



HAL
open science

Rapport final financement du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) pour l'année 2011 dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS SOL)

Claudy C. Jolivet, Dominique D. Arrouays, Line Boulonne, Agnès Bourgeois,
Magalie Delmas, Marine Gourrat, Manuel Pascal Martin, Céline Ratié,
Nicolas N. Saby

► To cite this version:

Claudy C. Jolivet, Dominique D. Arrouays, Line Boulonne, Agnès Bourgeois, Magalie Delmas, et al.. Rapport final financement du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) pour l'année 2011 dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS SOL). [Rapport Technique] 2012. hal-02806632

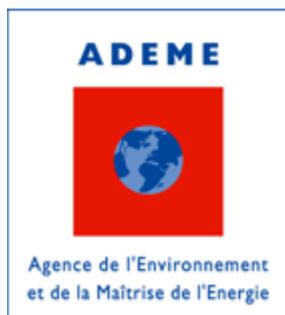
HAL Id: hal-02806632

<https://hal.inrae.fr/hal-02806632>

Submitted on 6 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 2011 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 2011 WITHIN THE FRAMEWORK OF
THE GROUP OF SCIENTIFIC INTEREST SOL (GIS SOL)

Septembre 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°1060C0142 – INRA (A)33000178

Coordination technique :

Antonio Bispo et Thomas Eglin, Service Agriculture et Forêts (SAF) - Département Productions et Énergies Durables (DPED) - Direction Exécutive des Programmes (DEP) - ADEME (Angers)

Comité de pilotage

Antonio Bispo, ADEME (Angers)

Dominique Arrouays, Marion Bardy et Claudy Jolivet, INRA (Orléans)

Comité de suivi administratif

Agnès Triballat et Sylvie Giraudet, ADEME (Angers), Sylvaine Parot, INRA (Orléans)

Auteurs

Claudy Jolivet, Dominique Arrouays, Line Boulonne, Agnès Bourgeois, Magalie Delmas, Marine Gourrat, Manuel Martin, Céline Ratié, Nicolas Saby, INRA, US 1106 InfoSol, F-45075 Orléans

Contributeurs : Claire Chenu (UMR Bioemco INRA Grignon), Isabelle Cousin et Catherine Hénault (UR Sols INRA Orléans), Michael Hedde (UMR PESSAC INRA Versailles), Yves Le Bissonnais (UMR LISAH INRA Montpellier), Laurent Philippot et Lionel Ranjard (UMR Agroécologie INRA Dijon)

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 œuvre 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'œuvre 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.....	8
2	Plan d'action 2011-2012 du RMQS.....	9
2.1	Préparation de la seconde campagne d'échantillonnage du RMQS.....	9
2.1.1	Test des stratégies d'échantillonnage pour la deuxième campagne.....	9
2.1.2	Assurance qualité.....	10
2.1.3	Analyse du potentiel de l'enquête agronomique et améliorations.....	10
2.2	Etude et chiffrage du potentiel de diversification des variables mesurées et amélioration de la performance du dispositif vis-à-vis d'enjeux prioritaires.....	10
2.2.1	Biodiversité.....	10
2.2.2	Impact des pratiques agricoles et forestières sur la qualité physique des sols.....	11
2.2.3	Carbone et flux de GES (gaz à effet de serre).....	11
2.2.4	Pollution des ressources en eau et des milieux aquatiques.....	12
3	Résultats et Bilan des actions menées.....	13
3.1	Préparation de seconde campagne d'échantillonnage du RMQS.....	13
3.1.1	Test des stratégies d'échantillonnage pour la deuxième campagne.....	13
3.1.1.1	Méthodologie générale.....	14
3.1.1.2	Construction d'échantillons annuels.....	14
3.1.1.3	Cadre statistique.....	15
3.1.1.4	Optimisation du schéma d'échantillonnage.....	16
3.1.1.5	Étude de la dynamique temporelle.....	16
3.1.1.6	Conclusions.....	17
3.1.2	Assurance qualité.....	18
3.1.2.1	Résultats des essais de répétabilité.....	18
3.1.2.2	Résultats de la campagne-test.....	19
3.1.2.3	Recommandations pour la deuxième campagne.....	21
3.1.3	Analyse du potentiel de l'enquête agronomique et améliorations.....	21
3.1.3.1	Caractériser la diversité des systèmes d'exploitation des sites RMQS.....	21
3.1.3.2	Valorisation de l'enquête : caractériser la pression de l'agriculture sur le sol ...	25
3.1.3.3	Exemples d'analyses complémentaires abordées grâce à la richesse des enquêtes et au large potentiel de la base de données Donesol.....	32

3.1.3.4	Perception de la dégradation du sol par les exploitants.....	33
3.1.3.5	Pistes d'amélioration de l'enquête agronomique pour la 2 ^{ème} campagne.....	35
3.1.3.6	Conclusions	36
3.2	Etude et chiffrage du potentiel de diversification des variables mesurées et amélioration de la performance du dispositif vis-à-vis d'enjeux prioritaires	38
3.2.1	Biodiversité	38
3.2.1.1	ADN microbien.....	39
3.2.1.2	ADN de la méso et de la macrofaune.....	40
3.2.1.3	Identification de sites sentinelles	41
3.2.1.4	Indicateurs enzymatiques	41
3.2.1.5	Suivi de la végétation.....	42
3.2.2	Impact des pratiques agricoles et forestières sur la qualité physique des sols	46
3.2.2.1	Stabilité structurale	46
3.2.2.2	Mesures physiques profondes	48
3.2.3	Carbone et flux de GES (gaz à effet de serre)	52
3.2.3.1	Fraction labile du carbone organique	52
3.2.3.2	Stocks de carbone des horizons profonds.....	54
3.2.3.3	Cycle de l'azote et test de réduction de N ₂ O en N ₂	59
3.2.4	Pollution des ressources en eau et des milieux aquatiques	63
3.2.4.1	Transferts de N et P et couplages avec d'autres bases de données	63
3.2.4.2	Propriétés hydrauliques des horizons profonds.....	66
3.2.4.3	Profils de distribution de N, P et contaminants organiques.....	66
3.2.4.4	Éléments traces	68
4	Conclusions	69
4.1	Test de stratégies d'échantillonnage pour la deuxième campagne	69
4.2	Assurance qualité	69
4.3	Analyse du potentiel de l'enquête agronomique et améliorations.....	69
4.4	Étude et chiffrage du potentiel de diversification des variables mesurées et amélioration de la performance du dispositif vis-à-vis d'enjeux prioritaires	70
4.5	Perspectives.....	70
5	Références bibliographiques.....	71

Liste des figures

Figure 1 - Exemple d'un échantillon annuel sélectionné aléatoirement parmi 9 possibilités	15
Figure 2 - Schéma de répétabilité mis en œuvre pour évaluer les sources de variabilité associées aux paramètres mesurés sur le RMQS	19
Figure 3 - Teneurs en limons (LF+LG) et en sables (SF+SG) mesurées durant la première campagne (2001-2006) et durant la campagne-test de 2010 sur 40 sites RMQS en région Centre	20
Figure 4 - Teneurs en sodium total mesurées durant la première campagne (2001-2006), réanalysés en 2010 et mesurés durant la campagne-test de 2010 sur 40 sites RMQS en région Centre.....	20
Figure 5 - Répartition sur le territoire des différentes catégories de système d'exploitation identifiées par classification ascendante hiérarchique.....	25
Figure 6 - Indicateurs de travail du sol des sites RMQS sur le territoire métropolitain et surfaces en non-labour à l'échelle régionale d'après les enquêtes pratiques culturelles d'Agreste 2006....	27
Figure 7 - Indicateurs de couverture du sol des sites RMQS sur le territoire métropolitain et surface en grandes cultures restant nu en hiver à l'échelle régionale d'après les enquêtes pratiques culturelles d'Agreste 2006	27
Figure 8 - Arbre de décision conçu à partir des observations du pédologue et matrice de confusion associée	29
Figure 9 - Stocks de carbone simulés avec RothC en fonction des stocks mesurés, par quantité de carbone entrant en moyenne par année.....	30
Figure 10 - Localisation sur le territoire métropolitain de sites sentinelles potentiels	33
Figure 11 - Distribution des types de dégradation perçus par les exploitants des parcelles du RMQS.....	34
Figure 12 - Comparaison entre la perception de la battance de leurs sols par les exploitants et la sensibilité à la battance (IB = indice de battance)	34
Figure 13 - Sites ayant fait l'objet d'un relevé floristique par catégorie d'occupation. A gauche : pourcentages en tenant compte de tous les relevés (n=1102) ; à droite : effectifs en ne considérant que les sites RMQS (n=546).....	43
Figure 14 - Exemple de traits fonctionnels pouvant être calculés et cartographiés sur les sites RMQS à partir des relevés floristiques. A gauche : teneur foliaire en azote ; à droite : teneur foliaire en phosphore.	45
Figure 15 - Distribution de la profondeur maximale du dernier horizon observé sur les profils RMQS.....	54
Figure 16 - Profils de carbone issus de la base de données DONESOL (IGCS) classés par catégorie d'occupation (teneurs en g/kg et profondeurs en cm)	56
Figure 17 - Profils de carbone issus de la base de données DONESOL (IGCS) classés par types de sols (teneurs en g/kg et profondeurs en cm) – première partie.....	57
Figure 18 - Profils de carbone issus de la base de données DONESOL (IGCS) classés par types de sols (teneurs en g/kg et profondeurs en cm) - deuxième partie	58
Figure 19 - Cycle de l'azote dans les sols	59
Figure 20 - Cartes d'abondance de marqueurs moléculaires de gènes fonctionnels bactériens du cycle de l'azote dans les sols des sites du RMQS de Bourgogne : (a) narG,(b) nirK,(c) nirS,(d) nosZ, (e) AOB. L'échelle de couleur correspond au nombre de copies de chaque gène par ng d'ADN. Tiré de Bru <i>et al.</i> , 2011.	62
Figure 21 - Risques de transfert de phosphore vers les eaux de surface	65

Liste des tableaux

Tableau 1 - Résultats du modèle mixte pour les teneurs en carbone. Le modèle permet d'estimer un intervalle de confiance à 95%	19
Tableau 2 - Synthèse sur le potentiel de Donesol à fournir des indicateurs de pression des pratiques agricoles sur la qualité des sols.....	31
Tableau 3 - Chiffrage de la détermination des teneurs en carbone sur les profils RMQS	55
Tableau 4 - Chiffrage de la détermination des teneurs en P total sur les profils RMQS.....	67
Tableau 5 - Chiffrage de la détermination des teneurs en micro-polluants organiques sur les profils RMQS	67

Résumé

Ce rapport présente le travail réalisé par l'unité InfoSol dans le cadre de la convention ADEME N° 1060C0142. Les travaux réalisés dans le cadre de cette convention ont permis : 1) de tester une nouvelle stratégie d'échantillonnage annualisée des sites RMQS, 2) d'évaluer la possibilité de calculer des indicateurs de pression agricole sur les sols à partir des données issues des enquêtes sur la gestion des sites réalisées durant la première campagne et d'en conclure sur des propositions d'amélioration des enquêtes, 3) d'évaluer la faisabilité et de chiffrer le potentiel de diversification des variables mesurées sur le RMQS afin d'améliorer la performance du dispositif vis-à-vis d'enjeux prioritaires.

Mots clefs : sol, qualité, RMQS, deuxième campagne d'échantillonnage

Summary

This report presents the work realized by the InfoSol unit within the framework of the agreement ADEME N° 1060C0142. The works realized allowed: 1) to test a new strategy of annualized sampling on RMQS sites, 2) to estimate the possibility of calculating indicators of agricultural pressure on soils from the data stemming from inquiries on the management of sites realized during the first campaign and of ending from it on proposals of improvement of inquiries, 3) to estimate the feasibility and the cost of a diversification of variables measured on the RMQS to improve the performance of the device towards priority stakes.

Key words: soil, quality, RMQS, second RMQS campaign

1 INTRODUCTION

Longtemps considérés par les décideurs et les aménageurs comme un bien privé et un simple support à la production agricole, les sols sont aujourd'hui au centre des préoccupations environnementales. 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 Commission européenne (2012) a récemment publié un rapport donnant une vue d'ensemble de la mise en œuvre de la stratégie thématique en faveur de la protection des sols depuis son adoption en septembre 2006 (Commission européenne, 2006). Ce rapport confirme de maintien d'une politique environnementale européenne de protection des sols, avec notamment une meilleure intégration de la protection des sols dans les différentes politiques. La future directive cadre européenne sur les sols en projet 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 produit 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.

La première campagne de prélèvements du RMQS s'est achevée en juin 2009. Deux mille deux cents sites ont été mis en place et échantillonnés. La France dispose donc d'un réseau de surveillance de la qualité des sols couvrant la France métropolitaine, la Guadeloupe et la Martinique. La convention de reconduction du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (2012-2016) a inscrit dans ses objectifs le déploiement d'une deuxième campagne d'échantillonnage à partir de 2015. La préparation de cette future campagne suppose de réévaluer l'ensemble de la stratégie mise en œuvre lors de la première campagne. Le plan d'action de la période 2011-2012 du RMQS comprend deux objectifs destinés à répondre à cette réévaluation : i) réviser la stratégie d'échantillonnage et les formulaires d'enquête utilisés pour caractériser les sites du réseau, ii) étudier et chiffrer le potentiel de diversification des variables mesurées afin d'améliorer la performance du dispositif vis-à-vis d'enjeux prioritaires. 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 2011-2012 DU RMQS

La description du plan d'action 2011-2012 est extraite de la Convention N°1060C0142.

Les travaux à réaliser décrits ci-après ont pour objectif de définir la stratégie d'échantillonnage et les paramètres à analyser lors de la phase 2, qui devrait débuter en 2012 (NDLR : la phase 2 comprend la poursuite des analyses sur les échantillons du RMQS1 et la préparation du RMQS2). Ils ont été arrêtés et validés par le Haut Comité de Groupement du GIS Sol lors de sa réunion en décembre 2010.

2.1 PRÉPARATION DE LA SECONDE CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE DU RMQS

Il s'agit de réfléchir à la nouvelle stratégie d'échantillonnage du réseau et d'améliorer le questionnaire d'enquête utilisé pour caractériser le site de prélèvement.

2.1.1 TEST DES STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LA DEUXIÈME CAMPAGNE

Dans un premier temps, il s'agira de réaliser des simulations *in silico* d'évolutions probables/possibles (ex : dépôts atmosphériques, pratiques agricoles) d'un ensemble de paramètres mesurés (candidats pressentis positifs, C, C/N, Kech, P Olsen, pH, S/T, quelques oligo-éléments ; candidats pressentis négatifs ETM) et d'envisager ainsi les résultats probables obtenus sur une deuxième campagne. Cela permettra de sélectionner les paramètres pertinents pour lesquelles des variations seront significativement détectables.

Cette évaluation des tendances sur de tels pas de temps basée sur le RMQS sera notamment mise en regard des dynamiques déjà observées sur la BDAT (ex : P en Bretagne, et C en Bretagne et en Franche Comté).

Parallèlement, pour certaines variables, l'effet de la date de prélèvement par rapport à des apports théoriques sera quantifié (exemple typique du P, lié à la date de fertilisation, à coupler au traitement de l'enquête).

La caractérisation de la variabilité intra-site liée à la chaîne de « géolocalisation, prélèvements, quartage, analyses » sera également étudiée en exploitant les résultats des essais de re-prélèvement réalisés en 2010 ainsi que les essais de répétabilité.

Sur un ou plusieurs indicateurs d'intérêt (précédemment caractérisés), des simulations de re-échantillonnage seront menées suivant 2 stratégies :

- identiques à la première campagne (+ ou – 1 ou 2 ans) ou
- fondées sur un prélèvement annuel national aléatoire, systématique ou stratifié (par exemple de 200 sites par an, ou de 400 sites tous les deux ans) (stratégie BioSol pour les sites forestiers)

Les avantages et inconvénients théoriques des deux stratégies ainsi que leur faisabilité pratique et leur coût seront analysés afin de conclure pour la définition de la deuxième campagne.

2.1.2 ASSURANCE QUALITÉ

Des indicateurs permettant de s'assurer qu'il n'y a pas eu de biais lors du prélèvement de cette deuxième campagne seront définis et proposés.

2.1.3 ANALYSE DU POTENTIEL DE L'ENQUÊTE AGRONOMIQUE ET AMÉLIORATIONS

Il s'agira d'analyser dans quelle mesure les observations et l'enquête réalisées pour chaque site de prélèvement renseignent sur les pressions d'origine agricole afin de conclure sur la capacité de l'enquête à stratifier la population de sites en vue d'une exploitation statistique et à produire des indicateurs quantitatifs de pression à relier à des états observés.

Les étapes suivantes sont proposées :

- Analyser la possibilité de réaliser une typologie de systèmes de culture à partir de l'enquête
- Analyser la possibilité de produire des indicateurs de pression à partir de l'enquête (ex : indicateur de fréquence de traitement, indicateurs des flux entrants en terme d'ETM, P, C, nombre de passages en travail du sol, taux de couverture hivernale)
- Analyser la représentativité des systèmes de culture de l'enquête et, en conséquence, la possibilité d'utiliser des sous-populations à des fins statistiques (ex : combien de sites recevant des boues de STEP, combien convertis à l'Agriculture Biologique, combien en monoculture, combien en TCS, combien en afforestation récente).
- Analyser l'impact de la date de prélèvement (saisonnalité, durée après le dernier apport) sur des variables d'intérêt majeur (ex : P Olsen).
- Analyser la faisabilité de sélectionner des sites sentinelles *a priori* en état de déséquilibre d'origine anthropique (ex : changements récents, pressions fortes) ou au contraire en état d'équilibre supposé hors effet du changement global (ex : prairies naturelles, pelouses d'altitude...).
- Analyser la perception de la dégradation des sols par les agriculteurs.

Les résultats de ces différentes analyses conduiront à réviser le formulaire d'enquête pour la deuxième campagne.

2.2 ÉTUDE ET CHIFFRAGE DU POTENTIEL DE DIVERSIFICATION DES VARIABLES MESURÉES ET AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE DU DISPOSITIF VIS-À-VIS D'ENJEUX PRIORITAIRES

Les travaux décrits ci-après seront conduits par un groupe de travail de l'INRA incluant des chercheurs spécialistes des processus concernés. A l'exception du travail méthodologique sur le P total (II.4.4.), ils ne nécessitent pas de financement dédié dans le cadre du Gis Sol.

2.2.1 BIODIVERSITÉ

Différents travaux basés sur le RMQS ont été conduits durant la première campagne sur la biodiversité des sols (biodiversité microbienne et biodiversité de la faune du sol). L'étude de ces travaux devra permettre de mieux définir l'opportunité, la faisabilité ainsi que les coûts liés à ces opérations.

Ainsi, il s'agira de :

1. Chiffrer le coût d'une extraction systématique de l'ADN sur la deuxième campagne (avec plusieurs options de quantité pour être en mesure de réaliser différentes caractérisations).
2. Réaliser une analyse bibliographique des techniques d'identification de la méso et/ou macrofaune basées sur l'ADN. L'évaluation des coûts en sera faite.
3. Proposer des jeux de sites (à partir des enquêtes) *a priori* « stables » (ex : pelouses d'altitudes, prairies permanentes) ou au contraire en déséquilibre (ex : changements d'usage et/ou de pratiques) pour lesquels un suivi plus complet (non basé exclusivement sur des approches ADN) et plus rapproché pourrait être mis en œuvre. Cette option sera chiffrée.
4. Analyser et chiffrer l'utilisation potentielle d'indicateurs enzymatiques
5. Chiffrer le coût d'un suivi du cortège floristique sur les sites en prairie permanente et/ou en pelouses naturelles.

Ces travaux préliminaires devront permettre de statuer sur les approches à mettre en œuvre pour mieux intégrer l'enjeu « biodiversité » dans les travaux du GIS Sol et plus particulièrement dans le cadre du RMQS.

2.2.2 IMPACT DES PRATIQUES AGRICOLES ET FORESTIÈRES SUR LA QUALITÉ PHYSIQUE DES SOLS

Les caractéristiques physiques des sols conditionnent grandement sa résistance au tassement, les émissions de GES et l'infiltration de l'eau. Les paramètres mesurés sur la première campagne ne permettent pas d'intégrer cet aspect. Il s'agit donc de :

6. Réaliser une analyse des déterminants de la stabilité structurale dans les bases de données déjà acquises et de la performance des FPT (fonctions de pédotransfert) afin de juger de l'utilité de proposer un test en routine sur les sites du RMQS. Si le test de stabilité est nécessaire, son coût sera évalué.
7. Analyser et chiffrer la possibilité de réaliser des mesures de masse volumique apparente, de densité texturale et de teneurs en éléments grossiers sur 30-50 et au-delà.

Ces paramètres, s'ils s'avèrent pertinents, permettront de mieux intégrer la dimension physique des sols notamment vis-à-vis des propriétés hydriques.

2.2.3 CARBONE ET FLUX DE GES (GAZ À EFFET DE SERRE)

Les sols ont un rôle crucial vis-à-vis du changement climatique puisqu'ils peuvent être une source ou un puits de GES. Les paramètres mesurés lors de la première campagne sont jugés incomplets pour pouvoir estimer ce rôle. Il s'agira donc de :

8. Tester l'apport d'indicateurs permettant une meilleure approche/modélisation des changements et notamment d'évaluer par simulation le gain potentiel qu'il y aurait à quantifier une fraction labile du carbone organique (fraction > 50 μ m). Si de tels indicateurs sont jugés pertinents, un chiffrage sera proposé pour leur mise en œuvre.
9. Évaluer l'intérêt de mesurer les stocks de C sur des horizons plus profonds (50-100 cm) et le chiffrer.
10. Analyser l'intérêt et la faisabilité d'utiliser des marqueurs moléculaires de gènes fonctionnels bactériens et/ou des marqueurs enzymatiques du cycle de l'azote et /ou le dé-

veloppement de tests de réduction de N₂O en N₂ (lien avec les émissions de N₂O du sol). La pertinence, la précision et les coûts afférents de chaque option seront discutés et les coûts seront estimés.

A l'issue de ces travaux, il devrait être possible de proposer de nouveaux paramètres pour la seconde campagne afin de mieux intégrer l'enjeu « changement climatique » dans le RMQS.

2.2.4 POLLUTION DES RESSOURCES EN EAU ET DES MILIEUX AQUATIQUES

Actuellement plusieurs paramètres intégrés dans la première campagne mais leur valorisation vis-à-vis de l'enjeu « eau » est sous exploitée. Afin d'améliorer la pertinence du réseau, il s'agira de :

11. Examiner pour certains éléments (ex : N, P) la possibilité de valoriser la BDAT, le RMQS et IGCS couplés à des modèles de transfert latéraux et/ou verticaux.
12. Analyser et chiffrer la faisabilité d'acquérir des données permettant d'estimer les propriétés hydrauliques des horizons (profonds en particulier) : masse volumique apparente, densité texturale, teneur et nature de la charge caillouteuse (voir aussi 3.2.2).
13. Analyser la faisabilité et le coût de caractériser des profils de distribution de N et P ainsi que des contaminants organiques principaux présents dans les eaux superficielles et souterraines.
14. Définir quelles variables sont à l'évidence manquantes dans l'état initial et pourraient être mises en routine sur la campagne 1 et/ou 2. Les candidats potentiels sont par exemple : Hg, As, Se, extractions d'ETM « douces ». Le coût de telles analyses sera évalué en examinant si des sous-échantillonnages seraient pertinents (par exemple, où serait il pertinent d'avoir des données en Se, As ?).

3 RÉSULTATS ET BILAN DES ACTIONS MENÉES

3.1 PRÉPARATION DE SECONDE CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE DU RMQS

Les objectifs de ces travaux étaient de réfléchir à une nouvelle stratégie d'échantillonnage et à une amélioration du questionnaire d'enquête utilisé pour caractériser les sites de prélèvement, pour préparer la deuxième campagne du RMQS. Ces travaux font l'objet de rapports spécifiques dont seules des synthèses sont reprises ici. Ces rapports sont disponibles sous la référence :

- Bourgeois *et al.*, 2012 - Optimisation de l'échantillonnage annualisé pour la deuxième campagne du RMQS, Rapport de contrat, INRA, 60 pages
- Gourrat M., 2012 - Valorisation des enquêtes agronomiques du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, Rapport de contrat, INRA, 53 pages

3.1.1 TEST DES STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LA DEUXIÈME CAMPAGNE

L'objectif de cette étude est de **développer une nouvelle stratégie d'échantillonnage annualisée afin de préparer la deuxième campagne du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols**. Cette campagne sera par la suite appelée RMQS2. Pour cela, on se base sur les données issues de la première campagne d'échantillonnage, appelée RMQS1. Il s'agit d'adapter la stratégie d'échantillonnage annuelle de la première campagne (RMQS1) dans la mesure où cette campagne présente une répartition de mise en place des sites "clusterisée" régionalement. Le choix d'une stratégie régionalisée présentait un avantage en termes de déploiement du réseau sur le territoire. Il était en effet plus aisé de travailler régionalement pour développer et animer un partenariat régional, avec un réseau en grande partie déjà constitué pour la réalisation des programmes d'inventaire cartographique (IGCS). Cependant, la méthode RMQS1 présente deux inconvénients majeurs :

- le premier est qu'il faut attendre 10 à 12 ans avant d'obtenir une cartographie et des statistiques représentatives de l'ensemble du territoire (en raison de la clusterisation de l'échantillonnage).
- Le deuxième est que les efforts budgétaires sont tributaires de l'engagement et de la surface des régions partenaires, et qu'ils présentent donc des pics importants difficiles à gérer en termes de logistique et de trésorerie.

On se propose donc de tester et d'optimiser des méthodes d'échantillonnage permettant de réunir pour la deuxième campagne (RMQS2) les conditions suivantes :

- Un étalement régulier de l'effort d'échantillonnage, et donc des coûts qui y sont associés.
- Une bonne représentativité des échantillons annuels en termes d'occupation des sols et de distribution statistique de la variable d'intérêt.
- Une couverture spatiale régulière du territoire, permettant de produire des cartes sans avoir à attendre la fin de la campagne RMQS2.

- Le schéma d'échantillons annuels RMQS2 devra permettre de détecter le plus rapidement possible (dans l'idéal à l'horizon 2020) d'éventuelles évolutions des teneurs dans les sols.

La variable d'intérêt testée est la teneur en carbone organique du composite de surface (0-30 cm) en chacun des sites. Nous avons choisi cette propriété du sol pour les raisons suivantes :

- Elle présente une importance environnementale et agronomique majeure, et intervient dans la plupart des fonctions et des services éco-systémiques des sols ainsi que des menaces qui pèsent sur eux.
- Le carbone a été identifié par le Gis Sol comme une des variables prioritaires à analyser dans le RMQS2.
- Le carbone dans les horizons de surface est *a priori* celui qui subit le plus l'impact des changements (climatiques, occupation, pratiques, etc.) et dont la cinétique est également *a priori* compatible avec le pas de temps du RMQS.
- Des scénarii et des outils de modélisation sont disponibles pour tenter de simuler son évolution future.

3.1.1.1 Méthodologie générale

Notre étude a donc consisté à construire un échantillonnage annualisé pour estimer les paramètres d'un modèle statistique spatio-temporel. Nous avons retenu un modèle mixte dont les résidus sont spatialement corrélés. L'analyse a été conduite en deux temps consistant à insérer ou non la composante temporelle. En premier lieu, nous avons donc comparé différentes stratégies d'échantillonnage pour ré-estimer les moyennes en carbone par grands type d'occupation du sol de la première campagne. 3 stratégies ont été construites : aléatoires, aléatoires stratifié selon une grille et, optimisé. Dans un deuxième temps, la composante temporelle a été abordée en simulant les évolutions des teneurs en C selon différentes hypothèses et en testant l'aptitude des différentes stratégies à détecter ces changements.

Les sites étudiés se situent en France métropolitaine et correspondent à des occupations de sol différentes qui sont des déterminants majeurs des teneurs en C. Dans cette étude, nous avons retenu trois grands groupes :

- Occupation 1 : les cultures. Elles regroupent les surfaces cultivées en grandes cultures, les vignes, les vergers et les cultures pérennes et arbustives ;
- Occupation 2 : les prairies ;
- Occupation 3 : les forêts.
- Les sites dont l'occupation correspond aux friches, milieux naturels et parcs et jardins ont été écartés de l'analyse finale.

3.1.1.2 Construction d'échantillons annuels

L'objectif est de créer un schéma d'échantillons annuels pour la campagne RMQS2. Nous disposons de la localisation d'environ 2200 sites RMQS répartis en France métropolitaine selon la grille systématique de maille carrée de 16 km de côté. La première idée a consisté à simuler un échantillonnage procurant une répartition spatiale homogène des points de chaque échantillon annuel. Ceci est effectué ici pour le cas d'un échantillonnage étalé sur 9 années.

Pour ce faire, on établit une grille régulière à partir de l'ensemble des points qui consiste à les regrouper par 9, soit dans des carrés de 3 points par 3 points. Pour construire un échantillon annuel, on tire un point de façon aléatoire dans chacun des carrés ainsi obtenus. On répète cette opération autant de fois qu'il y a de points dans un carré, sachant que le tirage des points se fait sans remise. On obtient ainsi 9 échantillons différents. Un schéma d'échantillons obtenu par cette méthode sera par la suite appelé « schéma aléatoire ».

Les échantillons constituant ce schéma peuvent présenter une légère différence d'effectif, dans la mesure où l'on ne dispose pas forcément de 9 points dans tous les carrés, notamment au niveau des frontières du territoire, ou dans le cas de points qui n'ont pas été échantillonnés lors de la première campagne. Néanmoins, ces différences sont négligeables à l'échelle des tailles des échantillons et n'affectent pas les résultats des analyses qui suivront. La taille de ces échantillons annuels est d'environ 200/250 points.

La Figure 1 illustre la constitution d'un échantillon annuel, avec une représentation graphique de la grille régulière et l'exemple d'un échantillon annuel (points rouges) sélectionné aléatoirement parmi 9 possibilités (points blancs).

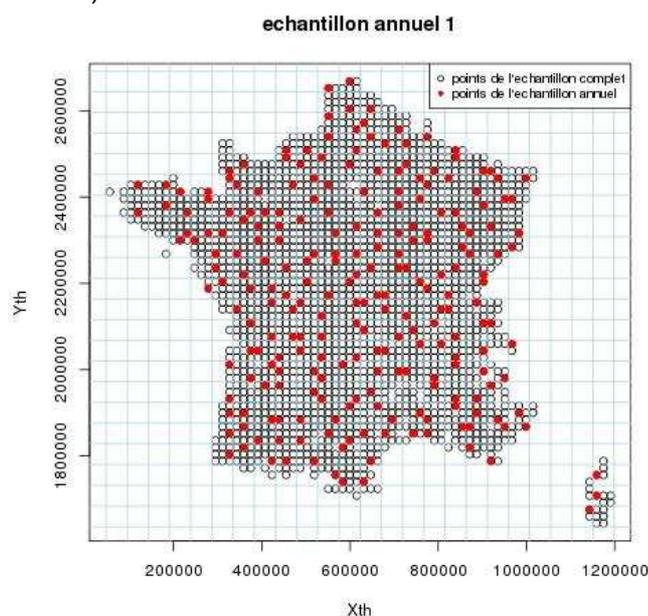


Figure 1 - Exemple d'un échantillon annuel sélectionné aléatoirement parmi 9 possibilités

3.1.1.3 Cadre statistique

Nous avons testé différentes techniques d'estimation des paramètres d'un modèle mixte avec des résidus spatialement corrélés à partir de l'échantillon complet de façon à pouvoir obtenir des valeurs moyennes des données transformées par occupation du sol. Les données ont subi une transformation afin de satisfaire l'hypothèse de normalité des distributions des résidus liée aux méthodes employées. La transformation inverse a posé de nouvelles questions mathématiques et statistiques qui sont développées dans le rapport complet de cette étude, et qui ont pu être résolues. On a pu finalement conclure à la validité du modèle tel qu'il a été redéfini. On constate

tout de même un écart à la normalité dans les queues de la distribution, ce qui se traduira par la suite par une moins bonne prédiction au niveau des valeurs extrêmes.

3.1.1.4 Optimisation du schéma d'échantillonnage

Le schéma d'échantillonnage aléatoire qui a été mis en œuvre précédemment permet d'avoir une répartition spatiale homogène des points de chaque échantillon annuel. On cherche à optimiser ce schéma en se dirigeant vers une stratégie permettant de contrôler également la répartition des occupations de sol et celle des déciles des distributions à l'intérieur de chaque échantillon.

Pour cela, un algorithme dit de *recuit simulé* (en anglais *simulated annealing*) a été mis en œuvre. Un tel algorithme a ici pour objectif de déterminer un schéma d'échantillons annuels tel que, entre chaque échantillon annuel et l'échantillon complet, les écarts entre les répartitions des données dans les occupations de sol et dans les intervalles inter-déciles soient minimisés. Il s'agit à partir d'un schéma initial d'effectuer des changements dans les points des échantillons afin de parvenir à trouver un minimum à la somme de ces écarts, qui correspond à ce qu'on appelle la *fonction objectif*. L'idée consiste à panacher des itérations qui améliorent (*i.e.* diminuent) cette fonction à d'autres qui la dégradent afin que l'algorithme ne se perde pas dans un minimum local. Ceci est contrôlé par un paramètre appelé *paramètre de température*. Ce paramètre varie au cours de la recherche : il est élevé au début et finit par tendre vers 0, car plus la recherche avance, moins on acceptera les itérations qui dégradent la fonction objectif. La fonction qui spécifie l'évolution de la température est appelée *schéma de refroidissement* (en anglais *cooling schedule*). Le schéma optimal de 9 échantillons que l'on retiendra est celui qui donne la valeur minimale de la fonction objectif. La conclusion principale de ce travail que le schéma optimisé permet d'améliorer légèrement l'estimation de la moyenne, mais ne permet pas d'améliorer la prédiction locale. De fait, la contrainte de distribution spatiale imposée par le premier schéma (au minimum 1 point dans chaque carré de 3 sur 3) génère déjà implicitement des distributions des occupations et des déciles des valeurs proches de celles du schéma optimisé.

3.1.1.5 Étude de la dynamique temporelle

Avant de passer à cette partie de l'étude, nous avons supprimé de l'échantillon complet les données qui appartiennent au 4^{ème} groupe d'occupation de sol. En effet, ce groupe correspond à une catégorie « autres » et on a pu constater qu'elle était à l'origine d'une très forte variabilité dans les estimations. Les schémas d'échantillonnage ont été mis en œuvre comme on l'a vu jusqu'à présent dans le cas d'un étalement du RMQS2 sur 9 ans. Dans cette partie on étudie également le cas d'un échantillonnage sur 12 puis 16 années.

Nous avons testé plusieurs modèles d'évolution spatio-temporelle des teneurs en C. Nous avons testé en premier lieu le modèle de Bellamy *et al.*, (2005) correspondant à des évolutions pouvant être considérées comme extrêmes et toutes proportionnelles aux teneurs initiales. On a considéré ensuite le cas proposé par Schulze *et al.* (2009), *i.e.* le cas général où l'on a un paramètre d'évolution par classe d'occupation. Les valeurs du paramètre d'évolution considérées sont les suivantes :

- Occupation 1 (cultures) : -0.15%/an

- Occupation 2 (prairies) : +0.46%/an
- Occupation 3 (forêts) : +0.16%/an

Nous avons enfin testé l'estimation du paramètre d'évolution en considérant les données qui ont évolué artificiellement suivant différents scénarii avec le modèle RothC. Le modèle est paramétré en utilisant les valeurs de taux d'argile et de stock de carbone sur 30 cm (utilisé pour initialiser le système et estimer les quantités mensuelles de carbone entrant dans les sols) mesurés sur chacun des sites.

Les différents scénarii climatiques utilisés correspondent aux scénarii d'émission A1B, A2 et B1. Ces scénarii climatiques ont été régionalisés par le CERFACS. Le scénario A1B est intermédiaire dans la gamme des scénarii imaginés (A2 plus pessimiste et B1 plus optimiste). Il correspond à une économie mondiale utilisant à la fois des ressources énergétiques fossiles et non fossiles. Il se traduit par une concentration en CO₂ de 500ppm en 2050 et de 700ppm en 2100, et par un réchauffement moyen mondial de 2,8°C en 2100 (gamme de vraisemblance : 1,7 à 4,4°C).

Dans le cas de l'évolution simulée avec le modèle RothC, certains sites RMQS ont subi des changements d'occupation du sol, modélisés à partir des données temporelles de changement d'usage TERUTI. Néanmoins, dans le cadre de ce travail, seuls les sites RMQS n'ayant pas subi de changement d'occupation de sol au cours des simulations sur la période considérée (2000 à 2030) ont été pris en compte. Les données de simulation concernant les sites ayant subi des changements d'occupation du sol pourraient être utilisées dans le futur afin de tester la performance du dispositif RMQS à détecter l'effet de tels changements sur les stocks de carbone.

3.1.1.6 Conclusions

Le bilan que l'on tire de cette étude est que le schéma aléatoire stratifié est nettement plus performant que le schéma du RMQS1. Il permet en particulier d'obtenir plus rapidement une valeur moyenne et une carte du carbone sur le territoire. Cette « rapidité » d'obtention est cependant bien entendu tributaire de la durée sur laquelle ce schéma est appliqué. En revanche, la version stratifiée optimisée (prenant en compte des contraintes sur l'occupation du sol et sur la distribution statistique du paramètre d'intérêt) ne permet pas une amélioration significative par rapport au schéma aléatoire stratifié, que ce soit en termes de prédiction ou d'estimation des différents paramètres (moyennes, taux d'évolution annuels). Ceci peut paraître surprenant mais peut s'expliquer par la structure spatiale du carbone en France. Le fait de simplement stratifier spatialement suffit pour obtenir une bonne représentativité, dans la mesure où la grille d'échantillonnage contient beaucoup de points.

En simulant des changements selon le scénario de Schulze *et al.* (2009), on parvient à détecter rapidement le taux d'évolution qui a été appliqué artificiellement, quelle que soit la durée de l'échantillonnage. En revanche, il est plus difficile de détecter un taux d'évolution si l'on fait évoluer les données de façon plus réaliste en utilisant des simulations RothC. Dans le cas des scénarii SRES A1B et A2, on parvient à converger vers une valeur à condition que la durée de l'échantillonnage ne soit pas trop longue. **Par conséquent, il semble essentiel d'étaler le moins possible la campagne RMQS2 dans le temps si l'on souhaite une détection.** De plus, avec le scénario A1B, on rejette toujours l'hypothèse selon laquelle le paramètre d'évolution est

nul. En revanche, avec le scénario A2, il est plus difficile de rejeter cette hypothèse. Le nombre de valeurs significatives fluctue beaucoup au cours du temps. Pour ce qui est du scénario B1, il y a une fluctuation importante dans les estimations, et on ne parvient pas à obtenir une convergence, même si on détecte presque toujours un taux d'évolution significativement non nul.

On parviendra donc à détecter rapidement une évolution du carbone dans les sols si cette évolution est assez importante et plus ou moins constante dans le temps. Pour la détection des changements liés à des changements d'occupation, certaines configurations (par exemple, le passage cultures en terres arables vers forêts ou inversement) risquent de présenter des effectifs trop faibles pour pouvoir être quantifiées avec un dispositif de type RMQS. Si l'on souhaite prouver statistiquement l'effet de ces changements d'occupation peu représentés dans le réseau RMQS, il faudrait multiplier le nombre de situations de suivi. La démonstration de l'efficacité du réseau à détecter l'impact des changements d'occupation du sol bien représentés par le réseau reste à faire. La nécessité de ce dernier travail dépend de la part relative du changement du stock de carbone dans les sols liée aux changements d'occupation des sols vs la part liée aux modes de gestion et à l'effet du climat sur les sols sans changement d'occupation. Ces parts relatives sont à l'heure actuelle mal connues. Ceci pourrait être fait par modélisation, calibrée sur suffisamment de sites d'observation de longue durée ou de chronoséquences.

3.1.2 ASSURANCE QUALITÉ

Objectif : Définir et proposer des indicateurs permettant de s'assurer qu'il n'y a pas eu de biais lors du prélèvement de la deuxième campagne RMQS.

Ce point n'a pas été complètement traité, néanmoins les essais de répétabilité d'échantillonnage, de préparation et d'analyse menés sur une dizaine de sites ainsi que les résultats de la campagne-test (40 sites rééchantillonnés en région Centre en 2010) apportent des éléments pour répondre à cette question. La possibilité de détecter une stabilité ou une évolution d'une variable au sein d'un réseau de monitoring est conditionnée par la possibilité de s'assurer de l'absence de biais associé à l'échantillonnage ou à l'analyse, et à la quantification de l'incertitude associée à ces différentes étapes.

3.1.2.1 Résultats des essais de répétabilité

Afin d'analyser et de discriminer quantitativement les différentes sources de variabilité dans la mesure des paramètres mesurés sur le RMQS, un jeu de données correspondant au schéma de répétabilité de la Figure 2 a été collecté sur neuf sites répartis en France. Les sites ont été sélectionnés dans des situations contrastées de types de sols et d'occupation. Le protocole comprend le prélèvement de tous les carrés afin de constituer 4 composites par couche (surface et sous-surface) de chaque site. Un des quatre composites a ensuite été subdivisé en 5 sous-échantillons pour la première étape (sample preparation). Un de ces sous-échantillons est ensuite subdivisé une seconde fois pour la deuxième étape (sub-sampling). Un des sous-échantillons est encore divisé une troisième fois pour l'étape de broyage à 250µm et la prise d'essai (fine grinding and test sample). Enfin la dernière étape de division correspond au dosage de la variable d'intérêt.

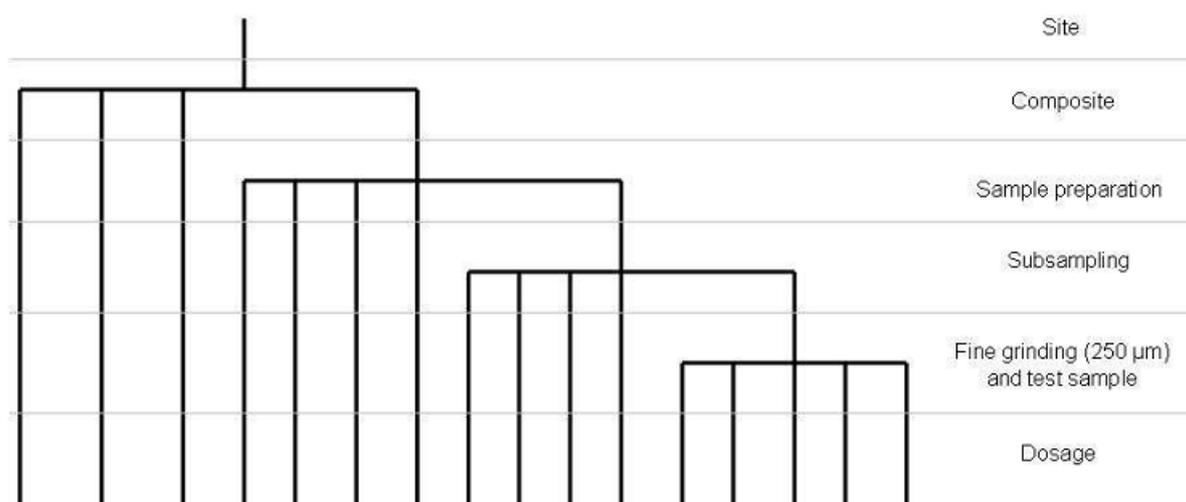


Figure 2 - Schéma de répétabilité mis en œuvre pour évaluer les sources de variabilité associées aux paramètres mesurés sur le RMQS

L'utilisation de modèles mixtes hiérarchiques pour traiter ce jeu de données a permis dans un premier temps de calculer les incertitudes associées aux teneurs en carbone organique (Aldana-Jague, 2012). Ces résultats montrent que les incertitudes associées aux étapes d'échantillonnage sont relativement faibles, ce qui témoigne d'une absence de biais d'échantillonnage en dépit de la forte variabilité spatiale des teneurs en carbone. Ces résultats montrent également qu'une incertitude relativement élevée est associée à l'une des étapes de réduction des échantillons (Tableau 1). Ce travail mené pour les teneurs en carbone devra être poursuivi pour les autres variables mesurées.

Tableau 1 - Résultats du modèle mixte pour les teneurs en carbone. Le modèle permet d'estimer un intervalle de confiance à 95%

Stage	Variance (g.kg^{-1}) ²					
	Surface			Sub-surface		
	Lower	Est.	Upper	Lower	Est.	Upper
Site	130.6678	348.3459	928.6515	5.2333	18.1675	63.0689
Composite	0.1284	0.3671	1.0495	0.0576	0.1808	0.5673
Sample preparation	0.0492	0.1726	0.6052	0.0375	0.0880	0.2064
Subsampling	0.2776	0.4141	0.6178	0.0105	0.0281	0.0750
Fine grinding, test sample and dosage	0.0304	0.0536	0.0946	0.0217	0.0338	0.0528

3.1.2.2 Résultats de la campagne-test

Une autre possibilité de s'assurer de l'absence de biais liée à l'échantillonnage et à la variabilité spatiale des propriétés des sols sera de comparer des paramètres invariants à l'échelle de temps

du RMQS. La comparaison des squelettes granulométriques (somme des limons et des sables) est une des possibilités de vérification (Figure 3).

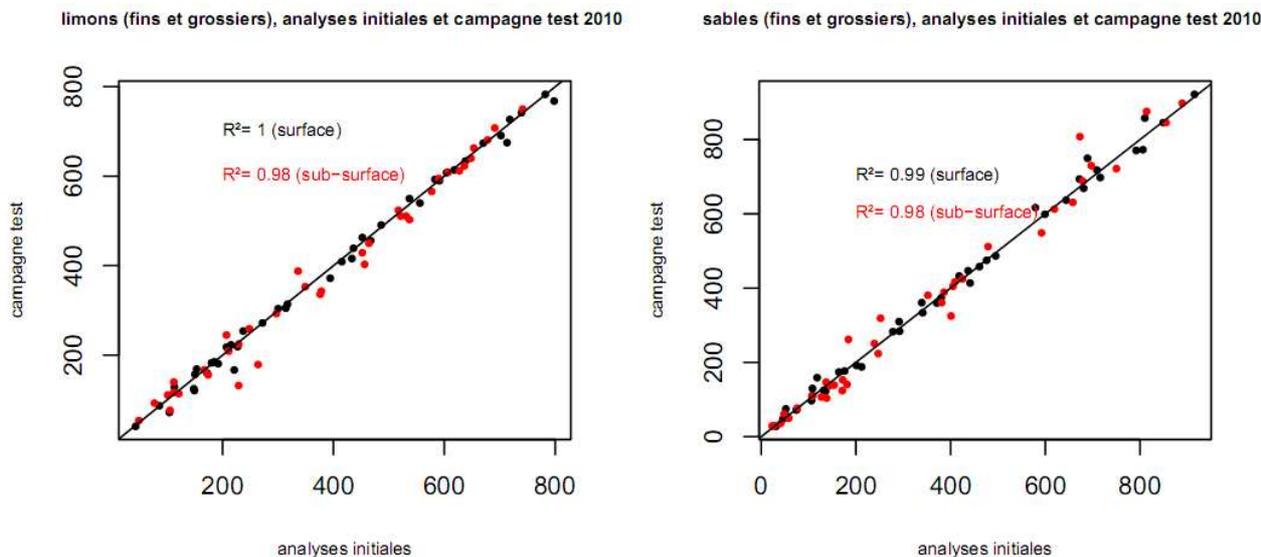


Figure 3 - Teneurs en limons (LF+LG) et en sables (SF+SG) mesurées durant la première campagne (2001-2006) et durant la campagne-test de 2010 sur 40 sites RMQS en région Centre

L'utilisation des teneurs totales en certains éléments majeurs tels que le sodium (Figure 4) ou le magnésium est également possible pour vérifier l'absence de biais. L'intégration de l'incertitude associée à chaque variable permet en outre de tester la significativité des écarts constatés entre les séries d'analyses (cf. Rapport final convention ADEME-RMQS N° 0975C0045). Cependant 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.

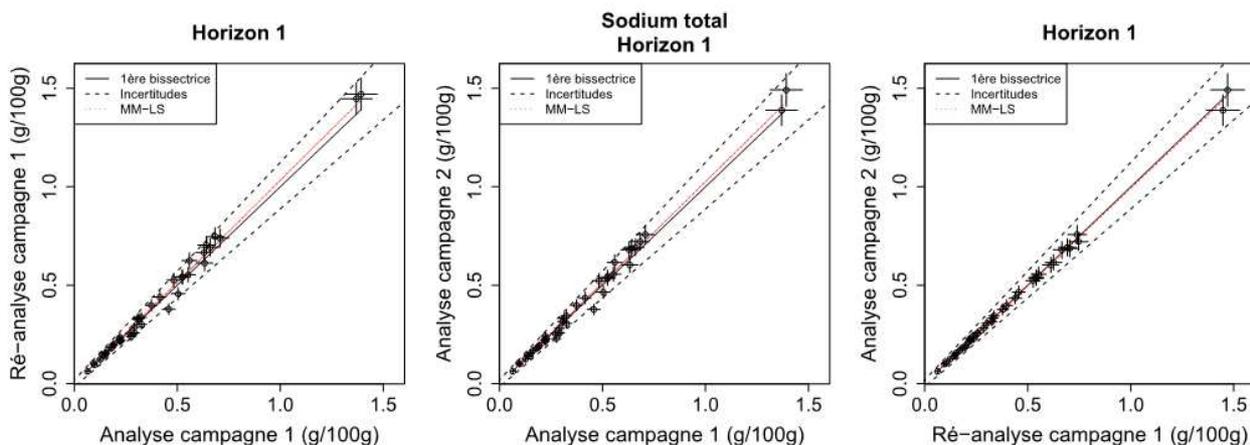


Figure 4 - Teneurs en sodium total mesurées durant la première campagne (2001-2006), réanalysés en 2010 et mesurés durant la campagne-test de 2010 sur 40 sites RMQS en région Centre

3.1.2.3 Recommandations pour la deuxième campagne

L'utilisation de paramètres invariants (squelettes granulométriques ou teneurs totales en certains éléments majeurs) sera nécessaire pour comparer les séries analytiques des deux campagnes et s'assurer de l'absence de biais d'échantillonnage.

Les résultats de la campagne-test ont montré que 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.

L'intégration des incertitudes associées aux variables mesurées constitue une étape indispensable pour pouvoir comparer les jeux de données entre deux campagnes de mesure.

3.1.3 ANALYSE DU POTENTIEL DE L'ENQUÊTE AGRONOMIQUE ET AMÉLIORATIONS

L'objectif de ce travail est de **valoriser** les données récoltées par les enquêtes réalisées lors de la première campagne du RMQS et d'en identifier les **limites** afin de proposer des **améliorations** pour le formulaire d'enquête et plus largement pour la collecte des données de la prochaine campagne. Nous nous attacherons donc à évaluer le **potentiel** de ces données en répondant à 4 questions :

- Comment stratifier la population des sites du réseau en vue d'une exploitation statistique ?
- Peut-on produire des indicateurs de pression afin d'évaluer la pression agricole sur les sols des sites RMQS ?
- La date de prélèvement (saisonnalité, durée après le dernier apport) a-t-elle une influence sur une variable d'intérêt majeur, le phosphore assimilable (méthode Olsen) ?
- Les données disponibles permettent-elles de sélectionner des sites sentinelles *a priori* en état de déséquilibre d'origine anthropique (changements récents, pressions fortes...) et des sites sentinelles en état d'équilibre naturel (n'ayant subi aucune ou une très faible pression anthropique) ?

En dernier lieu, des pistes d'améliorations des questionnaires d'enquêtes sont proposées sur la base des limites identifiées.

3.1.3.1 Caractériser la diversité des systèmes d'exploitation des sites RMQS

3.1.3.1.1 Support de l'étude : les données d'enquêtes

Les enquêtes ont été réalisées le plus souvent par des conseillers agricoles des chambres d'agriculture partenaires mais également par des personnes peu familières du milieu agricole. Elles ont été réalisées majoritairement par rencontre directe de l'exploitant et plus rarement par courrier ou par téléphone. Les questions portent sur la perception de l'exploitant sur la qualité de son sol, les changements de pratiques ou d'occupation du sol majeurs connus de l'exploitant, le

mode de gestion et les pratiques culturales actuelles pouvant avoir un effet sur les propriétés du sol. Sur le papier, le questionnaire s'articule autour de 8 grandes rubriques. Différents formulaires d'enquête ont été utilisés selon le type d'occupation du sol : 63 sites en « Enquêtes cultures pérennes (vignes et vergers) » et 1402 sites en « Enquêtes grandes cultures/prairies » (810 sites en grandes cultures et 493 en prairie permanente). Au total, les enquêtes de 1465 sites ont été collectées sur 2195 sites que compte le réseau RMQS. L'essentiel des sites ne disposant pas d'enquêtes correspondent à des forêts (557 sites du réseau ICP forest niveau 1) ou à des milieux naturels (aucune gestion). Par ailleurs, le recueil des données d'enquêtes n'a pas pu se faire sur une centaine de sites (24 en cultures, 46 en STH, 19 sous forêts, 3 en vignes-vergers et 1 dans un parc urbain).

Les principales informations de ces enquêtes, concernant l'historique de la parcelle, la perception du sol par l'exploitant, l'occupation du sol et sa gestion (travail du sol, gestion des résidus, tout type d'apports) durant les années précédant la date d'enquête (7 années renseignées au maximum) ont été rassemblées dans des tables du système d'information DONESOL. Les données concernant les traitements phytosanitaires étant trop conséquentes et celles liées aux cultures intermédiaires ayant été saisies plus tardivement, font l'objet de tables hors DONESOL.

Les données n'ont pas toutes été saisies avec la même échelle de temps ou avec la même « granularité » (année, culture, rotation). D'une part, les enquêtes ne couvrent pas la même période. En effet, du fait de la mise en place du réseau entre 2001 et 2009, la période couverte par les enquêtes s'étend de 1994 à 2009. D'autre part, l'historique des pratiques ne couvrent pas systématiquement 7 ou 10 années pour toutes les enquêtes, en raison d'une qualité de collecte variable.

Les questions posées à l'exploitant n'ayant pas été renseignées avec la même précision ni avec la même rigueur, le taux de remplissage des tables varie : pour les sites en grandes cultures, on connaît les cultures mises en place sur les 7 années précédant la date d'enquête pour 59% des sites, on ne dispose d'aucune information sur la gestion des résidus et le rendement des cultures sur plus de 30% des sites.

3.1.3.1.2 Typologie des exploitations de la table

3.1.3.1.2.1 Méthodologie

Pour avoir une vision de la diversité des sites agricoles du réseau RMQS, il est nécessaire de définir des critères permettant de scinder l'ensemble des sites en sous-populations. On peut évaluer le réseau en fonction de l'occurrence de certaines pratiques:

- 13,5 % (109 sites) des parcelles en grandes cultures du RMQS sont sous techniques culturales sans labour
- 2,6 % (36 sites) des parcelles agricoles sont certifiées en agriculture biologique (toutes occupations confondues)
- 4,6 % (53 sites) des parcelles agricoles sont en agriculture raisonnée
- 8 % (66 sites) des parcelles en grandes cultures sont en monoculture (maïs : 77%, céréales : 18%, pour le reste : tabac, cultures florales, soja)
- 4,2 % (34 sites) des parcelles en grandes cultures cultivent de la luzerne
- 2,6 % (24 sites) des parcelles agricoles en grandes cultures reçoivent **au moins** un apport de boues de stations d'épuration **au cours de la rotation connue**.

Il est difficile de juger si l'échantillon que représentent les sites du RMQS est représentatif de l'ensemble des systèmes agricoles français. En effet les données dont nous disposons ne peuvent pas être comparées à une donnée de référence. Elles ne donnent pas une photographie des modes de pratiques et de gestion à un instant donné mais une moyenne sur une dizaine d'années (durée de la première campagne RMQS). Cependant, elles ne sont pas en contradiction avec certaines valeurs de référence.

La moyenne de 2,5% d'exploitations agricoles certifiées en agriculture biologique sur une période de 2001 à 2009 sur le RMQS est en adéquation avec les chiffres de l'Agence Bio. La part des exploitations françaises sous label AB est passée de 1,6% en 2001, 2% en 2005, à 4,6% en 2011, avec une progression particulièrement marquée à partir de 2008 puisque le nombre d'exploitations a augmenté de 63% entre 2008 et 2011. La comparaison est possible car en général, pour une exploitation sous certification d'agriculture biologique, l'ensemble des parcelles est cultivé en agriculture biologique. De même, en ce qui concerne le travail du sol, la comparaison avec les pratiques françaises n'est pas si aisée : il existe des disparités des pratiques entre les régions et selon les années. Les sources de données disponibles (Agreste, Enquêtes Pratiques Culturelles) sont annuelles. Par exemple, pour le travail du sol sans labour (sans retournement) : en 2001, l'enquête sur les pratiques culturelles d'Agreste donne 21% des cultures annuelles en non-labour contre 33% en 2006 (lié à une large conversion des parcelles sous colza et blé tendre en 2006). Pour le RMQS, le chiffre de 13.5 % concerne les parcelles sur lesquelles sur la durée de la rotation connue, l'exploitant applique systématiquement un non-labour.

Remarque : des travaux destinés à juger de la représentativité du réseau RMQS ont été réalisés au sein d'InfoSol afin de comparer les occupations du sol des sites du réseau à celles référencées par les enquêtes Agreste d'une part pour les sites agricoles et aux données de Corine Land Cover d'autre part pour l'ensemble des sites. Une étude similaire pourrait être envisagée afin d'étudier la représentativité des pratiques agricoles du réseau en se basant sur les enquêtes Agreste comme point de référence.

Outre une simple description des données, il est possible de catégoriser les sites par une analyse statistique telle qu'une **classification multicritères** (méthode de classification ascendante hiérarchique). L'objectif étant de différencier les systèmes en fonction de la pression qu'ils exercent sur le sol, seules les pratiques qui ont un effet direct ou indirect sur la qualité du sol sont retenues pour l'analyse. Les variables sélectionnées et calculées sont les suivantes :

- Taux moyen de couverture du sol sur la rotation : durée de couverture du sol sur la rotation sur la durée totale de la rotation
- Indicateur de travail du sol : emprunté à l'outil MASC, il classe les sites en 4 catégories : 1) aucun travail du sol/semis direct ; 2) travail du sol sans labour (superficiel ou bien profond) ; 3) labour occasionnel ; 4) labour systématique.
- Nombre de cultures différentes dans la rotation
- Fréquence d'apparition des différentes familles de culture dans la rotation : les familles ont été définies selon la problématique sol : Cultures à paille de printemps, Cultures à paille d'hiver, Plantes sarclées (pomme de terre, betterave, maïs, tournesol, soja), Cultures de

colza ; autres oléagineux (lin), fourrages longue durée (Ray Grass et autres graminées, luzerne) ; autres fourrages (choux fourrager, ...) ; légumineuses annuelles (protéagineux, trèfle) ; légumes ; tabac ; melon ; fleur ; jachères ; autres (cultures marginales inclassables : houblon, chanvre, culture industrielle

- Fréquence de retour d'une culture intermédiaire
- Présence d'apports d'amendements organiques d'origine animale (oui, non)
- Présence d'apports d'amendements organiques d'origine végétale (oui, non)
- Présence d'apports d'amendements organiques d'origine urbaine (oui, non)

3.1.3.1.2.2 Résultats

Seuls 10 sites n'ont pas pu être classés par manque d'information. Notre approche statistique par classification ascendante hiérarchique présente l'intérêt de regrouper les sites aux pratiques culturales similaires. Cette dernière a permis de distinguer six groupes aux effectifs différents et présentant une diversité des conduites culturales plus ou moins importante au sein d'un même groupe (Figure 5) :

- La classe I est la moins uniforme et regroupe l'ensemble des sites aux pratiques marginales : culture de légumes, tabac, melon, fleur, apport d'amendements organiques d'origine végétale et urbaine, systèmes ayant une part importante de céréales à paille de printemps type blé dur dans la rotation.
- La classe II regroupe les sites où la diversité des espèces cultivées est la plus importante, ce qui implique des rotations longues. Ils se distinguent par une part importante des légumineuses annuelles ainsi qu'une part de sites sans labour assez grande.
- La classe III regroupe des systèmes de polycultures élevage où un grand nombre de sites reçoit des amendements d'origine animale et où sont cultivés en alternance cultures d'hiver (céréales à paille) et cultures de printemps (type plantes sarclées comme le maïs pour les fourrages). Malgré l'importance des cultures de printemps, la couverture du sol annuelle moyenne reste importante grâce à l'introduction sur un grand nombre de sites de cultures intermédiaires.
- La classe IV regroupe les sites où la couverture du sol annuelle est la plus faible. A la vue de la part importante des plantes sarclées dans la rotation, sur ces parcelles sont cultivées principalement des monocultures de maïs sans mise en place de culture intermédiaire.
- La classe V regroupe les sites qui cultivent du colza. Ce sont des systèmes céréaliers de type colza/blé/orge et les systèmes céréaliers avec maïs dont une part supérieure aux autres classes, pratique des travaux du sol simplifiés.

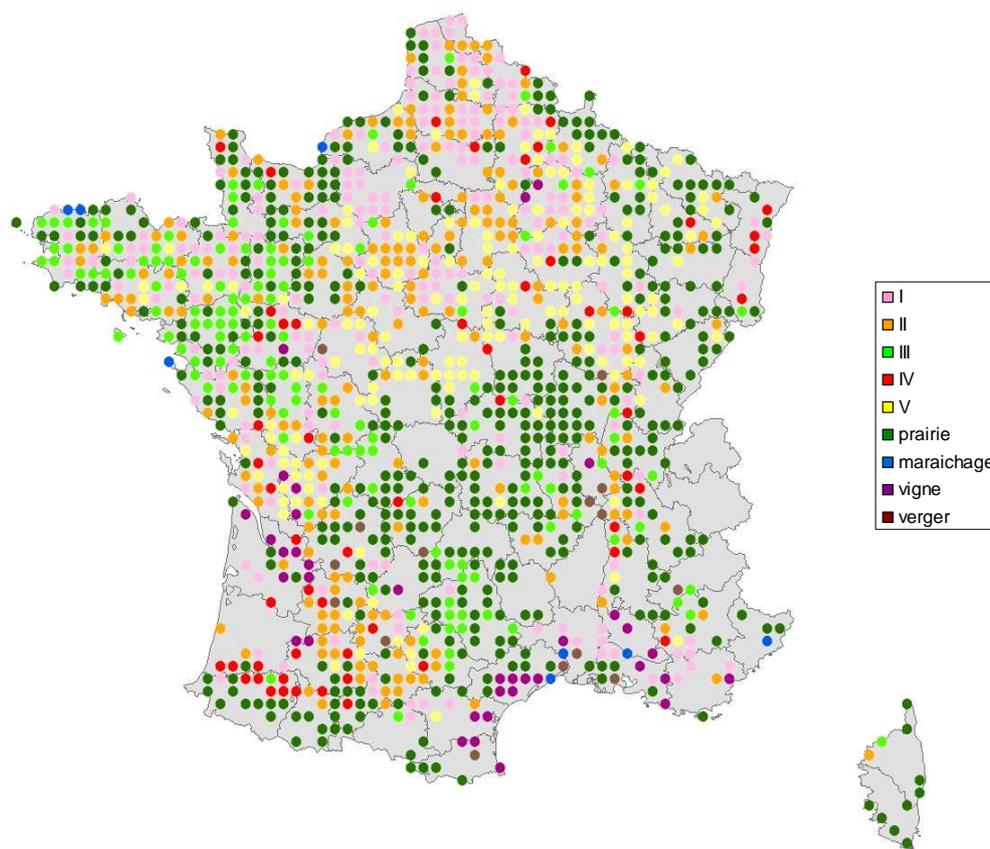


Figure 5 - Répartition sur le territoire des différentes catégories de système d'exploitation identifiées par classification ascendante hiérarchique

Une ACP (Analyse en Composantes Principales) réalisée avec les mêmes données d'entrée permet de définir deux nouvelles variables continues : les coordonnées des sites sur les 2 principaux axes de l'ACP. Ces derniers expliquent 21.20% de la variabilité des données (l'axe 1 explique 11,35 % et l'axe 2 9,86 %). L'axe 1 permet de différencier les sites en fonction de la part de plantes sarclées d'une part et celle de céréales à paille d'hiver et de colza d'autre part et l'axe 2, de discriminer les sites en fonction de la part de fourrage de longue durée dans la rotation.

Les différentes variables obtenues (type de système de pratiques obtenues par CAH, axes 1 et 2 de l'ACP) peuvent servir à de prochaines analyses. Une analyse de variance a par exemple montré une relation entre la coordonnée du site sur l'axe 2 et la teneur en carbone de l'horizon supérieur du sol.

3.1.3.2 Valorisation de l'enquête : caractériser la pression de l'agriculture sur le sol

Aucun indicateur de pression des pratiques agricoles sur les sols sous cultures pérennes (vignes et vergers) ou prairie permanente n'a été identifié. Pour les sites en grandes cultures, la majorité des outils limite l'évaluation des effets du système sur le sol à deux indicateurs de pression liés au type de travail du sol et au degré de couverture du sol. Nous avons sélectionné des indica-

teurs qui n'évaluent pas toujours directement une menace qui pèse sur les sols mais qui y sont liés de près ou de loin.

3.1.3.2.1 ISC : Indicateur de Succession Culturelle

L'ISC est un des modules de l'outil INDIGO ®¹ (Bockstaller *et al.*, 2008), il a un statut particulier car il n'évalue pas directement un impact environnemental mais porte sur les effets du choix de la rotation culturale. Plus l'ISC est élevé, plus la succession culturale est diversifiée, plus l'impact du système de culture sur le sol est globalement positif. Cet indicateur prend en considération, entre autres, l'effet du précédent cultural sur la structure du sol, la pression des ravageurs, des maladies et des adventices.

Il a pu être calculé sur 562 sites soit 69,4% des sites en grandes cultures et permet d'illustrer la diversité des rotations au sein des différentes classes de système de culture identifiées précédemment. La classe IV regroupant majoritairement des systèmes en monoculture de maïs se caractérise par un pourcentage élevé de sites (>90%) ayant un ISC faible (≤ 3).

Il semble par ailleurs, qu'une tendance se dégage entre la valeur de l'ISC et celle de la quantité d'ADN du sol. A partir d'une valeur seuil de l'ISC = 8, les systèmes agricoles présentent une quantité d'ADN microbienne contenue dans les premiers centimètres du sol plus importante. Ces résultats sont cependant à relativiser en raison du faible nombre de sites ayant un ISC aussi élevé (20 sites avec un ISC supérieur à 8).

3.1.3.2.2 Indicateur de travail du sol et de couverture du sol

Des indicateurs de travail du sol et de couverture du sol ont été calculés à partir des données d'enquête et confrontés aux données des enquêtes pratiques culturales d'Agreste 2006 (Figure 6 et Figure 7).

Les régions Midi-Pyrénées et Champagne-Ardenne figurent parmi celles où le non-labour est plus fréquent par rapport à la France entière (données Agreste 2006), ce qui est convergent avec les résultats du RMQS. De même, les régions Aquitaine, Midi-Pyrénées et Alsace figurent parmi celles où la couverture en hiver est la moins importante, ce qui se vérifie au niveau des points du RMQS. Pour certaines régions, le faible nombre de points en sol de grandes cultures pour le RMQS permet difficilement de faire une comparaison.

¹ Indigo® est une méthode scientifique d'évaluation de l'impact environnemental des pratiques agricoles sur l'air, le sol, l'eau de surface et l'eau souterraine. Elle a été mise au point par l'INRA(1), aux centres de Colmar et de Nancy, en collaboration avec l'Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA). Couplé à une application informatique, Indigo® est un outil de diagnostic et d'aide à la décision, destiné aux techniciens, conseillers, ingénieurs agronomes et agriculteurs qui souhaitent améliorer leurs pratiques pour les rendre plus durables.

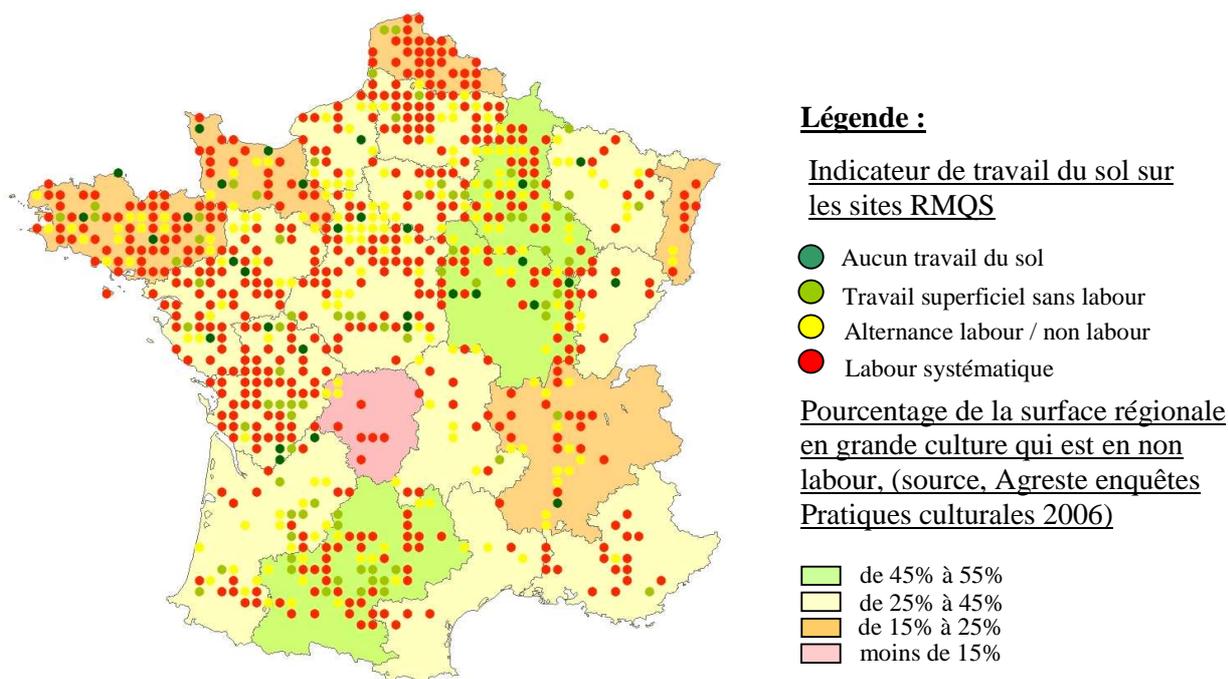


Figure 6 - Indicateurs de travail du sol des sites RMQS sur le territoire métropolitain et surfaces en non-labour à l'échelle régionale d'après les enquêtes pratiques culturales d'Agreste 2006

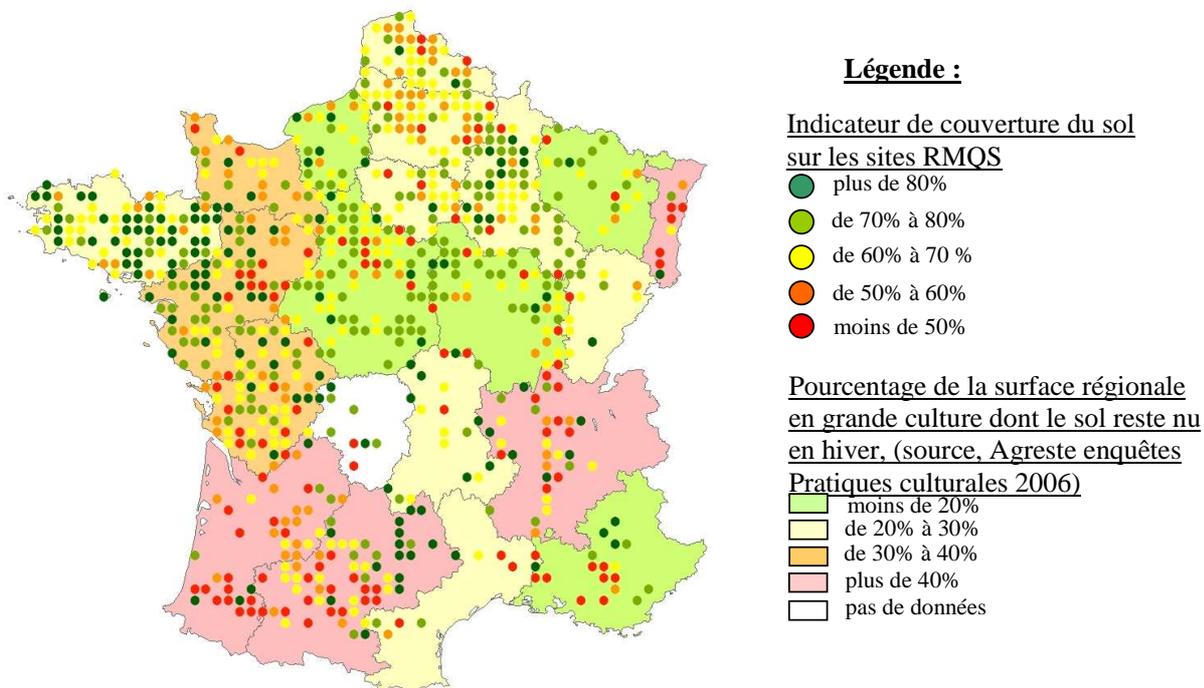


Figure 7 - Indicateurs de couverture du sol des sites RMQS sur le territoire métropolitain et surface en grandes cultures restant nu en hiver à l'échelle régionale d'après les enquêtes pratiques culturales d'Agreste 2006

3.1.3.2.3 IFT : Indice de fréquence de traitement

L'IFT permet de mesurer une pression pesticide globale et de comparer ainsi des systèmes sur le plan de leur dépendance aux pesticides. Il est défini comme « la somme des traitements appliqués, pondérés chacun par le rapport entre la dose utilisée par hectare et la dose d'homologation ». Contrairement au calcul de référence de l'IFT (Pingault *et al.*, 2009), nous nous sommes limités aux calculs intermédiaires des IFT par culture sans agréger les IFT par système de cultures. Les IFT calculés sur 169 sites soit 422 valeurs d'IFT (sites pour lesquels la saisie des traitements phytosanitaires a été réalisée (nord de la France + 57 sites viticoles) sont pour la plupart bien éloignés de ceux de références (IFT de références fournis par l'INRA de Grignon 2008), même après pondération liée à l'année climatique (7^{ème} décile), excepté pour le maïs. Il est probable que les exploitants enquêtés n'ont pas fourni l'ensemble de leurs traitements phytosanitaires, ou bien que les informations fournies soient peu précises de sorte que nous n'ayons pu rattacher un certain nombre de traitements à une année donnée. Ces résultats ne sont donc pas exploitables en l'état pour juger de la pression phytosanitaire exercée sur les sites du RMQS.

3.1.3.2.4 Indicateur de pression érosive : MERO et arbres de décisions

3.1.3.2.4.1 Mero : Maîtrise de l'Érosion

Mis au point à dire d'experts lors de la conception de la méthode MASC (Sadok *et al.*, 2009) et dérivé d'INDIGO, cet indicateur évalue le niveau de maîtrise de l'érosion par les pratiques agricoles mises en place à l'échelle d'une parcelle. Son calcul se décompose sous la forme d'un arbre satellite qui prend en considération à la fois la sensibilité du milieu et l'effet du système de culture. Les étapes intermédiaires de calcul ont été simplifiées et n'ont pas tenu compte de certaines caractéristiques locales. Le calcul de MERO a pu être effectué sur 787 sites. En regroupant les sites par valeur de MERO obtenue, la proportion de sites au sol battant augmente avec la valeur de MERO, mais ce n'est pas le cas pour les sols où des signes d'érosion ont été signalés. MERO n'est donc pas un indicateur puissant permettant d'identifier les sols où la pression érosive est forte sur les sites de RMQS.

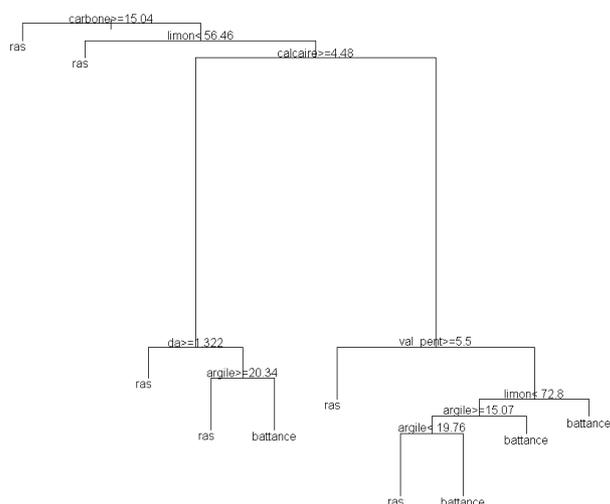
3.1.3.2.4.2 Arbres de décision

L'indicateur MERO n'étant pas pertinent pour le RMQS, de nouveaux indicateurs ont été testés en utilisant des arbres de décision permettant de classer le risque érosif en fonction de variables environnementales et des pratiques exercées sur la parcelle.

Deux jeux de données sont disponibles pour définir la présence ou non d'érosion ou de battance sur la parcelle : les données fournies par l'agriculteur et les données fournies par le pédologue après observation des formes d'érosion présentes sur le profil. Elles sont toutes deux classées en 3 catégories : érosion observée, battance observée, pas d'érosion ni de battance observée (RAS). Les données sélectionnées pour caractériser le milieu et le système de culture sont les

suivantes : des propriétés physiques du sol (val_pent : valeur de la pente ; cailloux : teneur totale en éléments grossiers dans l'ensemble de l'horizon) ; des propriétés chimiques du sol (ph_eau : valeur de mesure du pH dans l'eau ; carbone : teneur en carbone dans les 30 premiers cm de sol ; calcaire : teneur en calcaire ; argile : teneur en argile dans les 30 premiers cm de sol ; limon : teneur en limon dans les 30 premiers cm de sol ; sable : teneur en sable dans les 30 premiers cm de sol ; da : densité apparente du sol dans l'horizon travaillé de surface) ; des pratiques agronomiques (ISC, indic_travail_sol ; pourc_couv : couverture du sol).

Ce sont principalement des propriétés physiques du sol (teneur en limon, argile et carbone) (Figure 8) et la pente de la parcelle qui interviennent dans la construction des arbres de décision. Cependant, les résultats obtenus ne permettent pas d'identifier les pratiques qui accentuent les risques d'érosion des sols. Le faible nombre de sites sur lesquels ont été observées des dégradations peut expliquer ce résultat.



Prédictions Observations	RAS	Battance	Érosion
RAS	584 78%	8 1%	0 0%
Battance	80 10,6%	55 7,2%	0 0%
Érosion	21 2,8%	3 0,4%	0 0%

Figure 8 - Arbre de décision conçu à partir des observations du pédologue et matrice de confusion associée

3.1.3.2.5 Indicateur de pression sur la diminution du stock de carbone

L'objectif du calcul de cet indicateur est d'évaluer le potentiel des informations collectées pour classer les sites en fonction de leur capacité à stocker du carbone. Notre démarche repose sur le postulat que tout sol à l'état d'équilibre (pratiques exercées sur ce dernier inchangées depuis une longue période supérieure à 20 ans) tend vers une valeur de carbone stockée d'équilibre. L'idée est de comparer la valeur du stock de carbone dans le sol mesurée lors du prélèvement à celle simulée à l'état « d'équilibre » sous l'hypothèse que les pratiques culturales restent inchangées.

Différents modèles permettent de simuler la dynamique du carbone dans le sol et d'atteindre la valeur de carbone stocké « à l'équilibre » en prenant en compte la quantité moyenne de carbone entrant annuellement ainsi que les effets de certaines pratiques culturales. Nous avons retenu RothC (Coleman *et al.*, 1999), un modèle à compartiments multiples qui prend en compte le degré de couverture du sol et la quantité moyenne de carbone entrant annuelle apportée par les résidus de récoltes, les exsudats racinaires et les amendements organiques. Nous avons retenu les coefficients d'allocation définis par AgroTransfert pour l'outil SIMEOS-amg pour calculer le carbone entrant à partir des rendements des cultures et des quantités d'amendements organiques apportés (aucun coefficient n'ayant été validé pour les cultures fourragères de longue durée, les sites avec de telles cultures dans leur rotation ont été exclus des calculs). Après avoir formulé différentes hypothèses pour pallier des valeurs manquantes (rendement, mode de gestion des résidus, fréquences de retour des apports organiques), nous avons fait tourner RothC sur 429 sites en grande culture (Figure 9).

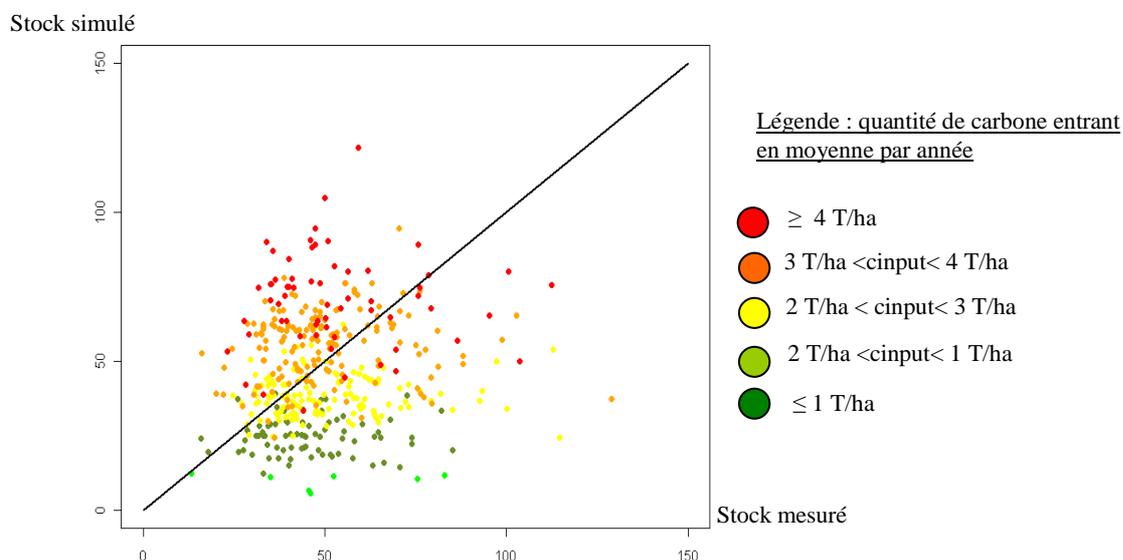


Figure 9 - Stocks de carbone simulés avec RothC en fonction des stocks mesurés, par quantité de carbone entrant en moyenne par année

Les calculs étant fortement corrélés à la quantité de carbone entrant annuellement (ordre de grandeur symbolisé sur le graphique par des couleurs de points différentes) et les hypothèses pour obtenir cette variable étant nombreuses, il est difficile de valider ces résultats. Pour valider ces calculs, notre démarche est de repérer les sites ayant déjà atteint leur état dit « d'équilibre » et de comparer la différence entre le stock simulé et le stock calculé, sachant qu'en théorie, elle devrait être nulle. Nous avons donc sélectionné les sites où aucun changement d'occupation et de pratiques n'a été renseigné et où la personne enquêtée exploite la parcelle depuis plus de 20 ans. Ces sites repérés, dits « à l'état d'équilibre », ont une répartition des différences de stocks similaire aux autres, ce qui ne permet pas de valider nos hypothèses et d'exploiter nos résultats.

Le Tableau 2 synthétise les résultats concernant l'obtention d'indicateurs de pression à partir des données d'enquête du RMQS.

Tableau 2 - Synthèse sur le potentiel de Donesol à fournir des indicateurs de pression des pratiques agricoles sur la qualité des sols

Nom de l'indicateur	Commentaires généraux sur le calcul	Problèmes rencontrés	Liaison avec variables d'état	Améliorations proposées
ISC	Calcul réussi sur de nombreux sites	Succession culturale pas toujours renseignée sur 5 ans ; précisions (cultures hiver/printemps) manquantes	Semble être relié à la quantité d'ADN microbien du sol mais résultats à confirmer	Améliorer le taux de réponses et leur précision concernant la succession culturale
Travail du sol	Des erreurs probables dans le calcul final. Cohérent avec les résultats des enquêtes Agreste 2006	Organisation des données dans DoneSol non adaptée ; Des erreurs de saisies (mauvaise interprétation du rôle de l'outil utilisé,...)	Pas de lien avec l'érosion	D'autres indicateurs: fréquences de retour du labour, profondeurs de travail sont à calculer après avoir adapté la collecte et l'organisation des données
IFT	Calcul théoriquement plausible mais résultats inexacts	De nombreux traitements n'ont pas été renseignés par les exploitants ; des fautes d'orthographe dans les noms des produits		Le mode d'obtention des données traitements phytosanitaires est à repenser et sera amélioré avec l'extension des enregistrements des pratiques
Couverture du sol	Inexactitudes probables. Cohérent avec les résultats des enquêtes Agreste 2006	Rotation type (durée, succession) non communiquée ; informations manquantes sur les intercultures	Faible lien avec l'érosion (cf. arbres de décisions) ;	Améliorer le taux de réponses et leur précision, notamment concernant l'implantation de cultures intermédiaires
Carbone Bilan des apports minéraux	Calcul théoriquement plausible mais des erreurs probables	De nombreuses hypothèses pour palier les données manquantes : gestion des résidus, rendements, fréquences des apports et amendements organiques		Améliorer le taux de réponses ; meilleure organisation des données pour une harmonisation des échelles de temps indispensable aux calculs des fréquences
MERO	Indicateur pas adapté , créé à dire d'expert pour une évaluation ex ante et non pas sur un système déjà en place	Calculs des données intermédiaires peu rigoureux, non adapté au site (caractéristiques climatiques non prises en compte)	Faible lien avec le phénomène de battance et d'érosion mais ne permet pas de distinguer les sites érosifs des autres	Cet indicateur n'est pas adapté à l'évaluation d'un système en place.
Arbres de décisions Érosion	Démarche à conserver même si résultats peu probants avec les données de cette campagne	Nombre de sites avec des signes d'érosion trop faibles	N'identifie pas les pratiques culturelles influant sur les phénomènes d' érosion	Insister sur les questions portant sur l'érosion afin d'identifier le maximum de sites présentant des phénomènes d'érosion et poursuivre ces calculs

3.1.3.3 Exemples d'analyses complémentaires abordées grâce à la richesse des enquêtes et au large potentiel de la base de données Donesol

3.1.3.3.1 Impact de la date de prélèvement (saisonnalité, durée après le dernier apport) sur une variable d'intérêt majeur : le phosphore assimilable (méthode Olsen)

Le stade de développement de la culture, les apports d'amendements organiques riches en phosphore, les apports de fertilisants minéraux peuvent faire varier la quantité de phosphore assimilable dans le sol. Une analyse de variance faite sur les sites du RMQS montre un effet de la date de prélèvement sur la valeur de phosphore assimilable : les prélèvements réalisés aux mois de janvier et juin donnent respectivement des teneurs significativement plus élevées et plus faibles que ceux réalisés durant les autres mois.

Le meilleur modèle testé selon le critère AIC fait intervenir le mois du prélèvement, la classe du système de culture (obtenue d'après la classification des sites en première partie), le pH, la teneur en argile de surface et la quantité de phosphore apportée par la fertilisation animale :

$$R^2 = 14,2 \% \quad AIC = -4869,4$$

Effet des différentes variables :

- (-) mois AIC = -4864,7
- (-) classe_système_culture AIC = -4844,0
- (-) pH AIC = -4869,5
- (-) teneur_argile AIC = -4857,3
- (-) quantité_fertilisation_animale AIC = -4869,3

Ces résultats suggèrent que ces informations sur la temporalité des prélèvements soient davantage prises en compte dans le traitement des données (modélisation et spatialisation des résultats).

3.1.3.3.2 Identification et localisation de sites sentinelles en état d'équilibre et en état de déséquilibre d'origine anthropique

Une partie du questionnaire d'enquête portant sur l'historique de la parcelle, il est possible d'identifier des sites *a priori* en état de déséquilibre d'origine anthropique (changements récents,...). Nous nous sommes limités à l'identification et localisation des sites ayant subi un retournement de prairie et ceux au contraire qui anciennement étaient en grandes cultures et qui désormais sont en prairie permanente (> 10 ans). A l'inverse, les sites en état d'équilibre, supposés sans changement d'occupation (*i.e.* prairies naturelles, pelouses d'altitude...), qualifiés de sites « à l'état naturel » peuvent également être identifiés. La Figure 10 montre leur répartition géographique au sein du réseau. Au total, sont identifiés 151 sites ayant subi un retournement de prairie entre 1960 et 2007 et 85 sites ayant subi un enherbement permanent au cours de la même période. Les sites « à l'état naturel » sont au nombre de 82.

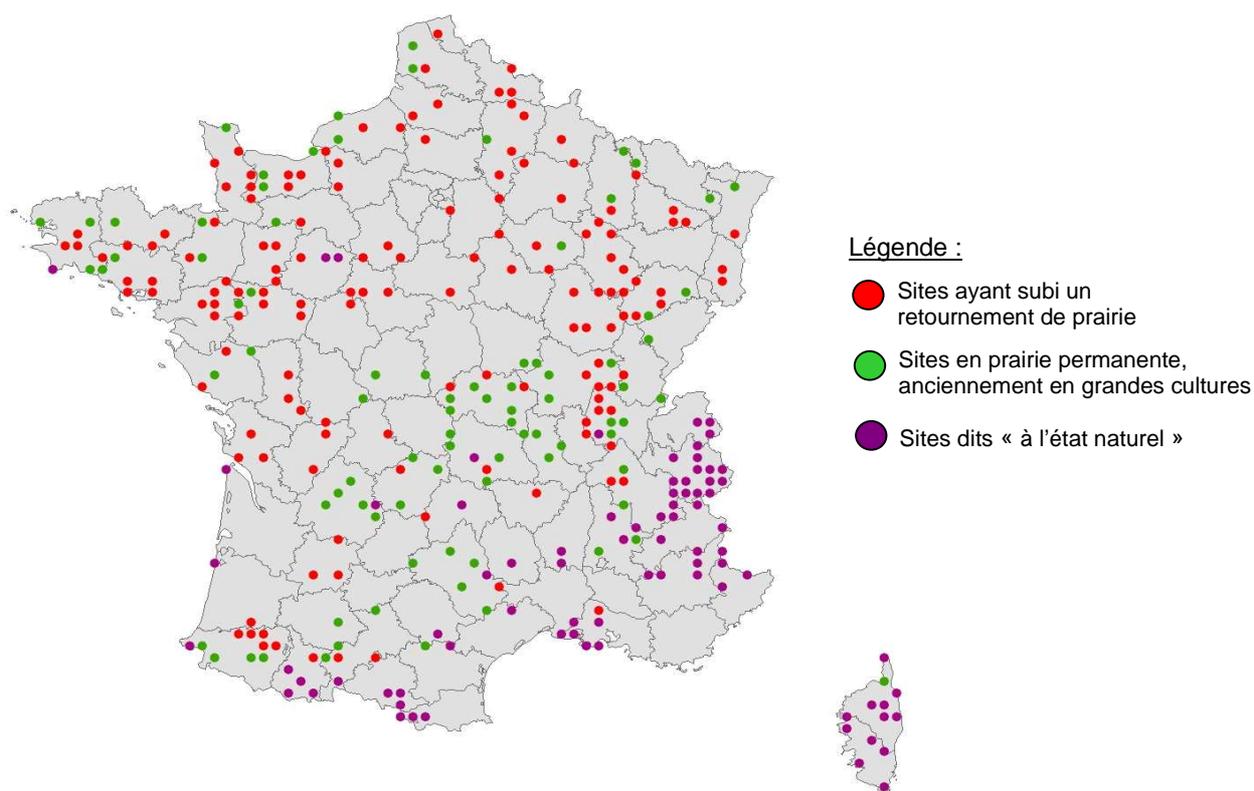


Figure 10 - Localisation sur le territoire métropolitain de sites sentinelles potentiels

3.1.3.4 Perception de la dégradation du sol par les exploitants

Une première exploitation des données concernant la perception de la dégradation du sol par les exploitants des sites RMQS a été menée. Sur un effectif de 1416 parcelles enquêtées, à la question posée « le sol présente-t-il des signes ou des risques de dégradation ? », les réponses ont été les suivantes : 1/ aucun pour une grande majorité de sites, 2/ avec un score pratiquement identique : compaction, acidification, battance et 3/ appauvrissement en matières organiques. A noter qu'un seul exploitant perçoit des signes ou des risques de contamination de ses sols (Figure 11).

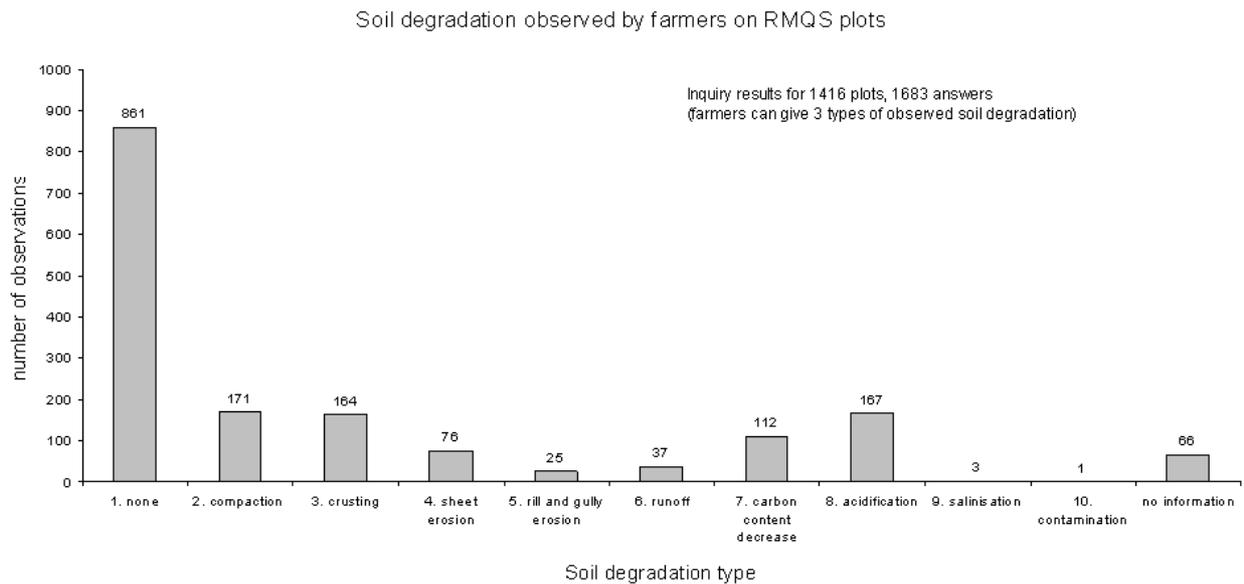


Figure 11 - Distribution des types de dégradation perçus par les exploitants des parcelles du RMQS

Si on s'intéresse plus particulièrement à la battance, en comparant la perception des exploitants à la réalité, au travers du calcul d'un indice de battance à partir des variables mesurées, on s'aperçoit qu'il existe une bonne relation entre ces deux paramètres (Figure 12). Les exploitants qui déclarent observer de la battance ont des sols dont l'indice de battance est en moyenne plus élevé que ceux qui déclarent ne pas en observer dans leurs parcelles. On remarque tout de même un nombre d'outliers assez important dans cette dernière catégorie.

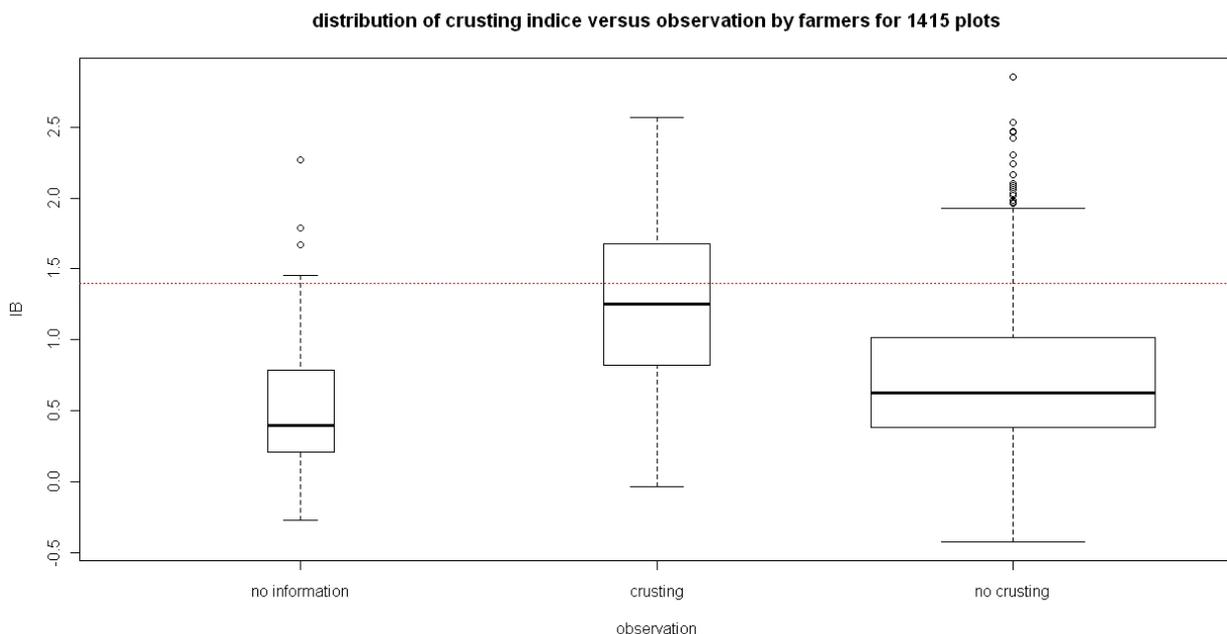


Figure 12 - Comparaison entre la perception de la battance de leurs sols par les exploitants et la sensibilité à la battance (IB = indice de battance)

Avec $IB = (1.25 * \text{Liments fins} + 0.75 * \text{Liments grossiers}) / (\text{Argile} + 10 * \text{Matière organique}) [- 0.2 (\text{pH} - 7) \text{ si } \text{pH} > 7]$

IB < 1,4 : sol non battant

IB de 1,4 à 1,6 : sol peu battant

IB de 1,6 à 1,8 : sol battant

IB > 1,8 : sol très battant

Ces travaux sont encore exploratoires et mériteraient d'être poursuivis.

3.1.3.5 Pistes d'amélioration de l'enquête agronomique pour la 2^{ème} campagne

Une des difficultés essentielle liée à la collecte des données est **la sensibilisation et la formation de l'enquêteur**. Le deuxième obstacle rencontré dans la collecte des données concerne **l'accès aux informations données par les agriculteurs**. La réussite de l'enquête dépend encore beaucoup de la bonne volonté de l'agriculteur, qui peut être effrayé par le nombre d'informations demandées. Un allègement et une réorganisation des rubriques en faciliteront l'accès.

3.1.3.5.1 Faciliter l'accès aux données et modification du format d'enquête

Que ce soit une démarche volontaire, engagée pour l'obtention d'une certification ou bien une obligation réglementaire, l'exploitant possède des documents de traçabilité concernant les activités pratiquées sur son exploitation. Certains peuvent lui être demandés sous format papier ou informatique : plans de fumure et cahier de fertilisation, enregistrement des traitements phytosanitaires, fichier de traçabilité des pratiques (dossier Mes Parcelles), autre. Ces documents étaient encore peu accessibles ou bien non maintenus par l'agriculteur au début de la première campagne. Ces documents devront être préparés par l'agriculteur préalablement à l'entretien.

La sensibilisation de l'enquêteur aux questions prioritaires pourrait faire l'objet d'un « **guide d'entretien** » à fournir avec le formulaire d'enquête. Ce guide permettrait également d'éviter certaines erreurs de saisie ou d'interprétation de la part de l'enquêteur. Devrait y figurer par exemple une liste détaillée et fermée des cultures qui peuvent être renseignées dans l'enquête, qui ne contiendrait pas de noms génériques tels que blé ou maïs.

La saisie de l'enquête lors de la première campagne a été rendue difficile du fait d'une lecture synthétique à réaliser par l'opérateur de saisie. Le choix du format d'enquête doit s'orienter vers une forme qui soit au plus près du formulaire de saisie, avec les contraintes liées à la rédaction de questions fermées au lieu de questions ouvertes.

L'organisation même du questionnaire peut également être améliorée. **Regrouper les questions par année culturale** (tableau décrivant les itinéraires techniques pour une même culture) et non plus par thématique (travail du sol, gestion des résidus) permettrait de clarifier et simplifier la collecte d'informations. La question de l'informatisation du questionnaire se pose également, ce qui faciliterait le dépouillement de l'enquête et pallierait les problèmes de questionnaires renseignés de façon peu soignée. Il est aussi envisageable de procéder à la récupération directe des fichiers informatiques de l'agriculteur pour les seuls itinéraires culturaux.

3.1.3.5.2 Modifications du contenu de l'enquête

Il est peu rentable de poursuivre en l'état l'obtention des données sur les traitements phytosanitaires, seule une question plus large pourra être posée sur le raisonnement des traitements phytosanitaires sur la parcelle. Le calcul d'un IFT pourra cependant se faire à l'aide du registre phytosanitaire de l'exploitant demandé avant l'entretien.

Au contraire, des questions complémentaires peuvent être posées, certaines à l'échelle de l'exploitation dans son ensemble : type d'exploitation (polyculture, polyculture/élevage...) ; taille de l'exploitation ou taille des parcelles, d'autres à l'échelle de la parcelle, qui sont des questions qui synthétiseraient les itinéraires culturaux déjà détaillés : stratégie adoptée concernant le travail de son sol (fréquence de retour du labour, nombre de passages destinés au travail du sol,), objectif de chacun des travaux du sol : désherbage, état structurel du sol..., enrobage des semences, ...

Ce qui signifie ici qu'il y aurait des questions très précises et techniques sur les itinéraires culturaux et qu'on demanderait à l'enquêteur ou agriculteur d'en faire une synthèse.

3.1.3.5.3 Pour les prairies, un questionnaire à part ?

Le format et le contenu de l'enquête sont bien adaptés aux exploitations en grandes cultures mais difficilement aux systèmes prairiaux pour lesquels l'organisation des données sous forme de tableau retraçant les itinéraires techniques année par année n'est pas adaptée. Un questionnaire simplifié serait mieux adapté à ce type de système. Ce type de questionnaire a déjà été établi et testé lors de la campagne-test menée en région Centre en 2010. Cependant, il est nécessaire de maintenir des questions sur les prairies temporaires dans le questionnaire grandes cultures.

3.1.3.6 Conclusions

3.1.3.6.1 Utilité et utilisation des enquêtes

Les données des enquêtes du RMQS représentent une source d'informations indispensable pour caractériser les systèmes de gestion des sites et quantifier les apports sur les parcelles. Outre le travail le travail qui a été réalisé ici, ces données ont été utilisées dans le cadre de plusieurs projets tels que ECOMIC-RMQS, DIVGRASS, ou pour la récente réévaluation des stocks de carbone de sol de France (Meersmaan *et al.*, 2010).

Malgré un nombre d'utilisations croissant, les données d'enquêtes demeurent encore largement inexploitées. L'une des principales raisons est qu'environ 40 % d'entre elles ne figurent pas dans la base de données DONESOL. Le temps de développement et de saisie nécessaire pour intégrer ces données a été largement sous-estimé pour la première campagne. En outre, les objectifs d'utilisation de ces données n'ont pas été fixés initialement, ce qui ne nous a pas permis de définir le cadre et le degré de précision de stockage de ces données. Une saisie *a minima* des grandes caractéristiques des pratiques sur les parcelles a donc été réalisée, ce qui représente d'ores et déjà un nombre important de données et a nécessité plus de 400 jours de saisie. La saisie complémentaire des données pourra porter sur le détail par année des itinéraires culturaux

sur la parcelle : par exemple, dates des apports, traitements phytosanitaires, données détaillées du travail du sol, données sur la gestion des prairies et du chargement à la parcelle.

3.1.3.6.2 Développement d'indicateurs

A travers cette étude, nous avons vu les difficultés qui se posent en tentant de comparer finement des systèmes d'exploitation en fonction de l'effet des pratiques agricoles sur les sols à partir de données d'enquêtes. Il n'existe pas d'outil idéal évaluant les effets des pratiques agricoles sur la qualité des sols et nous avons vu la difficulté qu'il y a à relier certains indicateurs de pression issus d'outils d'évaluation de la durabilité des pratiques agricoles, à une variable d'état. Les limites rencontrées sont multiples : le phénomène étudié est peu représenté (phénomènes érosifs), les données nécessaires aux calculs sont manquantes ou imprécises (durée et fréquence de retour d'une culture intermédiaire, mode de gestion des résidus). Cependant, de faibles améliorations peuvent conduire aux calculs d'indicateurs fiables et pertinents : indicateur de travail du sol, de couverture du sol, d'érosion, de pression sur le stock de carbone du sol. A noter enfin que les indicateurs ont été surtout développés pour les grandes cultures, ce qui ne représente qu'une partie des occupations du RMQS.

Enfin un travail a été réalisé sur la représentativité des occupations et des cultures du RMQS par rapport à la France entière, par ailleurs. Il reste à mener sur les pratiques culturales, mais ce travail de comparaison reste délicat, car, d'une part, le RMQS couvre des données réparties sur une période de 9 ans, à comparer à des données statistiques agricoles annuelles, et d'autre part, la comparaison doit pouvoir porter sur des indicateurs comparables entre statistiques annuelles et RMQS, ce qui nécessite de retravailler les données source et les données cible du RMQS pour une comparaison adéquate.

3.1.3.6.3 Amélioration du formulaire

Le formulaire utilisé lors des enquêtes agronomiques réalisées dans le cadre du RMQS est riche. Il balaie à la fois l'ensemble des pratiques actuelles et anciennes pratiquées sur la parcelle et aborde la perception que l'exploitant a de son sol et l'influence que cela implique dans la gestion de la production. Nous avons soulevé un certain nombre de pistes pour des retouches qui permettraient d'augmenter le taux de remplissage de l'enquête et de réduire le temps de calcul de certains indicateurs. Cependant, il est nécessaire pour les calculs de s'adapter au contexte. Il est possible que de nouveaux outils ou indicateurs soient développés ou que de nouvelles problématiques deviennent prioritaires, pour lesquelles les données du RMQS seraient une bonne source d'information. D'où la nécessité de concilier dans ce questionnaire d'une part les informations nécessaires aux calculs des indicateurs précédemment identifiés et d'autre part un maximum d'informations sur le système d'exploitation qui pourraient servir à d'autres études par la suite.

La collecte des données est une étape difficile, dépendant de la motivation de l'exploitant, de la compétence de l'enquêteur, et la première campagne n'a pas bénéficié de l'obligation d'enregistrement des pratiques. Le support de l'enquête devra être revu en fonction des nouveaux outils de traçabilité utilisés par les agriculteurs. Certaines données ont pu être facilement acquises (rotations récentes, fertilisation minérale). Par contre d'autres questions ont été plus souvent éludées comme la gestion des résidus de récolte (ou du moins éludées pour les cultures

les plus éloignées de la date de prélèvement), la gestion des cultures intermédiaires ou le rendement des cultures. Les réponses concernant la gestion des prairies et notamment le chargement ou l'occupation du bétail à la parcelle ne sont pas toujours précises.

En vue du lancement de la deuxième campagne RMQS, la réflexion autour de ces enquêtes devra être poursuivie. Des pistes d'amélioration du formulaire ont été proposées, mais nous recommandons la constitution d'un groupe de travail afin de poursuivre ce travail d'amélioration à apporter dans l'acquisition des données et de mieux définir certains besoins futurs de données en lien avec les paramètres qui seront suivis sur le RMQS. Une réflexion approfondie devra être menée en parallèle sur i) l'intégration des données collectées en base de données : développement d'une base de données dédiée ou de tables spécifiques dans le système d'information du RMQS et ii) sur les modalités de saisie des données qui représente une activité importante largement sous-estimée durant la première campagne. Le développement de formulaires de saisie automatique serait une piste à explorer.

3.2 ETUDE ET CHIFFRAGE DU POTENTIEL DE DIVERSIFICATION DES VARIABLES MESURÉES ET AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE DU DISPOSITIF VIS-À-VIS D'ENJEUX PRIORITAIRES

Les travaux décrits ci-après ont été conduits par un groupe de travail de l'INRA incluant des chercheurs spécialistes des processus concernés du département Environnement Agronomie et des membres d'InfoSol.

3.2.1 BIODIVERSITÉ

Différents travaux basés sur le RMQS ont été conduits durant la première campagne sur la biodiversité des sols dans le cadre de plusieurs projets de recherche (biodiversité microbienne et biodiversité de la faune du sol). A partir des conclusions de ces travaux, nous avons analysé les 5 points décrits ci-après. Ces travaux ont été conduits par un groupe de travail de l'INRA (département Environnement et Agronomie) incluant des chercheurs spécialistes des processus concernés et des représentants d'InfoSol.

1. Chiffrer le coût d'une extraction systématique de l'ADN microbien sur la deuxième campagne (avec plusieurs options de quantité pour être en mesure de réaliser différentes caractérisations).
2. Réaliser une analyse bibliographique des techniques d'identification de la méso et/ou macrofaune basées sur l'ADN. L'évaluation des coûts en sera faite.
3. Proposer des jeux de sites (à partir des enquêtes) *a priori* « stables » (ex : pelouses d'altitudes, prairies permanentes) ou au contraire en déséquilibre (ex : changements d'usage et/ou de pratiques) pour lesquels un suivi plus complet (non basé exclusivement sur des approches ADN) et plus rapproché pourrait être mis en œuvre. Cette option sera chiffrée.
4. Analyser et chiffrer l'utilisation potentielle d'indicateurs enzymatiques

5. Chiffrer le coût d'un suivi du cortège floristique sur les sites en prairie permanente et/ou en pelouses naturelles.

3.2.1.1 ADN microbien

Objectif : Chiffrer le coût d'une extraction systématique de l'ADN sur la deuxième campagne (avec plusieurs options de quantité pour être en mesure de réaliser différentes caractérisations).

Étude et chiffrages réalisés par : Lionel Ranjard (INRA Agro-écologie Dijon) et InfoSol

Type de détermination : La détermination proposée est la mesure de la biomasse moléculaire microbienne des sols du RMQS 2. Cette mesure consiste à extraire et à quantifier l'ADN du sol par une procédure développée et optimisée au sein de la plateforme GenoSol. Cette biomasse moléculaire microbienne des sols représente une estimation de l'abondance microbienne (bactéries+champignons+virus).

Enjeux environnementaux et politiques concernés : Les microorganismes du sol sont les acteurs clés du fonctionnement biologique des sols par leur implication dans la régulation des cycles biogéochimiques. Une altération de leur abondance ou de leur diversité peut avoir des effets délétères sur la qualité agronomique et environnementale des sols (baisse de fertilité, déstockage du C du sol...). Dans ce contexte, la mesure de la biomasse moléculaire microbienne représente un bioindicateur opérationnel et sensible pour évaluer l'état biologique du sol et l'impact des pratiques agricoles et/ou industrielles.

Contexte scientifique et technique : La technique d'extraction d'ADN de sol employée correspond à une amélioration de la norme ISO qui a été développée au sein de la plateforme GenoSol. De plus, cette technique a été optimisée pour être utilisée en moyen débit afin de pouvoir traiter plusieurs centaines d'échantillons de sols par mois. Cette mesure a déjà été effectuée sur tous les sols du RMQS 1 ce qui a permis d'établir une cartographie nationale et d'initier un référentiel d'interprétation de cette valeur de biomasse en fonction des types pédoclimatiques et des modes d'usage des sols.

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : Dans le cadre du RMQS 2, la plateforme Genosol propose un monitoring de cette biomasse moléculaire microbienne sur tous les sites échantillonnés chaque année (soit environ 250/an) afin d'exploiter la grande diversité des situations pédoclimatiques et environnementales nécessaire à la consolidation de son référentiel d'interprétation.

Chiffrage de l'indicateur :

Opérations de terrain = non

Conservatoire des Sols (Orléans) :

- préparation de 100g de terre fine, quartage, enregistrement et livraison = 23 €/éch

- petit matériel et fonctionnement = 2 €/éch

GenoSol (Dijon) :

- conservation cryogénique de 100g de chaque échantillon = 4 €/éch

- extraction ADN : 25 €/éch

- stockage des ADN en conservatoire : 1 €/an

- main d'œuvre pour extractions et analyses : 10 €/éch

Total = 65 € par échantillon

Le chiffrage de quantités variables en fonction des déterminations attendues n'a pas lieu d'être dans la mesure où une seule extraction d'ADN suffit pour réaliser un grand nombre de déterminations.

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) : Les données acquises sur la biomasse moléculaire microbienne des sols du RMQS 1 ont permis d'analyser sa gamme de variation et de mettre en place un référentiel d'interprétation de cette biomasse à l'échelle nationale. Il est donc possible de dégager des valeurs seuils et moyennes en fonction des types pédoclimatiques et des indicateurs de pression anthropique dans le but de diagnostiquer des impacts précoces des modes d'usages des sols. En parallèle, des mesures de biomasse moléculaire sont menées sur d'autres réseaux de sites expérimentaux (ORE, réseau PIC, LTO Européen...) au sein de la plateforme GenoSol qui permettront d'affiner les gammes de variations naturelles et les valeurs seuils en fonction des types de sols et des évolutions saisonnières et annuelles. Par ailleurs, la comparaison des données acquises sur le RMQS 1 et 2 permettra de dégager les tendances d'évolution de la qualité biologique des sols Français et l'impact des changements de mode d'usage des sols à moyen terme.

Opérateurs pressentis : Dans ce contexte, l'opérateur pressenti est la plateforme GenoSol qui a développé, validé et valorisé la technique d'extraction d'ADN de sol comme un estimateur de la biomasse moléculaire microbienne et qui possède les équipements et les compétences techniques et informatiques pour faire cette mesure en moyen débit. (http://www.dijon.inra.fr/plateforme_genosol)

3.2.1.2 ADN de la méso et de la macrofaune

Objectif : Réaliser une analyse bibliographique des techniques d'identification de la méso et/ou macrofaune basées sur l'ADN. L'évaluation des coûts en sera faite.

Étude et chiffrages réalisés par : Michael Hedde (INRA UMR PESSAC Versailles) et InfoSol

Les études menés par M. Hedde et coll. en 2011 concluaient sur l'intérêt de systématiser la mesure de l'ADN total du sol pour qualifier l'ensemble du règne vivant et s'orienter vers de la biogéographie. Le séquençage environnemental (meta barcoding) devrait permettre, à terme, d'identifier les espèces présentes dans le sol à partir de la connaissance de cet ADN. Des travaux méthodologiques sont cependant à mener pour i) optimiser l'échantillonnage car les prises d'échantillons sont faibles ce qui pose un problème de représentativité, notamment pour les graines des adventices et pour la faune de surface, ii) améliorer les méthodes d'extraction de l'ADN, iii) identifier les biais techniques possibles entre les deux campagnes de prélèvement. Par ailleurs, les résultats obtenus ne seront pas exploitables dans l'immédiat, car les bases de données interprétatives ne sont pas forcément disponibles. On pourra s'appuyer sur les programmes de recherches RMQS/Biodiv/Bretagne (identification des espèces présentes réalisée, ADN total à mesurer) et ECOMIC-RMQS, PATHO-RMQS (mesure de l'ADN total et de celui des espèces présentes en cours) pour compléter ces référentiels. Ces approches apporteront des éléments de réponse sur des questions précises comme par exemple la dispersion de l'ambrosie, la présence de bactéries pathogènes dans le sol, présence de bactéries dénitrifiantes, à partir de l'identification de certains gènes. La quantification d'une espèce reste encore une question de recherche.

Depuis cette étude, une publication récente (Bienert *et al.* 2012) a démontré la possibilité à partir d'une approche métagénomique de retrouver les marqueurs spécifiques des vers de terre dans l'ADN total du sol. La méthode serait utilisable sur des sols secs puisqu'elle utilise un fragment suffisamment petit d'ADN pour qu'il soit conservé y compris dans l'ADN dégradé du sol (dans les traces de mucus ou tout type de cellule provenant des vers de terre). Des questions méthodologiques demeurent afin de savoir combien d'extractions d'ADN (et donc quelle quantité de sol) il faudrait utiliser pour recueillir une quantité suffisante d'ADN et obtenir des résultats fiables. Ces travaux nécessiteraient donc de commencer par une étude pilote sur un nombre restreint de sites RMQS afin de valider la méthode avant de mener une analyse de ce type sur l'ensemble des points du RMQS.

Pas de chiffrage de la mesure.

3.2.1.3 Identification de sites sentinelles

Objectif : Proposer des jeux de sites (à partir des enquêtes) *a priori* « stables » (ex : pelouses d'altitudes, prairies permanentes) ou au contraire en déséquilibre (ex : changements d'usage et/ou de pratiques) pour lesquels un suivi plus complet (non basé exclusivement sur des approches ADN) et plus rapproché pourrait être mis en œuvre. Cette option sera chiffrée.

L'identification de sites « stables » ou en déséquilibre a été en partie traitée dans le paragraphe 3.1.3.3.2. Ce travail a permis d'identifier : 82 sites à l'état naturels, 151 sites sous prairie permanente convertis à la culture et 85 sites cultivés convertis en prairie permanente. Cette identification reste à poursuivre pour traiter les sites forestiers ayant subi des changements d'occupation et qui pourraient intégrer cette liste de sites sentinelles. Le chiffrage d'un suivi plus complet et plus rapproché n'a pas été réalisé, mais les indicateurs chiffrés par ailleurs dans ce rapport seraient de bon candidats à mettre en œuvre sur ces sites, pour permettre en particulier une caractérisation fine et un suivi des compartiments organiques et de la biodiversité des sites.

3.2.1.4 Indicateurs enzymatiques

Objectif : Analyser et chiffrer l'utilisation potentielle d'indicateurs enzymatiques

Étude et chiffrages réalisés par Michael Hedde (INRA UMR PESSAC Versailles) et InfoSol

Type de détermination : Mesure de l'activité biologique du sol vue au travers de la quantification d'activités enzymatiques potentielles. Les enzymes présentes dans le sol proviennent de la sécrétion ou de la libération (par lyse) des cellules microbiennes, végétales, animales.

Enjeux environnementaux et politiques concernés : Les enzymes des sols sont impliquées dans les cycles biogéochimiques des éléments (C, N, P, S). Leurs activités, modulées par de nombreux facteurs, en font des indicateurs de la biodiversité fonctionnelle des sols (Caldwell 2005 ; Schimel *et al.* 2007).

Contexte scientifique et technique (normes, faisabilité, capacité d'interprétation) : Les activités anthropiques (pratiques culturales, contaminants organique et métalliques) ont des effets quantifiables sur les activités enzymatiques des sols. Le projet 'Bio-indicateurs' de l'ADEME donnera accès à un référentiel dès la fin 2011 (en fonction de l'usage et des principales propriétés des sols). Des méthodes normalisées permettent l'analyse des hydrolases (ISO 22939) en moyen-débit.

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : Travaillant sur sol sec, l'ensemble des sites des deux campagnes RMQS sera caractérisé. Pour chaque site, 3 aliquotes de 50 g de sol sec seront réhumidifiées et les activités enzymatiques seront réalisées en 4-plicats. Les enzymes envisagées sont l'arylsulfatase, les phosphatases, l'uréase, la galactosidase et les laccases.

Chiffrage de la mesure

Opérations de terrain = pas d'opération supplémentaire
Conservatoire des Sols (Orléans):

- préparation des échantillons : RMQS 1 = 25 € (re-préparation à partir des stocks); RMQS 2 = 23 € (préparation de routine pour les analyses physicochimiques)

- petit matériel et fonctionnement = 2 € / éch

Unité PESSAC :

- petit matériel et fonctionnement = 1 €

- investissement = 4,55 € [lecteur multiplaques 20 k€ à prévoir d'ici 4 ans]

- coût analytique = 6 € [ArylS, Phosphatase, Uréase, Galactosidase, laccase]

- main d'œuvre = 19 € [0,25 pers. j⁻¹.site⁻¹ et salaire mensuel CDD TR = 2231 €]

Total : RMQS1 = 57,55 € par site ; RMQS2 = 55,55 € par site

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) : Les réponses enzymatiques aux différentes contraintes naturelles et perturbations anthropiques seront documentées et comparées au référentiel établi dans le programme « Bio-indicateur ». La prise en compte des 2 campagnes RMQS permettra de renseigner l'activité métabolique des sols en fonction de l'évolution des paramètres liés aux MOS. Elles pourraient être intégrées dans des modèles de flux de minéralisation des pools de MOS.

Opérateurs pressentis : L'unité PESSAC (UR251) a les capacités analytiques et scientifiques permettant la réalisation des activités proposées.

ISO/TS 22939 Qualité du sol - Mesure en microplaques de l'activité enzymatique dans des échantillons de sol en utilisant des substrats fluorogènes.

Caldwell, 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. Pedobiologia 49, 637-644

Schimel et al., 2007. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. Ecology 88, 1386-1394

3.2.1.5 Suivi de la végétation

Objectif : Chiffrer le coût d'un suivi du cortège floristique sur les sites en prairie permanente et/ou en pelouses naturelles

3.2.1.5.1 Bilan des relevés réalisés sur le RMQS1

Objectifs initiaux : caractériser la végétation des sites de manière rapide (1 heure max par site) sur tous les sites possédant une végétation naturelle. Le relevé a été réalisé par un opérateur le jour de la mise en place du site. La moitié des sites du réseau (environ 1100) ont fait l'objet d'un relevé (Figure 13).

Méthodes utilisées :

Sur les sites RMQS, une méthode mise au point par le Cemagref (Chevalier *et al.*, 2000) a été utilisée, censée permettre une évaluation rapide de la richesse et de la diversité végétale : relevé de distances à la n^{ème} espèce sur de petites surfaces variables. La méthode a été réévaluée à mi-parcours et complétée par un relevé exhaustif dans un rayon d'un mètre. Cette méthode concerne 546 sites.

Sur les sites RMQS-Biosoil, les relevés ont été réalisés selon la méthode préconisée par le manuel Biosoil : un relevé exhaustif sur la surface du dispositif de 400 m². Cela concerne 557 sites.

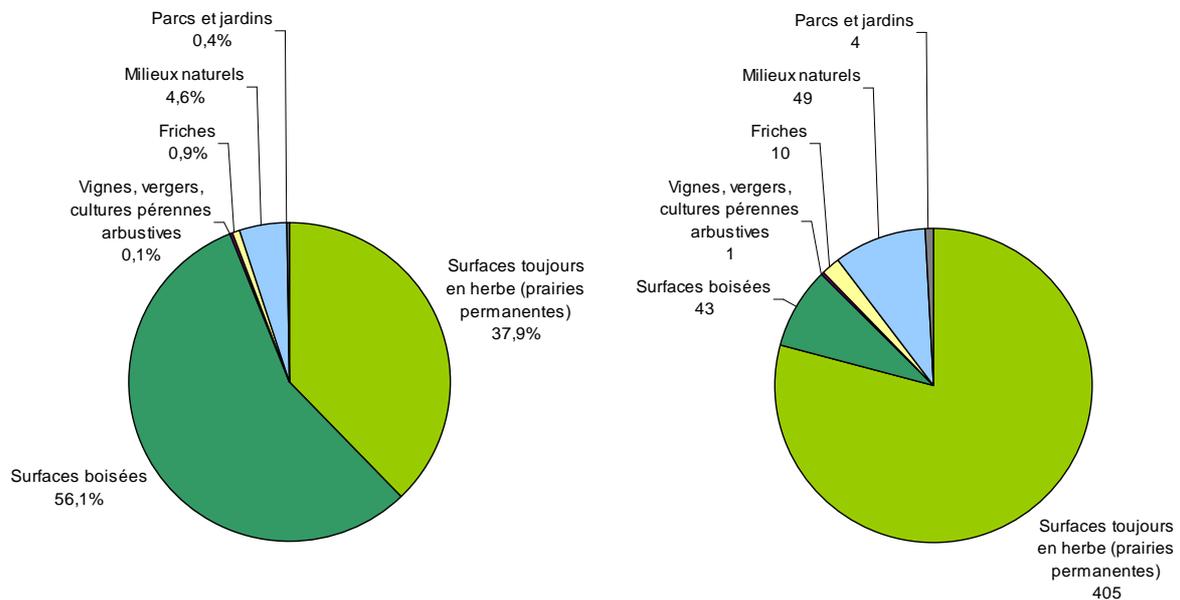


Figure 13 - Sites ayant fait l'objet d'un relevé floristique par catégorie d'occupation. A gauche : pourcentages en tenant compte de tous les relevés (n=1102) ; à droite : effectifs en ne considérant que les sites RMQS (n=546)

Points forts

- la position des sites sur la grille systématique permet de ne pas biaiser la représentativité nationale, contrairement aux relevés réalisés généralement qui ont tendance à favoriser les milieux connus pour leur richesse et leur biodiversité
- de nombreuses données sont associées aux relevés (description du sol, de l'environnement, pratiques culturales, analyses de sols, etc.) ce qui n'est pas le cas de la plupart des relevés réalisés par ailleurs, d'où un fort potentiel d'analyse des déterminants de la diversité floristique ou d'utilisation de ces données comme facteur explicatif de la variabilité des autres paramètres mesurés (diversité microbienne par exemple)
- Les relevés couvrent actuellement tous les sites possédant une végétation naturelle ou semi-naturelle : prairies permanentes de plus de 10 ans, forêts, milieux naturels divers (pelouses alpines, landes, fruticées, végétation de bord de mer, etc.)

Points faibles

- la méthode utilisée sur les sites RMQS n'est pas une méthode classique de relevé floristique et a évolué durant la campagne
- un grand nombre d'opérateurs ont participé aux relevés, de compétence variable

- la mise en place des sites est déterminée par le choix d'une période d'intervention favorable aux prélèvements de sols (sol humide, pas de culture trop haute) ce qui n'est pas toujours compatible avec la réalisation d'un relevé floristique de qualité (absence de certaines plantes notamment)
- aucun relevé n'a été réalisé dans les sols cultivés pour suivre la flore adventice des cultures

Utilisation des relevés botaniques RMQS1 :

La base de données des relevés botaniques du RMQS est actuellement utilisée dans deux projets.

DIVGRASS : diversité végétale et fonctionnement des prairies permanentes

Résumé du projet : DIVGRASS propose de synthétiser des données existantes sur la diversité végétale et le fonctionnement des Prairies Permanentes (PP) de France. Les PP qui représentent une valeur économique, biologique et culturelle indéniables sont en nette régression depuis plusieurs décennies dans notre pays et en Europe. L'objectif de DIVGRASS est de combiner l'information existante issue de bases de données régionales et nationales sur la distribution, la climatologie et la diversité végétale des PP. Le croisement des informations taxonomiques et de végétation avec les bases de données de traits fonctionnels végétaux constitue un volet important du projet. La synthèse proposée permettra d'aborder les questions suivantes: comment les patrons de diversité sont-ils organisés le long des gradients d'utilisation des terres et de climat ? Quelles sont les relations entre diversité fonctionnelle et propriétés des écosystèmes ? Comment mieux prendre en compte les patrons de diversité fonctionnelle dans les modèles de fonctionnement biogéochimique ? La nécessité de combiner des données hétérogènes pour répondre à ces questions servira de base pour identifier les points de blocage et avancées requises pour intégrer et distribuer largement les informations relatives à la diversité des PP. DIVGRASS regroupe des experts en écologie des prairies, en science du sol et en modélisation écosystémique. Il est également un lieu d'échange et d'intérêt réciproque pour les chercheurs et les experts en charge de l'inventaire et de la gestion des habitats prairiaux, des habitats pour lesquels les enjeux de connaissance et de conservation sont particulièrement importants. DIVGRASS est conçu de telle manière qu'il puisse jouer un effet d'entraînement pour de nouveaux projets interdisciplinaires sur l'écologie des PP en France. Dans ce projet, InfoSol fournira la base de données des relevés floristiques du RMQS et des données pédologiques issues des bases de données IGCS, RMQS et BDGSF.

Partenaires du projet : CNRS-INEE, France ; INRA, France ; Institut National Polytechnique de Lorraine, France ; Université Paul Cézanne, France ; Université de Caen Basse Normandie, France ; CEA Saclay, France ; Université Paris-Sud 11, France ; Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Allemagne ; Jena, INRA, France ; Fédération des conservatoires botaniques nationaux, France

<http://www.cesab.org/images/projets/fiches2010/divgrassfr.pdf>

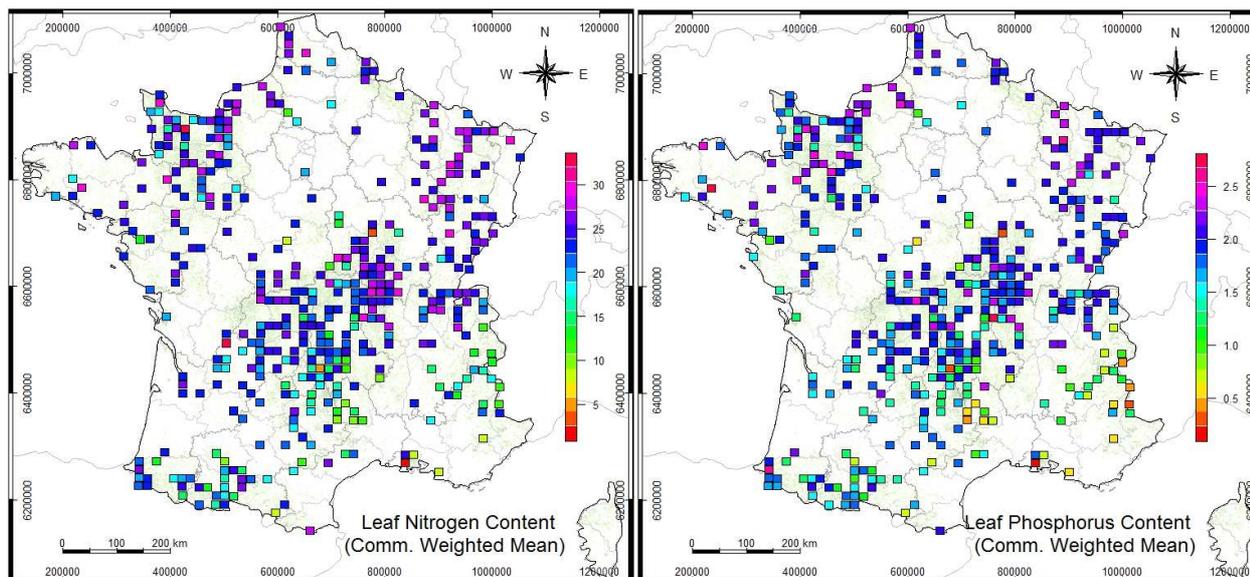


Figure 14 - Exemple de traits fonctionnels pouvant être calculés et cartographiés sur les sites RMQS à partir des relevés floristiques. A gauche : teneur foliaire en azote ; à droite : teneur foliaire en phosphore.

Mise en relation des données existantes de diversité floristique et de diversité des communautés bactériennes du sol au sein du RMQS

Résumé du projet : Dans le cadre du programme ANR ECOMIC-RMQS (Coord. L. Ranjard), des données d'écologie microbienne du sol (biomasse moléculaire, abondance et structure des communautés bactériennes) ont été obtenues sur les 2200 sites du RMQS. Ces sites se répartissent en termes d'occupation des sols en 1/3 de grandes cultures, 1/3 de prairies et 1/3 de forêts. Sur les sites prairiaux, des relevés de flore ont été réalisés durant la première campagne RMQS par l'unité InfoSol et ses partenaires. Sur les sites forestiers, des relevés de flore ont été réalisés par l'Inventaire Forestier National dans le cadre du projet BioSoil. **Nous proposons dans ce projet d'exploiter ces données floristiques dans le but de les mettre en relation avec les données microbiologiques du sol.** En effet la diversité et l'assemblage des communautés microbiennes dans les sols résultent à la fois des caractéristiques édaphiques (une des sorties du projet ECOMIC-RMQS) mais aussi d'autres facteurs comme les facteurs biotiques correspondant au couvert végétal. Cette analyse des données obtenues dans le cadre du projet ECOMIC-RMQS sous le regard de la mise en relation de la diversité végétale et de la diversité microbienne reste à faire. A ce jour, peu d'études de cette envergure en termes de nombre de sites et de diversité de situations ont été réalisées et l'hypothèse de la relation directe entre diversité végétale et diversité biologique des sols reste à démontrer à l'échelle des communautés d'espèces. Pour atteindre cet objectif, nous proposons d'associer les compétences d'InfoSol et de l'UMR Agroécologie 1347 (INRA Dijon) en termes de biostatistiques, de botanique, d'écologie végétale et microbienne.

Partenaires du projet : UMR 1347 Agroécologie – INRA Dijon ; US 1106 InfoSol – INRA Orléans

3.2.1.5.2 *Recommandations pour le RMQS2*

- L'intérêt d'un suivi de la flore sur les sites RMQS est justifié en soi et comme source de données pour interpréter les variables mesurées dans les sols (déterminant potentiel de la variabilité)
- Une réflexion sur les méthodes de relevé qu'il faudrait adopter sur le RMQS en fonction des milieux pour permettre un suivi de qualité devrait être menée en lien avec des spécialistes de la question
- La réalisation des relevés devrait être dissociée temporellement des prélèvements de sol car les conditions optimales requises pour ces deux opérations sont fondamentalement différentes
- Le recours à une structure possédant les compétences reconnues en botanique et du personnel dédié au suivi des milieux naturels devrait être envisagé (Conservatoires botaniques par exemple)
- L'intérêt et la faisabilité de relevés en sol cultivé devraient être évalués, la flore adventice des cultures étant un compartiment particulièrement sensible de la biodiversité végétale
- Le chiffrage d'une telle opération ne sera possible qu'en ayant au préalable répondu aux points précédents.

3.2.2 *IMPACT DES PRATIQUES AGRICOLES ET FORESTIÈRES SUR LA QUALITÉ PHYSIQUE DES SOLS*

Les caractéristiques physiques des sols conditionnent grandement sa résistance au tassement, les émissions de GES et l'infiltration de l'eau. Les paramètres mesurés sur la première campagne ne permettent pas d'intégrer cet aspect. La possibilité d'intégrer de nouvelles mesures a donc été étudiée au travers des deux points suivants :

1. Réaliser une analyse des déterminants de la stabilité structurale dans les bases de données déjà acquises et de la performance des FPT (fonctions de pédotransfert) afin de juger de l'utilité de proposer un test en routine sur les sites du RMQS. Si le test de stabilité est nécessaire, son coût sera évalué.
2. Analyser et chiffrer la possibilité de réaliser des mesures de masse volumique apparente, de densité texturale et de teneurs en éléments grossiers sur 30-50 et au-delà.

3.2.2.1 **Stabilité structurale**

Objectif : Réaliser une analyse des déterminants de la stabilité structurale dans les bases de données déjà acquises et de la performance des FPT (fonctions de pédotransfert) afin de juger

de l'utilité de proposer un test en routine sur les sites du RMQS. Si le test de stabilité est nécessaire, son coût sera évalué.

Ce travail a été réalisé en deux étapes : une analyse des données existantes puis un chiffrage de la mise en œuvre de cette mesure sur le RMQS.

L'analyse des données existantes a mobilisé une équipe conséquente de spécialistes de la question et a conduit à la publication d'un article dans « Etude et Gestion des Sols » (Chenu *et al.*, 2011). Les principales conclusions sont reprises ci-après.

Pour établir des relations statistiques entre caractéristiques constitutives des sols et stabilité de la structure, nous avons mis en place une base de données de stabilité structurale (AGRESTA). Elle est constituée des analyses de 480 échantillons de sols, provenant essentiellement de l'horizon de surface de sols métropolitains (dont 80 issus de la pédothèque du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols), ayant des textures variées (bien que centrées autour des textures limoneuses), des teneurs en C, pH, teneurs en CaCO₃ variées et qui sont sous des usages divers. Trois tests de stabilité structurale ont été appliqués (Le Bissonnais, 1996), afin de rendre compte du comportement du sol dans les différentes conditions climatiques et hydriques que l'on peut rencontrer à la surface du sol : (i) humectation rapide (immersion d'agrégats secs dans l'eau), (ii) réhumectation lente (humectation à l'eau par capillarité), (iii) désagrégation mécanique (agitation dans l'eau d'agrégats préalablement humectés dans l'éthanol). La granulométrie des produits de la désagrégation est ensuite déterminée par tamisage ou par granulométrie laser. Les résultats sont exprimés sous la forme de Diamètre Moyen Pondéré (DMP, exprimé en mm). Une relation statistique reliant la stabilité de la structure à la constitution des sols, en particulier à leur teneur en carbone organique (C), a été développée, cependant sa faible capacité prédictive ne permet pas de l'utiliser comme fonction de pédotransfert. Ces relations ont été et pourront sans doute encore être améliorées en les stratifiant par exemple en fonction de l'usage ou de la texture des sols. Elles permettront de simuler l'impact sur la stabilité structurale d'un changement de teneur en MO et de servir de base à des préconisations. Ce type d'outil peut permettre, pour des sols sensibles à la battance, de fixer des teneurs-seuil en C par rapport à cette propriété et d'évaluer l'intérêt d'un relèvement de la teneur en matières organiques des sols par des pratiques appropriées. Ce travail a des implications méthodologiques : les conditions de prélèvement et les conditions climatiques récentes ont une forte influence sur la stabilité structurale. L'impact des premières peut être réduit par l'utilisation de la fiche de prélèvement et de préparation proposée et sera incorporé dans la future version de la norme AFNOR. L'effet des conditions climatiques apparaît plus complexe à appréhender et fait l'objet actuellement de travaux dédiés. L'utilisation dans ce projet des trois tests de stabilité structurale proposés par Le Bissonnais (1996) et la mesure directe de la mouillabilité et de la cohésion (Cosentino *et al.*, 2006, 2010, Cosentino, 2006) montrent que les matières organiques agissent par différents mécanismes simultanés sur la stabilité structurale. Une perspective opérationnelle est la possibilité d'utiliser un seul des trois tests de la norme AFNOR, en choisissant le plus représentatif des conditions expérimentées au champ.

Il s'avère donc *in fine*, que les bases de données disponibles ne permettent pas en l'état l'établissement de fonctions de pédotransfert performantes. Par conséquent, la mise en œuvre du test de stabilité structurale sur le RMQS permettrait d'une part d'acquérir des données directement utilisables sans passer par une fonction de pédotransfert, et d'autre part permettrait également d'alimenter le référentiel d'interprétation donc d'améliorer à terme la capacité prédictive d'une fonction de pédotransfert. Un chiffrage de cette mesure a donc été réalisé dans un second temps.

Étude et chiffrage réalisés par Yves Le Bissonnais (UMR LISAH Montpellier) et InfoSol

Type de détermination : Mesure de la stabilité d'agrégats de sols pour l'évaluation de la sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique par la méthode normalisée NF X 31-515 et ISO/DIS 10930 avec le test d'immersion seul ou avec les 3 tests proposés.

Enjeux environnementaux et politiques concernés : Il s'agit d'une des seules méthodes de mesure normalisée, et facilement applicable dans le cadre du RMQS, portant sur la qualité physique des sols. Sa pertinence pour de nombreuses questions environnementales est avérée : évaluation de la sensibilité à la battance (risque de ruissellement), de l'érodibilité, du tassement, évaluation de l'effet de l'utilisation des matières organiques pour améliorer les sols, etc.

Contexte scientifique et technique (normes, faisabilité, capacité d'interprétation) : Méthode déjà appliquée sur un sous-échantillon du RMQS1, et dans le cadre de nombreux projets scientifiques. Normalisée Afnor depuis 2005 et à l'étape finale de normalisation ISO/DIS. Applicable en version allégée avec le test d'immersion seul ou avec les 3 tests proposés. Nombreuses références et grille d'interprétation en terme de battance, ruissellement et érosion.

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : Mesures possibles sur sols archivés et RMQS2. Mesure à faire sur les horizons de surface de sols cultivés, peu caillouteux ($EG < 40\%$), et non sableux (fraction sable $< 75\%$), soit environ 800 sites potentiels.

Chiffrage de la mesure :

Opérations de terrain = non

Conservatoire des Sols (Orléans):

- Préparation d'agrégats de 3 et 5 mm par tamisage (15 à 50 g), enregistrement = 18 €/éch

- Petit matériel, fonctionnement, livraison au laboratoire = 2 €/éch

Mesure de stabilité structurale : 20 à 60 € par échantillon selon le nombre de tests retenus (1 à 3)

Total : 40 € par site pour 1 test, 80 € par site pour 3 tests

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) : Diagnostic de la sensibilité à la battance, du risque de ruissellement et d'érosion ; évaluation des besoins en apport de MO pour atteindre un état physique satisfaisant, évaluation de l'impact des usages des sols et des pratiques agricoles sur les sensibilités sus-mentionnées.

Opérateurs pressentis : Laboratoire de la CDA du Loiret

3.2.2.2 Mesures physiques profondes

Objectifs : Analyser et chiffrer la possibilité de réaliser des mesures de masse volumique apparente, de densité texturale et de teneurs en éléments grossiers sur 30-50 et au-delà. Ces paramètres, s'ils s'avèrent pertinents, permettront de mieux intégrer la dimension physique des sols notamment vis-à-vis des propriétés hydriques.

Remarque préalable : si l'on souhaite caractériser les propriétés hydriques des sols, la mesure de la réserve utile s'avère indispensable. Nous avons donc intégré ce paramètre dans les chiffrages.

Études et chiffrages réalisés par Isabelle Cousin (UR Sols INRA Orléans) et InfoSol

Type de détermination : Détermination de la Masse Volumique Apparente (MV) et de la densité texturale des horizons profonds.

Enjeux environnementaux et politiques concernés :

La masse volumique apparente est le paramètre de référence pour estimer des stocks à partir de mesures locales de concentration (-> calcul des stocks de carbone, calcul des stocks d'éléments en trace). C'est également un indicateur de l'état de tassement et de dégradation structurale des sols.

La mesure de la densité texturale permet de connaître la masse volumique de l'assemblage élémentaire des particules. La comparaison des données de masse volumique macroscopique et de densité texturale peut permettre d'apprécier les tassements.

Contexte scientifique et technique (normes, faisabilité, capacité d'interprétation) :

La difficulté de la mesure de la masse volumique réside dans l'échantillonnage : il s'agit de prélever des volumes de sol sur des fosses, soit dans des cylindres, soit en creusant une cavité dont on mesure le volume (méthode du densitomètre à membrane, méthode au sable ou à l'eau).

La mesure de la densité texturale est réalisée au laboratoire, sur des agrégats de sol tamisés à 2 mm séchés (poussée d'Archimède dans du pétrole).

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : Les données n'ont pas été acquises sur la première campagne.

Sur chaque fosse, une répétition de trois mesures de la masse volumique est nécessaire par horizon. Si le milieu est très caillouteux, on pourra ne pas réaliser la mesure de la masse volumique (difficulté d'échantillonnage et faible probabilité de tassement profond).

L'échantillonnage pour la mesure de la densité texturale ne nécessite pas de précaution particulière.

Chiffrage de la mesure :

1. Masses volumiques apparentes

Opérations de terrain : suppose l'ouverture d'une fosse pédologique

- prélèvements de 3 échantillons au-delà de 50 cm (1h30) = 150 €

- envoi des échantillons au conservatoire : 10 €

Conservatoire des Sols (Orléans):

- mesures de teneur en eau, DA et EG (1h) = 17 € (2 mois CDD)

- Petit matériel et fonctionnement = 2 €

Total = 179€ par site

2. Densités texturales

Opérations de terrain = non

Conservatoire des Sols (Orléans):

- séparation d'agrégats de 2 à 3 mm sur sol sec (1h) = 17 €

Mesure au pétrole = à évaluer

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) :

Dans les horizons profonds, la masse volumique apparente varie peu à l'échelle de la décennie. Dans les horizons plus superficiels, elle est très liée au système de culture et aux itinéraires techniques et peut varier à une échelle infra-annuelle.

La densité texturale est fonction essentiellement de la granulométrie et devrait être stable dans le temps.

Opérateurs pressentis :

Pour le prélèvement : partenaires formés par InfoSol au prélèvement non destructif

Pour la mesure de la masse volumique apparente : mesure réalisée au conservatoire

Pour la mesure de la densité texturale : technicien en physique du sol

Type de détermination : Détermination de la teneur en cailloux et de leur réserve utile (RU) sur chaque horizon de sol.

Enjeux environnementaux et politiques concernés : Environ un tiers des sols français contient une proportion non négligeable d'éléments grossiers (sols caillouteux). Ces éléments grossiers présentent des propriétés spécifiques (et inconnues pour la plupart), différentes de celles de la terre fine sur laquelle sont conduites les analyses. Il convient donc, au minimum, de connaître la proportion de ces éléments spécifiques, afin de ne pas

leur affecter par défaut des propriétés de la terre fine. En outre, la connaissance de la RU des éléments grossiers permet une estimation optimisée de la RU des horizons.

Contexte scientifique et technique (normes, faisabilité, capacité d'interprétation) :

Une bonne estimation de la teneur en cailloux nécessite l'excavation de gros volumes de sol, représentatifs de l'horizon (de l'ordre de 20 à 30 kg). Ces volumes de sol doivent ensuite être lavés pour supprimer la terre fine et récupérer la phase caillouteuse dont on mesure le volume.

L'estimation de la RU sur les éléments grossiers peut être estimée par des fonctions de pédotransfert sur les sols de milieux sédimentaires à partir d'une simple connaissance de la masse volumique (Tétégan *et al.*, 2011). Par contre, pour d'autres lithologies, des études spécifiques sont à conduire.

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : L'estimation du volume de cailloux doit être réalisée sur les prélèvements du RMQS 2 (données insuffisantes sur RMQS1). Par contre, la RU des éléments grossiers peut être déterminée sur les cailloux actuellement stockés au Conservatoire. On ne s'intéresse, bien sûr, qu'aux horizons caillouteux.

Chiffrage de la mesure :

1. Teneur en EG :

Opérations de terrain : suppose l'ouverture d'une fosse pédologique

- prélèvement de 3 échantillons de 20 à 30 kg par site = 50 €
- envoi des échantillons au conservatoire : 30 €

Conservatoire des Sols (Orléans):

- Séparation des EG, séchage, pesées (1h20 /éch) = 67 € (=>8 mois de CDD)
- petit matériel et fonctionnement = 2 €

Total = 149 € par site

2. Mesure de la RU des EG: coût restant à évaluer

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) : Les résultats n'ont pas d'intérêt pour eux-mêmes mais sont nécessaires à la correction d'informations obtenues par ailleurs sur la terre fine (calcul de stocks, détermination de la masse volumique équivalente d'un horizon, réserve utile, etc) Ces données sont stables dans le temps.

Opérateurs pressentis :

Pour le prélèvement : partenaires formés par InfoSol au prélèvement non destructif

Pour la détermination de la proportion d'EG par horizon : le travail sera réalisé par le conservatoire des sols

Pour la détermination de la réserve utile : technicien en physique du sol (SAS Laboratoires, UR Sols, etc.)

Remarque : des tests d'utilisation de méthodes géophysiques pour estimer la teneur en EG sur le terrain ont été réalisés en milieu sédimentaire par l'UR Sol (thèse de M. Tétégan). Ces tests ont donné des résultats prometteurs. D'autres essais menés dans des milieux variés (cristallin, métamorphique, volcanique, etc.) permettraient d'élargir le domaine d'application de ces fonctions de pédotransfert, et pourraient s'appuyer sur la diversité des sols du RMQS, avant une utilisation en routine sur l'ensemble du réseau.

Type de détermination : Détermination de la Réserve Utile (RU) des horizons de sol.

Ce paramètre représente la quantité d'eau maximale stockée dans le sol et accessible aux plantes.

Enjeux environnementaux et politiques concernés : Les transferts d'eau dans les sols sont les moteurs du déplacement des substances particulières ou dissoutes dans les sols (déplacement de particules -> érosion ; transfert de molécules potentiellement polluantes -> nitrate, produits phytosanitaires, etc.). Sur de grands ter-

ritoires, les modèles agro-environnementaux utilisent, pour leur module de transfert, la réserve utile comme paramètre synthétique de description des propriétés hydriques des sols (cas du modèle STICS à l'INRA, ou des modèles utilisés par les professionnels - ClimV2 à Arvalis par exemple). Actuellement, il n'existe pas de carte de la RU à l'échelle nationale et les modèles sont renseignés, à dire d'experts, avec de très grandes incertitudes.

Contexte scientifique et technique (normes, faisabilité, capacité d'interprétation) : La réserve utile est bornée par deux valeurs : la teneur en eau à la capacité au champ, et la teneur en eau au point de flétrissement. La teneur en eau au point de flétrissement dépend essentiellement de la teneur en argile et en matière organique de chaque horizon. L'estimation de cette valeur à l'échelle nationale pourrait donc être calculée en fonction de ces deux paramètres par des fonctions de pédotransfert (à mettre au point dans le cadre d'une étude ciblée, en utilisant, notamment la base de données PEPSOL de l'INRA).

La teneur en eau à la capacité au champ peut être assimilée à la teneur en eau à un potentiel matriciel de -100 hPa. On peut réaliser cette mesure au laboratoire par la méthode des presses à membrane de Richards sur des échantillons de sol frais non perturbés. Ce dernier point est important et nécessite des précautions au prélèvement, au transport et au stockage (chambres froides).

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : Pour chaque horizon de sol, l'expérimentateur sous-échantillonne, au laboratoire, 8 à 12 mottes de taille décimétrique. Celles-ci sont placées dans une presse à membrane de Richards pendant une durée minimale de 5 jours, avant d'être pesées à l'état humide, puis séchées et pesées à l'état sec. Le laboratoire de mesure doit être climatisé et fournir des résultats à 20°C. Les échantillons séchés et archivés du RMQS 1 sont impropres à la réalisation de cette mesure. Tous les sites doivent faire l'objet de cette détermination, et, pour chaque site, chaque couche doit être échantillonnée (prélèvement de 4 horizons par site sur la fosse).

Chiffrage de la mesure :

Opérations de terrain : suppose l'ouverture d'une fosse pédologique

- prélèvement de 4 échantillons non perturbés (40 minutes) : 60 €

- envoi au laboratoire d'analyse : 10 €

- petit matériel (boîtes de prélèvement) = 4 €

Coût analytique = 22,70 € x 4 échantillons par site = 91 € (en cours de négociation avec le SAS laboratoire)

Total = 165 € par site

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) :

Les résultats obtenus seront : teneur en eau à la capacité au champ, teneur en eau au point de flétrissement. En associant ces paramètres à la masse volumique apparente de chaque horizon, on pourra déterminer la Réserve Utile de chaque horizon, et de chaque profil de sol. Aucun seuil n'est prévu a priori. La teneur en eau au point de flétrissement est stable au cours du temps. La teneur en eau à la capacité au champ et la masse volumique apparente peuvent évoluer en fonction du système de culture (pas de temps actuellement inconnu, mais probablement de l'ordre de la décennie au minimum).

Opérateurs pressentis :

Pour le prélèvement : technicien formé au prélèvement d'échantillons non perturbés par InfoSol (partenaire)

Pour les mesures : technicien en physique du sol formé par l'UR SOLS (SAS Laboratoire, par exemple).

Remarque : une piste à creuser serait d'évaluer la possibilité de combiner plusieurs indicateurs de la qualité physique des sols en une seule mesure. Isabelle Cousin (UR Sols Orléans) propose dans cette optique de mettre en œuvre **une mesure de la rétention en eau à -10 kPa sur un cylindre de sol non perturbé**. Cette mesure donnerait accès à 6 indicateurs :

- échantillon non perturbé -> permet une estimation qualitative de la **structure de l'horizon**
- prélèvement en cylindre -> permet la mesure de la **masse volumique apparente**, de la **porosité totale** et de la **packing density**.
- mesure de la teneur en eau à -10 kPa -> permet une estimation de la **borne haute de la réserve utile** - que, de façon générale, on peut effectivement fixer à pF 2 - et donc de la **réserve utile**, si on calcule la limite basse, c'est-à-dire la teneur en eau au point de flétrissement permanent (pF 4,2), par une fonction de pédotransfert. En effet, comme la valeur au point de flétrissement ne dépend presque que de la texture, des FPT sont opérationnelles pour l'estimer. Évidemment, cela suppose de connaître la granulométrie de l'échantillon, que l'on mesure par ailleurs sur les échantillons composites.

3.2.3 CARBONE ET FLUX DE GES (GAZ À EFFET DE SERRE)

Les sols ont un rôle crucial vis-à-vis du changement climatique puisqu'ils peuvent être une source ou un puits de GES. Les paramètres mesurés lors de la première campagne sont jugés incomplets pour pouvoir estimer ce rôle. Afin d'améliorer la pertinence du réseau, nous avons évalué 3 points :

1. Tester l'apport d'indicateurs permettant une meilleure approche/modélisation des changements et notamment d'évaluer par simulation le gain potentiel qu'il y aurait à quantifier une fraction labile du carbone organique (fraction > 50 μm). Si de tels indicateurs sont jugés pertinents, un chiffrage sera proposé pour leur mise en œuvre.
2. Évaluer l'intérêt de mesurer les stocks de C sur des horizons plus profonds (50-100 cm) et le chiffrer.
3. Analyser l'intérêt et la faisabilité d'utiliser des marqueurs moléculaires de gènes fonctionnels bactériens et/ou des marqueurs enzymatiques du cycle de l'azote et /ou le développement de tests de réduction de N₂O en N₂ (lien avec les émissions de N₂O du sol). La pertinence, la précision et les coûts afférents de chaque option seront discutés et les coûts seront estimés.

3.2.3.1 Fraction labile du carbone organique

De nombreuses études ont démontré des corrélations entre compartiments ou des groupes de compartiments de RothC et le carbone contenu dans certaines fractions issues méthodes de fractionnement d'échantillons de sol (voir des revues complète dans von Lützow *et al.*, 2006 ou plus récemment dans Peltre, 2010). Parmi celles-ci, la méthode de Balesdent (1996), proposée pour le RMQS, établit une bonne correspondance, pour un sol sous culture de maïs, entre le compartiment RPM et la fraction MOP. D'autres procédés et schémas d'analyse des résultats de fractionnement ont été proposés ultérieurement et présentent l'avantage d'estimer les tailles des autres compartiments. C'est le cas de la méthode proposée par Zimmermann *et al.* (2007). Les auteurs démontrent une excellente corrélation des tailles mesurées (par fractionnement) des compartiments BIO et HUM avec celles prédites par RothC à l'équilibre et une corrélation significative mais moins bonne que pour BIO et HUM pour RPM, DPM et IOM.

La forte sensibilité de RothC à l'estimation du compartiment RPM et les résultats déjà obtenus (Balesdent, 1996) avec la méthode proposée pour le RMQS plaident pour la réalisation de tests d'ajustement entre les dynamiques du C total avec et sans initialisation du compartiment RPM via la mesure des MOP. Reste cependant à régler la question de l'initialisation des autres compartiments même si certaines méthodes sont couramment utilisées (pour le compartiment IOM par exemple à l'aide de la méthode de Falloon *et al.*, 1998, assez discutée cependant, voir Xu *et al.*, 2011) existent. Ce travail n'a malheureusement pas pu être réalisé dans les délais impartis.

Études et chiffrages réalisés par Claire Chenu (UMR Bioemco INRA Grignon) et InfoSol

Type de détermination : Fractionnement granulométrique et densimétrique proposé par Balesdent *et al.* (1991), qui a un potentiel important, déjà validé pour des sols limoneux de grande culture. Permet d'accéder à une fraction labile des MO du sol. La méthode a déjà été appliquée sur 21 sites du RMQS. Elle a été normalisée sous la référence AFNOR NF X 31-516.

Enjeux environnementaux et politiques concernés : Stockage du carbone organique dans les sols et évolutions des stocks sur les sites RMQS liés au climat, aux modes de gestion, aux changements d'occupation et aux propriétés des sols.

Contexte scientifique et technique (normes, faisabilité, capacité d'interprétation) : La caractérisation de la répartition du carbone organique des sols (COS) total dans différents compartiment définis d'un point de vue fonctionnel est cruciale pour appréhender (notamment par modélisation) la dynamique du COS. De nombreuses méthodes de fractionnement et de compartimentation ont été proposées, comme par exemple celle de Balesdent *et al.* (1991). De nouvelles méthodes sont apparues récemment et reposent sur l'estimation inverse des compartiments à partir de la mesure des émissions de CO₂.

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : Étant donné le coût global élevé de la mesure des MOP sur les 2200 RMQS on pourrait envisager de se limiter dans un premier temps aux sols présentant des teneurs en C $\leq 2\%$, pour lesquels la pertinence du protocole a été démontrée. Dans un deuxième temps, ce protocole pourrait s'appliquer aux sols présentant des teneurs en C $> 2\%$, en étant particulièrement vigilant sur les méthodes de dispersions employées. La méthode est utilisable sur les échantillons stockés du RMQS1. Elle est envisageable sur ceux de la future campagne RMQS2.

Chiffrage de la mesure :

Opérations de terrain = pas d'opération spécifique

Conservatoire des Sols (Orléans):

- préparation de 150g de terre fine (pour 3 répétitions), quartage, enregistrement et livraison = 23 €/éch

- petit matériel et fonctionnement = 2 €/éch

Coût analytique = 80 € HT (SAS), 112 € HT (Célesta), 125 € HT (SADEF) selon la norme AFNOR NF X 31-516

(Les coûts proposés par les laboratoires seraient à négocier)

Total = 105 à 150 € par site

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) : Estimation des matières organiques particulières (MOP). L'estimation des MOP doit être assortie d'une méthode d'estimation des compartiments représentés par des modèles tels que RothC, sur une grande variété de sols.

Opérateurs pressentis : laboratoires privés SAS, SADEF ou Célesta.

3.2.3.2 Stocks de carbone des horizons profonds

La grande majorité des travaux portant sur la dynamique et la comptabilité du carbone organique dans les sols porte sur les couches les plus superficielles, le plus souvent sur de profondeurs allant de 15 à 30 cm de profondeur (Cf. analyse bibliographique réalisée dans le cadre du programme européen ENVASSO). Ceci peut se justifier par des arguments scientifiques (le C superficiel est a priori plus dynamique que le C profond) et logistiques/financiers (il est plus facile d'acquérir de nombreuses données en surface qu'en profondeur). Pourtant il est connu que :

- Le carbone profond peut représenter une part importante du C total (de 40 à plus de 80 %, selon diverses estimations).
- Le carbone profond est également susceptible de subir des minéralisations, par exemple sous l'effet de « priming effect ».
- L'adoption de certaines techniques ou de certains usages sont susceptibles de favoriser la séquestration du C en profondeur, et donc de façon a priori plus durable.

Le carbone présent dans les 30 premiers centimètres des sols de France a pu être récemment estimé à 3.260 ± 0.872 Milliards de tonnes (Martin *et al.*, 2011 ; Meersmans *et al.*, 2012) grâce aux données du RMQS. La Figure 15 montre la distribution de la profondeur maximale des sols des sites du RMQS. Sur les 1795 sites du RMQS dont la profondeur du sol est supérieure à 30 cm, la couche 30-50 cm contient 24.8% du carbone contenu dans la couche 0-50 cm.

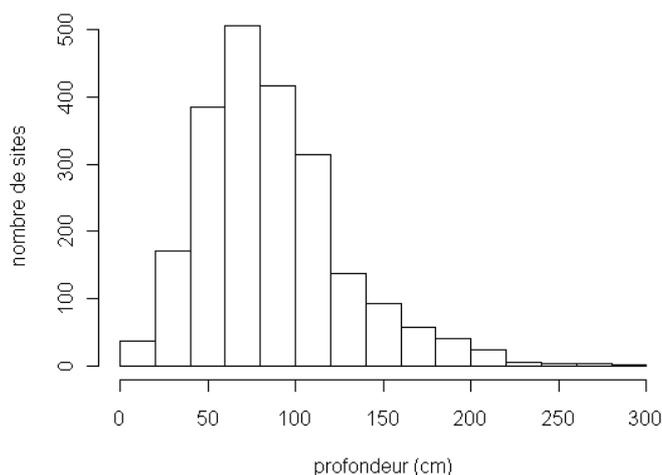


Figure 15 - Distribution de la profondeur maximale du dernier horizon observé sur les profils RMQS

Plus généralement, afin d'obtenir une première idée de la part de C contenue dans les sols de France, nous avons rassemblé l'ensemble des profils présents dans DoneSol qui disposaient de mesures de carbone en profondeur (Richer de Forges *et al.*, travaux en cours). Nous les présentons ci-après sous forme de « boîtes à moustaches » regroupées selon 1) les grands types

d'occupation des sols (Figure 16), 2) les grands types de sols (Figure 17 et Figure 18). Bien que les teneurs soient en règle générale décroissantes avec la profondeur, on constate que certains profils stockent des quantités considérables de C en profondeur. Certains développements pédogénétiques (comme par exemple les ANDOSOLS) stockent des quantités très fortes de carbone et sont de plus situés dans des situations pédogénétiques susceptibles d'une grande sensibilité au changement climatique.

Disposer d'une cartographie homogène de la répartition du carbone profond sur le territoire représente donc un enjeu majeur, tant en terme de protection des puits de carbone et de l'identification des situations susceptibles d'en stocker plus (et donc de gestion des flux de GES), que de comptabilité. A l'heure actuelle, cette cartographie homogène en termes de résolution n'est pas possible, dans la mesure où les données issues du programme IGCS dont nous disposons ne sont pas également réparties sur le territoire. Les prélèvements profonds réalisés dans le cadre du RMQS1 constituent donc une source précieuse pour mener cette cartographie, à la condition de les analyser. En tout état de cause, et en attendant les résultats issus de ces analyses, les travaux portant sur les profils IGCS devront être poursuivis afin de vérifier leur utilité et leur complémentarité en termes de cartographie. Ceux portant sur le carbone contenu dans la couche 30 à 50 cm peuvent être entrepris tout de suite. De même, un travail spécifique sur le stockage profond en forêt pourrait être initié à partir des données du programme BioSoil.

Chiffrage de la mesure du carbone organique sur les profils RMQS.

La mesure est proposée pour les 1650 sites du RMQS, sur lesquels 4245 échantillons d'horizons ont été collectés sur fosses pédologiques lors de la description des profils de sols durant la première campagne (Tableau 3). Les 550 autres sites font partie du réseau ICP forest niveau 1. Sur ces sites, on dispose déjà de deux jeux de données : des analyses réalisées en 1994-1995 (prélèvements par horizons sur profils de sols) et des analyses réalisées lors de la campagne Biosoil de 2006-2007 menée conjointement à la première campagne du RMQS (prélèvement composites à la tarière par couches selon des profondeurs fixes conformément au protocole européen : 0-10, 10-20, 20-40 et 40-80 cm).

Tableau 3 - Chiffrage de la détermination des teneurs en carbone sur les profils RMQS

Profils de carbone par horizons sur échantillons de fosses	€ HT
Quartage des échantillons (Conservatoire d'Orléans)	8,00
Prise en charge de l'échantillon (LAS)	3,33
Préparation (LAS)	4,55
Renvoi de l'échantillon après analyse (LAS)	0,72
Humidité résiduelle à 105°C	1,40
Carbone (C) organique et azote (N) total	5,25
Total par échantillon	23,25
Total pour les 4245 échantillons disponibles	98 696

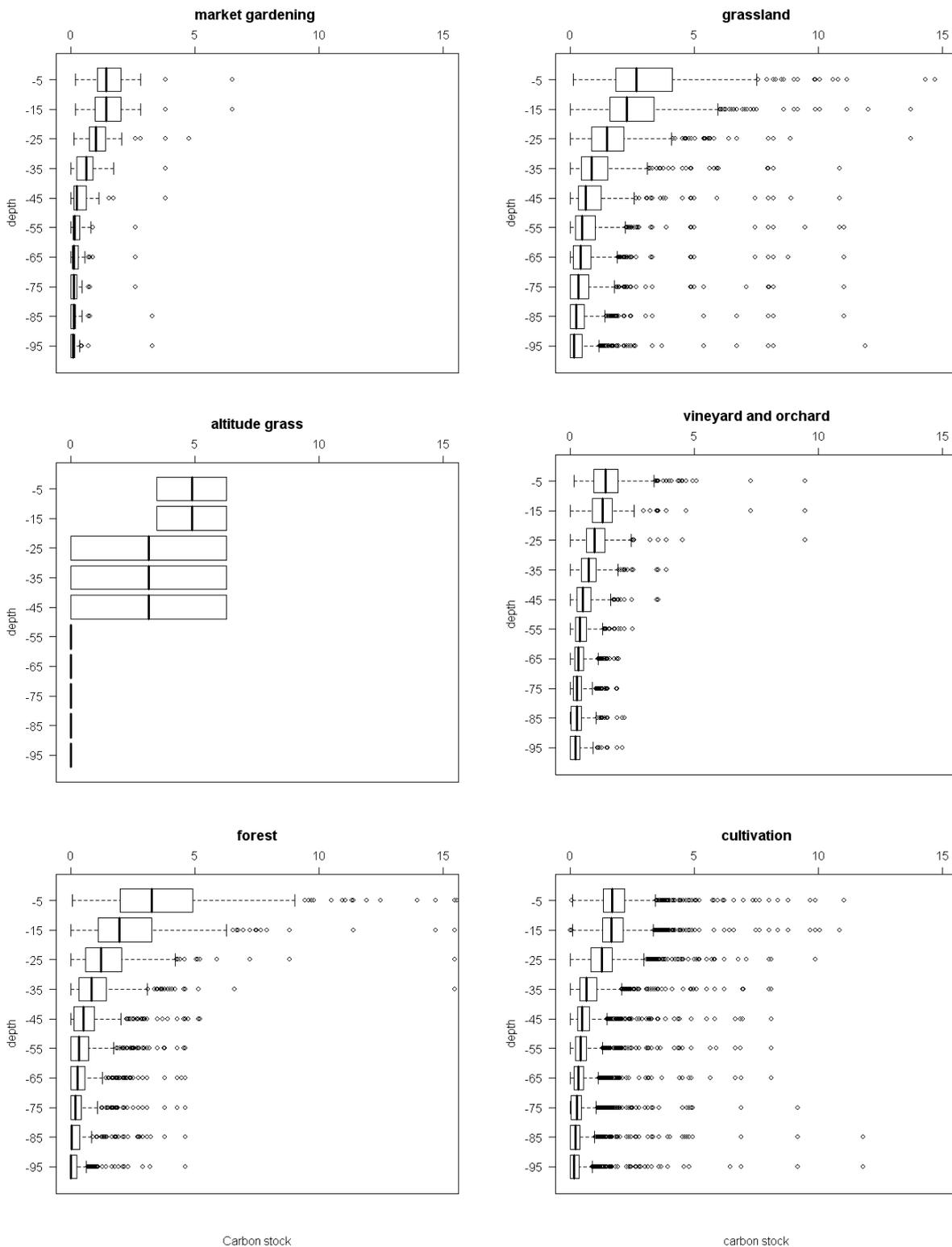


Figure 16 - Profils de carbone issus de la base de données DONESOL (IGCS) classés par catégorie d'occupation (teneurs en g/kg et profondeurs en cm)

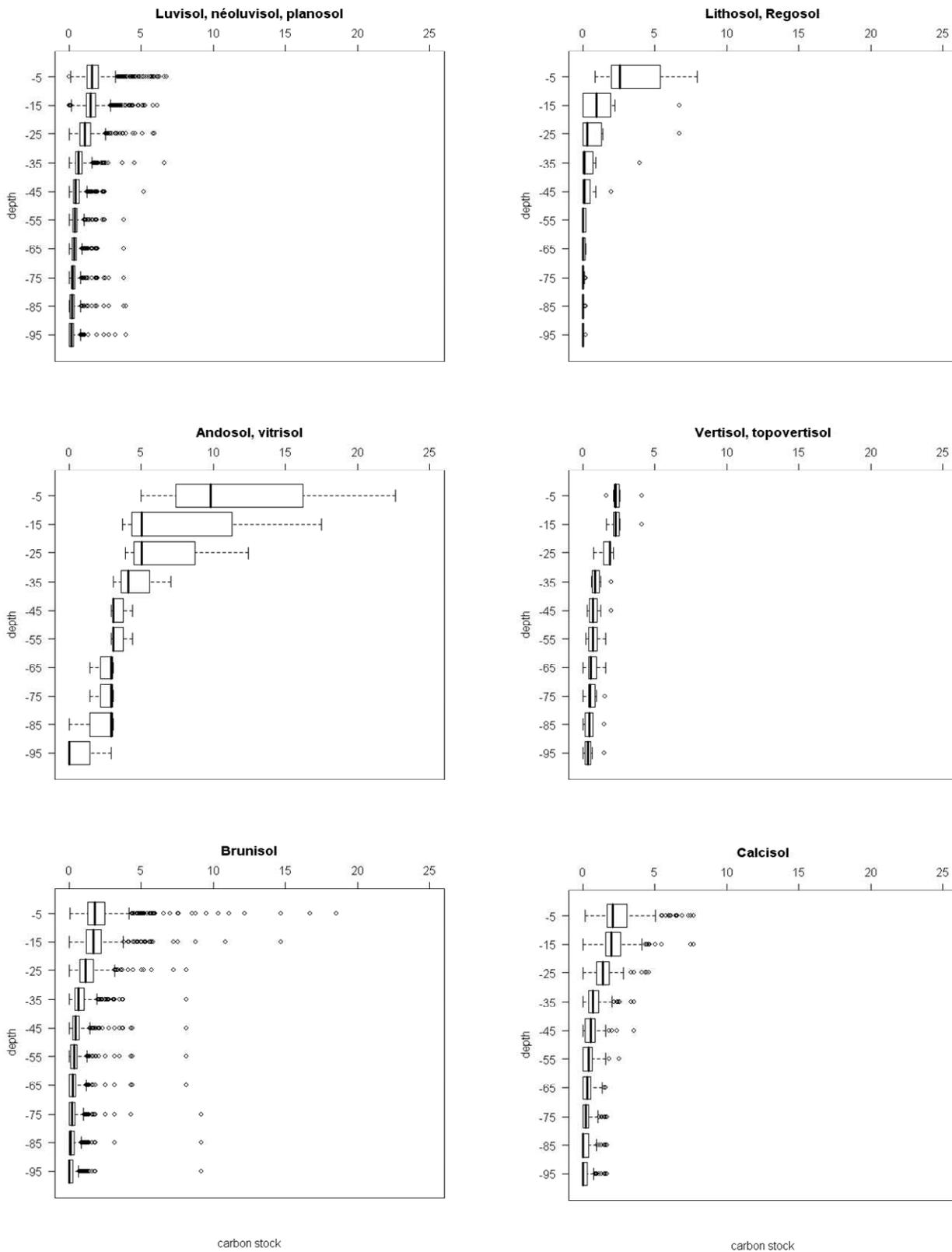


Figure 17 - Profils de carbone issus de la base de données DONESOL (IGCS) classés par types de sols (teneurs en g/kg et profondeurs en cm) – première partie

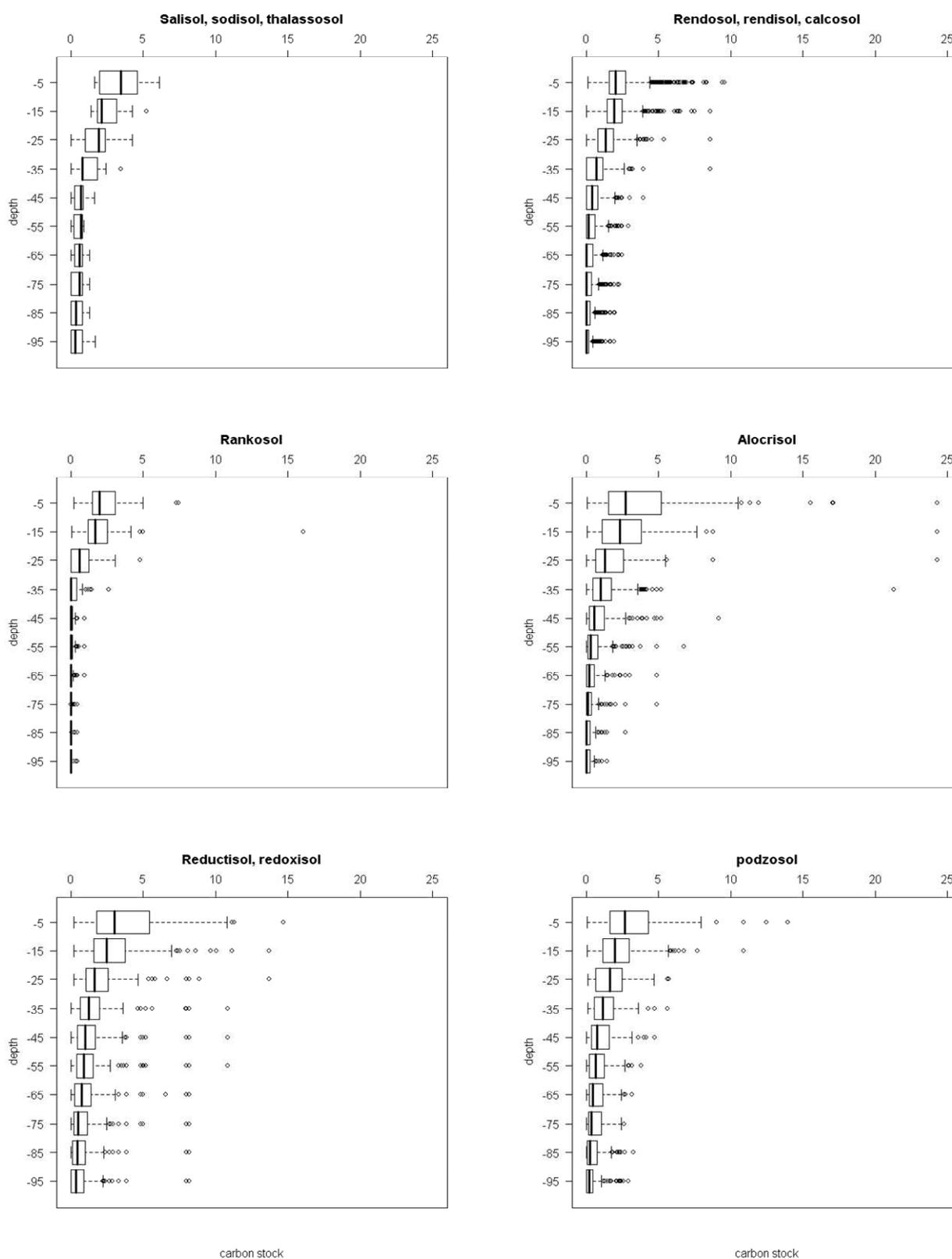


Figure 18 - Profils de carbone issus de la base de données DONESOL (IGCS) classés par types de sols (teneurs en g/kg et profondeurs en cm) - deuxième partie

3.2.3.3 Cycle de l'azote et test de réduction de N₂O en N₂

Analyser l'intérêt et la faisabilité d'utiliser des marqueurs moléculaires de gènes fonctionnels bactériens et/ou des marqueurs enzymatiques du cycle de l'azote et /ou le développement de tests de réduction de N₂O en N₂ (lien avec les émissions de N₂O du sol). La pertinence, la précision et les coûts afférents de chaque option seront discutés et les coûts seront estimés.

3.2.3.3.1 Test de réduction de N₂O en N₂

Étude menée par Catherine Hénault (UR Sols INRA Orléans) et InfoSol

L'agriculture participe aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, notamment par la production du puissant gaz à effet de serre, oxyde nitreux, N₂O, par les sols. Les émissions de N₂O par les sols présentent une très grande variabilité spatiale et temporelle. Le cycle de N₂O dans les sols met en jeu le fonctionnement de processus microbiologiques, en particulier ceux de dénitrification et de nitrification. L'oxyde nitreux est formé au cours du fonctionnement des premières étapes de la dénitrification et au cours de la nitrification (Figure 19). La dernière étape de la dénitrification, la réduction de N₂O en N₂, est le seul processus terrestre connu permettant l'élimination de la forme N₂O.

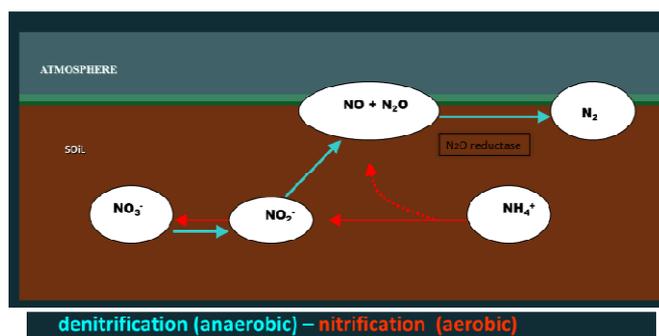


Figure 19 - Cycle de l'azote dans les sols

Des travaux antérieurs ont mis en évidence des fonctionnements inégaux de la réduction de N₂O en N₂ parmi les sols et des émissions de N₂O *in situ* plus fortes dans les situations de fonctionnement ralenti de l'étape de réduction de N₂O en N₂. La capacité du sol à réduire le N₂O peut être facilement mesurée en laboratoire par un test dont le protocole vient d'être présenté à l'AFNOR en vue d'une normalisation ISO.

Ce test permet de caractériser la capacité (ou l'incapacité) « naturelle ~ actuelle ~ réelle » des sols à réduire le gaz à effet de serre N₂O en N₂. Il est basé sur la caractérisation de l'accumulation transitoire de N₂O au cours du fonctionnement de la dénitrification en conditions contrôlées. Il implique la réalisation de cinétiques de dénitrification des sols au laboratoire.

La caractérisation de l'accumulation transitoire de N₂O au cours de la dénitrification aboutit à la définition d'un indice (empirique) variant, sur la base des observations actuelles, de 1 à 150. Cet indice est composé :

- du ratio N_2O / N_2 maximal observé au cours des cinétiques de laboratoire. Des valeurs comprises entre <0.1 et 1 ont actuellement été observées.
- du temps d'accumulation de N_2O pendant la dénitrification (24 à 200 heures, actuellement observé).

Il a été montré sur différents systèmes composés de situations + ou – émettrices, qu'une importante accumulation transitoire de N_2O au cours du fonctionnement de la dénitrification (indice élevé) était caractéristique des situations émettant *in situ* d'importantes quantités de N_2O .

La définition et l'intérêt de ce test en tant qu'indicateur de la qualité biologique des sols sont décrits dans Hénault *et al.*, 2001 et en tant que paramètre du modèle d'émission de N_2O , NOE, dans Hénault *et al.*, 2005. Bien que cet indicateur ne permette pas à lui seul de calculer des niveaux absolus d'émission de N_2O , il permet d'identifier des situations à risque en terme d'émission de N_2O parce que tout (ou presque tout) l'azote qui y est dénitrifié est émis sous forme N_2O (index ~ 50).

Ce test a été développé sur sols frais. Son utilisation sur sol sec (échantillons RMQS1) nécessiterait des recherches complémentaires. Sa mise en œuvre pourrait donc concerner la prochaine campagne RMQS2. Elle permettrait de disposer de :

- Un indice de la qualité biologique, révélateur de leur risque d'émissions de N_2O . Cet indice est intégrable dans les bases de données sol et les systèmes d'informations géographiques. Il peut contribuer à définir une typologie fonctionnelle des sols
- Une cartographie à l'échelle de la France des situations qui accumulent N_2O au cours du fonctionnement de la dénitrification et qui sont des situations à risque en termes d'émission de N_2O
- Une analyse des déterminants potentiels de la capacité ou non des sols à réduire le N_2O indispensable pour la gestion des émissions de N_2O , grâce aux nombreuses variables mesurées sur le RMQS (analyses physiques, chimiques, biologique, enquêtes sur les pratiques de gestion, etc.)
- Simulations numériques spatialisées des émissions de N_2O par les sols prenant en compte les propriétés biologiques des sols. La mesure de l'indicateur ici présenté permet d'avoir accès à l'un des paramètres biologiques du modèle NOE. Des travaux vont être réalisés (CASDAR NoGAS, ...) pour accéder aux autres paramètres biologiques des sols et en particulier le potentiel de dénitrification des sols (Hénault et Germon, 2000), soit par des mesures directes simplifiées, soit à partir de fonction de pédotransfert.

Ce test sera utilisé prochainement sur un échantillon représentatif de 90 sites du RMQS, qui seront ré-échantillonnés dans le cadre du projet ADEME REACCTIF SOLGES, coordonné par Catherine Hénault (UR Sols INRA Orléans). Ce projet va permettre de normaliser le protocole de mesure de la capacité des sols à réduire N_2O , d'optimiser sa mise en œuvre sur de grands échantillons, de tester la possibilité d'établir une fonction de pédotransfert à valeur explicative et prédictive de la capacité des sols à réduire N_2O en N_2 , de tester *in situ* d'éventuelles solutions pour atténuer les émissions de N_2O en N_2 et d'estimer le potentiel d'atténuation de ces solutions à différentes échelles spatiales. Les résultats de ce projet pourront être valorisés par le monde

socio-économique sur des aspects de chiffrage des émissions de N₂O et des méthodologies associées, de caractérisation des propriétés des sols ainsi que d'atténuation et de support à l'atténuation. Ils apporteront également des éléments objectifs permettant d'évaluer la faisabilité et l'intérêt de son déploiement sur l'ensemble des points du RMQS.

Le chiffrage de cet indicateur pour le RMQS n'est pas proposé pour l'instant, dans la mesure où les coûts analytiques pour de grandes séries pourront être affinés dans le projet SOLGES.

3.2.3.3.2 Marqueurs moléculaires de gènes fonctionnels bactériens et marqueurs enzymatiques du cycle de l'azote

Études et chiffrages réalisés par Laurent Philippot (INRA Agro-écologie Dijon) et InfoSol

Type de détermination : Il s'agit de quantifier l'abondance des communautés microbiennes impliquées dans le cycle de l'azote. Pour cela, le nombre de copie des gènes codant les enzymes clés catalysant les transformations entre les différentes formes d'azote est quantifié par real time PCR à partir de l'ADN extrait du sol. Ces gènes sont utilisés comme marqueur moléculaire des communautés microbiennes fonctionnelles correspondantes.

Enjeux environnementaux et politiques concernés : Les microorganismes du sol sont des acteurs clés de certains services écosystémiques comme le cycle des nutriments. Parmi ces derniers, l'azote a une importance agronomique particulière puisqu'il s'agit du nutriment qui limite le plus souvent la croissance des plantes. Cependant d'un point de vue environnemental, l'azote présent dans les sols peut également être lessivé, entraînant une contamination de l'eau, ou être transformé en gaz à effet de serre comme le N₂O. Dans ce contexte, il est important de comprendre comment les microorganismes responsables de ces transformations sont distribués. Certaines de ces communautés fonctionnelles sont également de bons bioindicateurs de la qualité des sols (Ritz *et al.*, 2009, Wessen et Hallin, 2011).

Contexte scientifique et technique (normes, faisabilité, capacité d'interprétation) : La quantification des microorganismes par PCR en temps réel se fait à partir de l'ADN extrait selon un protocole dont la normalisation ISO a été portée par l'équipe. Le projet de normalisation de la méthode de quantification des microorganismes par PCR en temps réel a été également en Septembre 2011 en Australie par le comité technique ISO/TC 190 « Soil quality ». Ces approches ont déjà été utilisées avec succès dans un grand nombre d'études dont la cartographie des microorganismes nitrifiants et dénitrifiants à l'échelle de la Bourgogne et l'identification des facteurs influençant cette distribution (Bru *et al.*, 2011). L'achat d'un appareil de PCR en temps réel de 384 puits permettra d'utiliser les robots pipeteurs existant dans le laboratoire pour un fonctionnement en haut débit.

Nombre de mesures nécessaires, campagne (RMQS2 ou sols déjà archivés) et critères de choix éventuel des sites : Il est possible d'analyser l'ADN déjà archivé des sols prélevés dans le cadre du RMQS1 ou celui qui sera extrait à partir du RMQS2.

Chiffrage de la mesure : Ces mesures sont réalisables à partir de l'ADN bactérien extrait du sol selon la méthode présentée au paragraphe 3.2.1.1. Les coûts d'échantillonnage et d'extraction de l'ADN seront déjà pris en charge si la quantification de la biomasse microbienne par extraction d'ADN est retenue.

Coût analytique de la quantification des bactéries et des archaea oxydant l'ammonium en nitrite (AOA et AOB), des bactéries dénitrifiantes réduisant le nitrite (NirK et NirS), des bactéries réduisant le gaz à effet de serre N₂O (NosZ1 et NosZ2) et des bactéries et de *crenarchaea* totales (16S rRNA X 2) soit un total de 8 différentes communautés microbiennes.

Analyses :

- Quantification des ADN par picogreen : 1 €/éch
- Test d'inhibition : 2 €/éch
- Quantification par PCR en temps réel des différents groupes microbiens : 40 €/éch
- Fluides : 6 €/éch

Équipement :

- PCR en temps réel haut débit 384 puits: 40 000 €

Total : 67 € par échantillon (+ extraction d'ADN chiffrée au paragraphe 3.2.1.1)

Résultats et indicateurs attendus (valeur diagnostique, existence de seuils, indicateurs de bilan et/ou de flux, vitesse d'évolution) : Ce travail permettra de connaître l'abondance des différents groupes microbiens impliqués dans les transformations de l'azote à travers le territoire. Ces données seront utilisées pour cartographier la distribution des ces communautés et pour identifier les facteurs (climatique, pédologique, usage des sols, etc..) influençant cette distribution à différentes échelles (cf. Bru *et al.*, 2011 et Figure 20). Ces données seront également utilisées pour identifier des groupes bioindicateurs de l'impact de l'usage des sols et de leurs possibles conséquences sur le fonctionnement du cycle de l'azote

Opérateurs pressentis : L'opérateur pressenti est l'unité INRA Agroécologie à Dijon (Equipe EMFI, Pole Ecol-Dur) avec le support de la plateforme Sequencage et Genotypage (<http://www2.dijon.inra.fr/sercobio/SSG.htm>)

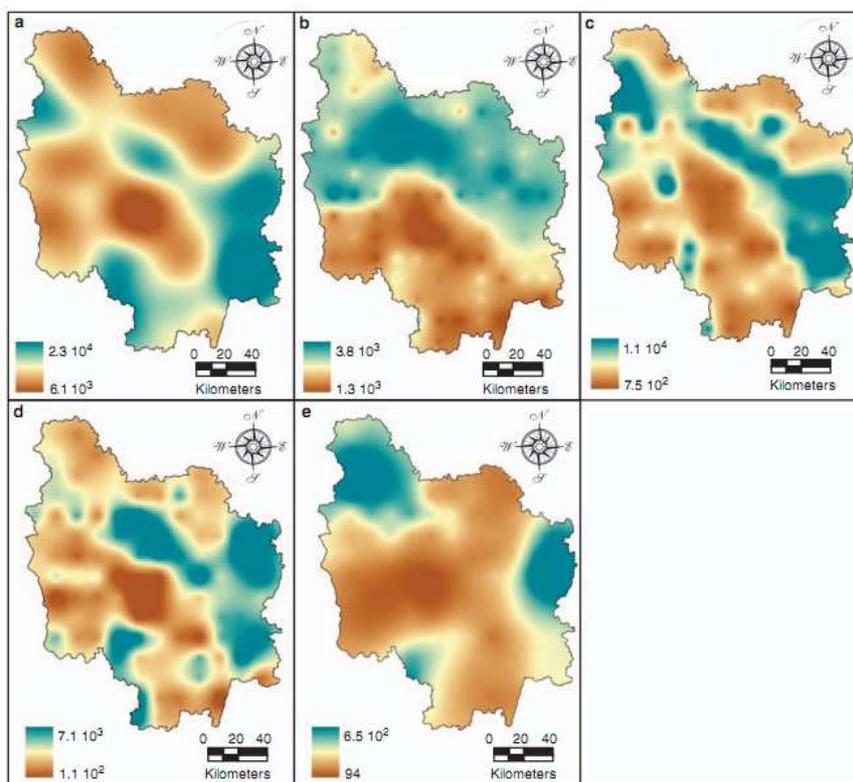


Figure 20 - Cartes d'abondance de marqueurs moléculaires de gènes fonctionnels bactériens du cycle de l'azote dans les sols des sites du RMQS de Bourgogne : (a) narG,(b) nirK,(c) nirS,(d) nosZ, (e) AOB. L'échelle de couleur correspond au nombre de copies de chaque gène par ng d'ADN. Tiré de Bru *et al.*, 2011.

3.2.4 POLLUTION DES RESSOURCES EN EAU ET DES MILIEUX AQUATIQUES

Plusieurs paramètres permettant de répondre partiellement à cette thématique ont été intégrés dans la première campagne mais leur valorisation vis-à-vis de l'enjeu « eau » est sous exploitée. De plus des paramètres essentiels n'ont pas été inclus dans le menu analytique de la première campagne. Afin d'améliorer la pertinence du réseau, nous avons évalué 4 points :

1. Examiner pour certains éléments (ex : N, P) la possibilité de valoriser la BDAT, le RMQS et IGCS couplés à des modèles de transfert latéraux et/ou verticaux.
2. Analyser et chiffrer la faisabilité d'acquérir des données permettant d'estimer les propriétés hydrauliques des horizons (profonds en particulier) : masse volumique apparente, densité texturales, teneur et nature de la charge caillouteuse.
3. Analyser la faisabilité et le coût de caractériser des profils de distribution de N et P ainsi que des contaminants organiques principaux présents dans les eaux superficielles et souterraines.
4. Définir quelles variables sont à l'évidence manquantes dans l'état initial et pourraient être mises en routine sur la campagne 1 et/ou 2. Les candidats potentiels sont par exemple : Hg, As, Se, extractions d'ETM « douces ». Le coût de telles analyses sera évalué en analysant par exemple si des sous-échantillonnages seraient pertinents (par exemple, où serait-il pertinent d'avoir des données en Se, As ?).

3.2.4.1 Transferts de N et P et couplages avec d'autres bases de données

Objectifs : Examiner pour certains éléments (ex : N, P) la possibilité de valoriser la BDAT, le RMQS et IGCS couplés à des modèles de transfert latéraux et/ou verticaux.

Le phosphore a été traité par l'unité InfoSol, dans le cadre d'une étude commanditée et coordonnée et publiée par l'ONEMA. Dans cette étude figurent des travaux similaires réalisés par ailleurs sur l'azote et les contaminants organiques. Seule une synthèse des travaux sur le phosphore est présentée ici. Le rapport complet est disponible en téléchargement sous la référence :

- ONEMA, 2012 - Recueil des méthodes de caractérisation des pressions. Partie II : Dispositifs de caractérisation des pressions sur les eaux de surface.
http://www.reseau.eaufrance.fr/webfm_send/3002

3.2.4.1.1 Estimation des émissions de phosphore (P) d'origine agricole à l'échelle des masses d'eau continentales

Le transfert de phosphore (P) des zones agricoles vers les eaux de surface contribue aux problèmes d'eutrophisation des eaux de surface. L'étude de cette problématique s'est largement développée ces dernières décennies, ce qui est notamment lié au fait que le traitement des eaux usées au niveau des stations d'épuration s'est grandement amélioré, induisant donc une part relative plus importante pour les sources agricoles.

Des méthodes sont alors nécessaires pour l'estimation de la qualité des eaux à une large échelle dans le cadre européen de la directive cadre sur l'eau (DCE). Dans ce contexte, une méthodologie a été développée pour mieux appréhender le risque de transfert de P vers les eaux de surface, en estimant la fraction de P sur les versants qui peut atteindre le réseau de drainage, et finalement pour mieux identifier l'origine du P qui est observé dans les rivières. Le modèle proposé s'appuie sur l'estimation des sources de P d'origine diffuse et la description du transfert jusqu'aux cours d'eau. Les bases de données utilisées pour ce travail sont les suivantes : RMQS, Corine Land Cover, BD ALTI IGN, Base de donnée géographique des sols de France à 1/1M, carte de l'érosion hydrique (Cerdan *et al.*, 2010), carte des stocks de carbone des sols de France estimée par Meersmans *et al.*, 2012, l'indice IDPR (Mardhel, 2004) pour la connectivité, la BD Carthage (réseau hydro en France).

Les sources de phosphore agricole sont d'une part le sol qui a accumulé les excédents de P, d'autre part le bilan annuel entrée-sortie. Pour le phosphore, le calcul d'un bilan entrées-sortie n'est pas disponible à l'échelle France. Par ailleurs la capacité du sol à stocker cet élément est importante et on peut considérer la teneur en P des sols comme un indicateur des bilans entrées-sorties cumulés depuis quelques décennies, faisant l'hypothèse d'une trajectoire continue. Le choix qui a été fait est donc de quantifier la pression du P en termes de teneur en phosphore du sol, exprimée en kgP/ha. Un modèle a été estimé pour spatialiser les teneurs en P pour la couche de surface des sols français ; il en résulte alors une carte des teneurs en P dans les sols.

Une fois qu'une carte nationale des teneurs en P dans la couche de surface des sols a été estimée, le transfert du P est modélisé. Le modèle proposé combine la description des processus de mobilisation et de transfert : le P et les particules de sol sont d'abord mobilisés par l'érosion hydrique, et sont ensuite transférés par du ruissellement de surface via les chemins de l'eau. La méthode prend en compte la distribution spatiale des propriétés majeures qui contrôlent la mobilisation du P au travers d'un modèle d'érosion hydrique proposé par Cerdan *et al.* (2010), et le transfert du P. La description et modélisation du transfert de P est basée sur la définition d'indicateurs qui décrivent la connectivité sédimentologique sur les versants et dans les rivières, afin de faire le lien entre les propriétés des bassins versants et les flux de P dans les rivières.

La forme finale du modèle à calibrer se présente sous la forme suivante :

$$\text{FluxP}_{\text{prédit}} = a (P_{\text{cont}} * [E * C]) + b RA + c DD$$

Avec : P_{cont} la teneur en P des sols (en k/kg),

E le taux d'érosion hydrique (en t/km²/an),

C l'indice de connectivité (sans dimension), indiquant la proportion de particules passant vers le réseau hydrologique,

R_A un indice d'agressivité des pluies,

DD la densité de drainage (comme indice de transfert potentiel de P au sein du réseau hydrologique.

et a , b et c les paramètres à calibrer.

Ce modèle est calibré à partir de données de flux de P qui ont été calculées à l'exutoire de 105 bassins versants, représentatifs de la diversité des conditions environnementales de la France métropolitaine. Finalement, ce modèle a ensuite été appliqué à l'échelle des masses d'eau continentales, et permet d'obtenir une carte de risque de transfert de P vers les eaux de surface (Figure 21).

Les perspectives de ce travail seraient de :

- Affiner le modèle en utilisant les données issues de la BDAT ou en zoomant sur des bassins versants, par exemple des bassins versants bretons sur lesquels des réseaux de mesures
- Intégrer les nouvelles mesures de P total qui sont en cours d'analyse sur les sites du RMQS afin de comparer avec ce qui est prédit par le modèle / validation.
- Analyser les flux de P et de sédiments (MES) pour mieux comprendre les interactions entre le P et les particules (variabilité temporelle du rapport concentration MES/concentration P) pour aller vers une meilleure compréhension de la variabilité temporelle des flux de P.

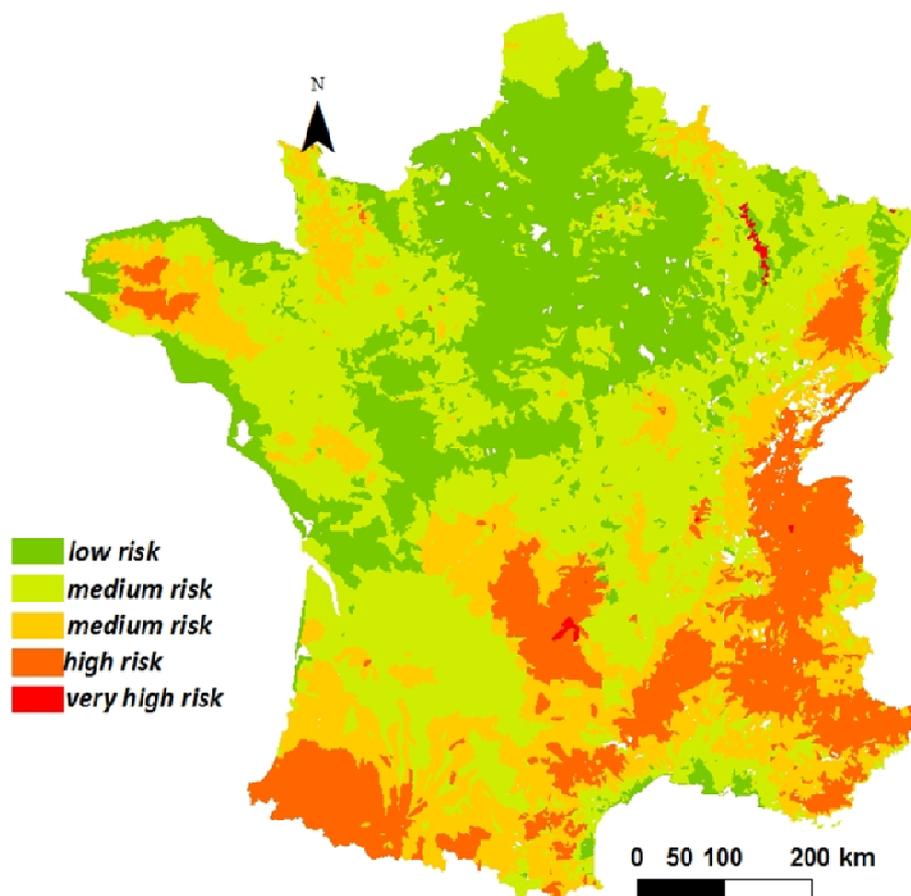


Figure 21 - Risques de transfert de phosphore vers les eaux de surface

Le résultat met en évidence des zones à fort risque d'émission de P au niveau des masses d'eau situées en zone de montagne, particulièrement à l'ouest de la chaîne pyrénéenne, et dans les Alpes, en raison de la forte connectivité (potentiel de transfert élevé lié aux fortes pentes ainsi qu'à un indice d'agressivité des pluies élevé) ; au niveau du Massif Central on relève aussi des zones à haut risque en raison d'indices de transferts élevés (fortes pentes et agressivité des pluies élevée) mais aussi en raison de teneurs estimées en P des sols élevées (associée au matériau parental des sols qui est riche en P). On peut aussi noter des zones à hauts risques en Bretagne, à relier à des teneurs élevées en P dans les sols bretons.

3.2.4.2 Propriétés hydrauliques des horizons profonds

Objectifs : Analyser et chiffrer l'acquisition des données permettant d'estimer les propriétés hydrauliques des horizons (profonds en particulier) : masse volumique apparente, densité texturales, teneur et nature de la charge caillouteuse.

Ce travail a été réalisé en lien avec l'analyse et le chiffrage des mesures physiques profondes. Les résultats sont présentés dans le paragraphe 3.2.2.2.

3.2.4.3 Profils de distribution de N, P et contaminants organiques

Objectifs : Analyser la faisabilité et le coût de caractériser des profils de distribution de N et P ainsi que des contaminants organiques principaux présents dans les eaux superficielles et souterraines

L'acquisition de profils de distribution de N, P et de contaminants organiques suppose d'analyser les échantillons des horizons des profils de sols des sites RMQS, à l'instar de ce qui est proposé pour l'évaluation des stocks de carbone profonds au paragraphe 3.2.3.2. Ces mesures sont proposées pour les 2200 sites du RMQS, ou seulement sur 1650 sites RMQS hors Biosoil en fonction des paramètres qui ont déjà été analysés sur les sites RMQS-Biosoil.

3.2.4.3.1 Profils d'azote

L'analyse de N total est déjà incluse dans le chiffrage du carbone organique, ces deux éléments pouvant être avantageusement analysés simultanément (Tableau 3). Cette détermination est proposée pour les 1650 sites du RMQS (4245 horizons), les 550 sites RMQS-Biosoil (2100 horizons) disposant déjà d'analyses de N total.

3.2.4.3.2 Profils de phosphore

L'analyse du phosphore total (extraction HF) est proposée pour les 1650 sites du RMQS (4245 horizons) et les 550 sites RMQS-Biosoil (2100 horizons), ces derniers disposant seulement d'une analyse pseudo-totale de P (extraction à l'eau régale).

Tableau 4 - Chiffrage de la détermination des teneurs en P total sur les profils RMQS

Profils de P par horizons sur échantillons de fosses	€ HT
Quartage des échantillons (Conservatoire d'Orléans)	8,00
Prise en charge de l'échantillon (LAS)	3,33
Préparation (LAS)	4,55
Renvoi de l'échantillon après analyse (LAS)	0,72
Humidité résiduelle à 105°C	1,40
Mise en solution totale par HF	4,90
Phosphore (P2O5) total HF (ICP-AES)	2,80
Total par échantillon	25,7
Total pour les 4245 échantillons RMQS	109 097
Total pour les 2100 échantillons RMQS-Biosoil	53 970
Total pour les 2200 sites RMQS (6345 échantillons)	163 067

Remarque : ce chiffrage inclut toutes les étapes de préparation d'échantillons pour analyses. Une économie de 18 € par échantillon est possible pour les échantillons RMQS (4245 horizons), en cas de détermination simultanée des teneurs en C, N, et P. Dans ce cas, seul le coût de l'extraction et du dosage du P total est à prévoir : 7,7 €/éch., soit un total de 32 687 euros.

3.2.4.3.3 Profils de contaminants organiques

L'analyse des micro-polluants organiques (MPO) est proposée pour les 2200 sites du RMQS (4245 horizons) et les 550 sites RMQS-Biosoil (2100 horizons). Aucune analyse de contaminants organiques n'ayant été réalisée sur les profils de sol du RMQS.

Tableau 5 - Chiffrage de la détermination des teneurs en micro-polluants organiques sur les profils RMQS

Profils de MPO par horizons sur échantillons de fosses	€ HT
Quartage des échantillons (Conservatoire d'Orléans)	8,00
Prise en charge de l'échantillon (LAS)	3,33
Préparation (LAS)	4,55
Renvoi de l'échantillon après analyse (LAS)	0,72
Humidité résiduelle à 105°C	1,40
HAP (16)	49,50
PCB (20)	177,00
Dioxines (7) et Furanes (10)	217,00
Pesticides organochlorés (17)	82,60
Herbicides (26)	94,50
Total par échantillon	638,6
Total pour les 2200 sites RMQS (6345 échantillons)	4 051 917

3.2.4.4 Éléments traces

Objectifs : Définir quelles variables sont à l'évidence manquantes dans l'état initial et pourraient être mises en routine sur la campagne 1 et/ou 2. Les candidats potentiels sont par exemple : Hg, As, Se, extractions d'ETM « douces ». Le coût de telles analyses sera évalué en analysant par exemple si des sous-échantillonnages seraient pertinents (par exemple, où serait-il pertinent d'avoir des données en Se, As ?).

La réalisation d'une campagne test en région Centre en 2010 a permis 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. 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.

- L'intégration de nouveaux paramètres (As, Hg, Se, U, Th, etc.) au menu analytique de la prochaine campagne RMQS ou leur analyse sur les échantillons stockés de la première campagne est possible et permettrait de compléter les référentiels existant qui sont relativement pauvres. 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 anomaliques, 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). Pour d'autres paramètres (Cs, Sb, Se et Sn), les valeurs anomaliques ou les valeurs maximales sont plus difficilement interprétables, notamment du fait d'un manque de données de référence dans les sols français. Compte tenu des risques liés aux contaminations par As, Hg et Se, la détermination de ces trois éléments devrait être menée sur le RMQS.
- 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. Une 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, minimales 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. L'apport des déterminations par extractions douces, à l'aide de sels neutres, ne semble donc 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

4.1 TEST DE STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LA DEUXIÈME CAMPAGNE

L'optimisation de la stratégie d'échantillonnage couplée à des simulations d'évolution des teneurs en carbone des sols selon différents scénarios montre qu'une stratégie d'échantillonnage annualisée selon un schéma aléatoire stratifié est nettement plus performante que le schéma régionalisé utilisé lors de la première campagne du RMQS pour obtenir rapidement une valeur moyenne et une cartographie des teneurs en carbone sur le territoire. Ces simulations montrent également qu'il semble important d'étaler le moins possible la campagne RMQS2 dans le temps si l'on souhaite être en mesure de détecter une évolution. Enfin, elles montrent que l'on parviendra à détecter rapidement une évolution du carbone dans les sols si cette évolution est assez importante et plus ou moins constante dans le temps. Pour la détection d'évolutions liées à des changements d'occupation, certaines configurations (par exemple, le passage cultures en terres arables vers forêts ou inversement) risquent de présenter des effectifs trop faibles pour pouvoir être quantifiées avec un dispositif de type RMQS.

4.2 ASSURANCE QUALITÉ

L'utilisation de paramètres invariants (squelettes granulométriques ou teneurs totales en certains éléments majeurs) permettra de comparer les séries analytiques des deux campagnes et s'assurer de l'absence de biais d'échantillonnage. L'intégration des incertitudes associées aux variables mesurées constitue une étape indispensable pour pouvoir comparer les jeux de données entre deux campagnes de mesure.

4.3 ANALYSE DU POTENTIEL DE L'ENQUÊTE AGRONOMIQUE ET AMÉLIORATIONS

Les données des enquêtes du RMQS représentent une source d'informations indispensable pour caractériser les systèmes de gestion des sites et quantifier les apports sur les parcelles. Malgré un nombre d'utilisations croissant, ces données demeurent encore largement inexploitées en raison notamment d'une proportion importante (environ 40%) de données qui n'ont pas été saisies en base de données.

Les données disponibles ont permis de calculer un certain nombre d'indicateurs de pression agricoles sur les sols, mais des hypothèses ont dû être faites pour être en mesure de les calculer, du fait que ces indicateurs nécessitent des données très spécifiques ou bien parce que des données sont manquantes pour un certain nombre de sites. Les indicateurs ont surtout été développés pour les grandes cultures, ce qui ne représente qu'une partie des occupations du RMQS.

Des sites sentinelles (sols cultivés, prairies permanentes et milieux naturels) ont été identifiés à partir de ces enquêtes, sur lesquels il serait intéressant de compléter les mesures réalisées. Ce travail d'identification serait à mener conjointement avec les services du Département de la Santé des Forêts (Ministère de l'Agriculture) pour les 550 sites forestiers RMQS-BioSoil, sur lesquels nous ne disposons pas d'enquêtes.

En vue du lancement de la deuxième campagne RMQS, la réflexion autour de ces enquêtes devra être poursuivie. Des pistes d'amélioration du formulaire ont été proposées, mais nous recommandons la constitution d'un groupe de travail afin de poursuivre ce travail d'amélioration à apporter dans l'acquisition des données et de mieux définir certains besoins futurs de données en lien avec les paramètres qui seront suivis sur le RMQS. Une réflexion approfondie devra être menée en parallèle sur i) l'intégration des données collectées en base de données : développement d'une base de données dédiée ou de tables spécifiques dans le système d'information du RMQS et ii) sur les modalités de saisie des données qui représente une activité importante largement sous-estimée durant la première campagne. Le développement de formulaires de saisie automatique serait une piste à explorer.

4.4 ÉTUDE ET CHIFFRAGE DU POTENTIEL DE DIVERSIFICATION DES VARIABLES MESURÉES ET AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE DU DISPOSITIF VIS-À-VIS D'ENJEUX PRIORITAIRES

A l'exception du suivi de la végétation qui nécessitera des études complémentaires, l'essentiel des paramètres proposés a fait l'objet d'une étude de faisabilité et d'un chiffrage précis. Plusieurs de ces paramètres pourraient être mis en œuvre en routine et sur la totalité des sites sur les échantillons de la première campagne et/ou ceux de la deuxième campagne RMQS : ADN microbien, indicateurs enzymatiques, matières organiques particulaires, stocks de carbone profonds, indicateurs de qualité physique et des propriétés hydriques, contaminants minéraux ou micropolluants organiques. La détermination de As, Hg, 16 HAP, 20 PCB, 7 dioxines et 10 furanes est en cours de réalisation sur les échantillons composites de surface de la première campagne des 2200 sites RMQS dans le cadre du programme RMQS1bis. Le phosphore total est également prévu dans ce programme. D'autres paramètres relèvent encore de la recherche et mériteraient d'être testés sur un échantillon de sites RMQS : tests de réduction de N_2O en N_2 , caractérisation moléculaire de la faune du sol (vers de terre). Ce sera fait pour le premier indicateur dans le projet ADEME REACTIF SOLGES et un projet est à l'étude pour tester le second indicateur. Le recours à des techniques de scoring mises en œuvre dans d'autres réseaux de surveillance pour objectiver le choix des indicateurs (Ritz *et al.*, 2009) serait une piste à suivre.

4.5 PERSPECTIVES

La préparation de la deuxième campagne RMQS nécessitera de travailler sur la mise en application des choix qui sont proposés ici en termes de stratégie d'échantillonnage et de nouveaux indicateurs à suivre, si ces choix sont retenus. En effet, la stratégie d'échantillonnage retenue aura des conséquences directes sur le choix des partenaires et le déroulement de la campagne. D'autre part, la faisabilité et le chiffrage des indicateurs proposés dans ce rapport pour la deuxième campagne ont été évalués indépendamment les uns des autres. Un travail d'intégration de la mise en œuvre de ces indicateurs, avec le reste des opérations à réaliser au cours de la mise en place d'un site RMQS devra être mené afin d'optimiser l'échantillonnage. Enfin le travail d'amélioration des enquêtes devra être poursuivi dans le cadre d'un groupe de travail élargi. Tout cela nécessitera des études approfondies durant les prochains mois, afin d'être opérationnels pour démarrer une nouvelle campagne début 2015.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agreste, 2010. Pratiques Culturelles 2006, Les Dossiers, 8, 86p

Agro-Transfert : <http://www.agro-transfert-rt.org/index.php/fr/nos-projets/centre-de-competences-et-de-ressource/-plage>

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.

Balesdent, J., 1996. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. EUROPEAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE 47, 4, 485-493.

Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RI, Lark RM, Kirk GJD. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. Nature 2005; 437: 245-248.

Bockstaller C. Girardin P., 2008. Mode de calcul des indicateurs agrienvironnementaux de la méthode INDIGO 119p

Bockstaller C. Guichard L. Makowski D. Aveline A. Girardin P. Plantureux S., 2007. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review, Agronomy, 139-149

Boiffin J., Kéli Zagbahi J. Sebillotte M., 1986. Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis, Agronomie, 6, 437-446

Boulonne L., 2011. Dictionnaire de données pour les tables relatives aux données d'enquêtes agronomiques, Unité Infosol, INRA Orléans, 134 pages

Bourgeois A., Allard D., Arrouays D., Martin M., Saby N., 2012. Optimisation de l'échantillonnage annuelisé pour la deuxième campagne du RMQS, Rapport de contrat, INRA, 60 pages

Bru, D. ; Ramette, A. ; Saby, N. ; Dequiedt, S. ; Ranjard, L. ; Jolivet, C. ; Arrouays, D. ; Philippot, L. Determinants of the distribution of nitrogen-cycling microbial communities at the landscape-scale. ISME Journal. 2011, 5 : 532-542.

Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y., Van Oost K., Poesen J., Saby N., Gobin A., Vacca A., Quinton J., Auerswald J., Klik K., Kwaad F.J.P.M., Raclot D., Ionita I., Rejman J., Rousseva S., Muxart T., Roxo M.J., Dostal T., 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data, Geomorphology 122, 167-177.

Coleman K. Jenkinson D.S., 1999. RothC-26.3 A model for the turnover of carbon in soil, 47 pages

Commission européenne, 2006. Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des régions - Stratégie thématique en faveur de la protection des sols [SEC(2006)620] [SEC(2006)1165] /* COM/2006/0231 final */

Commission européenne, 2012. Rapport de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions - Mise en œuvre de la stratégie thématique en faveur de la protection des sols et activités en cours /* COM/2012/046 final */

Cosentino D., 2006. Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. Thèse de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon. 214 pages

Cosentino D., Le Bissonnais Y. et Chenu C., 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 38 : 2053-2062

Falloon, P., Smith, P., Coleman, K. & Marshall, S., 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY* 30, 8-9, 1207-1211.

Gourrat M., 2012. Valorisation des enquêtes agronomiques du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, Rapport de contrat, INRA, 53 pages

Hénault C., Bizouard F., Laville P., Gabrielle B., Nicoulaud B., Germon J. C., Cellier P., 2005. Predicting "in situ" soil N₂O emission using a NOE algorithm and soil database. *Glob. Change Biol.* 11:115-127.

Hénault C., Chèneby D., Heurlier K., Garrido F., Perez S., Germon J.C., 2001. Laboratory kinetics of soil denitrification are useful to discriminate soils with potentially high levels of N₂O emission on the field scale. *Agronomie*, 21, 713-723.

Hénault C., Germon J.C., 2000. NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *Eur. J. Soil Sci.*, 51, 257-270.

Janik, L., Spouncer, L., Correll, R. & Skjemstad, J., 2002. Sensitivity Analysis of the RothC Soil Carbon Model (Ver. 26.3 Excel ©). 30

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 pages

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.

King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot JC., 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.

Le Bissonnais Y., 1996. Aggregate stability and measurement of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47 : 425-437.

Lutzow, M.V., Kogel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. *European Journal of Soil Science* 57, 4, 426-445.

Mardhel V., Frantar P., Uhan J., Mio A., 2004. Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. *Int. Conf. groundwater vulnerability assessment and mapping*. Ustron, Poland, 15-18 June 2004.

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

Meersmans, J., Martin, M., Lacarce, E., De Baets, S., Jolivet, C., Boulonne, L., Lehmann, S., Saby, N., Bispo, A., Arrouays, D., 2012. A high resolution map of French soil organic carbon. *J Agronomy for Sustainable Development*, 32:841-851

ONEMA, 2012. Recueil des méthodes de caractérisation des pressions. Partie II : Dispositifs de caractérisation des pressions sur les eaux de surface. http://www.reseau.eaufrance.fr/webfm_send/3002

Peltre, C., 2010. Potentialité de stockage du carbone dans les sols par apport de matières organiques exogènes. , , 232.

Pingault N. Pleyber E. Champeaux C. Guichard L. Omon, B., 2009. Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : l'indicateur de fréquence de traitement, Notes et études socio-économiques, 32. 61-94

Ritz K., Black H. I.J., Campbell C. D., Harris J.M., Wood C., 2009. Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. Ecological Indicators 9: 1212–1221

Sadok W. Angevin F. Bergez J.E. Bockstaller C. Colomb B. Guichard L. Reau R. Messean A. Dore T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems, Agronomy, 1-14

Scharnagl, B., Vrugt, J.A., Vereecken, H. & Herbst, M., 2010. Information content of incubation experiments for inverse estimation of pools in the Rothamsted carbon model: a Bayesian perspective. Biogeosciences 7, 2, 763-776.

Schulze, E. D., Luysaert, S., Ciais, P., Freibauer, A., Janssens, I. A., Soussana, J. F., Smith, P., Grace, J., Levin, I., Thiruchittam-palam, B., Heimann, M., Dolman, A. J., Valentini, R., Bousquet, P., Peylin, P., Peters, W., Rodenbeck, C., Etiope, G., Vuichard, N., Wattenbach, M., Nabuurs, G. J., Poussi, Z., Nieschulze, J., and Gash, J. H., 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance, Nat. Geosci., 2, 842–850.

Tetegan M., 2011. Modélisation des propriétés hydriques et du fonctionnement hydrodynamique des sols caillouteux. Application à l'estimation de la réserve utile à l'échelle régionale. Thèse Univ. Orléans.

Tetegan M., Nicoullaud B., Baize D., Bouthier A., Cousin I., 2011. The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: Proposition of new pedotransfer functions, Geoderma, 165, 1, 40-49.

Xu, X.L., Liu, W. & Kiely, G., 2011. Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modelled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model. AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT 140, 3-4, 372-381.

Yeluripati, J.B., van Oijen, M., Wattenbach, M., Neftel, A., Ammann, A., Parton, W.J. & Smith, P., 2009. Bayesian calibration as a tool for initialising the carbon pools of dynamic soil models. SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY 41, 12, 2579-2583.

Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M.W.I., Smith, P. & Fuhrer, J., 2007. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. EUROPEAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE 58, 3, 658-667.