \cdot x + b$ pour la mesure en x et $ir(y) = a \cdot y + b$ pour la mesure en y ; où a et b sont les paramètres de calcul des incertitudes de la variable V . Pour que le couple (x,y) soit susceptible d'appartenir à la première bissectrice après correction des incertitudes de mesure, il doit être éloigné de celle-ci au maximum de $-ir(x)$ en x et de $ir(y)$ en y (figure 1). Avoir les coordonnées de la borne supérieure revient donc à résoudre le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} x = X - ir(x) \\ y = Y + ir(y) \end{cases}$$

où (X,Y) correspond aux couples de coordonnées de la première bissectrice (et donc $X = Y$). La solution de ce système est :

$$\begin{cases} x = \frac{X - b}{1 + a} \\ y = \frac{Y + b}{1 - a} \end{cases}$$

La borne supérieure est la droite passant par tous les couples de points solution du système (où $X = Y$).

Borne inférieure:

Pour la borne inférieure, le système d'équation devient :

$$\begin{cases} x = X + ir(x) \\ y = Y - ir(y) \end{cases}$$

Qui a pour solution :

$$\begin{cases} x = \frac{X + b}{1 - a} \\ y = \frac{Y - b}{1 + a} \end{cases}$$

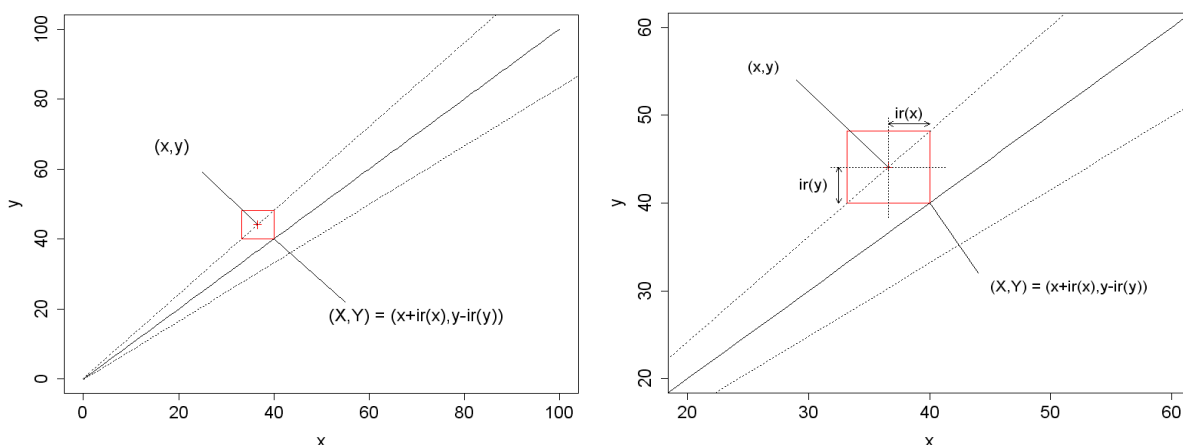


Figure 16 - Schéma du calcul des bornes inférieure et supérieure qui contient 90% des valeurs susceptibles d'appartenir à la première bissectrice. La figure de droite correspond à un zoom de la figure de gauche

Modèle de comparaison linéaire

On utilise un modèle linéaire $y = \alpha + \beta x$ où x prend les valeurs prises pour une détermination d'une campagne donnée et y valeurs prises par la même détermination pour une autre campagne ou série analytique)

La méthode utilisée pour estimer la pente beta est celui présenté par McAssey and Hsieh (2010). C'est un modèle dit "structural line-segment" dont la pente (beta) et sa variance sont estimées par la méthode des moments (MM-LS). L'ordonnée à l'origine du modèle (alpha) est estimée en faisant l'hypothèse que le segment passe par le point qui a pour coordonnées la valeur minimum de la variable en abscisse et la valeur minimum de celle en ordonnée.

Ce modèle, développé en médecine, à l'avantage de prendre en compte les incertitudes de mesures que l'on connaît sur les deux variables comparées linéairement. De plus, il est également possible de prendre en compte l'hétéroscédasticité des incertitudes de mesures (c'est-à-dire le fait que l'erreur dépend de la valeur des variables). Pour plus d'information sur ce modèle, voir McAssey and Hsieh (2010).

Ce modèle demande de connaître l'écart-type des erreurs des valeurs mesurées. En faisant l'hypothèse que les incertitudes de mesures pour chaque valeur sont des variables aléatoires suivant des lois normales avec pour moyennes μ égales aux valeurs de la variable et pour écarts-type σ , il est possible d'estimer ces écarts-type:

Pour une variable aléatoire qui suit une loi normale, l'intervalle symétrique autour de la moyenne comprenant 95% des données est donné par

$$IC(95\%) = \mu \pm 1.96 * \sigma$$

Où 1.96 est la valeur du quantile 0.975 d'une loi normale centrée réduite. Or ici, $1.96 * \sigma$ correspond l'incertitude de reproductibilité de la variable V étudiée, d'où:

$$\hat{\sigma}(V) = ir(V) / 1.96$$

Résultats des comparaisons

Carbone organique

L'estimation des paramètres du modèle linéaire entre deux analyses donne des modèles très proches de la première bissectrice. Ces modèles sont contenus dans l'intervalle des incertitudes de mesures, ce qui nous informe sur le fait que s'il existe des écarts de teneurs en carbone pour un même site entre les trois séries, ces écarts ne peuvent être différenciés des incertitudes de mesures. Les estimations des pentes donnent des variances faibles et sont donc bonnes. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) sont, pour la majorité, inférieures à 1g/kg ce qui montre un bon ajustement.

Ce n'est pas le cas de la comparaison de la première analyse avec la deuxième analyse pour l'horizon 1 ainsi que de la comparaison de la deuxième analyse avec la ré-analyse de la première campagne dont l'erreur est beaucoup plus élevée. Cette valeur importante de l'erreur est due à la présence d'une valeur aberrante pour le site 1085, dont les valeurs respectives pour la première campagne, la ré-analyse de la première campagne et la campagne test (horizon 1 pour tous) sont après correction 18,3, 17,1 et 5,1 g/kg. Cette baisse radicale entre la première campagne et la campagne test apparaît comme aberrante et l'échantillon de cette dernière est en cours de vérification afin de confirmer ou infirmer cette valeur.

Les erreurs quadratiques sont plus faibles entre la comparaison de la campagne test et de la ré-analyse de la campagne 1 qu'entre la campagne test et la campagne 1. Il est possible que les protocoles d'analyses (ré-analyse et analyse 2) soient plus cohérents entre eux que ceux de la

campagne 1 et la campagne test beaucoup plus éloignées dans le temps. Cependant cette baisse d'erreur n'est pas très importante et il ne semble pas utile de tout ré-analyser. Les erreurs quadratiques sont par contre plus fortes pour horizons 1 que pour horizons 2, ce qui peut s'expliquer par de plus fortes teneurs en carbone et une plus forte variance associée dans les horizons de surface.

Malgré la bonne cohérence des valeurs entre elles, il y a beaucoup de sites dont les valeurs sont en dehors des incertitudes de mesures entre la campagne 1 (analyse et ré-analyse) et la campagne test (plus de 30%). Ces sites demandent une attention particulière et un examen approfondi des raisons de ces différences (changements d'occupation, de pratiques agricoles....).

Conclusion pour le carbone organique : ce paramètre sensible aux changements de pratiques agricoles, d'usage, climatiques, représente une variable d'intérêt dans le cadre des travaux sur le changement climatique. Sa mesure est donc recommandée durant la deuxième campagne du RMQS. Compte tenu de la cohérence ces valeurs obtenues entre les trois séries de mesures, il n'apparaît pas nécessaire de prévoir la ré-analyse des échantillons de la première campagne pour permettre une comparaison avec les résultats de la prochaine campagne. Les changements éventuels devront être étudiés au cas par cas en examinant les sites dont la différence entre les deux campagnes est supérieure aux incertitudes de mesures.

Tableau 14 – Paramètres des modèles de comparaison linéaire entre les trois séries de données pour la variable carbone organique des horizons de surface (H1) et de sub-surface (H2)

	alpha	beta	Var beta	RMSE	% sites outliers	n° sites outliers
H1, 1 vs 1B	0.368	0.983	0.001	0.959	17.5	1035 ; 1089 ; 1135 ; 1208 ; 1214 ; 745 ; 801
H1, 1 vs 2	0.255	1.023	0.008	3.075	47.5	1035 ; 1037 ; 1039 ; 1044 ; 1085 ; 1089 ; 1127 ; 1208 ; 20797 ; 509 ; 624 ; 743 ; 745 ; 801 ; 844 ; 849 ; 904 ; 947 ; 989
H1, 2 vs 1B	0.638	1.041	0.008	2.754	37.5	1037 ; 1039 ; 1044 ; 1085 ; 1127 ; 1208 ; 1214 ; 20797 ; 509 ; 624 ; 743 ; 745 ; 844 ; 947 ; 989
H2, 1 vs 1B	0.439	1.063	0.001	0.76	18.8	1035 ; 1044 ; 628 ; 745 ; 801 ; 899
H2, 1 vs 2	0.417	0.991	0.001	0.889	34.4	1035 ; 1037 ; 1042 ; 1208 ; 20797 ; 745 ; 794 ; 801 ; 852 ; 904 ; 989
H2, 2 vs 1B	0.007	0.933	0.001	0.682	31.2	1035 ; 1042 ; 1044 ; 1208 ; 20797 ; 628 ; 794 ; 852 ; 904 ; 989

1 : analyses initiales des échantillons de la 1^{ère} campagne, 1B : ré-analyses en 2010 des échantillons de la 1^{ère} campagne et 2 : analyses des échantillons de la campagne test.

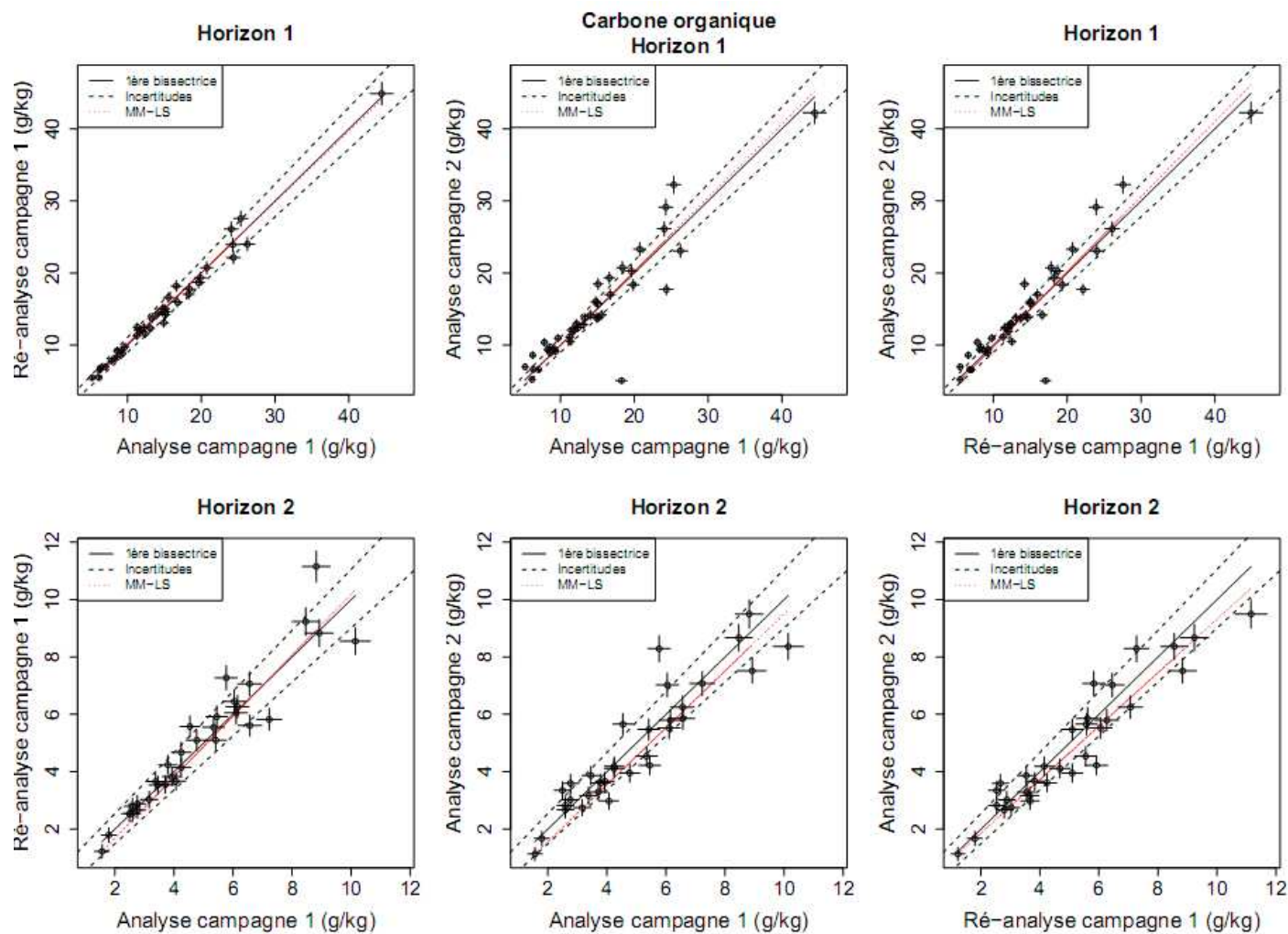


Figure 17 - Teneurs en carbone organique des horizons de surface (horizons 1) et de sub-surface (horizon 2) pour les trois séries de mesures

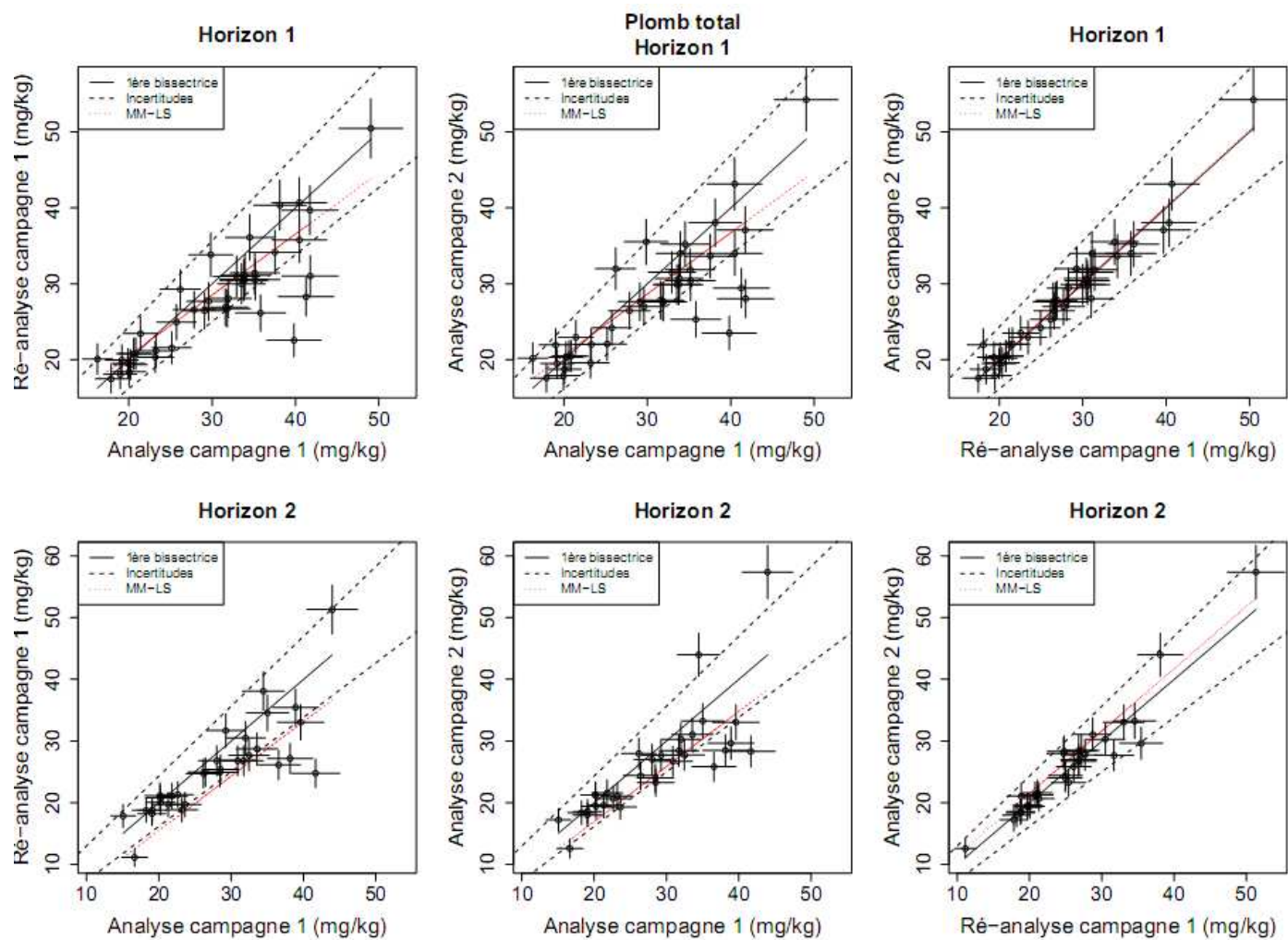


Figure 18 - Teneurs en plomb total des horizons de surface (horizons 1) et de sub-surface (horizon 2) pour les trois séries de mesures

Plomb total

Bien que le modèle estimé reste dans l'intervalle des incertitudes de mesures, la comparaison linéaire entre la première campagne et la campagne test montre une baisse systématique des valeurs de plomb total lors de la deuxième campagne. De plus l'erreur quadratique est importante (supérieur à 4 mg/kg) car la comparaison est très bruitée. On retrouve exactement le même cas de figure entre la campagne 1 et la ré-analyse de la campagne 1 avec des estimations et des erreurs similaires. De plus, les sites en dehors de l'intervalle d'incertitudes sont similaires entre les deux analyses pour les deux horizons.

Au contraire, les modèles estimés entre la campagne test et la ré-analyse de la campagne 1 pour les deux horizons sont très proches de la première bissectrice avec des erreurs quadratiques largement diminuées (moins de bruit) et il demeure un seul site qui sort très légèrement de l'intervalle des incertitudes de mesures. Il existe donc des écarts analytiques entre les mesures initiales de la campagne 1 et celles de la campagne test, à l'origine d'un biais systématique entre les deux séries. La ré-analyse a corrigé ce biais et les résultats ne montrent aucun changement réellement distinguable des incertitudes de mesures entre les deux campagnes.

Conclusions pour le plomb total : le plomb total est un paramètre peu sensible aux changements de pratiques agricoles ou d'usage, dont l'origine dans les sols est liée aux retombées atmosphériques et au fond pédogéochimique. Compte tenu des faibles retombées annuelles, sa mesure ne semble pas justifiée durant la prochaine campagne du RMQS. Cependant, compte tenu de la dispersion des valeurs obtenues entre les valeurs de la campagne 1 et de la campagne test, il serait nécessaire de prévoir la ré-analyse des échantillons de la première campagne pour permettre une comparaison avec les résultats d'une campagne ultérieure.

Tableau 15 – Paramètres des modèles de comparaison linéaire entre les trois séries de données pour la variable plomb total des horizons de surface (H1) et de sub-surface (H2)

	alpha	beta	Var beta	RMSE	% sites outliers	n° sites outliers
H1, 1 vs 1B	4.396	0.804	0.001	3.888	10	1131 ; 794 ; 801 ; 955
H1, 1 vs 2	4.466	0.806	0.001	4.341	20	1129 ; 1131 ; 1208 ; 507 ; 745 ; 794 ; 801 ; 955
H1, 2 vs 1B	0.056	1.003	0.002	1.515	0	
H2, 1 vs 1B	-2.159	0.883	0.002	5.154	18.8	1035 ; 1131 ; 745 ; 794 ; 904 ; 955
H2, 1 vs 2	-0.867	0.892	0.002	5.207	31.2	1035 ; 1131 ; 1208 ; 1212 ; 745 ; 794 ; 844 ; 852 ; 899 ; 955
H2, 2 vs 1B	1.314	1.011	0.002	2.596	3.1	899

1 : analyses initiales des échantillons de la 1^{ère} campagne, 1B : ré-analyses en 2010 des échantillons de la 1^{ère} campagne et 2 : analyses des échantillons de la campagne test.

Conclusions

La ré-analyse des échantillons qui permet d'obtenir des résultats dans les mêmes conditions analytiques améliore globalement les comparaisons même si, hormis pour Pb, Cr, Cu, cette amélioration n'est pas significative.

L'intégration des incertitudes et le recours au modèle linéaire pour comparer les trois jeux de données permettent de classer les paramètres en trois catégories :

- paramètres sensibles dont le suivi durant la deuxième campagne est recommandé, ne nécessitant pas *a priori* de ré-analyse des échantillons de la première campagne : carbone, azote, phosphore assimilable, pH ;
- paramètres peu sensibles à des évolutions et ne nécessitant pas *a priori* de ré-analyse des échantillons de la première campagne pour permettre une comparaison : éléments majeurs, Ni, Zn, Co, Cd, Tl. Un examen attentif des sites sortant des intervalles de confiance sera toutefois indispensable.
- paramètres peu sensibles à des évolutions mais nécessitant une ré-analyse des échantillons de la première campagne pour permettre une comparaison : Pb, Cr, Cu

Un certain nombre de paramètres n'ont pas été intégrés à cette analyse (CEC, cations échangeables, fractions granulométriques, nouveaux paramètres) les incertitudes de mesure n'étant pas encore disponibles. Ce travail devra donc être poursuivi.

3.4.5.4 Extractions par les sels neutres

Trois extractants de type sels neutres (CaCl_2 , NaNO_3 et NH_4NO_3) ont été utilisés pour mesurer les teneurs en Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Tl, Zn se rapprochant des formes biodisponibles, afin de tester l'opportunité de les sélectionner tous ou en partie dans le menu analytique de la prochaine campagne. Ces teneurs biodisponibles ont été mesurées sur les échantillons de surface collectés lors de la première campagne et sur les échantillons de la campagne test. Les deux séries ont été analysées simultanément en 2010.

3.4.5.4.1 Cartogrammes et résumés statistiques

Le Tableau 16 et le Tableau 17 donnent un résumé statistique des teneurs mesurées sur chaque série avec les 4 extractants. Les cartogrammes de l'Annexe 3 permettent également de visualiser les teneurs mesurées pour chaque site. Ces analyses sont comparées aux teneurs mesurées après extraction à l'EDTA sur les mêmes séries de données mais uniquement sur les éléments Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn.

Dans les tableaux et figures ci-dessous, les teneurs mesurées par :

- CaCl_2 sont notées par le suffixe cacl
- NaNO_3 sont notées par le suffixe na
- NH_4NO_3 sont notées par le suffixe nh

Tableau 16 - Résumé statistique des teneurs en éléments traces biodisponibles des échantillons de surface de la campagne 1

en µg/kg	cd_edta		cr_edta	cu_edta		ni_edta	pb_edta		zn_edta
Minimum	22,7		33,1	177,0		210,0	1960,0		652,0
1er Quartile	82,9		60,0	1242,0		540,2	3855,0		1250,0
Médiane	111,0		86,6	2190,0		1024,0	4785,0		1675,0
Moyenne	133,6		121,2	3590,0		1289,2	5415,0		2266,0
3e Quartile	157,8		116,8	3195,0		1582,5	6308,0		2802,0
Maximum	376,0		621,0	23800,0		5190,0	12800,0		10200,0
en µg/kg	cd_cacl	co_cacl	cr_cacl	cu_cacl	mo_cacl	ni_cacl	pb_cacl	tl_cacl	zn_cacl
Minimum	<1	<5	<10	<15	<5	<15	<3	<5	<10
1er Quartile	<1	<5	<10	29,10	<5	16,65	<3	<5	<10
Médiane	6,98	11,00	<10	39,10	<5	56,30	<3	<5	47,00
Moyenne	10,13	52,65	<8,745	48,41	<3,62	156,11	14,41	<5	186,50
3e Quartile	18,88	62,20	<10	54,83	<5	138,80	<3	<5	257,80
Maximum	43,40	421,00	20,70	168,00	8,10	1120,00	252,00	<5	1180,00
	cd_na	co_na	cr_na	cu_na	mo_na	ni_na	pb_na	tl_na	zn_na
Minimum	<0,5	<1	<5	4,42	<1	2,32	<2	<1	<10
1er Quartile	<0,5	2,68	<5	19,82	<1	12,10	<2	<1	<10
Médiane	1,01	4,83	<5	28,95	<1	19,90	<2	<1	13,55
Moyenne	2,11	24,95	<4,139	36,83	0,45	29,35	4,12	<0,2148	76,31
3e Quartile	3,49	19,03	<5	45,75	1,91	36,67	<2	1,13	60,30
Maximum	9,94	206,00	17,70	162,00	4,76	127,00	80,80	2,54	696,00
	cd_nh	co_nh	cr_nh	cu_nh	mo_nh	ni_nh	pb_nh	tl_nh	zn_nh
Minimum	<1	1,69	<15	<15	<2	<20	<5	1,37	<5
1er Quartile	2,55	8,65	<15	<15	<2	<20	<5	2,98	<5
Médiane	5,25	13,15	<15	23,90	<2	25,70	<5	4,21	49,30
Moyenne	8,88	62,50	<13,17	21,79	<1,595	59,45	56,68	5,75	210,10
3e Quartile	12,75	52,75	<15	41,15	<2	69,80	6,32	6,03	294,20
Maximum	33,30	442,00	28,20	129,00	2,32	318,00	862,00	32,60	1040,00

Tableau 17 - Résumé statistique des teneurs en éléments traces biodisponibles des échantillons de surface de la campagne test

en µg/kg	cd_edta		cr_edta	cu_edta		ni_edta	pb_edta		zn_edta
Minimum	24,3		30,0	266,0		145,0	2030,0		605,0
1er Quartile	80,7		50,9	1332,0		476,5	3825,0		1060,0
Médiane	105,5		80,0	2010,0		1040,0	4800,0		1615,0
Moyenne	123,7		109,3	3597,0		1224,8	5565,0		1976,0
3e Quartile	149,0		122,5	3038,0		1477,5	6935,0		2325,0
Maximum	354,0		520,0	27100,0		5340,0	11200,0		7190,0
en µg/kg	cd_cacl	co_cacl	cr_cacl	cu_cacl	mo_cacl	ni_cacl	pb_cacl	tl_cacl	zn_cacl
Minimum	1,00	<5	<10	<15	<5	<15	3,92	<5	<10
1er Quartile	4,74	<5	<10	19,85	<5	<15	4,79	<5	<10
Médiane	11,35	<5	<10	31,45	<5	22,00	11,10	<5	90,40
Moyenne	15,43	29,60	<9,426	40,73	<4,344	112,90	47,77	<5	214,20
3e Quartile	20,88	28,32	<10	42,00	<5	110,60	30,05	<5	364,80

Maximum	68,30	319,00	14,10	171,00	8,85	1320,00	532,00	<5	1160,00
	cd_na	co_na	cr_na	cu_na	mo_na	ni_na	pb_na	tl_na	zn_na
Minimum	<0,5	<1	<5	5,55	<1	3,65	<2	<1	<10
1er Quartile	0,69	2,37	<5	13,25	<1	9,08	<2	<1	<10
Médiane	1,48	3,33	<5	21,90	<1	15,15	<2	<1	12,05
Moyenne	2,55	19,46	<3,719	25,97	0,17	29,90	7,32	<1	81,50
3e Quartile	3,45	11,69	<5	27,70	1,38	27,13	<2	<1	65,33
Maximum	15,50	230,00	13,30	180,00	6,48	184,00	147,00	<1	785,00
	cd_nh	co_nh	cr_nh	cu_nh	mo_nh	ni_nh	pb_nh	tl_nh	zn_nh
Minimum	<1	1,05	<15	<15	<2	<20	<5	1,60	<5
1er Quartile	1,83	8,20	<15	<15	<2	<20	<5	3,12	<5
Médiane	3,42	10,85	<15	<15	<2	<20	<5	4,58	5,30
Moyenne	7,43	43,34	<13,19	5,56	<2	54,62	79,80	6,73	213,30
3e Quartile	10,03	44,08	<15	21,43	<2	75,92	6,32	7,70	230,20
Maximum	45,20	362,00	24,40	136,00	<2	419,00	1210,00	40,10	1280,00

L'ordre de grandeur des teneurs obtenues avec les 3 extractants sont comparables, si on considère les valeurs médianes. Néanmoins, les médianes obtenues avec CaCl₂ sont plus élevées qu'avec NH₄NO₃ et NaNO₃, qui donnent des résultats relativement proches.

Les extractions varient d'un élément à l'autre selon les extractants : Cd, Cu et Ni sont bien extraits par CaCl₂, Co et Tl sont bien extraits par NH₄NO₃, Zn a une affinité comparable avec le CaCl₂ et le NH₄NO₃. Certains éléments sont très peu extraits, quel que soit l'extractant : c'est le cas du Cr, du Mo et du Pb, pour lesquels la majorité des sols présentent des teneurs en-dessous du seuil de détection. C'est également vrai pour le Tl extrait au CaCl₂ et NaNO₃.

Entre les deux campagnes, les résultats sont similaires à l'exception du plomb extrait au CaCl₂, pour lequel l'extraction semble meilleure avec les échantillons de la campagne test. De même, le CaCl₂ a mieux extrait le zinc lors de la campagne test.

Pour Cd, Cu, Ni, Zn le «rapport» d'extraction par rapport à l'EDTA, calculé comme le rapport en % de la teneur mesurée après extraction sel neutre sur la teneur EDTA présente une médiane qui ne dépasse pas 7%, et un 3^e quartile inférieur à 12%, pour l'ensemble des extractants, sauf pour Cd extrait par CaCl₂ pour lequel le rapport atteint 20%. Il n'y a pas de relation de proportionnalité entre les teneurs EDTA et les teneurs extraites par les sels neutres.

Le rôle du pH semble prépondérant dans le rendement d'extraction. En effet, l'extraction par les sels neutres est d'autant plus importante que le pH du sol est faible (Figure 19). En revanche, en présence de contamination le pH devient un facteur secondaire. C'est le cas des sites 0989 (verger sur sol acide) et 0899 (sol carbonaté entouré de vignes) qui présentent des teneurs élevées en cuivre et pour lesquelles les trois extractants donnent des résultats comparables. L'interprétation de ces résultats a été approfondie en mettant en œuvre une analyse multifactorielle afin d'examiner les relations avec les autres variables des sols.

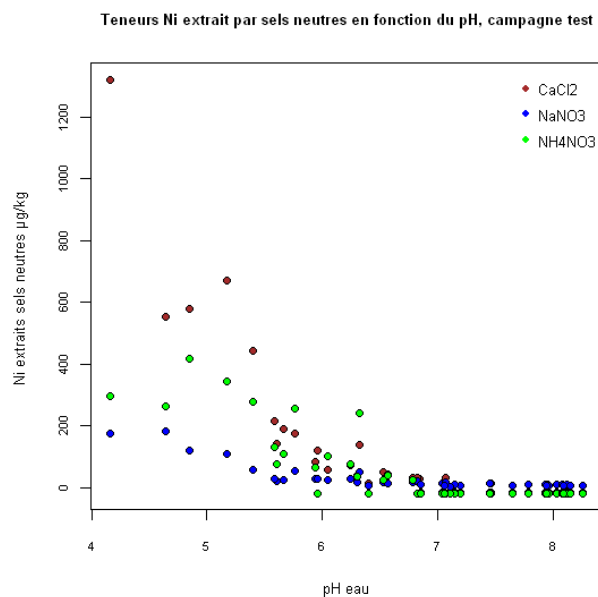


Figure 19 - Teneurs en nickel extrait par CaCl₂, NaNO₃ et NH₄NO₃ en fonction du pH eau

3.4.5.4.2 Approche multivariée

L'étude réalisée pour caractériser la capacité d'extraction des différents sels neutres est une analyse factorielle multiple (AFM). Une telle analyse multivariée permet de synthétiser dans un espace factoriel de dimension sans *a priori* les corrélations qui existent entre les variables, donnant ainsi des profils d'extraction. De plus, en projetant le nuage des individus (ici les sites par campagne d'analyse) dans ce même espace, il est possible de catégoriser ces derniers et d'interpréter cette catégorisation en fonction des liens identifiés entre les variables. Chaque site à une campagne donnée peut être associé à un profil d'extraction. Enfin, en projetant, à titre illustratif, d'autres variables telles que le pH, la teneur en carbone organique ou la teneur en azote, les profils d'extractions peuvent être caractérisés par les valeurs de ces variables.

Cette méthode montre donc les différences de teneur de chacun des éléments extraits entre les sites au deux campagnes. L'analyse ressemble donc fortement à une analyse en composantes principales (ACP) classiquement utilisée pour ce genre de problématique. Cependant, l'AFM a l'avantage de prendre en compte la structure en groupe des variables étudiées. Ici, les différents groupes seront les extractions au CaCl₂, les extractions au NaNO₃ et les extractions au NH₄NO₃. Cette prise en compte de la structure en groupe permet de les caractériser dans l'espace factoriel et d'éventuellement les différencier. Pour plus d'informations concernant l'AFM, voir Escoffier et Pagés, 2008.

Dans cette analyse multivariée, nous avons utilisé les teneurs en extraites par les 3 sels neutres en Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Tl, Zn mesurées sur les échantillons de surface de la première campagne et de la campagne test. Les teneurs en carbone organique, en azote total et le pH ont été utilisés en variables illustratives.

Résultats

Dimensionnalité

La première dimension de l'analyse explique 45% de la variance présente dans le tableau de données (Figure 20). Presque la moitié de l'information (i.e. des différences entre les variables d'une part et les sites d'autre part) est résumée par le premier axe. Associé au deuxième axe, qui explique 14% de l'information, on a quasiment 60% d'information résumée sur le premier plan factoriel. Le troisième axe explique 11% de l'information et sera lui aussi analysé. Avec ces trois premiers axes, 70% de l'information est résumé et sera interprétée. A partir du quatrième axe, seulement 6% et moins de l'information est expliquée. Ces axes correspondent à de l'information plus fine, assimilée à du bruit, et ne seront donc pas étudiés ici.

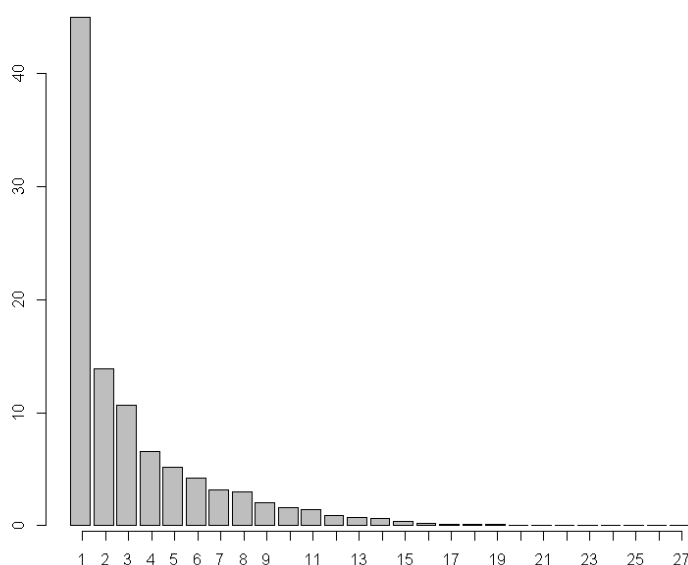


Figure 20 - Pourcentage de variance expliquée par chacun des axes factoriels

Principales caractéristiques des groupes

Les trois groupes ont des coordonnées fortes et très proches sur l'axe 1 (Figure 21). Cet axe explique une grande partie de la structure¹ de ces groupes et ne permet pas de les différencier (coordonnées identiques). Sur l'axe 2, les coordonnées sont moins grandes mais assez importantes pour voir que cet axe explique une partie non négligeable de la structure des groupes. Ces coordonnées sont très proches, donc cet axe ne permet pas de les différencier si ce n'est que les groupes CaCl₂ et NH₄NO₃ semblent très légèrement plus se ressembler qu'ils ne ressemblent au groupe NaNO₃. On peut noter également que le groupe illustratif pH est assez corrélé avec l'axe 1 et donc qu'il explique les différenciations faites par cet axe.

¹ La structure d'un groupe ou d'une variable fait référence à la manière dont ce groupe ou cette variable différencie/catégorise les individus (ici les sites à une campagne donnée)

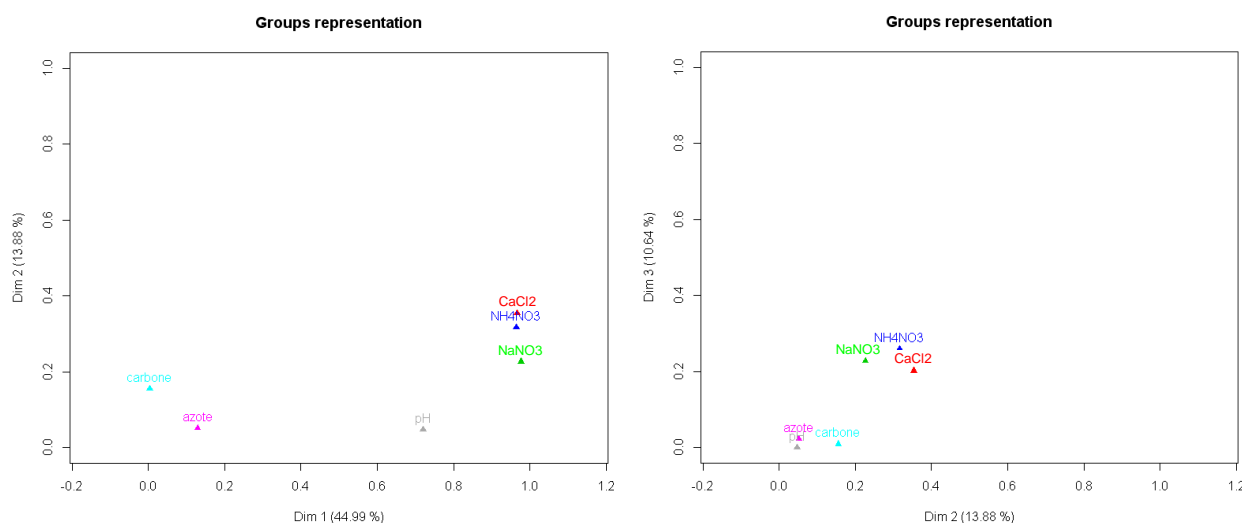


Figure 21 - Coordonnées des groupes sur les plans factoriels 1-2 (à gauche) et 2-3 (à droite)

A l'instar de l'axe 2, l'axe 3 explique une part non négligeable de la structure des groupes. Il semble de plus les différencier un peu plus, bien que cette différenciation soit négligeable au vu de la proximité sur le plan factoriel.

Afin d'étudier le lien entre les 3 groupes actifs, deux critères sont utilisables. La distance Lg d'une part, permet de quantifier la richesse de la structure commune entre deux groupes (Tableau 18). La distance RV d'autre part, permet de quantifier la ressemblance des structures entre deux groupes (Tableau 19).

Le premier critère, Lg, a pour maximum la valeur minimale entre la valeur Lg propre au premier groupe et celle propre au deuxième groupe.

Exemple (Tableau 18) :

$$\operatorname{argmax}(Lg(\text{CaCl}_2, \text{NaNO}_3)) = \operatorname{argmin}(Lg(\text{CaCl}_2), Lg(\text{NaNO}_3)) = \operatorname{argmin}(1.335, 1.197) = 1.197$$

Le deuxième critère, RV, a pour maximum la valeur 1. La "variable" appelée MFA dans les deux tableaux correspond à la structure de l'espace factoriel de l'analyse.

On peut voir que les trois groupes ont des structures communes très riches les unes aux autres et avec l'espace factoriel de l'analyse. De plus, dans une moindre mesure la structure commune entre les groupes et la variable pH est assez riche également. Autrement dit, la structure commune des trois groupes de sels neutres catégorise de manière importante les individus. Les extractions peuvent en partie être expliquées par le pH.

Tableau 18 - Distances Lg

Lg	CaCl2	NaNO3	NH4NO3	carbone	azote	pH	MFA
CaCl2	1.335						
NaNO3	1.068	1.197					
NH4NO3	1.053	1.071	1.305				
carbone	0.063	0.049	0.058	1			
azote	0.170	0.137	0.152	0.836	1		
pH	0.763	0.657	0.741	0.026	0.194	1	
MFA	1.188	1.147	1.180	0.059	0.158	0.743	1.209

Tableau 19 - Distances RV

RV	CaCl2	NaNO3	NH4NO3	carbone	azote	pH	MFA
CaCl2	1						
NaNO3	0.84	1					
NH4NO3	0.80	0.86	1				
carbone	0.05	0.05	0.05	1			
azote	0.15	0.13	0.13	0.84	1		
pH	0.66	0.60	0.65	0.03	0.19	1	
MFA	0.94	0.95	0.94	0.05	0.14	0.68	1

Plus de 80% des structures des variables se ressemblent (Tableau 19). Associé au critère Lg, cela nous renseigne sur le fait que non seulement l'extraction des sels neutres catégorise fortement les individus mais qu'en plus les extractions entre les sels neutres sont très similaires (à plus de 80%).

Interprétation des axes factoriels

La Figure 22 représente la projection des variables dans l'espace constitué par les axes factoriels 1 et 2. On constate que beaucoup de variables actives sont corrélées positivement avec l'axe 1 (hormis celles associées au cuivre, au molybdène et au thallium et les trois variables illustratives carbone, azote et pH). L'axe 1 représente donc un axe de richesse générale de teneurs en éléments analysés. L'axe 2 quant à lui disperse les variables corrélées avec l'axe 1. Il est celui qui décompose la richesse générale en fonction des éléments analysés. Les valeurs négatives de l'axe 2 représentent plutôt des richesses en chrome et en plomb, les valeurs positives des richesses en cadmium et cobalt et les valeurs intermédiaires des richesses en zinc et nickel.

On voit également que la plupart des éléments ont été extraits de la même manière en fonction du sel neutre (flèches d'un même élément pour les différents sels très proches entre elles). C'est surtout le cas du chrome et du plomb. Il peut y avoir quelques différences pour les autres éléments mais au vu de la proximité des variables sur le plan factoriel, ces différences sont très ponctuelles et ne donnent pas des teneurs totalement différentes.

Enfin, on voit également que la variable pH est corrélé négativement avec l'axe 1, donc négativement avec la richesse globale des teneurs. Ainsi, plus le pH est faible, plus les teneurs extraites sont élevées.

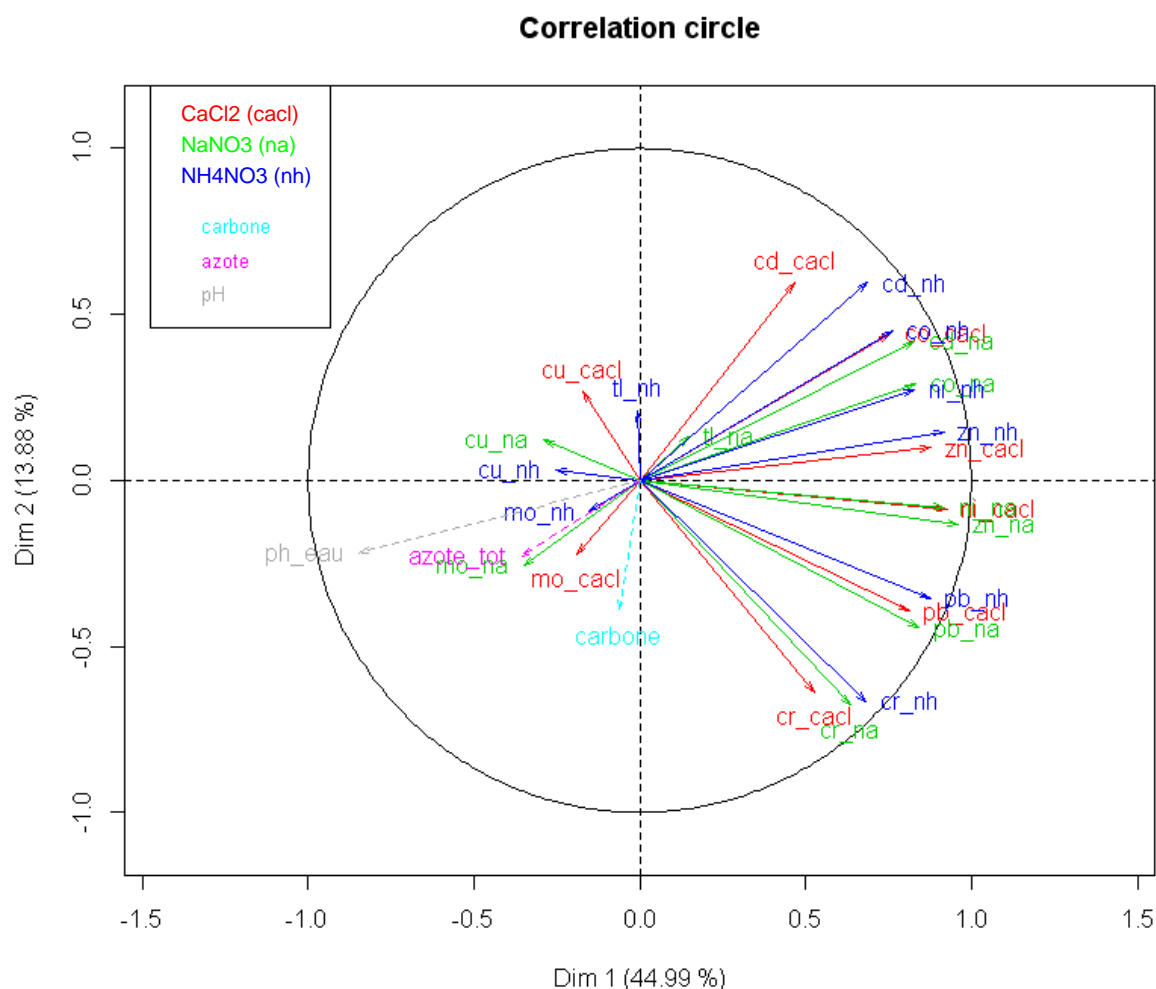


Figure 22 - Cercles des corrélations sur le plan factoriel 1-2

La Figure 23 représente la projection des variables dans l'espace constitué par les axes factoriels 2 et 3. L'axe 3 représente clairement les teneurs en cuivre qui sont très corrélées entre elles en fonction du sel d'extraction utilisé.

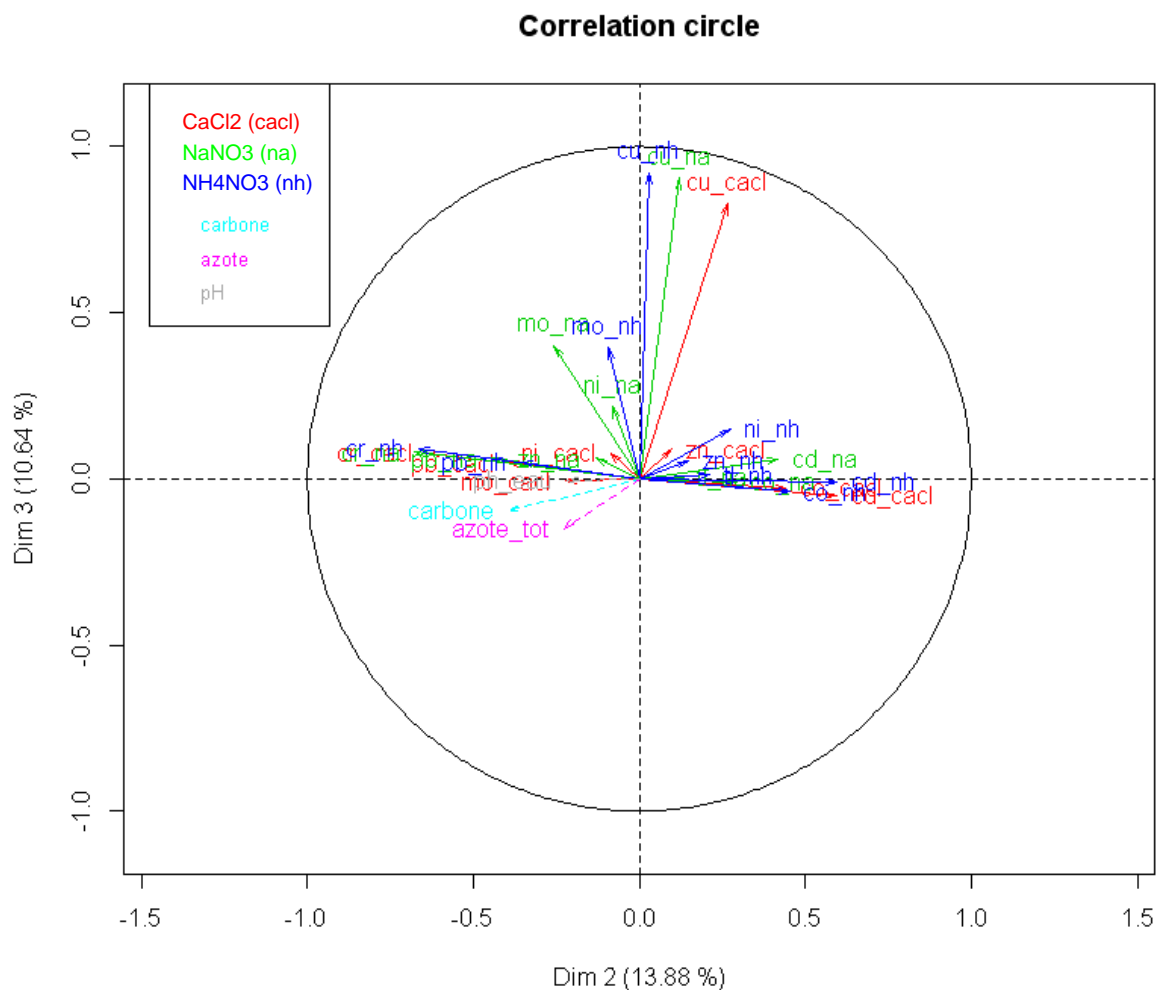


Figure 23 - Cercles des corrélations sur le plan factoriel 2-3

Catégorisation des individus :

La Figure 24 représente la projection des individus dans l'espace constitué respectivement par les axes factoriels 1 et 2 puis 2 et 3.

Les sites les plus riches sont les sites 1037, 20797, 849 et 1214. Le site 1037 est particulièrement riche en chrome par rapport aux autres, le site 20797 en nickel et le site 1214 en cadmium. Ces sites sont ceux qui contribuent le plus à construire l'analyse multivariée (axe 1) du fait de teneurs plus élevées en certains éléments par rapport aux autres. Ces quatre sites sont ceux dont les sols présentent les pH eau les plus faibles (inférieurs à 5, Figure 25). Dans le cas de ces quatre sites, on est probablement en présence de teneurs géogènes, héritées des matériaux parentaux des sols, que l'extraction par les sels neutre rend possible, du fait d'un pH acide.

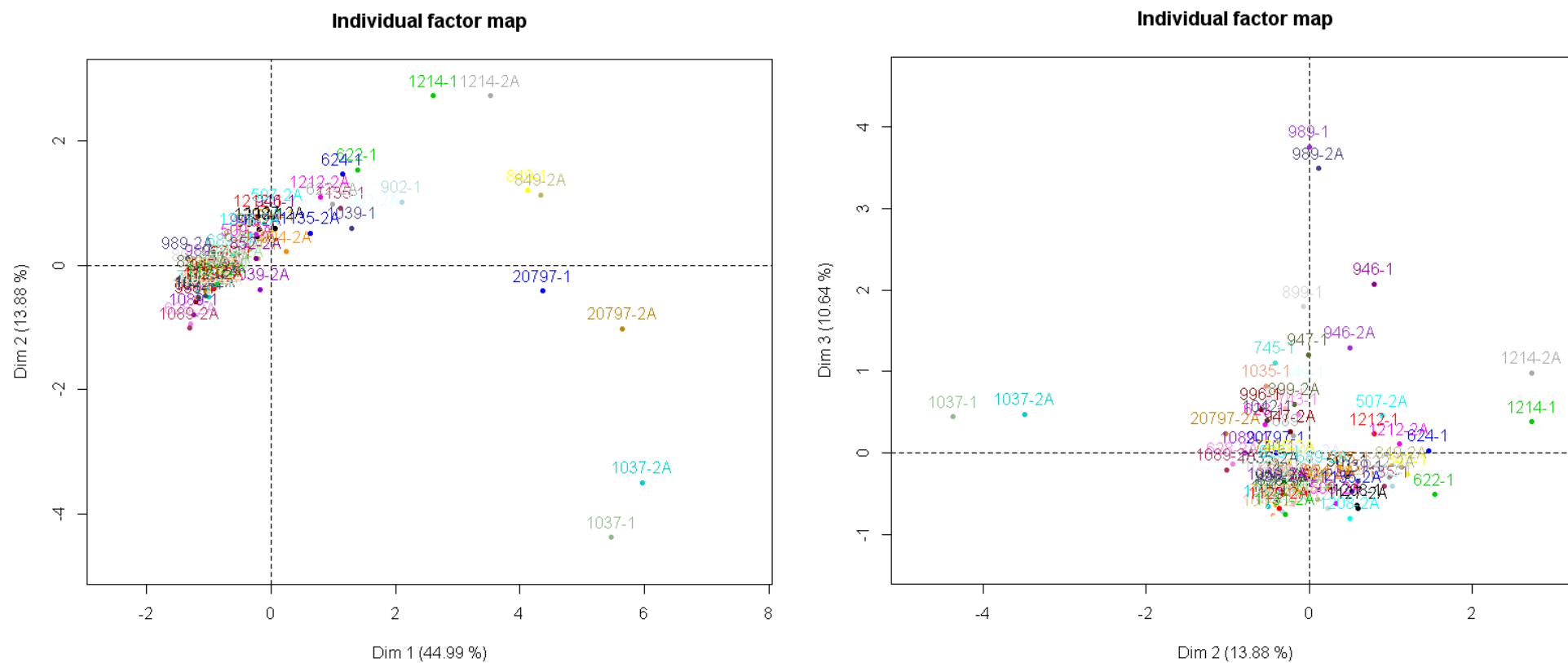


Figure 24 - Nuage des individus projetés selon les plans factoriels 1-2 (à gauche) et 2-3 (à droite)
 (code des individus : site - campagne ; 1 = première campagne, 2A = campagne test)

Le site 989 et dans une moindre mesure les sites 946 et 899, présentent une corrélation avec l'axe 3. Ils se distinguent par une teneur en cuivre relativement élevée, en relation avec des apports liés à leur occupation actuelle ou passée (989 = verger, 899 = ancien verger, 946 = ancienne vigne d'après la carte d'état major de 1839).

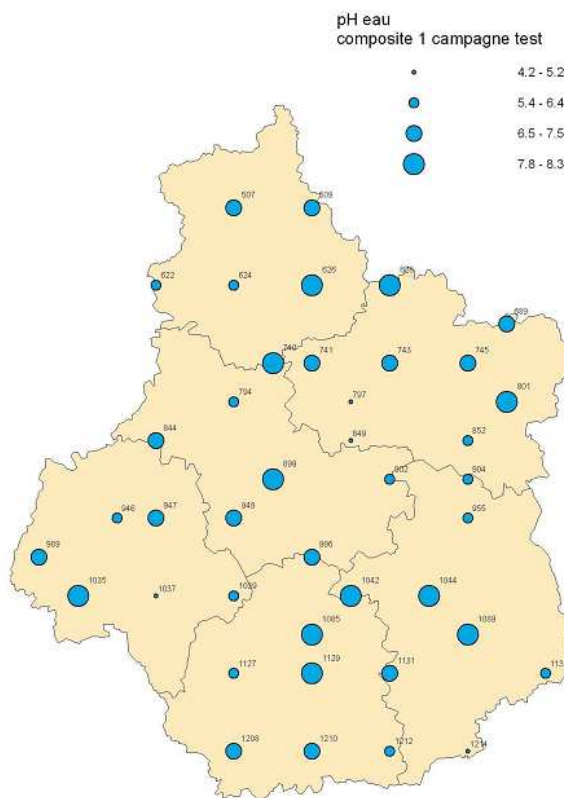


Figure 25 - Valeurs du pH eau pour les composites de surface de la campagne test

Conclusion pour les sels neutres :

L'extraction des éléments traces par les sels neutres est conditionnée par le pH du sol. Le rôle du pH est en effet prépondérant dans le rendement d'extraction, l'extraction par les sels neutres étant d'autant plus importante que le pH du sol est faible. Toutefois, en présence de contamination le pH devient un facteur secondaire. Le rendement d'extraction dans les sols contaminés par le cuivre, devient en effet indépendant du pH du sol. L'analyse multivariée montre qu'aucun des sels neutres n'apparaît plus approprié qu'un autre pour extraire les différents éléments étudiés. Les différences qu'il peut y avoir sont très ponctuelles, minimes et ne changent en rien les différences entre les individus (i.e. les sites) et les catégorisations possibles entre eux. L'utilisation des sels neutres apporte donc des éléments permettant de confirmer une contamination métallique. Cependant, les sites utilisés pour le test étant, à l'exception des sols contaminés en cuivre, très peu contaminés, il est difficile de conclure sur l'intérêt de ces mesures vis-à-vis des autres éléments traces métalliques, dans le cadre du RMQS.

3.4.6 BILAN DU TEST ET RECOMMANDATIONS POUR LA PROCHAINE CAMPAGNE RMQS

3.4.6.1 Mise en place des sites

- l'exploitant de la parcelle a changé dans 15 % des sites, mais tous, y compris les nouveaux, ont accepté le principe d'une nouvelle intervention sur la parcelle.
- 5% des parcelles ont subi un changement majeur d'occupation ou de pratique et 38% des parcelles ont subi un changement mineur susceptible d'avoir des conséquences sur les propriétés du sol. Les enquêtes sur les pratiques de gestion des sites ont permis la collecte des informations relative à la période écoulée depuis la première campagne permettant de renseigner ces changements.
- tous les sites ont été réimplantés facilement et précisément avec les nouveaux GPS testé, à l'exception d'un site forestier dont le bornage implanté lors de la première campagne a disparu suite à une exploitation forestière mécanisée. Le repérage des sites forestiers devra être amélioré.
- Le partenariat avec les chambres d'agriculture a été un atout dans la mesure où pédologues déjà impliqués dans la première campagne ont répondu favorablement à une nouvelle sollicitation, convaincus de l'intérêt de poursuivre leur implication dans un projet à long terme.

3.4.6.2 Analyses physicochimiques

La comparaison des différentes séries de mesures a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- les teneurs en éléments majeurs et en éléments traces métalliques totaux présentent très peu d'écart entre les différentes séries de mesures, sauf dans les cas où des biais analytiques ont été détectés (Cr) ou lorsque l'incertitude de mesure est relativement forte (Cu, Pb, Tl). En d'autres termes, ces teneurs ont peu ou pas évolué dans l'intervalle de temps écoulé entre les deux campagnes. Les écarts mesurés ne sont généralement pas différenciables des incertitudes de mesure. Leur intégration dans la prochaine campagne du RMQS ne semble pas prioritaire.
- D'autres paramètres tels que le carbone organique, l'azote total, le phosphore assimilable, pH sont plus sensibles aux changements et devraient être prévus prioritairement dans la prochaine campagne du RMQS.
- Enfin plusieurs éléments n'ont pas été intégrés dans cette analyse, sur lesquels on ne peut donc conclure. Cette analyse devra être poursuivie (CEC, cations échangeables, éléments libres, solubles, fractions granulométriques, ETM extraits à l'EDTA, etc.).

- La ré-analyse des échantillons permet d'obtenir des résultats dans les mêmes conditions analytiques et améliore globalement les comparaisons même si, hormis pour Pb, Cr, Cu, cette amélioration n'est pas significative. Un examen attentif des sites sortant des intervalles de confiance sera toutefois indispensable
- L'intégration de nouveaux paramètres (As, Hg, Se, U, Th, etc.) au menu analytique de la prochaine campagne ou leur analyse sur les échantillons stockés de la première campagne est possible et permettrait de compléter les référentiels existant qui sont relativement pauvres.
- L'apport des déterminations par extractions douces, à l'aide de sels neutres, ne semble pas évident pour évaluer les fractions biodisponibles en éléments traces métalliques, compte tenu du très faible niveau de contamination des sites du test. Un essai méthodologique mené dans un autre contexte (nord de la France ou Ile de France par exemple) permettrait de compléter ce jeu de données.

4 CONCLUSIONS

Les travaux réalisés dans le cadre de cette convention ont permis :

- De poursuivre le traitement et la valorisation des données du RMQS. Plusieurs articles scientifiques ont été publiés et un bilan complet de l'état des sols, intitulé « Rapport sur l'état des sols de France », a été publié en novembre 2011.
- De réaliser une étude de faisabilité de la poursuite de la mise en place du RMQS dans les territoires d'outre-mer. Cette étude a permis de chiffrer précisément le coût de leur mise en place à la Réunion, à Mayotte, en Nouvelle-Calédonie et en Guyane et de proposer un calendrier de mise en place. Ce travail a également permis de prendre contact avec des partenaires potentiels sur place. La mise en place du RMQS dans les îles subantarctiques n'a pas été chiffrée mais son coût pour le Gis Sol serait probablement inférieur à celui des autres DOM-TOM, compte tenu de la prise en charge par l'IPEV des frais de logistique dans le cadre des projets de recherche. L'intégration du RMQS dans les réseaux d'observation et de suivi de l'environnement existant sur ces « îles sentinelles » permettrait de renforcer la prise en compte du sol dans ces réseaux internationaux.
- De collecter et d'analyser les besoins des utilisateurs de données sur les sols, à l'occasion de la deuxième Conférence d'Orientation du Gis Sol, organisée en juin 2010. Ces utilisateurs ont souligné la nécessité d'acquérir de nouveaux paramètres et indicateurs de la qualité des sols, d'intégrer les questions liées au changement climatique, et de développer des approches permettant d'évaluer l'exposition des populations aux contaminants de l'environnement, en confrontant les données acquises par le Gis Sol avec celles acquises par d'autres organismes sur les autres compartiments de l'environnement.
- D'initier la réflexion sur la préparation de la deuxième campagne RMQS, en réalisant un test en vraie grandeur de réinstallation d'une quarantaine de sites en Région Centre. Les

données du test ont été acquises et un premier examen des résultats a été réalisé. Ce test a permis de tirer plusieurs conclusions et recommandations pour la deuxième campagne, relatives à la mise en place des sites et au menu analytique. Ces résultats devront être confrontés aux travaux menés dans le cadre de la convention ADEME-RMQS 2011, notamment en ce qui concerne la stratégie d'échantillonnage.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aldana-Jague, E., 2011. Estimation des sources de variabilité du stock de carbone dans les sols du RMQS, Rapport de stage de M1, Université de Tours - INRA, Orléans.

Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N. et Grolleau E. - 2002. Une initiative nouvelle en France : la mise en place d'un réseau multi-institutionnel de la mesure de la qualité des sols (RMQS). Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de Paris, 88, n°5, 93-103

Arrouays D., Saby N.P.A., Thioulouse J., Jolivet C., Boulonne L., Ratié C.- 2011. Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. *Geoderma* 161, 107-114

Beaugelin-Seiller K., Roussel-Debet S. et Germain P. - 2005. Césium 137 et environnement. Fiche radionucléide IRSN, 29 p.

Commission européenne (2002) - Communication du 16 avril 2002 au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social et au Comité des régions : Vers une stratégie thématique pour la protection des sols [COM (2002) 179 final].

Datnoff L.E., Heft Snyder G., Korndörfer G.H. - 2001. *Silicon in Agriculture*. Elsevier, 424 p.

Dictor, M.C., Baranger P., Chéry, L., Michel, K., Barbier J., Clozel, B., Touzé S., Le Gall A.C., Brosselin, P. - 2004. Synthèse des travaux de recherche et développement en France (1999-2003) sur la thématique Arsenic. BRGM /RP-53252-FR, 130 p., 4III, 3 annexes.

Duigou N., Baize D., Bispo A. - 2011. Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en Éléments Traces Métalliques. Cas de la région Centre. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 18, 2, pp 91-108.

Escofier B, Pagès J, 2008: *Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétation*. 4th edition, 318 pp, Dunod, Paris

Garnier-Laplace J., Colle C. et Moreno M. - 2001. Uranium naturel et environnement. Fiche radionucléide IRSN, 16 p.

Henner P. et Garcia-Sanchez L. - 2002. Thorium 232 et environnement. Fiche radionucléide IRSN, 13 p.

Jolivet, C., Arrouays, D., Boulonne, L., Ratié, C., Saby, N. - 2006a. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). Etat d'avancement et premiers résultats. *Étude et Gestion des Sols* 13(3), 149-164.

Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. - 2006, *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols*, édition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p.

King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot J.C., Hardy R., Le Bas C. et Stengel P. - 1999. Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. État d'avancement et exemples d'utilisation. *Étude et Gestion des Sols*, 6 (4), 215-228.

Lacarbe, E., Saby, N.P.A., Martin, M.P., Marchant, B.P., Boulonne, L., Meersmans, J., Jolivet, C., Bispo, A., D., A., 2012. Mapping soil Pb stocks and availability in mainland France combining regression trees with robust geostatistics. *Geoderma*, 170, 359-368

McAssey M.P. and Hsieh F., 2010. Slope estimation in structural line-segment heteroscedastic measurement error models. *Statistics in Medicine*, 29, 2631-2642.

Marchant, B.P., Saby, N.P.A., Lark, R.M., Bellamy, P.H., Jolivet, C.C., Arrouays, D., 2010. Robust analysis of soil properties at the national scale: cadmium content of French soils. *Eur J Soil Sci* 61(1), 144-152.

Martin M. P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., and Arrouays D. 2011. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences*, 8, 1053–1065

Roussel-Debet S et Beaugelin K., 2005. Strontium 90 et environnement. Fiche radionucléide IRSN, 25 p.

Saby, N.P.A., Marchant, B.P., Lark, R.M., Jolivet, C.C., Arrouays, D., 2011. Robust geostatistical prediction of trace elements across France. *Geoderma* 162(3-4), 303-311.

Sterckeman T., Douay F., Fourrier H. et Proix N. – 2002. Référentiel pédo-géochimique du Nord-Pas-de-Calais. INRA- ENSAIA 130 p.