



VetAgro Sup

Campus Agronomique
de Clermont

Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche

Institut d'enseignement supérieur et de recherche
en alimentation, santé animale, sciences agronomiques et de l'environnement

Référentiel Régional Pédologique Carte des pédopaysages de l'Allier à 1/250 000



© Jean-Luc Méloux

Bocage Bourbonnais, sols « rouges » du bassin de Bourbon-l'Archambault. En arrière plan, forêt de Tronçais

financé par : le Conseil Général de l'Allier, le Conseil Régional d'Auvergne, le Ministère de l'Agriculture, le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER)



Avec la participation technique de :



Référentiel Régional Pédologique Carte des pédopaysages de l'Allier à 1/250 000

financé par le Conseil Général de l'Allier, le Conseil Régional d'Auvergne, le Ministère de l'Agriculture, le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER)



Sommaire

Sommaire	3
Index des figures	4
Index des tableaux	5
Préalable	6
1. Présentation du département de l'Allier à 1/250 000	8
1.1. Grands ensembles géologiques et morphologiques (Figure 1)	8
1.2. Caractéristiques climatiques (Figure 3)	9
1.3. Grands traits de l'occupation du sol (Figure 4)	9
2. Méthode et mise en forme des résultats	15
2.1. Données rassemblées	15
2.1.1. Données surfaciques	15
2.1.2. Données ponctuelles	17
2.2. Acquisition de données	19
2.2.1. Prospections pédologiques à l'Est et à l'Ouest de l'Allier	19
2.2.2. Prospections pour la caractérisation des communautés microbiennes des sols	23
2.3. Mise en forme des données, caractéristiques de la carte réalisée	24
3. Présentation de la carte des pédopaysages de l'Allier à 1/250 000	25
3.1. Les régions naturelles	25
3.1. Les unités cartographiques	28
3.1.1. Description sommaire d'ensemble	28
3.1.2. Grandes familles d'UC	28
3.1.3. La composition en sols des pédopaysages de l'Allier	30
4. Caractérisation des communautés microbiennes des sols du département de l'Allier	36
4.1. Contexte scientifique	36
4.2. Expérience et capacités techniques de la plateforme GenoSol	37
4.3. Procédure technique	38
4.3.1. Réception et conservation des échantillons de sols	38
4.3.2. Extraction d'ADN des sols	38
4.3.3. Analyse de la biomasse moléculaire microbienne des sols	38
4.3.4. Mesure de l'abondance des bactéries et des champignons	38
4.3.5. Caractérisation de la structure génétique des communautés microbiennes du sol	38
4.3.6. Analyses mathématiques des données	39
4.4. Les communautés microbiennes dans les sols de l'Allier	39
4.4.1. Variabilité physico-chimique des sols de l'Allier	39
4.4.2. Biomasse Moléculaire Microbienne	41
4.4.3. Densités bactérienne et de champignons des sols	47
4.4.4. Structure génétique des communautés microbiennes	50
4.4.5. Relation aire espèce	60
Conclusion	63
Perspectives	65
Bibliographie	68
Annexes	70

Index des figures

Figure 1 : Formations géologiques de l'Allier (source : ©BRGM carte géologique au million – Echelle ≈ 1/750 000) 10	
Figure 2 : Relief de l'Allier (pentes en %) (source : MNT250 – IGN – Echelle ≈ 1/750 000) _____	11
Figure 3 : Répartition de la pluviométrie dans l'Allier (source : Extrait de la carte des précipitations annuelles 1891-1930 établie par la section climatologie de l'ONM in Favrot <i>et al.</i> , 1969 – Echelle ≈ 1/750 000) _____	12
Figure 4 : Espaces agricoles, forestiers et urbains dans l'Allier (source : Corine Land-Cover, 2006) _____	13
Figure 5 : Etudes existantes réalisées dans l'Allier _____	16
Figure 6 : Localisation des zones prospectées en 2011 _____	19
Figure 7 : Répartition des sondages réalisés en 2011 dans les parties Est et Ouest de l'Allier au regard des profils existants dans la partie centrale _____	21
Figure 8 : Répartition des profils existants et réalisés en 2011 dans l'Allier _____	22
Figure 9 : Carte des sols échantillonnés à l'échelle du département de l'Allier. _____	23
Figure 10 : Carte des petites régions agricoles de l'Allier (source : INSEE-RGA) _____	26
Figure 11 : Carte des petites régions forestières (source : IFN-IGN) _____	27
Figure 12 : Carte des GDM et PDM du département de l'Allier _____	29
Figure 13 : A : Analyse en composante principale des données physico-chimiques des sols du département de l'Allier et du RMQS. B : Cercle de corrélation compilant les données physico-chimiques des sols du département de l'Allier et du RMQS. _____	40
Figure 14 : Analyse du pH et de la texture des sols de l'Allier et comparaison avec les sols du RMQS. _____	40
Figure 15 : Variation de la quantité d'ADN entre les sols de l'Allier (200 sols, échelle de droite) et comparaison avec les données issues des sols du RMQS (2206 sols échelle de gauche). _____	41
Figure 16 : Cartographie nationale la biomasse moléculaire microbienne des sols et positionnement du département de l'Allier _____	42
Figure 17 : Cercle de corrélation des données physico-chimiques et microbiologiques des sols de l'Allier. Les données de biomasse moléculaire, de densités bactérienne et fongique sont mises en valeurs additives. _____	43
Figure 18 : Influence du mode d'usage du sol sur la biomasse moléculaire microbienne (C=sols sous culture, F=sols sous forêts, P= sols sous prairie, A= autres modes d'occupation des sols) _____	44
Figure 19 : Variations du pH en fonction des modes d'usage des sols _____	45
Figure 20 : Variogrammes de la biomasse moléculaire microbienne à l'échelle du département de l'Allier _____	46
Figure 21 : Distribution de la densité des bactéries et des champignons dans les sols du département de l'Allier (estimée par le nombre de copies d'ADNr 16S et 18S par gramme de sol, respectivement). _____	47
Figure 22 : Influence du mode d'usage des sols de l'Allier sur la densité bactérienne et de champignons (C=sols sous culture, F= sols sous forêts, P= sols sous prairie, A= autres). _____	48
Figure 23 : Rapport de densité Champignons / Bactéries sur les sols de l'Allier _____	49
Figure 24 : Variogrammes des densités bactérienne et fongique à l'échelle du département de l'Allier. _____	50
Figure 25 : A-Analyse en composante principale des profils B-ARISA obtenus pour les sols de l'Allier. B- Comparaison des structures génétiques B-ARISA des sols de l'Allier avec celles des sols du RMQS. _____	51
Figure 26 : Analyse de co-inertie entre les caractéristiques physico-chimiques des sols et les données B-ARISA. Les paramètres les plus structurants étant ceux qui expliquent l'axe 1 de l'ACP. _____	52
Figure 27 : Analyse ACP interclasse des profils B-ARISA en fonction du mode d'occupation des sols. _____	53
Figure 28 : Variogrammes des structures génétiques des communautés bactériennes à l'échelle du département de l'Allier (axes 1, 2 et 3). _____	53
Figure 29 : Cartographie des structures génétiques des communautés bactériennes à l'échelle du département de l'Allier : cartographies des 3 premiers axes de la Multispati (1 à 3) ; projection RGB de ces 3 axes simultanément en attribuant à chaque axe un gradient de couleur : rouge (axe 1), vert (axe 2) et bleu (axe 3) _____	54
Figure 30 : Analyse en composante principale des profils F-ARISA obtenus pour les sols du département de l'Allier _____	55
Figure 31 : Analyse de co-inertie entre les caractéristiques physico-chimiques des sols et les données F-ARISA. Les paramètres les plus structurants étant ceux qui expliquent l'axe 1 de l'ACP. _____	56
Figure 32 : Analyse ACP interclasse des profils F-ARISA en fonction du mode d'occupation des sols _____	57
Figure 33 : Variogrammes des structures génétiques des communautés de champignons à l'échelle du département de l'Allier (axes 1, 2 et 3) _____	58
Figure 34 : Cartographie des structures génétiques des communautés de champignons à l'échelle du	

département de l'Allier : cartographies des 3 premiers axes l'analyse Multispati (1 à 3) ; projection RGB de ces 3 axes simultanément en attribuant à chaque axe un gradient de couleur : rouge (axe 1), vert (axe 2) et bleu (axe 3) 59

Figure 35 : Stratégie d'analyse de la relation aire-espèce _____ 60

Figure 36 : Relation aire-espèce pour les communautés bactériennes et de champignons à l'échelle du département de l'Allier _____ 61

Figure 37 : Proposition de secteur à cartographier au 1/50 000ème dans l'Allier _____ 66

Index des tableaux

Tableau 1 : Répartition du nombre de sondages réalisés dans l'Allier _____ 17

Tableau 2 : Répartition du nombre de profils réalisés dans l'Allier _____ 18

Préalable

Un pédopaysage est un ensemble litho-géomorpho-pédologique cohérent. Plusieurs sols sont regroupés de manière hiérarchisée au sein d'un paysage identifié par des caractéristiques homogènes.

La cartographie des pédopaysages du département de l'Allier à 1/250 000 fait suite à des études antérieures réalisées dans le Val d'Allier, la Sologne Bourbonnaise et la Combraille dans la partie centrale de ce département. Ces études de sols sont les suivantes :

à l'échelle du 1/25 000-1/50 000,

- canton de Chantelle (Servant, 1966),
- canton de Cérilly (Bonfils et Labau, 1969),
- forêt de Tronçais (Bonfils, 1970),
- canton de Dompierre-sur-Besbre (Legros et Boyer, 1969),

à l'échelle du 1/100 000,

- Val d'Allier (Bornand *et al.*, 1966, 1968),
- Combraille et Bocage Bourbonnais (Favrot et Guyon, 1973).

Ces études, entreprises à des fins d'aménagement hydraulique il y a près de 50 ans par le Service d'Etudes des Sols de l'INRA de Montpellier, ont été synthétisées et étendues dans 2 cartes pédologiques de France au 1/100 000^{ème}, Vichy et Moulins, publiées par l'INRA respectivement en 1969 et 1974 (Favrot *et al.*). La feuille de Vichy fut d'ailleurs la première de la série.

La dernière étude réalisée en milieu agricole dans le département est un secteur de référence drainage mené à Pierrefitte-sur-Loire à l'échelle du 1/10 000^{ème} (Dupin et Lesage, 1983).

Ces études existantes représentent un peu plus de 500 000 ha, soit environ les 2/3 du département de l'Allier. Issues pour presque toutes de réalisations menées par la même équipe (Service d'Etudes des Sols de l'INRA-ENSA de Montpellier) au cours d'une même période (1965-1975), ces cartographies sont restées homogènes entre elles. En outre, les bases d'une cartographie moderne venaient d'être posées à l'époque et sont encore à peu de choses près celles qui sont utilisées aujourd'hui. Ainsi, malgré leur ancienneté, ces études de la partie centrale du département sont donc restées valides et il a été décidé d'en réaliser la synthèse. Celle-ci a été menée sous la responsabilité de VetAgro Sup, Campus Agronomique de Clermont, par Julien Landrieaux, Jean-Luc Méloux et Aude Pelletier.

De part et d'autre de la partie centrale, les zones Est et Ouest n'ont été étudiées que plus partiellement. Ainsi, outre les études menées dans le canton de Dompierre-sur-Besbre et le secteur de référence drainage de Pierrefitte-sur-Loire, 5 autres études ayant trait à la pédologie existent en milieu forestier :

- catalogue des stations forestières de Sologne Bourbonnaise (Beaufils *et al.*, 1989),
- catalogue des stations forestières du Bocage Bourbonnais et de la forêt de Tronçais (Beaufils *et al.*, 1991),
- Bocage et Sologne Bourbonnaise. Etude morphopédologique (Méloux, 1993),
- étude morphopédologique des plateaux nord-occidentaux du Massif Central (Méloux, 1997)
- les forêts face au changement climatique dans 6 stations de Sologne Bourbonnaise et du Bocage Bourbonnais (RMT Aforce, 2009).

Enfin, en complément de ces études, les données ponctuelles des réseaux RMQS et Biosoil (30 sites) et les relevés écologiques de l'inventaire Forestier National (IFN) recensent un certain nombre de paramètres sur les sols, et ce dans 1 124 relevés pour environ 120 000 ha forestiers dans l'Allier,

soit 1 pour 100 ha environ).

Néanmoins, dans ces 2 zones Est et Ouest, les parties agricoles étaient restées pratiquement sans étude de sols à ce jour, et les profils de sols analysés de façon standard homogène sous forêt restaient l'exception. Comme pour la synthèse de la partie centrale, ces 2 secteurs, représentant près de 162 000 ha à l'Est et plus de 115 000 ha à l'Ouest, ont donc été cartographiés à l'échelle du 1/250 000 IGCS, en visant un niveau moyen à supérieur, c'est à dire avec 1 sondage pour 200 ou 400 ha et 1 profil analysé pour 2000 ou 4000 ha.

Un zonage des sols à l'échelle du 1/100 000ème a d'abord été digitalisé dans un Système d'Information Géographique (SIG). Ensuite, la synthèse réalisée au 1/250 000ème et la Base de Données (DoneSol) associée en est une généralisation et une homogénéisation selon les principes du programme d'Inventaire, de Gestion et de Conservation des Sols (IGCS) mené par le Ministère de l'Agriculture et l'Institut National de la Recherche Agronomique. Les unités cartographiques semblables des différentes petites régions issues du zonage au 1/100 000ème ont été regroupées pour présenter une liste homogène pour l'ensemble de l'Allier. Toutefois, certaines unités cartographiques caractéristiques, bien que limitées en surface, ont été conservées. Les grands domaines géo-morpho-pédologiques en ont été déduits en s'appuyant sur la définition existante des petites régions naturelles départementales. Une harmonisation a été effectuée avec les RRP existants ou en cours des départements limitrophes (Loire, Saône-et-Loire, Nièvre, Cher et Creuse). Ce travail a été réalisé par le bureau d'études SOL-CONSEIL, par Nicolas Muller et Jean-Paul Party.

Par ailleurs les communautés microbiennes ont été caractérisées afin de donner une image de la biodiversité des sols du département de l'Allier. La composante biologique des sols est difficile à étudier. Ceci s'explique par une accessibilité plus ou moins difficile des populations au sein d'une matrice hétérogène et structurée mais aussi par leur densité et diversité très importantes. Les avancées méthodologiques qui ont eu lieu depuis une quinzaine d'années ont permis d'atteindre une automatisation des outils moléculaires qui rendent possible la caractérisation des ressources génétiques microbiennes des sols. L'abondance et la structure génétique des bactéries et champignons du sol ont été étudiées par la plateforme « GenoSol » sous la responsabilité de Anne-Laure Bliex, Samuel Dequiedt et Lionel Ranjard.

Les échantillons de sol envoyés à la plateforme GenoSol ont été préparés au laboratoire d'analyses des sols et des végétaux de VetAgro Sup sous la responsabilité de Charlène Paillat, Christian Cougoul et Laurence Andanson.

Les analyses physico-chimiques des sols prélevés entre juillet et novembre 2011 ont été réalisées par le laboratoire SADEF.

Il s'agit ainsi de la première couverture structurée des sols pour l'ensemble de l'Allier, disponible sur SIG et accompagnée d'un répertoire DoneSol et d'une base de données sur la caractérisation des communautés microbiennes des sols.

1. Présentation du département de l'Allier à 1/250 000

1.1. Grands ensembles géologiques et morphologiques (Figure 1)

L'Allier couvre au total environ 734 000 ha. C'est un département français assez étendu qui fait partie de la région Auvergne. Il représente environ 1,3 % du territoire français et a la particularité d'être limitrophe de 4 autres régions :

- à l'Ouest, le Limousin (département de la Creuse),
- au Nord, le Centre (département du Cher),
- au Nord-Est et à l'Est, la Bourgogne (départements de la Nièvre et de la Saône-et-Loire),
- au Sud-Est, la région Rhône-Alpes (département de la Loire).

Son périmètre recouvre un peu plus de 20 cartes géologiques au 1/50 000 toutes publiées, à l'exception de la feuille de Lapalisse.

L'Allier est un département dit de transition car il n'a pas d'unité géographique. Il correspond à une partie du rebord nord-ouest du Massif Central qui surplombe l'extrême sud du Bassin Parisien.

Les derniers reliefs granitiques y sont entaillés par des fossés et bassins tertiaires liés au réseau hydrographique de la Loire (associé à la Besbre à l'Est) et de deux de ses principaux affluents, l'Allier (associé à la Sioule) dans la partie centrale, le Cher (associé à l'Aumance) à l'Ouest. Ces bassins sont principalement constitués d'alluvions et des terres de Limagne au centre, de matériaux détritiques à l'Est (sables et argiles du Bourbonnais) et à l'Ouest. Ils se situent respectivement au pied des massifs granitiques de la Montagne Bourbonnaise (qui correspond à l'extension Nord des Monts de la Madeleine et du Forez) et de la Combraille Bourbonnaise.

Le Massif Central correspond à une partie de la chaîne hercynienne qui s'est formée il y a 380 millions d'années (Dévonien) sur toute une partie de l'Europe.

Les roches qui le composent sont alors essentiellement des gneiss, des schistes et micaschistes qui ont été déformés par des fractures liées aux failles le long desquelles des granites se sont ensuite mis en place pour l'essentiel il y a 300 millions d'années environ (Carbonifère). Le climat de type équatorial et la forêt correspondante conduisent alors à des bassins d'érosion dans lesquels des débris végétaux s'accumulent et forment les gisements de charbon du Sillon Houiller. Ces bassins s'étendent ensuite peu à peu jusqu'à la fin du Primaire, il y a 250 millions d'années (Permien) pour se remplir de sables et d'oxydes de fer qui formeront les grès rouges.

Le Massif Central est alors en grande partie démantelé et envahi par la mer et les formations sédimentaires du Secondaire (Trias et Jurassique) s'y déposent et subissent une altération à la fin du Secondaire et durant le Tertiaire.

Il y a 30 à 40 millions d'années au Tertiaire (Oligocène, Eocène), de nouvelles fractures conduisent d'une part à l'apparition des bassins d'effondrement dont la Limagne fait partie, où se déposent des sédiments argilo-sableux sur sols rouges, et de horsts d'autre part tels les Mont du Forez par exemple. Au sud, la phase volcanique commence il y a 15 millions d'années (durant le Miocène et le Pliocène) et se poursuivra jusqu'au Quaternaire récent.

A la fin du Tertiaire, des phénomènes d'érosion provoquent le dépôt des matériaux détritiques (sables argileux dans les bassins de la Loire, de l'Allier et du Cher). Enfin, au Quaternaire, il y a 2 à 1 millions d'années, les cours d'eau s'encaissent et déposent des alluvions sur des terrasses étagées et emboîtées.

Le relief se décompose en 3 grands ensembles (Figure 2) :

- les vallées, les plaines et plateaux détritiques du Bourbonnais, avec des altitudes comprises entre 150 et 350 m,
- les collines et plateaux granitiques de la Combraille et du Bourbonnais, de basse altitude (350-400 m à 500-600 m),
- la Montagne Bourbonnaise, massif au relief plus escarpé au sud-est du département d'une altitude comprise entre 500-600 m et un peu plus de 1 200 m.

Les vallées, plaines et plateaux détritiques du Bourbonnais en tant que telles comportent plusieurs sous-ensembles :

- à l'Est, la vallée de la Loire et le Val d'Allier, associés à la Limagne et à la Sologne Bourbonnaise,
- à l'Ouest, la vallée du Cher, associée au bassin de Montluçon,
- dans la partie centrale, le Bocage Bourbonnais, avec plusieurs bassins.

1.2. Caractéristiques climatiques (Figure 3)

Le climat du département de l'Allier est de type océanique modéré, avec une température moyenne de 11°C en plaine (7°C en altitude) et une amplitude thermique moyenne d'environ 20°C (près de 0°C en Janvier et de 20°C en Juillet en moyenne). Les étés sont donc chauds et relativement humides et les hivers relativement froids avec environ 80 jours de gel d'Octobre à Avril. Le Val d'Allier présente un caractère océanique dégradé et abrité de l'influence des masses d'air océaniques par les horsts du Massif Central qui l'encadrent sur lesquels l'essentiel des précipitations se déchargent (plus de 1 200 mm sur les sommets de la montagne Bourbonnaise). En conséquence, la plaine du Val d'Allier qui se trouve face aux parties les plus élevées de la montagne, présente les précipitations les plus faibles de la région, soit un peu moins de 600 mm pour environ 100 jours de pluie par an, contre 700 à 800 mm pour le reste de la plaine. Outre la Montagne Bourbonnaise, les pluies sont plus importantes au sud dans la Combraille (800 à 1000 mm).

1.3. Grands traits de l'occupation du sol (Figure 4)

L'occupation des sols de la région se répartit en 3 grands ensembles (Corine Land Cover, 2006 et CDA03, 2010) :

- les espaces urbains et industriels et ceux qui y sont reliés (jardins, vergers) qui occupent près de 55 000 ha, soit environ 8 % du territoire, ceci correspondant à la moyenne nationale comprise entre 8 et 12 %,
- les espaces forestiers qui occupent au total environ 130 000 ha, soit un peu plus de 15 % de la surface de l'Allier, avec 10 000 ha de surfaces en eau,
- les espaces agricoles qui occupent environ 540 000 ha, dont 485 000 ha de SAU, soit près de 65 % de la surface de l'Allier, avec environ 120 000 ha de terres cultivées – céréales à paille 80 000 ha, maïs 20 000 ha, protéagineux 20 000 ha – et 360 000 ha de prairies (dont près de 240 000 permanentes).

L'importance des espaces prairiaux est la principale caractéristique de ce département. Ceci rend compte d'une agriculture principalement tournée vers l'élevage (pour 85 % de ses exploitations), faute de sols de qualité en surface suffisante pour leur mise en culture. Ceci souligne déjà le caractère « défavorisé » de ce département, dont rendait déjà compte la Géographie illustrée de la France de Jules Verne au XIX^{ème} siècle (1868).

Figure 1 : Formations géologiques de l'Allier (source : ©BRGM carte géologique au million – Echelle ≈ 1/750 000)

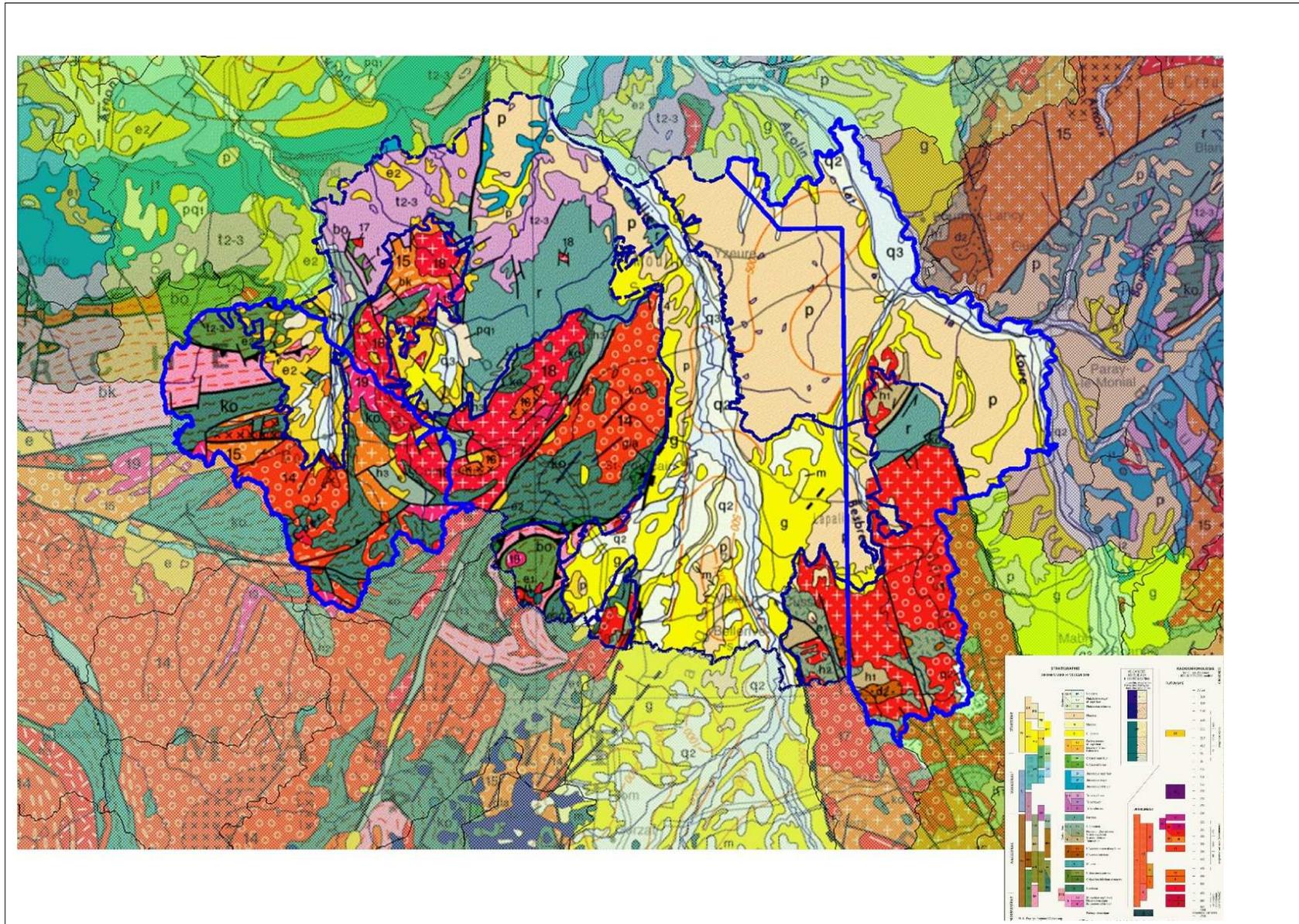


Figure 2 : Relief de l'Allier (pentes en %) (source : MNT250 – IGN – Echelle $\approx 1/750\ 000$)

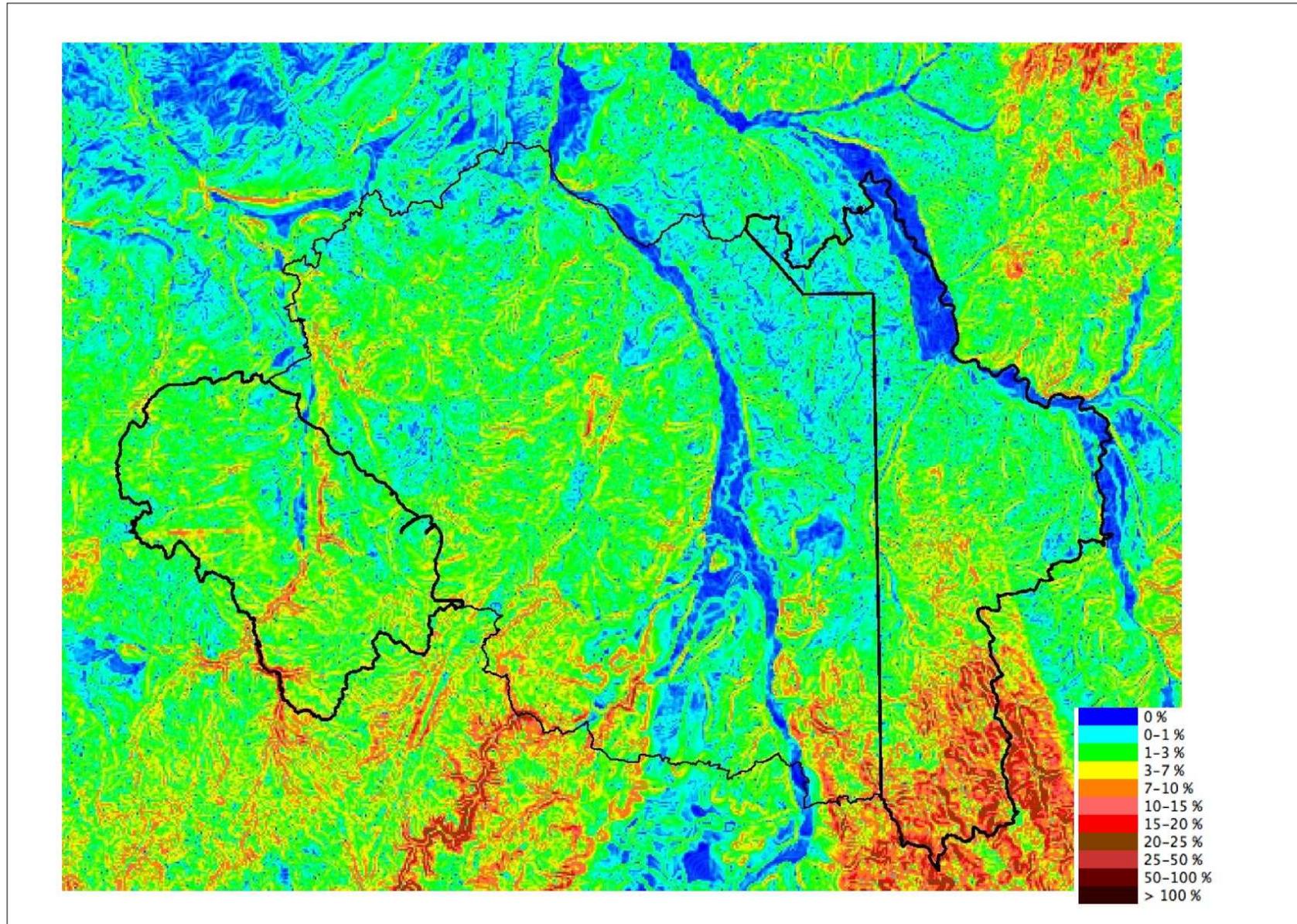


Figure 3 : Répartition de la pluviométrie dans l'Allier (source : Extrait de la carte des précipitations annuelles 1891-1930 établie par la section climatologie de l'ONM in Favrot *et al.*, 1969 – Echelle $\approx 1/750\ 000$)

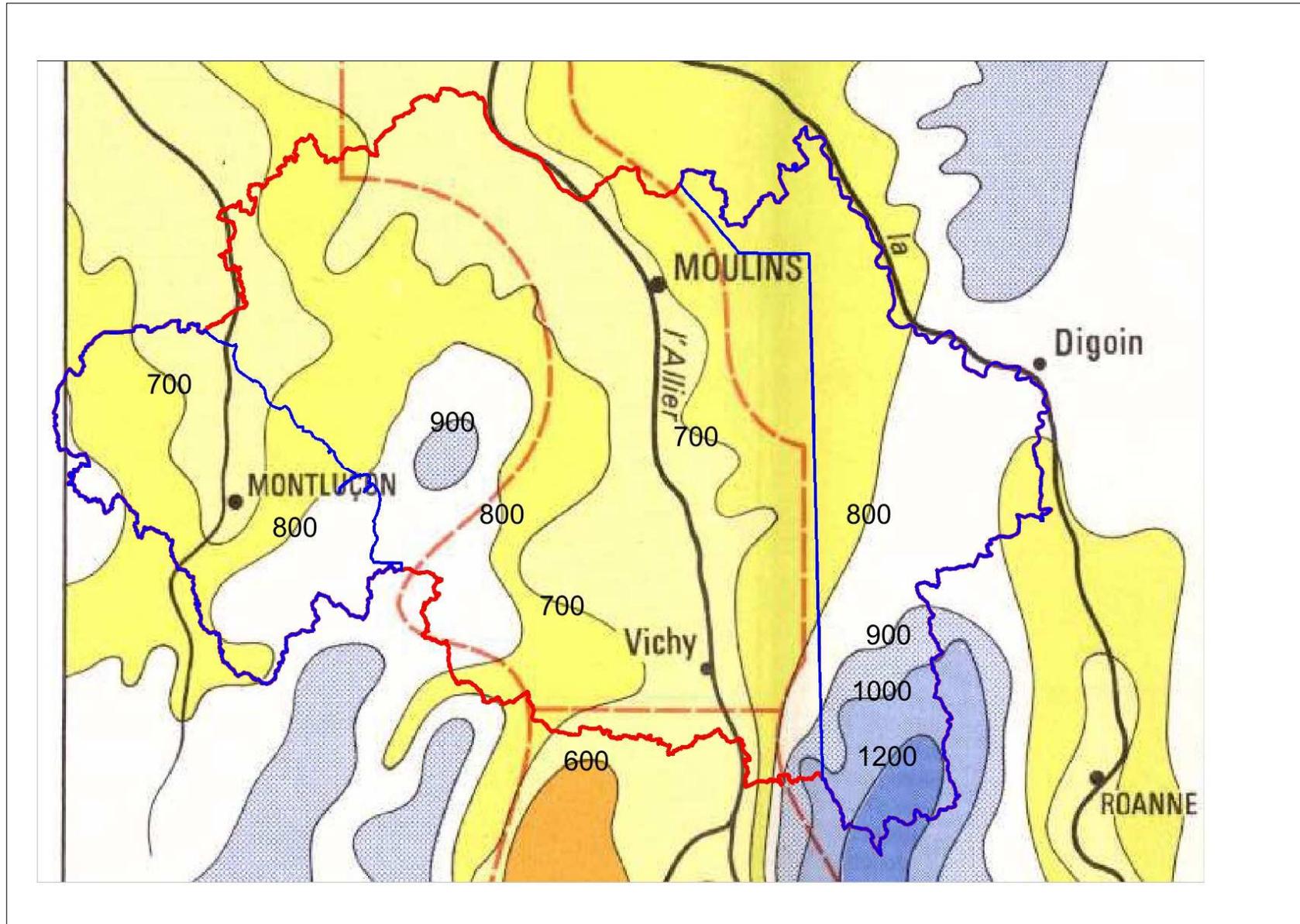
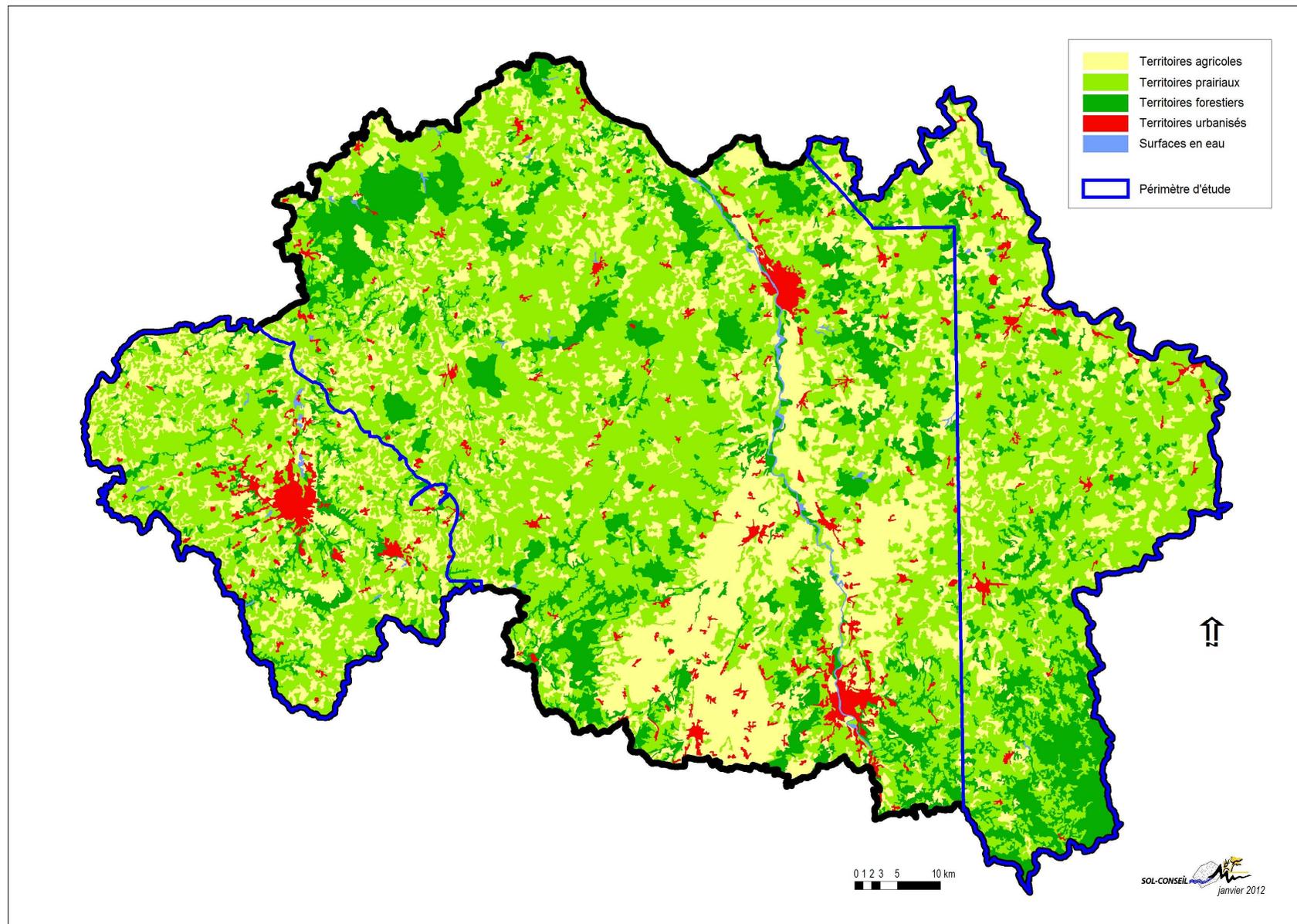


Figure 4 : Espaces agricoles, forestiers et urbains dans l'Allier (source : Corine Land-Cover, 2006)



Les espaces forestiers sont majoritairement représentés dans la Montagne Bourbonnaise. La forêt y occupe près de 30 000 ha, soit environ 35 % de la montagne. L'occupation forestière varie selon les autres petites régions de l'Allier de 10 à 20 % des surfaces. Le reste des surfaces est très majoritairement occupé par les prairies, sauf dans le Val d'Allier et la Limagne, dont les terres sont majoritairement cultivées. Ce sont les seules régions qui comportent une part prépondérante de cultures.

Les forêts de Montagne Bourbonnaise et de Combraille se répartissent selon 3 étages bioclimatiques :

- l'étage collinéen, de 400 à 600 m, constitué de peuplements de chêne sessile avec hêtre et charme, châtaignier et robinier, pouvant être enrésinés de pin sylvestre et d'épicéa, pour environ 25 000 ha à moins de 400 m d'altitude,
- l'étage montagnard lui succède ensuite jusqu'à 900-1000 m, soit avec le pin sylvestre et le hêtre, soit le sapin toujours associé au hêtre, et souvent mélangé à l'épicéa, sur les versants granitiques sur environ 15 000 ha,
- l'étage montagnard supérieur avec une hêtraie à sapin se terminant vers 1200-1300 m, et couvrant environ 4 à 5 000 ha.

Les autres espaces forestiers se situent dans le Bocage et la Sologne Bourbonnaise pour environ 80 000 ha, dont un peu plus de 10 000 pour la forêt de Tronçais.

Les espaces agricoles présentent une occupation spécifique en 2 grands ensembles :

- d'une part, elle est principalement agro-pastorale dans tout le Bocage et la Sologne Bourbonnaise ainsi qu'en Combraille et dans les espaces ouverts de Montagne Bourbonnaise ; les surfaces herbagères représentent 65 % de la SAU régionale,
- d'autre part, les alluvions du Val d'Allier, ainsi que les terres de Limagne qui s'y rattachent sont le principal domaine des grandes cultures du département ; ces surfaces représentent au total 135 000 ha, dont 75 % de la SAU est cultivée : 80 % y est consacrée aux grandes cultures, dont 65 % pour les céréales à pailles, le reste étant cultivé à parts égales entre le maïs et les protéagineux.

L'occupation du sol est ainsi le reflet de la qualité des types de sols, qui ne sont réellement favorables que dans le Val d'Allier et la Limagne.

2. Méthode et mise en forme des résultats

La réalisation de la carte des pédopaysages à 1/250 000 du département de l'Allier complète une suite d'études cartographiques réalisées pendant 10 ans entre 1965 et 1975 par le Service d'Etudes des Sols de l'INRA de Montpellier.

Outre ces documents de base, d'autres études ayant trait aux sols forestiers ont été menées au cours des années 1990 pour la typologie de stations forestières et l'Inventaire Forestier National. Ces données ont permis d'améliorer le contenu de la cartographie des sols forestiers.

La cartographie des pédopaysages de l'Allier au 1/250 000^{ème} est donc d'abord une synthèse et une généralisation de ces sources documentaires, mise en conformité avec les principes directeurs de l'Inventaire, la Gestion et la Conservation des Sols (IGCS) de France. En l'état, c'est la meilleure actualisation des données qui soit possible sur ce département.

2.1. Données rassemblées

2.1.1. Données surfaciques

Comme suggéré en préalable, la carte réalisée est issue en partie de la collecte de nombreuses observations réalisées par le passé dans l'Allier.

Les études pédologiques recensées en 2011 dans le département de l'Allier sont concentrées sur une zone située au centre du département et en couvre environ les 2/3 (Figure 5 et Annexe 1). Les études de sol au 1/100 000 couvrent une surface continue, avec des zones de chevauchement.

Sur la zone centrale, les pédopaysages au 1/250 000 ont été obtenus en regroupant des unités de sol définies à l'échelle la plus proche, le 100 000^{ème}. A cette échelle, la plupart des unités cartographiques ne comportent qu'un type de sol.

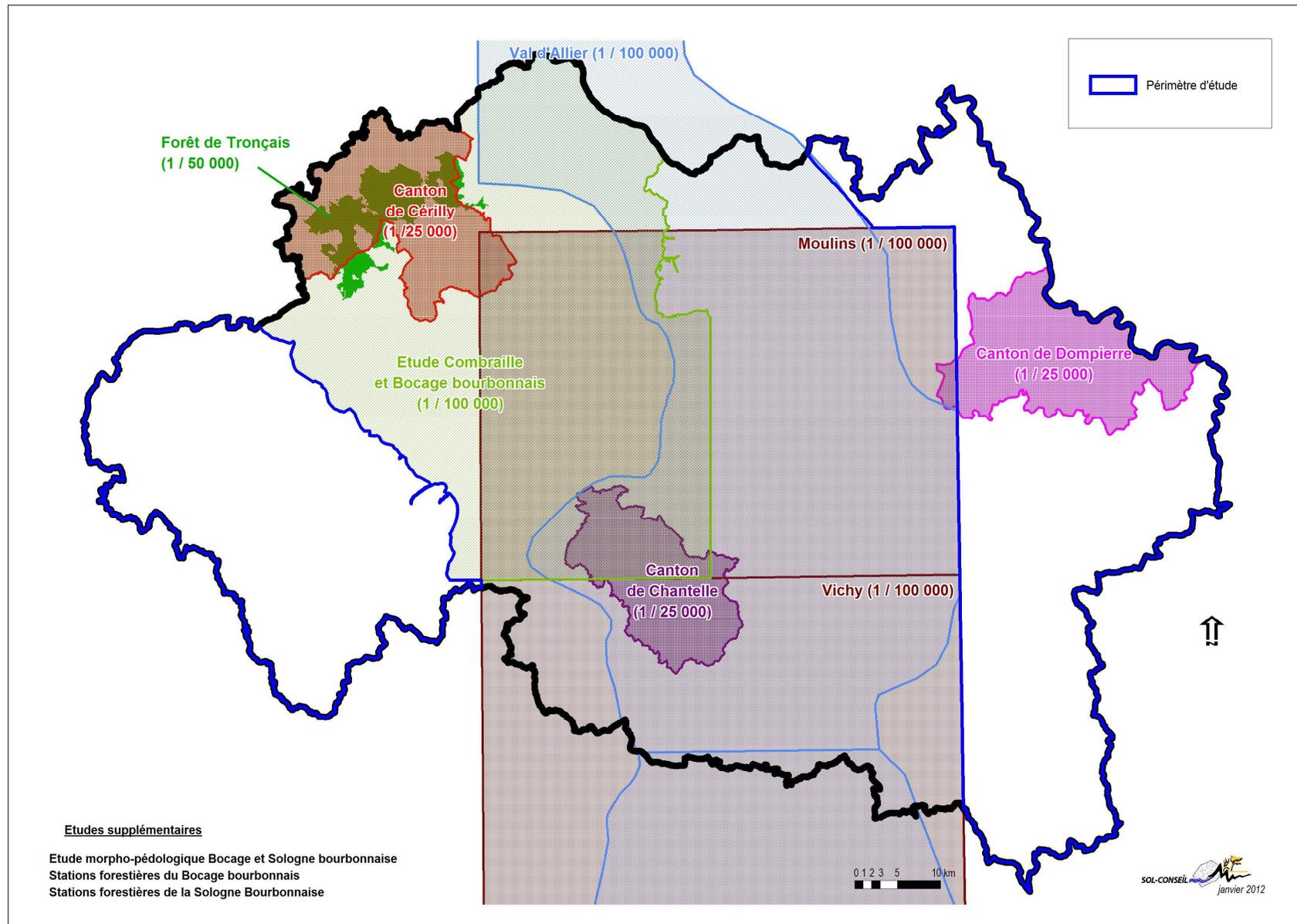
Le passage a proprement dit du 1/100 000^{ème} au 1/250 000^{ème} a consisté à regrouper des unités de sol au sein de pédopaysages. Les composantes du pédopaysage que sont la lithologie, la géomorphologie, le relief, l'hydrologie, l'occupation du sol,... ont servi à réaliser ce regroupement.

Les données suivantes ont ainsi été exploitées :

- MNT de la région Auvergne (résolution 10 m) (Raster),
- CORINE LAND COVER (1996, 2000 et 2006) national (Vecteur),
- Carte géologique (1/1 000 000^e, 1/50 000^e) en flux WMS (site du BRGM) et notices,
- Orthophotoplan 2009 de la région Auvergne (résolution 30 cm) (Raster),
- BD Carthage : référentiel hydrographique de la région Auvergne (Vecteur),
- Scan 1000 (France), Scan 100 et Scan 25 sur l'Auvergne (Raster),
- BD carto sur l'Auvergne : information sur l'administratif, le réseau routier, ferré, l'hydrographie... (Vecteur).

Dans la mesure du possible, les unités de sol définies dans les études pédologiques au 1/100 000^{ème} ont été réutilisées pour caractériser la composition en types de sol des pédopaysages au 1/250 000^{ème}. Toutefois, dans la logique des pédopaysages, il a parfois été nécessaire de créer les unités de sol à partir d'un regroupement de profils, en revenant donc à l'information de base qui est la donnée ponctuelle.

Figure 5 : Etudes existantes réalisées dans l'Allier



2.1.2. Données ponctuelles

Les informations recueillies sur les points d'observation antérieurs n'ont pas toutes été intégralement conservées. Ainsi, du fait de leur ancienneté, les fiches de sondages n'ont pas été retrouvées. Cela représente néanmoins plusieurs milliers d'observations réalisées :

Etude	Echelle	Nombre de sondages
Pierrefitte-sur-Loire	1/10 000	500*
Chantelle	1/25 000	1 500*
Cérilly et Tronçais	1/25 000	2 000*
Dompierre-sur-Besbre	1/25 000	1 900
Val d'Allier	1/100 000	1 900*
Bocage Bourbonnais - Combraille	1/100 000	900
Vichy	1/100 000	3 000*
Moulins	1/100 000	4 400*
Limagne	1/100 000	100*
Stations Forestières S. Bourbonnaise	-	800
Stations Forestières B. Bourbonnais	-	400*
Morpho-pédo B. et S. Bourbonnaise	-	500*
Relevés IFN	-	1 100
IGCS Allier Est et Ouest	1/250 000	850**
Total	-	19 850

* estimation - ** fiches DoneSol archivées

Tableau 1 : Répartition du nombre de sondages réalisés dans l'Allier

L'ensemble représente près de 20 000 sondages réalisés, soit 1 sondage pour moins de 40 ha en moyenne. Cependant, les sondages réalisés en 2011 seulement pourront, le cas échéant, être stockés en base de données du fait de l'absence d'archives connues à ce jour pour les autres.

Pour les espaces forestiers, plusieurs sources existantes pourront être mises à contribution à l'avenir :

- les observations sur les sols effectuées pour les relevés phyto-écologiques systématiques de l'Inventaire Forestier National, soit 1 124 sondages (1 pour 100 ha en moyenne),
- les observations sur les sols effectuées pour les relevés phyto-écologiques des catalogues de stations forestières, estimés à environ 1 700 sondages (1 pour 80 ha environ),
- les observations sur les sols effectuées pour les cartographies de stations forestières effectuées à grande échelle réalisées dans certains massifs-tests (en général 1 par ha ou moins), étant susceptible d'avoir porté au plus sur quelques centaines d'hectares.

De même que pour les sondages, environ 900 profils localisés, soit 1 pour 800 ha, ont été décrits et analysés. Ils ont été utilisés pour la réalisation de la synthèse cartographique :

Etude	Echelle	Nombre de profils
Pierrefitte-sur-Loire	1/10 000	0
Chantelle	1/25 000	0 (68)*
Cérilly et Tronçais	1/25 000	0 (153)*
Dompierre-sur-Besbre	1/25 000	121 (126)*
Val d'Allier	1/100 000	22 (220)*
Bocage Bourbonnais - Combraille	1/100 000	265 (361)*
Vichy	1/100 000	140
Moulins	1/100 000	204
Limagne	1/100 000	0
StatFor S. Bourbonnaise	-	13
StatFor B. Bourbonnais	-	18
Morpho-pédo B. et S. Bourbonnaise	-	21
Relevés IFN	-	0
RMQS/Biosoil		30
IGCS Allier	1/250 000	86**
Total	-	920

* prise en compte des seuls profils qui ne sont pas déjà décomptés dans les feuilles de Vichy et Moulins (entre parenthèse, total des profils situés dans le département de l'Allier)

** profils localisés au GPS et fiches DoneSol archivées

Tableau 2 : Répartition du nombre de profils réalisés dans l'Allier

Le décompte réalisé permet de constater que 80 % des profils sont correctement localisés, décrits et analysés.

De la même façon que les sondages, ces profils sont rattachés à une étude, un auteur et une date. La plupart de ces profils sont stockés dans la base de données DoneSol.

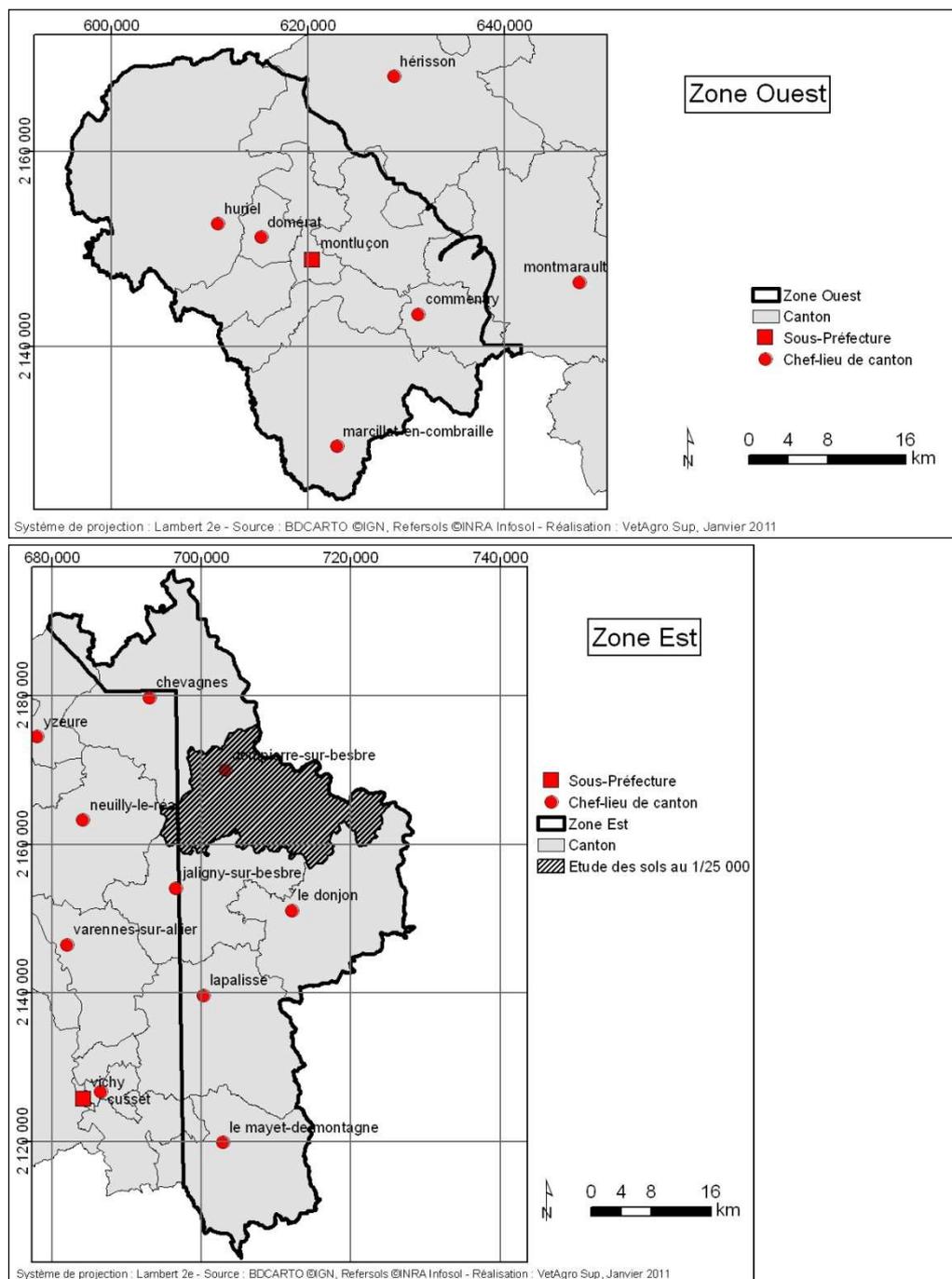
Ainsi, l'ensemble des données ponctuelles observées depuis plus de 40 ans dans l'Allier conduit à 1 ratio de 1 sondage pour moins de 40 ha et 1 profil de sol décrit et analysé pour 800 ha.

2.2. Acquisition de données

2.2.1. Prospections pédologiques à l'Est et à l'Ouest de l'Allier

Les prospections pédologiques ont été effectuées sur une surface totale d'environ 274 000 ha, soit environ 1/3 du département. Cette surface a été divisée en deux sous-zones désignées ci-après « zone Ouest » et « zone Est » (Figure 6).

Figure 6 : Localisation des zones prospectées en 2011



La densité des observations a été de 1 sondage pour 400 ha et de 1 fosse pour 4 000 ha. Sur la zone Ouest, dans le bassin de Montluçon, une densité d'observations plus importante a été retenue, pouvant atteindre 1 sondage pour 200 ha et 1 fosse pour 2 000ha.

La localisation des fosses a été choisie pour caractériser en priorité les types de sol qui occupent le

plus de surface sur la zone d'étude.

Dans les pages suivantes, nous présentons successivement :

- l'emplacement des sondages de sols effectués en 2011 à l'Est et à l'Ouest du département (Figure 7),
- l'emplacement de tous les profils pédologiques (= fosses) (Figure 8).

Sur les fosses, un échantillon de terre par horizon a été prélevé. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées sur ces échantillons par le laboratoire SADEF.

Figure 7 : Répartition des sondages réalisés en 2011 dans les parties Est et Ouest de l'Allier au regard des profils existants dans la partie centrale

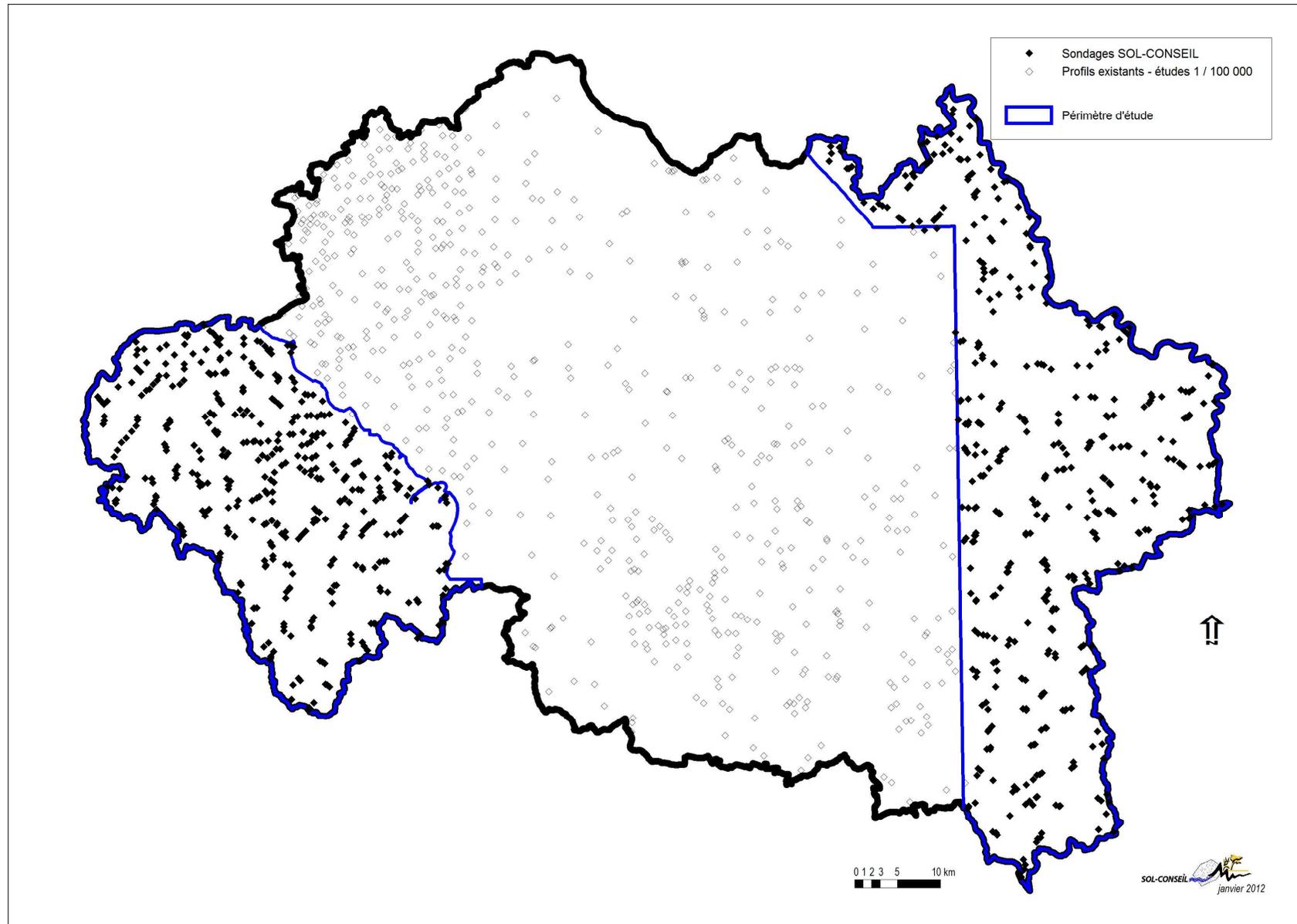
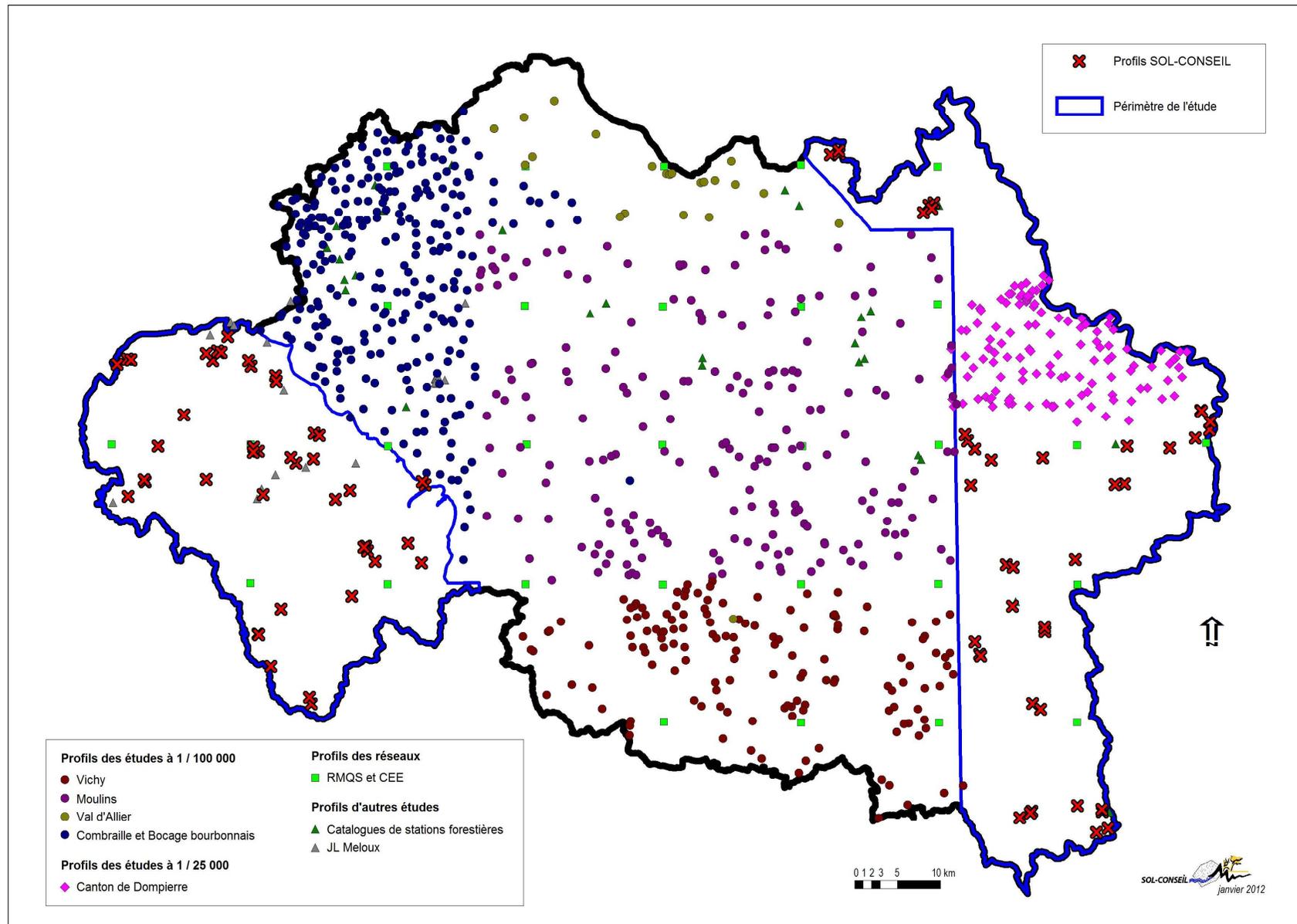


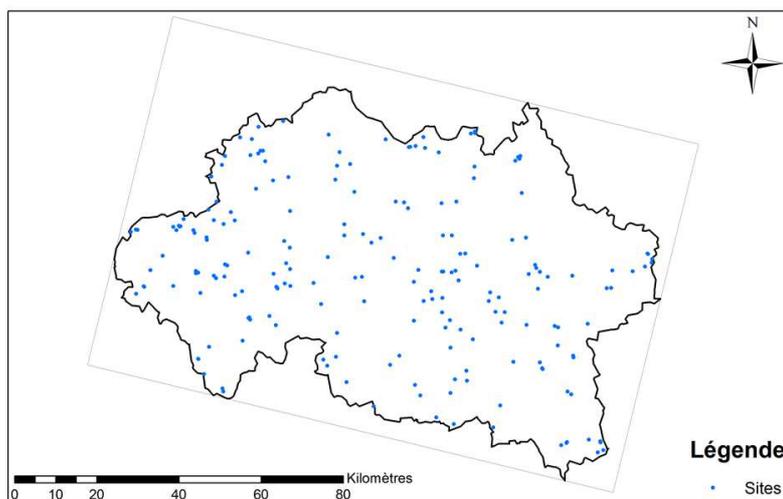
Figure 8 : Répartition des profils existants et réalisés en 2011 dans l'Allier



2.2.2. Prospections pour la caractérisation des communautés microbiennes des sols

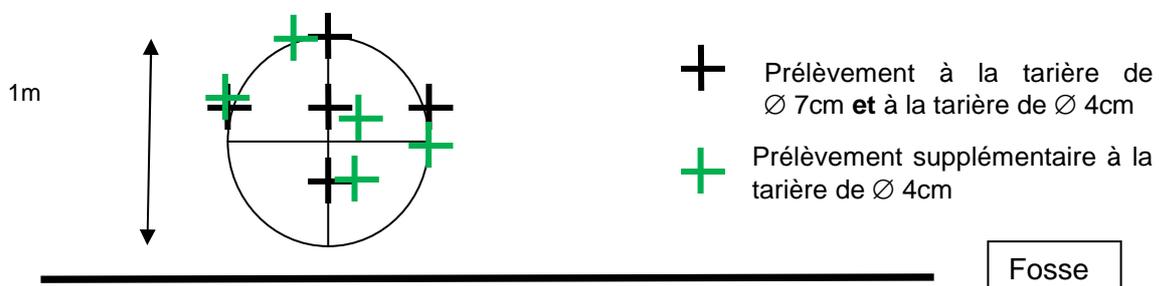
La stratégie d'échantillonnage est basée sur une spatialisation des sols échantillonnés à l'échelle du département de l'Allier, selon un échantillonnage stratifié et construit avec *a priori* selon la typicité départementale des caractéristiques pédologiques des sols. Au sein du département 200 sols ont été échantillonnés et analysés pour leurs caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques (Figure 9).

Figure 9 : Carte des sols échantillonnés à l'échelle du département de l'Allier.



Les microorganismes sont caractérisés sur un échantillon composite de 5 prélèvements effectués sur une profondeur 0-30 cm à l'aide d'une tarière hélicoïdale \varnothing 7cm (ou tarière hélicoïdale \varnothing 4cm si sol trop caillouteux ou trop sec).

Les prélèvements sont réalisés au niveau de la fosse comme indiqué sur le schéma ci-dessous :



Les mises en garde de prélèvement p64-65 du manuel RMQS ont été suivies. La quantité prélevée était de 2 à 4 kg.

Après séchage, tamisage et quartage, un échantillon de 50g a été transmis à la plateforme GenoSol pour la caractérisation des communautés microbiennes de l'Allier.

2.3. Mise en forme des données, caractéristiques de la carte réalisée

La cartographie synthétique des sols de l'Allier à 1/250 000 est constituée de fichiers cartographiques représentant les pédopaysages digitalisés et la localisation de tous les sondages, profils et analyses réalisés, au format .shp lisible par les principaux Systèmes d'Information Géographique, associée à une base de données DoneSol.

La base de données pédologiques est présentée selon la structuration de DoneSol, à savoir :

- la carte des pédopaysages est un ensemble d'Unités Cartographiques (UC ou UCS),
- chaque UC est constituée d'une ou plusieurs Unités de Sol (US ou UTS, avec T comme typologique),
- une US peut appartenir à une ou plusieurs UC,
- chaque US est constituée d'une ou plusieurs STRATES,
- une STRATE ne peut appartenir qu'à une seule US.

La carte des pédopaysages de l'Allier au 1/250 000 contient 85 UC dont 3 de « non sol ».

Elles sont réparties en près de 2 212 polygones (ou plages cartographiques)

Au 1/250 000ème, ces UC sont définies par 244 US, elles-mêmes décrites par 877 STRATES (Annexe 2 : Caractéristiques des UC (n°, surface, % département, nombre de plages, nombre US)).

3. Présentation de la carte des pédopaysages de l'Allier à 1/250 000

3.1. Les régions naturelles

Comme dans toute la France, les petites régions sont définies de 2 façons : selon le découpage INSEE, tel que l'utilise aussi le RGA, et le découpage de l'IFN.

Les petites régions agricoles (PRA) utilisées dans le RGA et définies par l'INSEE sont au nombre de 5 dans le département de l'Allier (Figure 10) :

N°	Nom INSEE	Surface (ha)	% Allier
1	Bocage Bourbonnais	272 340	37%
2	Combraille Bourbonnaise	84 453	12%
3	Limagne agricole	132 656	18%
4	Monts du Forez	90 591	12%
5	Sologne Bourbonnaise	153 971	21%
Total	Allier	734 000	

L'inventaire Forestier National (IFN) distingue quant à lui 6 régions forestières (Figure 11) :

N°IFN	Nom IFN	Surface (ha)	% Allier
1	Montagne Bourbonnaise	80 174	11%
2	Basse Combraille	194 664	26%
3	Bocage Bourbonnais - Boischaut-Sud	150 770	20%
4	Sologne Bourbonnaise	147 991	20%
5	Val d'Allier et Limagne	146 988	20%
6	Moyenne Combraille	16 557	2%
Total	Allier	737 000	

Les régions utilisées pour l'élaboration de la carte des pédopaysages ont été établies d'après l'homogénéité des paysages géologiques, morphologiques et pédologiques. En respectant les usages antérieurs, les intitulés en sont les suivants :

N°	Nom	Surface (ha)	% Allier
11 + 37	Vallée de la Loire et Sologne Bourbonnaise	156 819	21%
12 + 14 + 21 + 22	Val d'Allier, Vallée de la Besbre, et Plaines et collines calcaires de Limagne	128 290	17%
13 + 31 à 36	Vallée du Cher et Bocage Bourbonnais	154 061	21%
41 + 42	Basse et Moyenne Combraille	213 453	29%
43 + 44	Collines et Montagne Bourbonnaise	81 514	11%
Total	Sols Allier (surface « non sol » non comptabilisée)	734 137	

Figure 10 : Carte des petites régions agricoles de l'Allier (source : INSEE-RGA)

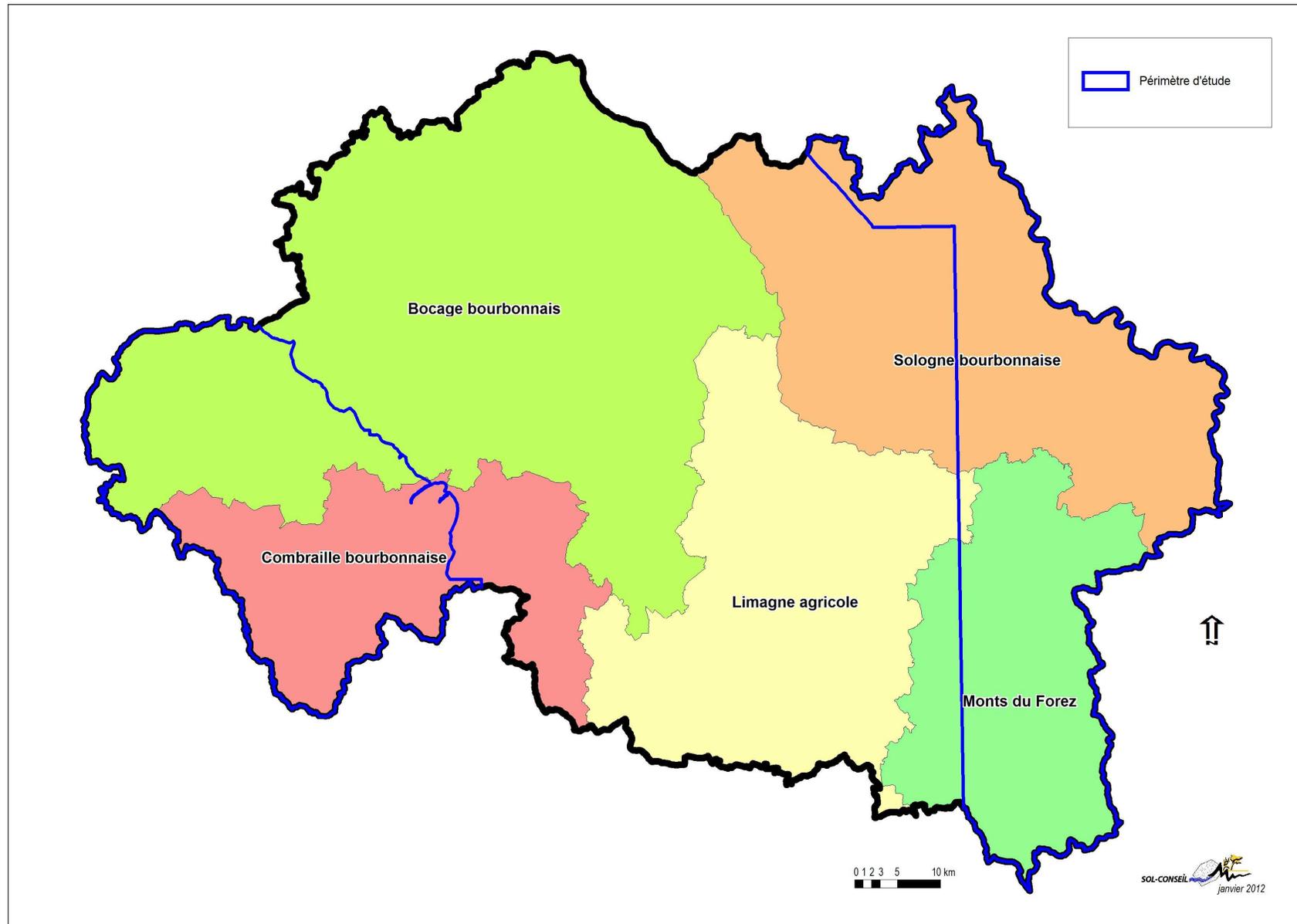
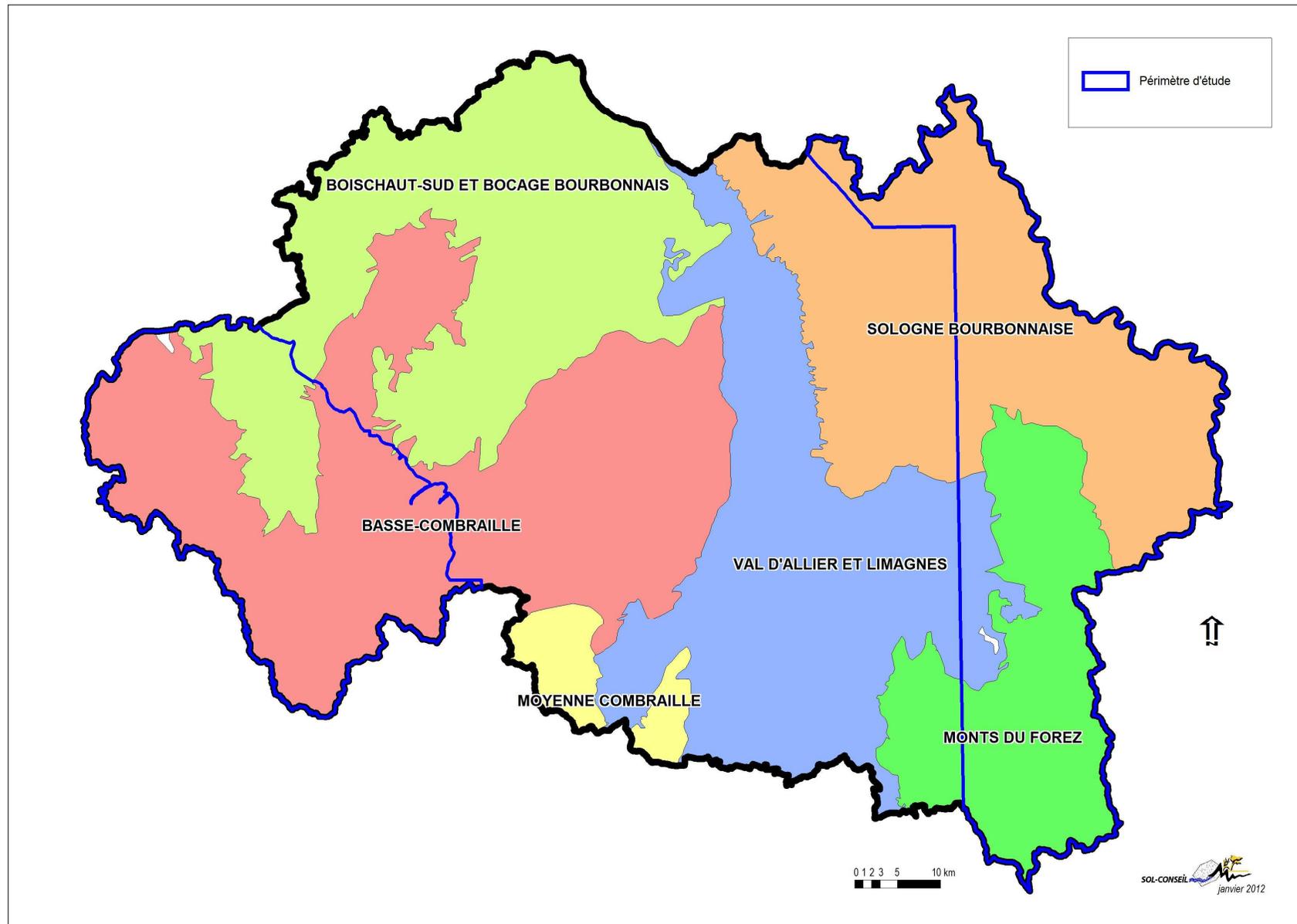


Figure 11 : Carte des petites régions forestières (source : IFN-IGN)



3.1. Les unités cartographiques

3.1.1. Description sommaire d'ensemble

La description des Unités Cartographiques (UC) représente la légende détaillée de la carte des pédopaysages de l'Allier. Elle s'appuie sur les caractéristiques typiques des Unités de Sols (US) les composant. Les UC sont numérotées pour toute la carte avec 4 chiffres : 2 pour chacune des sous-régions définies ci-dessous et 2 pour chaque UC les composant de 01 à nn, ceci permettant de créer si nécessaire plus de 10 UC pour les 17 petites sous-régions définies ci-dessous.

1 – Vallée de la Loire et affluents

- 11. Vallée de la Loire
- 12. Val d'Allier
- 13. Vallée du Cher
- 14. Vallée de la Besbre

2 – Plaines et Collines calcaires de Limagne

- 21. Plaine de Limagne Nord
- 22. Côtes bordières calcaires

3 – Bocage Bourbonnais et Sologne Bourbonnaise

- 31. Bassin de Montluçon
- 32. Bassin de Cosne-d'Allier
- 33. Bassin de Bourbon l'Archambault
- 34. Sud de la dépression du Val de Germigny (Berry)
- 35. Plateaux de Tronçais-Civrais
- 36. Plateaux de Lurcy-Lévis
- 37. Sologne Bourbonnaise

4 – Massifs cristallins

- 41. Basse Combraille
- 42. Moyenne Combraille
- 43. Collines Bourbonnaises
- 44. Montagne Bourbonnaise

Enfin, les cas particuliers des UC « non sol » sont numérotées selon la typologie nationale :

- 6 Zones urbanisées,
- 4 Cours d'eau de largeur conséquente,
- 3 Plans d'eau d'étendues conséquentes.

3.1.2. Grandes familles d'UC

Comme mentionné précédemment, la légende a d'abord été divisée selon les 4 grands domaines morphologiques marquant le relief régional :

- les vallées (Loire, Allier, Cher, Besbre),
- les plaines et collines de Limagne,
- les bassins et plateaux d'épandage (Bocage Bourbonnais et Sologne Bourbonnaise),
- les massifs cristallins : Combraille et Montagne Bourbonnaise.

Ces 4 grands domaines morphologiques (GDM) sont à leur tour divisés en 17 petits domaines morphologiques (PDM) comportant chacun au moins 2 UC (et jusqu'à plus de 10).

1. Vallée de la Loire et de ses affluents : 11 – Vallée de la Loire (UC 1101 à 1104), 12 – Val d'Allier (UC 1201 à 1204), 13 – Vallées du Cher et de l'Aumance (UC 1301 à 1304), 14 – Vallée de la Besbre et des petites rivières affluentes de la Loire (UC 1401 à 1402),

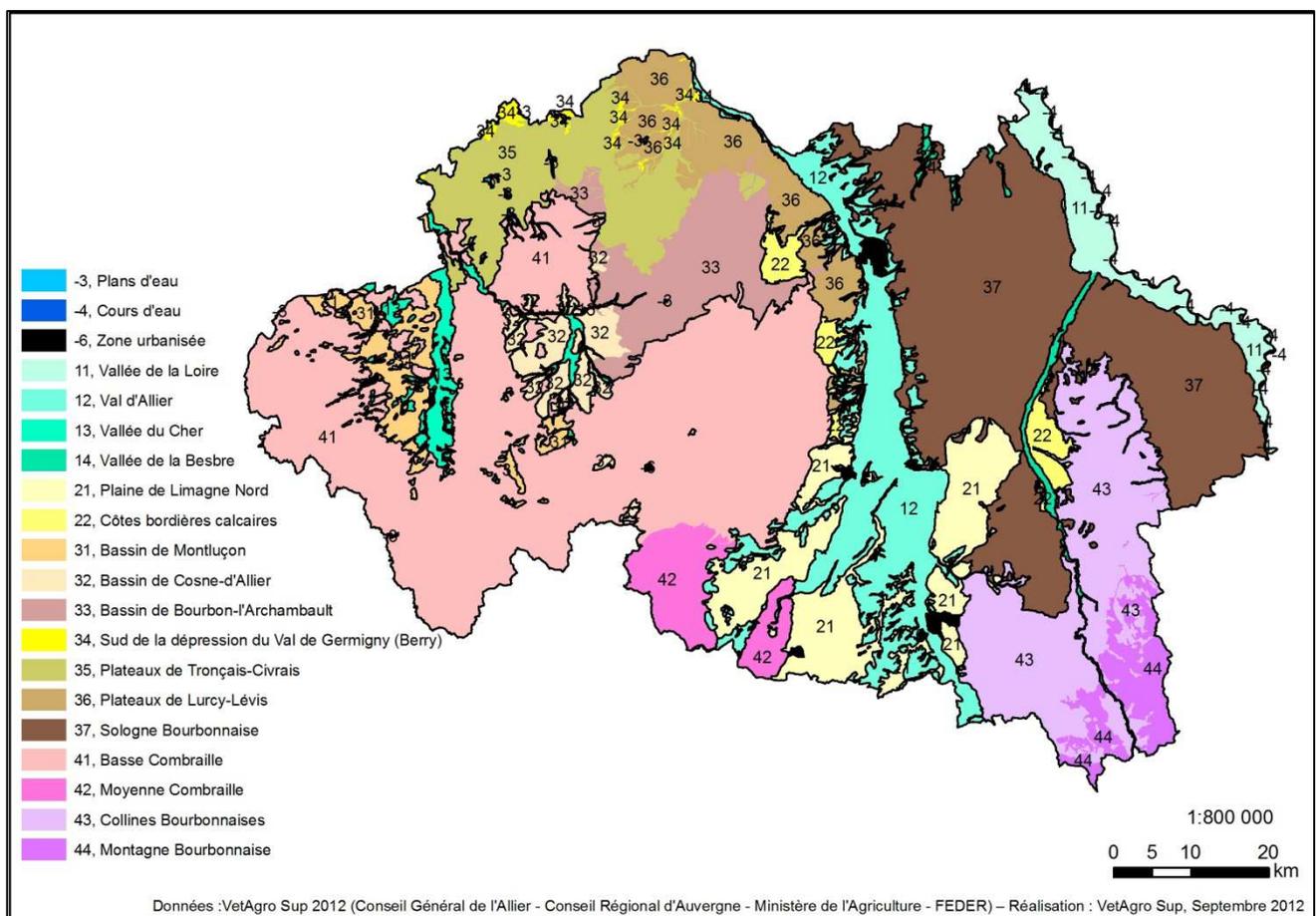
2. Plaines et collines calcaires de Limagne : 21 – Plaine de Limagne Nord (UC 2101 à 2107), 22 – Côtes bordières calcaires (UC 2201 à 2202),

3. Bassins sédimentaires du Bocage Bourbonnais et de Sologne Bourbonnaise : 31 – Bassin de Montluçon (UC 3101 à 3104), 32 – Bassin de Cosne-d'Allier (UC 3201 à 3205), 33 – Bassin de Bourbon-l'Archambault (UC 3301 à 3306), 34 – Sud de la dépression du Val de Germigny (Berry) (UC 3401 à 3403), 35 – Plateaux de Tronçais-Civrais (UC 3501 à 3505), 36 – Plateaux de Lurcy-Lévis (UC 3601 à 3604), Sologne Bourbonnaise (UC 3701 à 3705),

4. Massifs cristallins de Combraille et de Montagne Bourbonnaise : 41 – Basse Combraille (UC 4101 à 4112), 42 – Moyenne Combraille (UC 4201 à 4205), 43 – Collines Bourbonnaises (UC 4301 à 4307), 44 – Montagne Bourbonnaise (UC 4401 à 4403).

Le regroupement de ces UC permet ainsi de présenter une carte simplifiée de la structuration des unités cartographiques de sols et de montrer les différents types de matériaux présents dans l'Allier (Figure 12).

Figure 12 : Carte des GDM et PDM du département de l'Allier



3.1.3. La composition en sols des pédopaysages de l'Allier

1 VALLE DE LA LOIRE ET DE SES AFFLUENTS

11 Vallée de la Loire

Vallée de la Loire, plaine alluviale (FLUVIOSOL leptique caillouteux 15% et FLUVIOSOL brunifié pachique, localement rédoxique 85%) sur alluvions récentes, sous prairies et cultures

Vallée de la Loire, plaine alluviale hydromorphe (FLUVIOSOL rédoxique pachique 85%, REDOXISOL fluviq ue pachique 8% et REDUCTISOL fluviq ue pachique 7%) sur alluvions récentes, sous prairies principalement

Vallée de la Loire, basses terrasses (FLUVIOSOL faiblement rédoxique 65%, REDOXISOL fluviq ue pachique 20% et REDUCTISOL fluviq ue pachique 10%) sur alluvions anciennes, sous prairies principalement

Vallée de la Loire, hautes terrasses (BRUNISOL à NEOLUVISOL fluviq ue faiblement rédoxique 35%, BRUNISOL rédoxique 30%, LUVISOL rédoxique 25% et BRUNISOL leptique caillouteux 10%) sur alluvions très anciennes, sous cultures principalement

12 Val d'Allier

Vallée de l'Allier, plaine alluviale (FLUVIOSOL caillouteux inondable 40%, FLUVIOSOL TYPIQUE 20% et FLUVIOSOL BRUNIFIE 40%) sur alluvions récentes, sous végétation naturelle, prairies et cultures

Vallée de l'Allier, plaine alluviale hydromorphe, dépressions et base des basses terrasses (FLUVIOSOL à horizon rédoxique de profondeur 50%, REDUCTISOL 30% et REDOXISOL 20%) sur alluvions récentes, sous prairies et cultures

Vallée de l'Allier, basses et moyennes terrasses (BRUNISOL EUTRIQUE sableux 60%, rédoxique 15%, vertique 15% et REDOXISOL ferronodulaire 5%) sur alluvions anciennes, sous cultures et prairies

Vallée de l'Allier, hautes terrasses résiduelles planes et surfaces d'érosion (LUVISOL rédoxique 55%, PLANOSOL 10%, NEOLUVISOL-REDOXISOL 15%, BRUNISOL DYSTRIQUE 15% et EUTRIQUE 5%), sur argiles sableuses, sous forêts, prairies, vignes

13 Vallée du Cher

Vallées du Cher, de l'Aumance et affluents, plaine alluviale du lit majeur, inondable (FLUVIOSOL BRUNIFIE 45%, BRUNISOL DYSTRIQUE fluviq ue réductique 35% et REDUCTISOL 15% dans les bras morts, COLLUVIOSOL en bordures 5%), sous prairies

Vallées du Cher et de l'Aumance, basses terrasses (BRUNISOL DYSTRIQUE fluviq ue 50%, BRUNISOL DYSTRIQUE fluviq ue caillouteux 40% et NEOLUVISOL rédoxique fluviq ue 10%) d'alluvions anciennes limono-sablo-argileuses, ocre-rouse, sous prairies

Vallée du Cher, moyennes et hautes terrasses sur alluvions anciennes faiblement ondulées (NEOLUVISOL rédoxique 20%, LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL 5%, BRUNISOL rédoxique 30%, BRUNISOL caillouteux 45%) principalement sous cultures et prairies

Vallée du Cher, très hautes terrasses sur alluvions très anciennes (LUVISOL-REDOXISOL 45%, NEOLUVISOL rédoxique 30%, BRUNISOL DYSTRIQUE rédoxique 20%, REDOXISOL fluviq ue 3%) sous cultures et prairies, (PODZOSOL à mor 2%) sous châenaie acide

14 Vallée de la Besbre (et des petites rivières affluentes de la Loire)

Vallée de la Besbre, plaine alluviale (FLUVIOSOL pachique 60% et FLUVIOSOL rédoxique 40%) sur alluvions récentes, sous prairies principalement

Vallée de la Besbre et petites vallées affluentes de la Loire, basses et moyennes terrasses (LUVISOL rédoxique 45%, BRUNISOL DYSTRIQUE fluviq ue 30%, et rédoxique 20% et REDUCTISOL fluviq ue pachique 5%), sous prairies et quelques cultures

2 PLAINES ET COLLINES CALCAIRES DE LIMAGNE

21 Plaine de Limagne Nord

- 2101 Buttes ("turots") et petits plateaux tabulaires calcaires à rebords escarpés (CALCOSOL 65% sur buttes et plateaux, RENDOSOL 30% sur sommets de butte et pentes et COLLUVIOSOL calcaire 5% en bas de pente), sous cultures principalement
- 2102 Versant-glacis concave à pente faible au pied des reliefs calcaires et des hautes terrasses (CALCOSOL colluvial 75 % et CALCISOL 25%) sur colluvions issues d'alluvions anciennes et de marno-calcaires, sous cultures
- 2103 Talus et rebords des reliefs calcaires et des hautes terrasses échancrés de vallons (RENDOSOL 30%, REGOSOL 20% sur pentes fortes, COLLUVIOSOL calcaire 40%, CALCOSOL leptique 10% sur pentes moyennes et bas de pente), sous landes et prairies
- 2104 Dépressions marneuses de Limagne en bordure de fleuve (CALCISOL rédoxique 95% et REDUCTISOL TYPIQUE 5%) sur colluvions des hautes terrasses et des marno-calcaires, sous cultures et prairies
- 2105 Marais de Limagne Nord (Boucé et Louchy) et larges dépressions, "Terres noires" (TOPOVERTISOL 65%, CALCOSOL réductique clinohumique 10% et CALCOSOL 25%) sur mélange de colluvions marno-calcaires et d'alluvions, sous cultures
- 2106 Plaine faiblement ondulée de Forterre, entourée de versant-glacis concave, sur colluvions détritiques argilo-sableuses et marnes (CALCISOL argileux 95% et CALCOSOL 5%), sous cultures
- 2107 Petites vallées des plateaux et coteaux calcaires, sur alluvions récentes et colluvions (FLUVIOSOL-REDUCTISOL saturé colluvial 100%), sous cultures et prairies

22 Côtes bordières calcaires

- 2201 Coteaux et entablements calcaires et marneux du Val d'Allier, surfaces faiblement ondulées (CALCOSOL 40%, CALCISOL 30%, RENDOSOL 6%, en bas de pente CALCISOL rédoxique 20%, COLLUVIOSOL 3%, FLUVIOSOL-REDUCTISOL 1%), sous cultures et prairies
- 2202 Coteaux marneux et marno-calcaires de Besbre (PELOSOL rédoxique 65%, CALCOSOL 25 %, COLLUVIOSOL carbonaté rédoxique à réductique 5 %, FLUVIOSOL réductique 3% à REDUCTISOL carbonaté histique 2% dans les vallons) sous cultures et prairies

3 BOCAGE BOURBONNAIS ET SOLOGNE BOURBONNAISE

31 Bassin de Montluçon

- 3101 Glacis d'épandage éocène de pente faible avec quartzite et paléaltérite rougeâtre (BRUNISOL DYSTRIQUE leptique 25% et quartzique rubéfié 20%, BRUNISOL DYSTRIQUE pachique rédoxique 50% sur PALEOSOL) sous prairies principalement et cultures
- 3102 Glacis d'épandage éocène et lambeaux de terrasses à paléaltérite rougeâtre (LUVISOL rédoxique 40%, PELOSOL-REDOXISOL 30%, BRUNISOL DYSTRIQUE pachique sur PALEOSOL 10%, BRUNISOL DYSTRIQUE leptique et rédoxique 20%) sous prairies et cultures
- 3103 Buttes et reliefs résiduels calcaires de l'éocène (CALCISOL localement rédoxique 70%, et CALCOSOL pachique 30%), sous prairies et cultures
- 3104 Petites vallées et vallons aplanis d'alluvions récentes des glacis d'épandage (FLUVIOSOL rédoxique 30%, FLUVIOSOL-REDOXISOL 40%, REDUCTISOL 30%) à prairies localement très humides

32 Bassin de Cosne-d'Allier

- Bassins argilo-sableux tertiaires, aux interfluves plans et glacis-versant à pente faible (LUVISOL 25%, PELOSOL 30%, PLANOSOL 7%, REDOXISOL 20%, BRUNISOL DYSTRIQUE 10%, leptique sur PALEOSOL 6%), sous prairies, (ALOCRISOL 1%,
3201 PODZOSOL 1%)
- Plateaux en glacis d'épandages détritiques des bassins tertiaires (LUVISOL-REDOXISOL 50%, NEOLUVISOL rédoxique 20%, BRUNISOL DYSTRIQUE 20%, PLANOSOL 10%) sur
3202 sables et argiles à galets pliocènes, sous prairies et cultures
- Plateaux aux interfluves plans et rebords d'interfluves des bassins tertiaires, recouverts de loess plus ou moins colluvionnés (LUVISOL TYPIQUE rédoxique 100%), sur limons, sous
3203 forêts et prairies
- Dépressions à vastes fonds plats et versants à très faible pente concave des bassins tertiaires (PELOSOL TYPIQUE 10%, PELOSOL-REDOXISOL 35%, REDOXISOL 40%,
3204 REDUCTISOL 15%), sur alluvions et colluvions argileuses, sous prairies
- Fonds de vallées très évasées des bassins tertiaires (FLUVIOSOL-REDOXISOL 85% et REDUCTISOL TYPIQUE 15%) sur alluvions récentes et colluvions issues des argiles
3205 sableuses tertiaires

33 Bassin de Bourbon-l'Archambault

- Bassin de Bourbon l'A., plateaux gréseux permien aux interfluves vallonnés (BRUNISOL DYSTRIQUE 42%, NEOLUVISOL 10%, LUVISOL 33%, PELOSOL planosolique 13%),
3301 «Buttons» sidérolithiques (BRUNISOL DYSTRIQUE 1%, RANKOSOL 1%), sous prairies
- Bassin de Bourbon l'A., dépression permienne (s.s.), plaines et plateaux aux interfluves plans et longs versants à pente faible (BRUNISOL EUTRIQUE 45%, NEOLUVISOL 16%, LUVISOL 6%, PELOSOL 33%) sur argiles, schistes et grès, sous cultures
3302
- Bassin de Bourbon l'A., cuesta du Permo-Trias, talus, replats et buttes (BRUNISOL EUTRIQUE rédoxique 40%, NEOLUVISOL rédoxique 20%, LUVISOL TYPIQUE rédoxique 5%, PELOSOL 35% sur argiles lourdes), sur grès argileux rouges, sous prairies
3303
- Bassin de Bourbon l'A., plateaux aux interfluves plans et rebords d'interfluves recouverts de limons polygéniques (LUVISOL 60%, NEOLUVISOL 40%), sur loess et altérites, sous forêts, prairies et cultures
3304
- Bassin de Bourbon l'A., dépressions à vastes fonds plats et versants à très faible pente concave (PELOSOL 20%, REDOXISOL 75%, REDUCTISOL 5%), sur alluvions et colluvions argilo-limoneuses, sous prairies
3305
- Bassin de Bourbon l'A., fonds de vallées évasées (FLUVIOSOL-REDOXISOL limono-sablo-argileux 80% et REDUCTISOL 20%), sur alluvions récentes et colluvions issues du bassin permien, sous prairies
3306

34 Sud de la dépression du Val de Germigny (Berry)

- Sud de la dépression marneuse du Val de Germigny (Berry), plateaux aux interfluves très plans, avec versants mous (CALCOSOL 20%, PELOSOL calcique 50%, RENDOSOL 10%,
3401 LUVISOL-REDOXISOL 20%), sous cultures et prairies
- Sud de la dépression marneuse du Val de Germigny (Berry), dépressions à vaste fond plat et versants concaves à très faible pente (PELOSOL calcique 45%, REDOXISOL 45%,
3402 REDUCTISOL calcique 5%), sur alluvions limono-argileuses, sous prairies
- Sud de la dépression marneuse du Val de Germigny (Berry), fonds de vallées très ouvertes (FLUVIOSOL BRUNIFIE (REDOXISOL) (REDUCTISOL) 100%), sur alluvions et colluvions
3403 calcaires, sous prairies

35 Plateaux de Tronçais-Civrais

- Plateaux gréseux de Tronçais-Civrais aux interfluves plans, avec versant à pente variable et buttes (BRUNISOL DYSTRIQUE rédoxique 33%, leptique 7%, NEOLUVISOL 15%, LUVISOL rédoxique 27%, PLANOSOL 6%, REDOXISOL 12%), sous prairies et forêts
- 3501
- Plateaux argilo-gréseux aux interfluves très plans, avec versants mous et plaines argileuses au Nord de Tronçais (NEOLUVISOL rédoxique 30%, LUVISOL rédoxique 28%, PELOSOL 10%, PLANOSOL 2%, BRUNISOL rédoxique 30%), sous prairies et cultures
- 3502
- Plateaux gréseux de Tronçais-Civrais, interfluves plans et rebords d'interfluves recouverts de limons polygéniques (LUVISOL-REDOXISOL 40%, LUVISOL DEGRADE 30% et NEOLUVISOL rédoxique 30%), sur loess, sous forêts et prairies
- 3503
- Dépressions argilo-limono-sableuses (vallées élargies), à vastes fonds plats et versants à très faible pente concave (PELOSOL 20%, REDOXISOL 75%, REDUCTISOL 5%), sur alluvions anciennes, sous prairies
- 3504
- Fonds de vallées évasées (FLUVIOSOL-REDOXISOL à alios 80%, REDUCTISOL TYPIQUE 20%), sur colluvions et alluvions issues du Trias, sous prairies
- 3505

36 Plateaux de Lurcy-Lévis

- Plateaux en glacis d'épandages détritiques aux Interfluves très plans de la rive gauche de l'Allier (LUVISOL-REDOXISOL 50%, NEOLUVISOL rédoxique 20%, BRUNISOL 20%, PLANOSOL 10%) sur sables et argiles à galets, sous prairies et forêts
- 3601
- Versants de pente moyenne des plateaux en glacis d'épandages détritiques de la rive gauche de l'Allier (BRUNISOL DYSTRIQUE 80%, NEOLUVISOL rédoxique 18%) sur sables et argiles à galets pliocènes, sous prairies, PODZOSOL 2% sous forêts
- 3602
- Versants et dépressions argilo-calcaires et siliceux de Coulevre (BRUNISOL EUTRIQUE 20%, CALCISOL 10%, LUVISOL-REDOXISOL 20%, LUVISOL leptique 20%, PELOSOL 30%), sous prairies et cultures
- 3603
- Fonds de vallées alluviales et colluviales très ouvertes sur sables et argiles du Bourbonnais pliocènes (FLUVIOSOL BRUNIFIE rédoxique, BRUNISOL DYSTRIQUE alluvial, REDOXISOL, REDUCTISOL, à alios fréquent), sous prairies et cultures
- 3604

37 Sologne Bourbonnaise

- Glacis d'épandage et lambeaux de terrasses de pentes faibles à très faibles (LUVISOL rédoxique 40%, LUVISOL planosolique 50%, PLANOSOL 10%) sous grandes cultures, prairies et bois (sur les surfaces les plus dégradées)
- 3701
- Glacis de pente moyenne (LUVISOL rédoxique et planosolique 65%, NEOLUVISOL et BRUNISOL eutriqué rédoxique 20%), et vallons (COLLUVIOSOL rédoxique 5%, FLUVIOSOL rédoxique à REDUCTISOL histique 8%) sous grandes cultures, prairies et bois
- 3702
- Rebords des glacis de pente assez forte (BRUNISOL eutriqué et NEOLUVISOL rédoxique 65%, LUVISOL rédoxique 8%), et vallons (COLLUVIOSOL rédoxique 15%, FLUVIOSOL rédoxique à REDUCTISOL histique 10%) principalement sous prairies et bois
- 3703
- Large vallons humides (200 à 500 m) de Sologne Bourbonnaise à COLLUVIOSOL rédoxique 15%, FLUVIOSOL rédoxique à réductique 25% et REDUCTISOL localement histique 60% principalement sous prairies
- 3704
- Petites vallées drainant la Sologne Bourbonnaise (FLUVIOSOL pachique et rédoxique 15%, FLUVIOSOL-COLLUVIOSOL rédoxique à réductique 30%, REDOXISOL fluviétique pachique 5%, REDUCTISOL fluviétique et histique 50%), sous prairies principalement
- 3705

MASSIFS CRISTALLINS DE COMBRAILLE ET DE MONTAGNE

4 BOURBONNAISE

41 Basse Combraille (dont massif de Cérilly)

- Gorges du Cher, versants à pente forte (>20%) des vallées en V très étroites dans le socle (ALOCRISOL à oligomull 52%, RANKOSOL 20%, BRUNISOL DYSTRIQUE et leptique 20%,
4101 COLLUVIOSOL-FLUVIOSOL brut 5%), à chênaies acides, landes et prairies
- Versants à pente modérée à forte des vallées secondaires étroites entaillant le socle et escarpements (RANKOSOL 20%, BRUNISOL DYSTRIQUE leptique 50%, peu épais 20%,
4102 COLLUVIOSOL 5%, FLUVIOSOL 5%), à chênaies, landes et prairies
- Concavité basale d'escarpements, pied de versants, versant-glacis (NEOLUVISOL rédoxique 30%, BRUNISOL DYSTRIQUE colluvial pachique 65%) sur éboulis et colluvions
4103 périglaciaires épaisses, sur socle altéré (mylonite), à cultures et prairies
- Plateaux cristallins et métamorphiques à interfluves plans ou vallonnés (LUVISOL et NEOLUVISOL rédoxique 25%, BRUNISOL DYSTRIQUE et leptique 64%), et petites vallées
4104 (COLLUVIOSOL-REDOXISOL 4%, REDUCTISOL 2%), à prairies et quelques cultures
- Buttes et plateaux cristallins de pentes faibles à modérées (LUVISOL rédoxique 10%, BRUNISOL DYSTRIQUE et rédoxique 85%), à petites vallées et vallons (FLUVIOSOL-
4105 REDOXISOL 1%, REDUCTISOL histique 2% et HISTOSOL 2%) à cultures et prairies
- Massifs à alvéoles sur granite : collines, buttes, replats et dépressions mal drainées (RANKOSOL 10%, BRUNISOL DYSTRIQUE leptique 30%, colluvial 35%, rédoxique 5%, NEOLUVISOL rédoxique 5%, FLUVIOSOL-REDOXISOL 8%, REDUCTISOL 2%, histique
4106 5%)
- Plateaux à interfluves plans sur roches basiques à pente faible, à petits vallons (BRUNISOL EUTRIQUE localement luvique 90%, FLUVIOSOL-REDOXISOL 7% à REDUCTISOL histique
4107 3%) à cultures et prairies
- Reliefs micaschisteux de St Eloy d'Allier à pentes modérées à fortes, à vallons et petites vallées (BRUNISOL DYSTRIQUE localement rubéfiés et leptique 95%, FLUVIOSOL-
4108 REDOXISOL 2% et REDUCTISOL localement histique 3%) à cultures et prairies
- Fossés houillers aux interfluves +/- pentus (LUVISOL et NEOLUVISOL rédoxique 30%, ALOCRISOL, BRUNISOL DYSTRIQUE et COLLUVIOSOL rédoxique 65%) à vallons et
4109 petites vallées (FLUVIOSOL-REDOXISOL à REDUCTISOL histique 5%) à cultures et prairies
- Buttes quartzitiques et crêtes des filons de quartz (ALOCRISOL 30% sur le sommet et les marges, BRUNISOL DYSTRIQUE colluvial (rédoxique) 60% sur altérites hydrothermales
4110 (argiles rose-saumon) des versants latéraux, PODZOSOL 10% sous forêts)
- Plateaux et sommets d'interfluves à pentes faibles peu ondulés recouverts de placages plus ou moins limoneux (LUVISOL TYPIQUE rédoxique 40%, NEOLUVISOL rédoxique 35%,
4111 BRUNISOL DYSTRIQUE rédoxique 25%), sous forêt, cultures et prairies
- Fonds de vallées (talwegs encaissés) d'alluvions récentes et de colluvions de reliefs cristallins (FLUVIOSOL rédoxique 50%, FLUVIOSOL-REDOXISOL 45%, REDUCTISOL à horizons
4112 histiques profonds (HISTOSOL) 5%), à prairies localement très humides

42 Moyenne Combraille

- Gorges de la Sioule, ravins, versants à pente forte (>20%) des vallées secondaires entaillant le socle (LITHOSOL 60%, RANKOSOL 35%), et vallées en V très étroites (COLLUVIOSOL
4201 5%), sous forêts, landes et prairies

Plateaux cristallins aux interfluves vallonnés, à versants de pente modérée à forte (BRUNISOL DYSTRIQUE 65%, rédoxique 24%, RANKOSOL 5%), et vallons associés
4202 (COLLUVIOSOL-REDOXISOL 4%, REDUCTISOL 2%), sous prairies et cultures

Dôme d'Echassières sur granite leucocrate à muscovite très altéré (kaolinisation) (NÉOLUVISOL rédoxique 75%, BRUNISOL DYSTRIQUE 20%, COLLUVIOSOL-REDOXISOL
4203 5%) , carrière de kaolin, forêt (Forêt des Colettes), prairies

Versants à pente forte (>20%) de la vallée de la Bouble et des vallées secondaires entaillant les micaschistes (RANKOSOL 70%, BRUNISOL DYSTRIQUE 15%, rédoxique 10%), et
4204 vallées en V (COLLUVIOSOL-FLUVIOSOL 5%), forêts, landes et prairies

Plateaux micaschisteux aux interfluves vallonnés, à versants de pente modérée à forte (NEOLUVISOL-REDOXISOL 85%, RANKOSOL 8%), et vallons associés (COLLUVIOSOL-
4205 REDOXISOL 5%, REDUCTISOL 2%), sous forêts, prairies et cultures

43 Collines Bourbonnaises (alt. < 500-600 m)

Collines cristallines à pente faible et vallons associés (BRUNISOL DYSTRIQUE +/- colluvial 77% NEOLUVISOL rédoxique 5% COLLUVIOSOL caillouteux pachique et rédoxique 13%
4301 REDUCTISOL histique 5%) à prairies, bois feuillus et quelques cultures

Collines cristallines de pentes moyennes et vallons associés (BRUNISOL DYSTRIQUE leptique et colluvial 57% RANKOSOL-ALOCRISEL 35% NEOLUVISOL rédoxique 3%
4302 COLLUVIOSOL-FLUVIOSOL rédoxique 5%) à prairies, bois feuillus avec quelques cultures

Collines cristallines à pente modérée et vallons associés (BRUNISOL DYSTRIQUE leptique et pachique 75% ALOCRISEL 5% NEOLUVISOL et COLLUVIOSOL rédoxique 15%
4303 REDUCTISOL histique 5%) sous prairies et chênaies acides principalement

Collines schisteuses de pente moyenne (BRUNISOL DYSTRIQUE et rédoxique 70% RANKOSOL-ALOCRISEL leptique 35%), à chênaies acides, et vallons associés (COLLUVIOSOL pachique et rédoxique 6%, REDUCTISOL histique 4%) principalement sous
4304 prairies

Collines gréseuses de pente faible et vallons associés (BRUNISOL DYSTRIQUE leptique et rédoxique 75% et NEOLUVISOL rédoxique 10% COLLUVIOSOL-FLUVIOSOL rédoxique à réductique, localement histique 5%) sous cultures et prairies
4305

Petites vallées drainant les Collines Bourbonnaises (FLUVIOSOL pachique et rédoxique 15%, FLUVIOSOL-COLLUVIOSOL rédoxique à réductique 30%, REDOXISOL fluviatique
4306 pachique 5%, REDUCTISOL fluviatique et histique 50%) sous prairies principalement

Plateaux et sommets d'interfluves des Collines Bourbonnaises à pentes faibles, peu ondulés, recouverts de placages plus ou moins limoneux (LUVISOL rédoxique 20%, NEOLUVISOL
4307 30%, BRUNISOL DYSTRIQUE 15%, leptique 35%), sous prairies et forêts

44 Montagne Bourbonnaise (alt. 600 à 1200 m)

Montagnes cristallines de pente moyenne à forte et vallons associés (BRUNISOL DYSTRIQUE leptique et pachique 65%, RANKOSOL ALOCRISEL et PODZOSOL ocrique 25% COLLUVIOSOL rédoxique REDUCTISOL et HISTOSOL 10%) à hêtraies-pessières et
4401 prairies

Montagnes cristallines à pente faible d'origine glaciaire et vallons très humides (ALOCRISEL et podzolique 45% PODZOSOL ocrique 5% BRUNISOL DYSTRIQUE leptique 35%
4402 ORGANOSOL fluviatique 5% et HISTOSOL fibrique 10%) sous hêtraies-pessières

Petites vallées et larges vallons des collines et montagnes bourbonnaises (COLLUVIOSOL pachique et rédoxique à réductique 52%, REDUCTISOL fluviatique localement histique 45% et
4403 HISTOSOL fibrique 3%) à prairies et bois feuillus ou résineux

Ceci permet de présenter la carte des pédopaysages et sa légende obtenues au 1/250 000^{ème} (Carte jointe au rapport).

4. Caractérisation des communautés microbiennes des sols du département de l'Allier

4.1. Contexte scientifique

Dans le cadre de ce programme l'objectif général est de caractériser les communautés microbiennes indigènes des sols du département de l'Allier. Le but de ce projet est donc de faire un état de référence de la composante biotique tellurique (microbiologique) afin de pouvoir identifier des dérives précoces en cas d'impact des pratiques et modes d'usage des sols.

L'état de référence sera basé sur des analyses quantitatives et qualitatives des communautés microbiennes telluriques grâce à des outils d'écologie moléculaire directement sur l'ADN extrait du sol. Ces analyses nous permettront de comparer la densité et la diversité des communautés microbiennes indigènes des sols du département de l'Allier. Une telle étude spatialisée à cette échelle d'investigation représente l'opportunité de résoudre la distribution de la diversité microbienne. La combinaison de cette échelle à d'autres traitées par ailleurs (parcelle, régions, territoire, RMQS) permettra de comparer l'influence des paramètres environnementaux sur la distribution de la diversité microbienne à différentes échelles spatiales (territoire > paysage > parcelle). En effet, à l'échelle du territoire national nous avons démontré que la diversité des communautés bactériennes était plus influencée par le type de sol que par le mode d'usage et les facteurs climatiques. A l'échelle de la parcelle agricole, l'homogénéité des conditions pédologiques fait ressortir l'effet du mode d'usage des sols et l'impact des activités humaines via les pratiques agricoles (amendements, travail du sol,...). Par contre, très peu de données sont disponibles à l'échelle intermédiaire du paysage et du territoire et il est donc pertinent d'évaluer l'influence du mode d'usage et/ou de son historique sur la diversité microbienne indigène et sa distribution.

Par conséquent, les objectifs de ce projet sont :

d'un point de vue fondamental :

- d'évaluer précisément l'abondance et la structure génétique des communautés microbiennes des sols de l'Allier,
- de définir la distribution spatiale de l'abondance et de la diversité des communautés microbiennes telluriques et les profils biogéographiques associés et les notions de changement d'échelle,
- d'évaluer la relation aire-espèces pour les communautés microbiennes du sol à l'échelle de ce département,
- de hiérarchiser les filtres environnementaux (pédo-climat, usage du sol, couvert végétal, historique) qui régulent la diversité et la fonctionnalité des communautés microbiennes des sols,

d'un point de vue technique :

- d'établir une base de données de l'abondance et de la structure génétique microbienne des sols de l'Allier,
- de développer des outils statistiques adaptés aux études sur la distribution spatiale de la diversité microbienne et intégrant les changements d'échelle,

d'un point de vue opérationnel :

- d'établir une banque de conservation à long terme d'échantillons de référence pour le suivi de ce département permettant de revenir sur ces échantillons avec l'évolution des techniques d'investigation,
- de quantifier l'impact des activités anthropiques et d'améliorer l'évaluation environnementale des modes d'usages des sols à l'échelle du paysage,

- - d'identifier des bio-descripteurs microbiens de la qualité des sols et de leur évolution,
- - d'élaborer des cartes de distribution de l'abondance et de la biodiversité des sols à l'échelle de l'Allier permettant de définir des outils d'aide à la décision pour améliorer la gestion des sols,
- - d'élaborer un système d'information environnementale sur la biodiversité microbienne tellurique qui permettra de définir un « Normal Operating Range » des sols de l'Allier.

4.2. Expérience et capacités techniques de la plateforme GenoSol

Les communautés microbiennes du sol sont difficiles à caractériser. Ceci s'explique par une accessibilité plus ou moins importante des populations au sein d'une matrice hétérogène et structurée mais aussi par leur densité et diversité très importantes qui rendent difficile à résoudre l'information obtenue. Toutefois, grâce aux avancées méthodologiques qui ont eu lieu depuis une quinzaine d'années, les études d'écologie microbienne bénéficient maintenant d'une automatisation des outils moléculaires (extraction d'ADN, caractérisation du polymorphisme de l'ADN, séquençage haut débit, métagénomique, métaprotéomique...Maron et al., CR Biol 2011) permettant la caractérisation des ressources génétiques microbiennes (diversité taxonomique, potentiel génétique et fonctionnel) des sols en moyen débit. Dans ce contexte, l'UMR Microbiologie du Sol et de l'Environnement de l'INRA de Dijon s'est positionnée très tôt comme un leader national et international sur ces développements méthodologiques. Par ailleurs, pour répondre à une demande scientifique et technique croissante dans ce domaine, l'UMR MSE a créé en 2008 la plateforme « GenoSol » (http://www.dijon.inra.fr/plateforme_genosol), dont l'objectif est de fournir une structure logistique et technique assurant l'acquisition, la conservation, la caractérisation et la mise à disposition des ADN métagénomiques de sols issus d'échantillonnages de grande envergure (plusieurs centaines à plusieurs milliers de sols correspondant à de grandes échelles spatiales et/ou temporelles) (Ranjard et al., EMI 2009).

Cette plateforme représente l'aboutissement de l'expertise et du savoir faire de l'unité d'adossment (UMR MSE) en termes de standardisation des outils moléculaires, mais aussi de mise en place d'une DNA-thèque et d'un système d'information des ressources génétiques/biodiversité sur les sols servant aux interprétations de ces analyses à grande échelle (temps, espace). Ces analyses doivent permettre i) de combler le déficit d'approches globales et sans *a priori* qui permettront d'évaluer la contribution des facteurs environnementaux dans l'évolution des sols à long terme, ii) une meilleure connaissance, gestion et valorisation de la biodiversité et iii) une meilleure « finalisation » des résultats obtenus par la traduction de ces ressources génétiques en services écosystémiques dans le souci d'un usage durable des sols. Cette plateforme a permis à l'UMR MSE de se positionner sur différents projets scientifiques de grande envergure comme ECOMIC-RMQS, projet ANDRA, ADEME Bioindicateurs I et II et dernièrement le projet Européen ECOFINDER (7^{ème} PCRD) qui doit permettre de mettre en place la directive cadre européenne sur l'utilisation et la protection des sols. Plus récemment, la plateforme GenoSol a été lauréate des « investissements d'avenir » pour devenir à terme la plateforme de référence en microbiologie environnementale et prendre en charge les analyses de diversité microbienne des observatoires de recherche à long terme de l'INRA, du CNRS et d'autres instituts de recherche.

Le présent rapport présente l'intégralité du projet qui a pour objectif d'analyser l'abondance microbienne et plus spécifiquement les densités de bactéries et de champignons dans les sols de l'Allier ainsi que la structure génétique de ces communautés. Ce projet permettra aussi, en comparant les résultats avec ceux obtenus sur la maille RMQS, de comparer les caractéristiques des communautés de la zone d'étude par rapport au référentiel de la diversité des sols français mais aussi d'évaluer le déterminisme environnemental de la distribution spatiale de la diversité microbienne en prenant en compte l'influence du changement d'échelle.

En parallèle, la relation aire-espèce, qui permet d'évaluer l'intensité de la diversification des communautés microbiennes sur ce département, a été calculée et comparée aux valeurs classiques trouvées dans la littérature mais aussi à celle observée à plus grande échelle sur le RMQS.

4.3. Procédure technique

4.3.1. Réception et conservation des échantillons de sols

Dans le cadre de ce projet, la plateforme GenoSol a reçu les 200 échantillons de sols échantillonnés selon la procédure décrite en CCTP entre juillet 2011 et novembre 2011. Les échantillons de sols sont stockés dans le conservatoire GenoSol *i.e.* mis en cryo-conservation à -40°C selon le référentiel et le contrôle qualité GenoSol.

4.3.2. Extraction d'ADN des sols

Les analyses de densité et de caractérisation de la structure génétique des communautés de bactéries et de champignons indigènes sont abordées par des outils de biologie moléculaire directement sur l'ADN extrait des sols. Par conséquent, en parallèle de la cryo-pédothèque mise en place pour ce projet, une DNA-thèque correspondante a été aussi mise en place et gérée par la plateforme GenoSol. Dans le cadre de ce projet, l'ADN des sols a été extrait selon un protocole qui correspond à une amélioration de la norme ISO 11063 sur l'extraction d'ADN (Terrat et al., *Mic Biotech* 2012 ; Plassart et al., soumis) qui permet d'obtenir un ADN de sol de haute qualité moléculaire (en termes de pureté et de représentativité).

4.3.3. Analyse de la biomasse moléculaire microbienne des sols

La biomasse moléculaire a été évaluée sur les sols par le calcul du rendement d'ADN extrait et exprimé en $\mu\text{g.g}$ de sols. Cette biomasse moléculaire microbienne a déjà été mesurée sur les sols issus de grands échantillonnages (RMQS, ORE...) et a déjà fait l'objet d'une valorisation académique (Dequiedt et al., *Global Ecol. Biogeo.* 2011). Une telle mesure est stratégique car elle représente un bioindicateur sensible et pertinent (reconnu par les utilisateurs des sols) pour évaluer l'état biologique du sol et l'impact des pratiques agricoles et/ou industrielles.

4.3.4. Mesure de l'abondance des bactéries et des champignons

A partir de la matrice ADN de sol extraite dans l'étape précédente il est possible d'appliquer différents types d'outils moléculaires permettant d'aborder la quantification fine des communautés microbiennes. Un de ces outils est la PCR quantitative qui permet de quantifier le nombre de séquences génétiques d'un gène taxonomique et/ou fonctionnel. Dans ce projet, la quantification des bactéries et des champignons a été abordée grâce à la qPCR des séquences taxonomiques 16S et 18S, respectivement. La connaissance de ces mesures ainsi que le rapport champignons/bactéries peut s'avérer très pertinent en tant qu'indicateur de la qualité biologique des sols et du turn-over des matières organiques. Cette technique est totalement maîtrisée par la plateforme GenoSol qui l'applique en routine sur les échantillons de sols de son conservatoire (Chemidlin et al., *Plos One* 2011).

4.3.5. Caractérisation de la structure génétique des communautés microbiennes du sol

La structure génétique des communautés microbiennes a été abordée par la technique de

génotypage ARISA qui permet de génotyper les gènes ribosomiques des bactéries et des champignons directement à partir de l'ADN extrait du sol. Cet outil nous permet donc de pouvoir estimer les différences de composition entre les communautés indigènes de sols différents.

4.3.6. Analyses mathématiques des données

Des analyses statistiques (ANOVA, Multivariées) ont été appliquées sur les données moléculaires acquises afin d'estimer les différences d'abondance et de structure génétique entre les communautés indigènes des sols contrastés d'un point de vue pédoclimatique et mode d'usage. Des analyses en géostatistiques ont aussi été appliquées et permettent de renseigner sur la distribution spatiale de la diversité microbienne à l'échelle du site d'étude et de fournir des cartographies de ces données microbiologiques à l'échelle du département de l'Allier.

4.4. Les communautés microbiennes dans les sols de l'Allier

4.4.1. Variabilité physico-chimique des sols de l'Allier

Nous avons voulu mettre en évidence la variabilité et la spécificité pédologique des sols de l'Allier. Nous avons donc analysé la matrice de données physico-chimiques des sols de ce département par l'intermédiaire d'une analyse en composante principale sur une matrice de corrélation (Figure 13). Nous avons aussi confronté dans cette analyse les données de l'Allier avec celles du RMQS.

La figure 13A montre que les sols de l'Allier se positionnent dans le nuage de points des sols du RMQS et donc qu'ils sont représentatifs des sols français. Toutefois, cette figure montre aussi une importante dispersion du nuage de points des sols de l'Allier ce qui indique une importante variabilité physico-chimique de ces sols regard à la surface d'investigation. Le cercle de corrélation des paramètres physico-chimiques des sols RMQS et Allier (Fig. 13B) montre que les sols de ce département se caractérisent par une grande variabilité de texture (argileuse à sableuse), de teneurs en matières organiques du sol et en qualité de cette matière organique (C/N). De plus la figure 14 montre aussi une variabilité du pH des sols à l'échelle du département quasiment aussi importante que celle rencontrée à l'échelle du territoire national. Toutefois, une majorité de ces sols ont un pH neutre ou acide alors que la majorité des sols à l'échelle nationale montre un pH neutre ou alcalin.

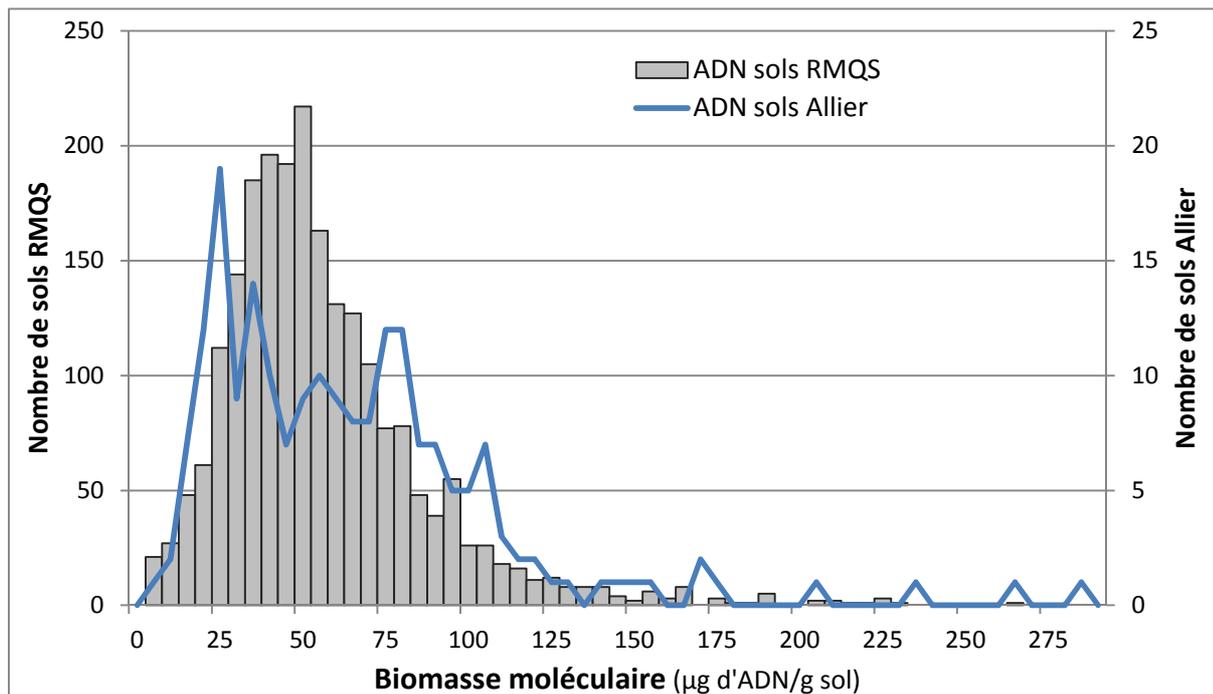
Cette première caractérisation de la zone confirme de nouveau son intérêt dans l'appréhension des déterminismes des communautés microbiennes à grande échelle. Ce département présente une variabilité pédologique importante sous des conditions climatiques qui sont peu fluctuantes au regard de celles observées à l'échelle du territoire national.

4.4.2. Biomasse Moléculaire Microbienne

Variation de la biomasse moléculaire microbienne dans les sols de l'Allier

La biomasse microbienne des sols est estimée grâce à la quantité d'ADN extrait des sols. La distribution de cette biomasse moléculaire microbienne dans les sols de l'Allier est illustrée par la figure ci-dessous (Figure 15).

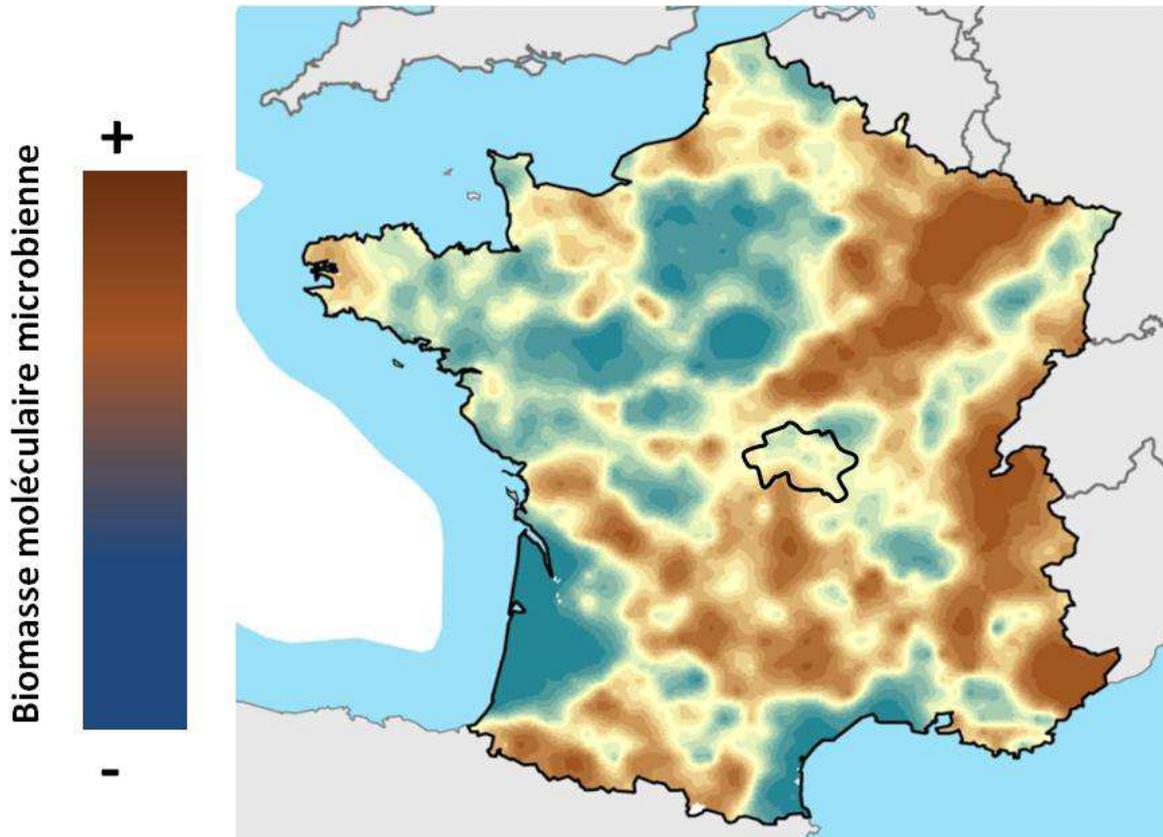
Figure 15 : Variation de la quantité d'ADN entre les sols de l'Allier (200 sols, échelle de droite) et comparaison avec les données issues des sols du RMQS (2206 sols échelle de gauche).



La biomasse moléculaire des sols de l'Allier varie entre 3,42 et 283,7 µg d'ADN par gramme de sol et 50 % des sols présentent une biomasse comprise entre 30,6 et 80,9 µg d'ADN par gramme de sol. L'amplitude de variabilité observée entre les sols de l'Allier est similaire à celle observée à l'échelle nationale suggérant ainsi une grande diversité de situations environnementales au niveau de ce département. Par ailleurs, environ 30% des sols de ce département renferment une biomasse microbienne faible (<50 µg d'ADN par gramme de sol) et inférieure à la moyenne nationale. Ceci peut s'expliquer par la proportion importante (en comparaison de l'échelle nationale) des sols à texture sableuse et avec des pH plus acides dans ce département, ces paramètres pédologiques structurant significativement et négativement cette biomasse microbienne des sols (Dequiedt et al., 2011).

Par conséquent, même si les sols de l'Allier ont une biomasse moléculaire microbienne représentative de la gamme de variation des sols français ils sont globalement plus pauvres que la moyenne des sols français. Cette observation va dans le sens des travaux antérieurs à l'échelle du territoire qui démontrent que le département de l'Allier correspond à une région écologique où les sols ont une biomasse microbienne moléculaire plus faible que dans d'autres régions écologiques françaises (Sud-Est, Nord-Est et sud du Massif central). Ces résultats sont en accord avec la physico-chimie des sols de ce département décrite dans le paragraphe précédent qui laissait supposer un tel résultat.

Figure 16 : Cartographie nationale la biomasse moléculaire microbienne des sols et positionnement du département de l'Allier

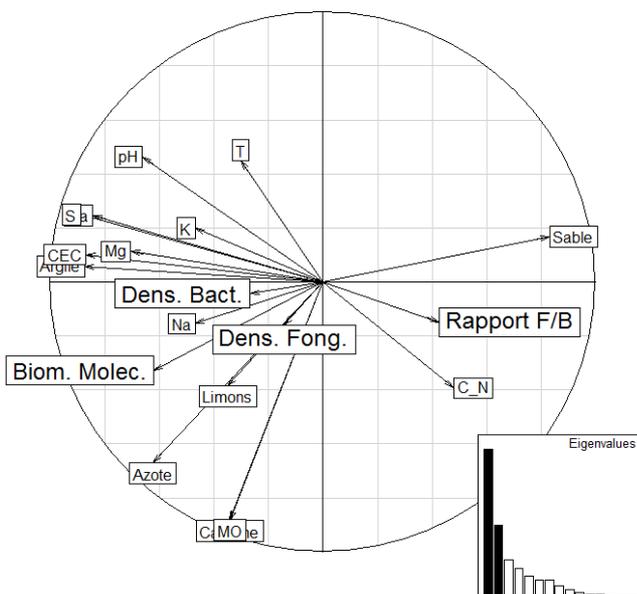


Hiérarchie des filtres environnementaux expliquant les variations de biomasse moléculaire microbienne dans les sols de l'Allier

Influence des caractéristiques physico-chimiques des sols

La confrontation de la biomasse moléculaire avec les données physico-chimiques des sols par une analyse multivariée et sa représentation dans un cercle de corrélation (Figure 17) montre que la biomasse moléculaire des sols de l'Allier est positivement corrélée à la texture du sol (argiles), à la teneur en matière organique, au pH et négativement corrélée avec le C/N et les textures sableuses.

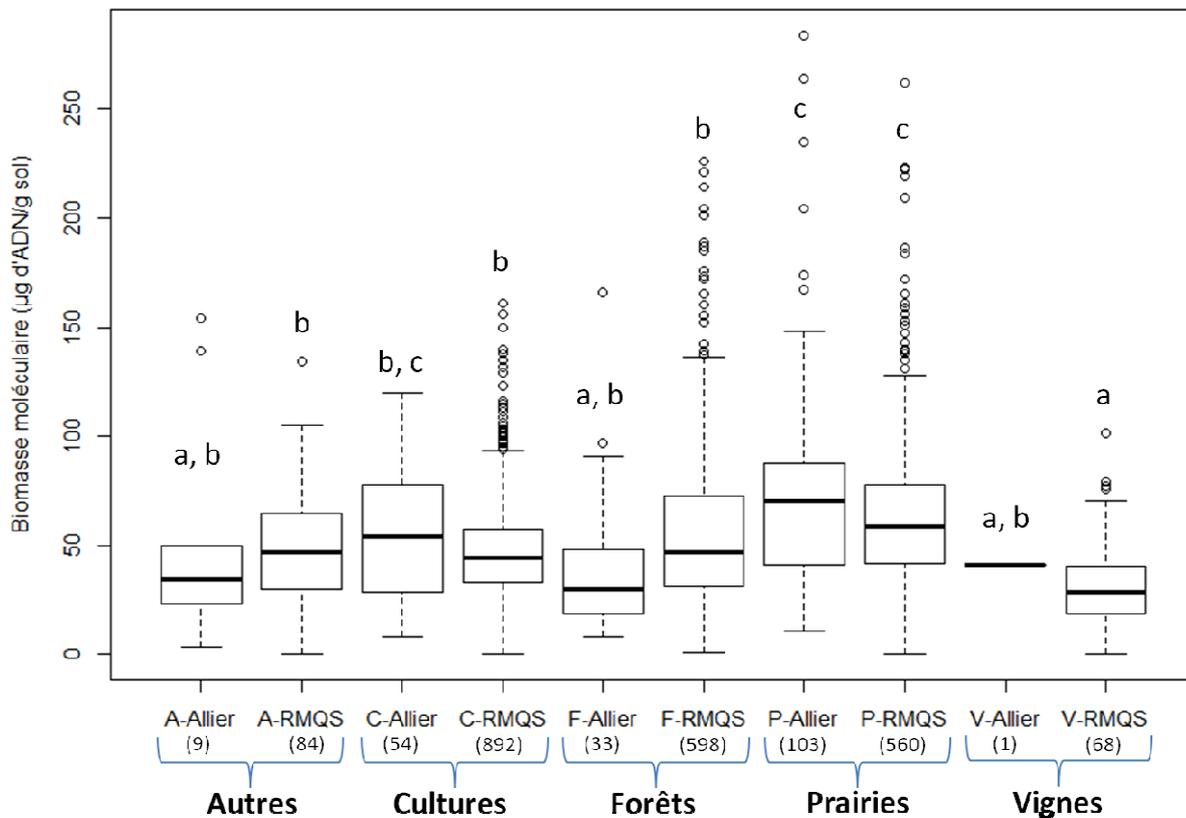
Figure 17 : Cercle de corrélation des données physico-chimiques et microbiologiques des sols de l'Allier. Les données de biomasse moléculaire, de densités bactérienne et fongique sont mises en valeurs additives.



Ces résultats corroborent ceux obtenus à plus grande échelle sur le RMQS (Dequiedt et al., 2011). En effet, des sols à texture fine, alcalin et avec une forte teneur en matière organique ont des capacités biotiques supérieures aux autres sols car ils fournissent plus de microenvironnements protecteurs et une source de carbone et d'énergie suffisante pour le développement microbien. De plus, la corrélation négative avec le C/N confirme le fait que la qualité de la matière organique et notamment sa récalcitrance à la dégradation (qui augmente avec le C/N) influence aussi fortement l'abondance des microorganismes du sol.

Influence du mode d'usage des sols

Figure 18 : Influence du mode d'usage du sol sur la biomasse moléculaire microbienne (C=sols sous culture, F= sols sous forêts, P= sols sous prairie, A= autres modes d'occupation des sols)

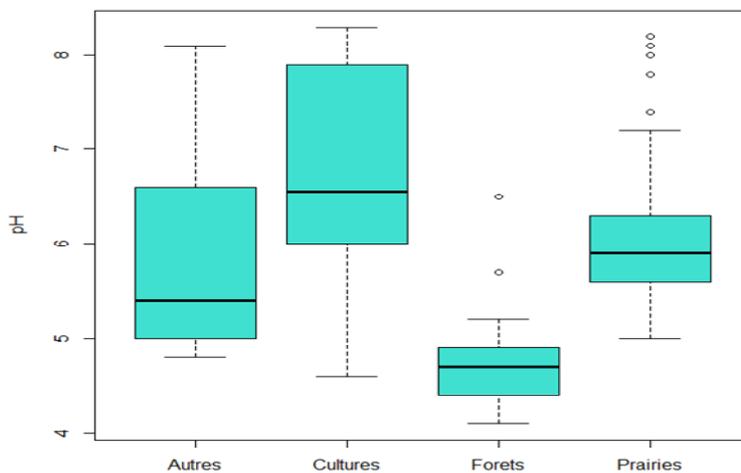


L'analyse de la biomasse moléculaire en fonction des modes d'occupation des sols montre des résultats assez classiques *i.e.* une biomasse plus forte en écosystèmes prairies et plus faible en grande culture. La plus faible biomasse en grande culture s'explique par un couvert végétal moins pérenne, des pratiques agricoles qui peuvent altérer la vie microbienne tellurique (labour, amendements...) et des stocks de matières organiques plus faibles dans ces sols.

Toutefois, la plus faible biomasse observée pour les écosystèmes forestiers à l'échelle du département de l'Allier en comparaison des prairies et des grandes cultures est en contradiction avec les résultats obtenus à l'échelle nationale (Dequiedt et al., 2011). Ces résultats ne peuvent pas s'expliquer par le fait que ces écosystèmes forestiers ne sont représentés que par des forêts de résineux qui engendreraient des litières peu productives car 88% des forêts de ce département sont sous feuillus. Par contre, ces résultats peuvent s'expliquer par l'acidité des sols sous forêts à l'échelle de ce département avec la totalité des sols forestiers qui ont un pH inférieur à 7 et 78% d'entre eux un pH < 5 (Figure 19).

De plus, les différences de biomasse microbienne observées entre les modes d'usage sont plus significatives pour les sols de l'Allier que pour les sols du RMQS. Ceci peut s'expliquer par la plus grande variabilité pédoclimatique des sols du RMQS associées à chaque classe de mode d'usage. Ces résultats permettent donc de confirmer l'influence significative des modes d'usage des sols sur la quantité de microorganismes indigènes de ces sols.

Figure 19 : Variations du pH en fonction des modes d'usage des sols

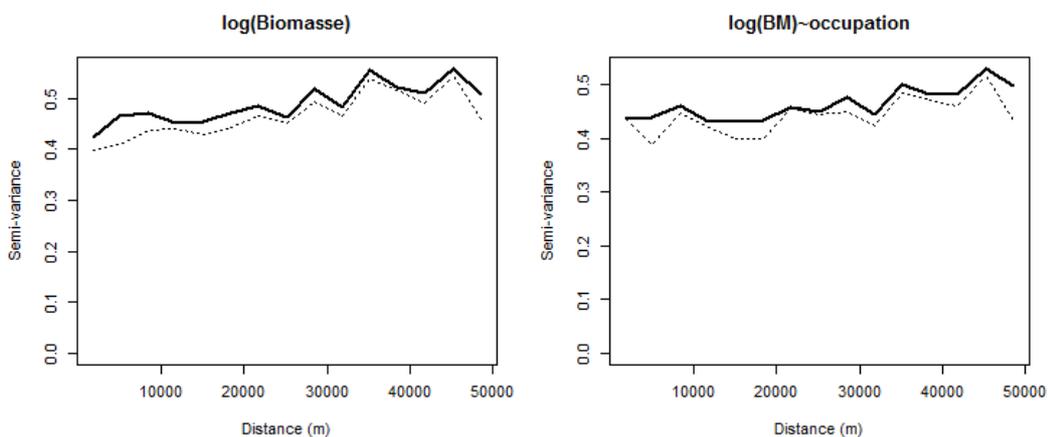


Cartographie de la biomasse moléculaire microbienne des sols à l'échelle du département de l'Allier

La cartographie des paramètres biologiques a été abordée dans le cadre du modèle linéaire mixte (MLM) couplé à une prédiction par krigeage universelle sur une grille de maille de 1 km de côté. L'objectif du Modèle Linéaire Mixte (MLM) consiste à décrire les variations spatiales observées par la somme d'effets déterministes et aléatoires en plus d'une variabilité des observations faites sur le même site et que l'on peut interpréter comme une erreur de mesure. Les effets fixes correspondent à la combinaison linéaire d'une ou plusieurs covariables et représente la variation de l'espérance de la propriété étudiée sur le domaine. Les effets aléatoires représentent la partie spatialement corrélée de la variation. Dans ce contexte, nous supposons que la propriété étudiée est issue de la réalisation d'une gaussienne multivariée. Dans notre cas, une transformation Box-Cox est appliquée pour satisfaire cette hypothèse. Classiquement, l'ajustement d'un tel modèle s'effectue de façon itérative à partir d'un variogramme expérimental et de la formule des moindres carrés généralisés. Dans le cas des résultats de l'Allier, le relativement faible nombre de points et leur répartition hétérogène ne permettent pas de recourir à cette méthode. Nous avons préféré utiliser les techniques de maximisation de la vraisemblance (REML) pour estimer les paramètres du MLM.

L'application de ces approches de géostatistiques aux données de biomasse Microbienne moléculaire révèle une absence de structuration spatiale de ce paramètre à l'échelle du département de l'Allier. Le variogramme construit est plat (figure 9bis ci-dessous) ce qui traduit l'absence de relation entre la variation de la quantité de biomasse et la distance de mesure entre deux points et donc l'impossibilité de dessiner des cartes de distribution spatiale de cette biomasse. L'utilisation des techniques couplées de REML (avec prise en compte du mode d'occupation des sols) confirme ce résultat comme le montre le variogramme de droite qui ne met pas non plus en évidence de structuration spatiale. Les travaux de Dequiedt et al (GEB 2011) démontrent cependant une répartition non aléatoire de cette quantité de biomasse à l'échelle du territoire nationale. Les patterns de distribution géographique de la biomasse moléculaire microbienne (et donc des drivers de cette Biomasse (texture, statut organique et mode d'occupation) se trouve donc à une échelle plus grande et peut-être à une échelle plus petite.

Figure 20 : Variogrammes de la biomasse moléculaire microbienne à l'échelle du département de l'Allier

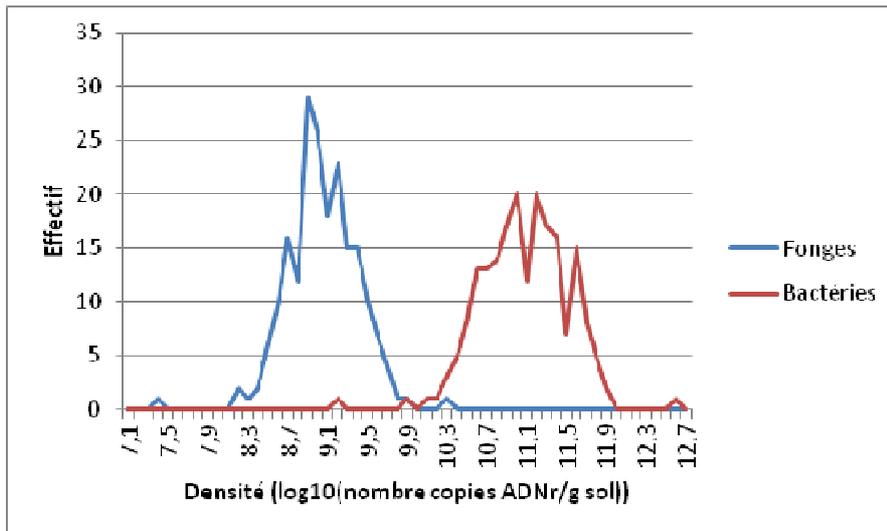


4.4.3. Densités bactérienne et de champignons des sols

Variation de la densité bactérienne et de champignons dans les sols de l'Allier

Les densités bactériennes et fongiques sont mesurées par quantification du nombre de copies d'ADNr-16S (spécifique des bactéries) et d'ADNr-18S (spécifique des champignons) par PCR quantitative directement sur l'ADN extrait des sols.

Figure 21 : Distribution de la densité des bactéries et des champignons dans les sols du département de l'Allier (estimée par le nombre de copies d'ADNr 16S et 18S par gramme de sol, respectivement).



Les densités bactériennes varient entre $1,3 \cdot 10^9$ et $3,7 \cdot 10^{12}$ copies de 16S par gramme de sol et les champignons entre $2,3 \cdot 10^7$ et $1,58 \cdot 10^{10}$ copies de 18S par gramme de sol. Ces valeurs sont dans la gamme de celles enregistrées au niveau des sols du RMQS (référentiel en cours de construction). Cette grande variabilité observée à l'échelle des sols de l'Allier peut s'expliquer par la grande variabilité des caractéristiques physico-chimiques et des modes d'usage des sols qui influencent fortement cette densité microbienne tellurique (Chemidlin et al., 2011 Plos One).

Hiérarchie des filtres environnementaux expliquant les variations de densité bactérienne et de champignons dans les sols de l'Allier

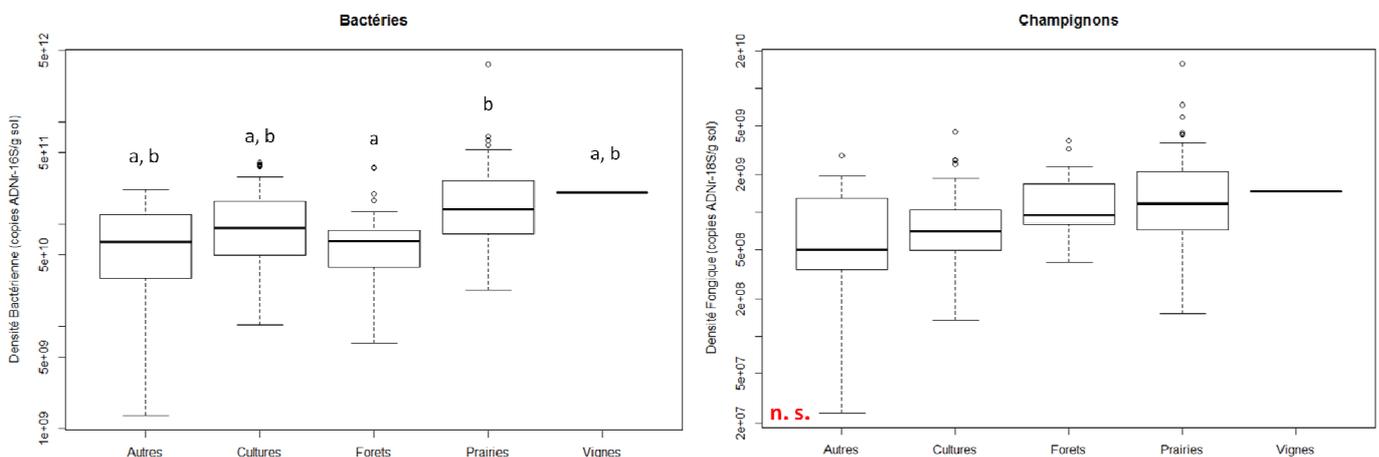
Influence des caractéristiques physico-chimiques des sols

Le cercle de corrélation de la figure 17 met en évidence une corrélation positive entre la densité bactérienne et le statut organique (teneur en matière organique, Corg et Ntot, éléments minéraux), la texture du sol (teneur en argile) et le pH. La densité fongique est, elle, corrélée essentiellement au statut organique du sol et à la texture. Ces résultats sont en accord avec les attributs écologiques de ces communautés puisque les textures fines ainsi qu'un statut organique élevé confèrent des niches favorables aux développements des populations bactériennes et de champignons. Par ailleurs, nous confirmons aussi la plus grande sensibilité des communautés bactériennes au pH et au rapport C/N en comparaison de celle des communautés de champignons.

Le rapport champignons sur bactéries (18S/16S) rend compte de la balance entre les communautés de champignons et celles des bactéries. Ce rapport varie dans les sites entre 0.2 et 7,3 % (Fig. 12) dans les sols de l'Allier ce qui est en accord avec les valeurs décrites dans la littérature (Strickland et al., 2010). Il est relié positivement à la nature de la matière organique (rapport C/N, figure 7) et à la teneur en sable ce qui confirme la plus forte implication des communautés de champignons dans la dégradation de la matière organique récalcitrante généralement rencontrée en sols forestiers (C/N élevé). Un gros déséquilibre de ce rapport (<0.1% ou > 20%) peut entraîner des modifications délétères du fonctionnement biologique des sols en termes, notamment, de turnover du cycle du carbone ou du recyclage des éléments minéraux. Aucun déséquilibre de ce type n'a été observé dans les sols de l'Allier.

Influence du mode d'usage des sols

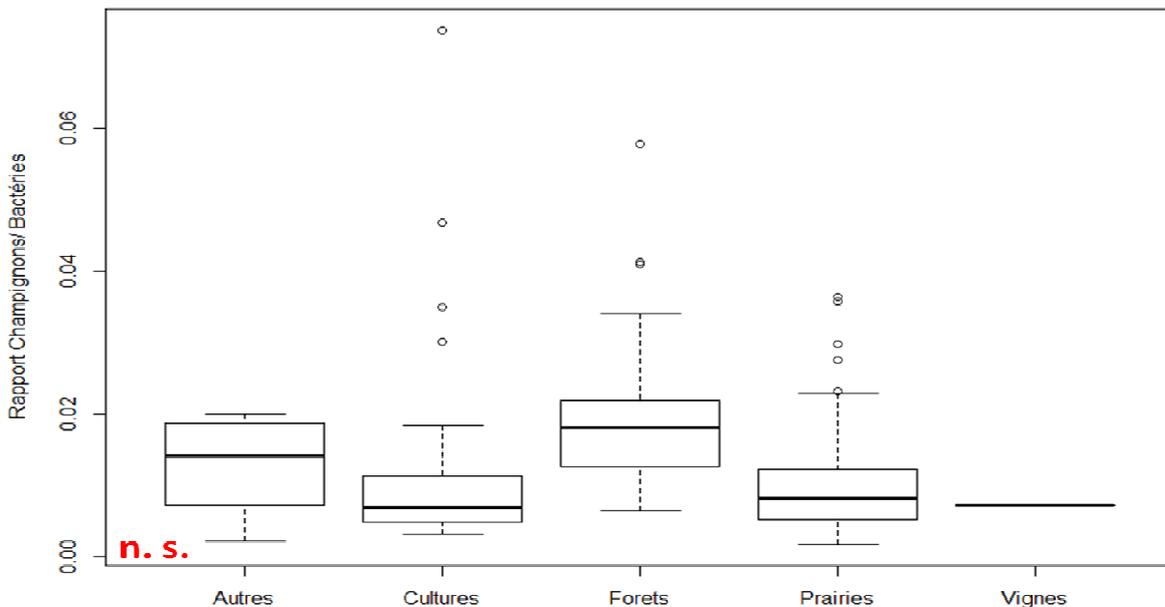
Figure 22 : Influence du mode d'usage des sols de l'Allier sur la densité bactérienne et de champignons (C=sols sous culture, F= sols sous forêts, P= sols sous prairie, A= autres).



L'analyse de la distribution des densités bactériennes entre les modes d'usages des sols de l'Allier montre des différences significatives. Le nombre de bactéries est significativement plus élevé dans les sols sous prairies et le moins élevé dans les sols sous forêts. Les sols sous culture montrent une densité bactérienne intermédiaire. Ces résultats confirment les fortes densités bactériennes observées sous prairie à l'échelle de la France (RMQS). La plus faible densité sous forêts va à l'inverse de ce qui est observé à l'échelle nationale. Elle peut s'expliquer par des typologies de sols particulières (plus acide, cf. Figure 13 et Figure 19) mais aussi par des typologies de litières (notamment celles provenant des résineux) relativement peu stimulantes pour le développement bactérien.

Pour les communautés de champignons, bien que les différences entre les modes d'usage ne soient pas statistiquement significatives, la tendance observée met en évidence une plus forte densité pour les sols sous forêts suivi des sols sous prairie et des sols sous cultures. La dominance des champignons pour les sols sous forêts peut s'expliquer par la typologie particulière de leur sol (sols plus acides) et de leur litière plus récalcitrante à la dégradation (Chemidlin et al., 2011), conditions peu favorables au développement bactérien.

Figure 23 : Rapport de densité Champignons / Bactéries sur les sols de l'Allier

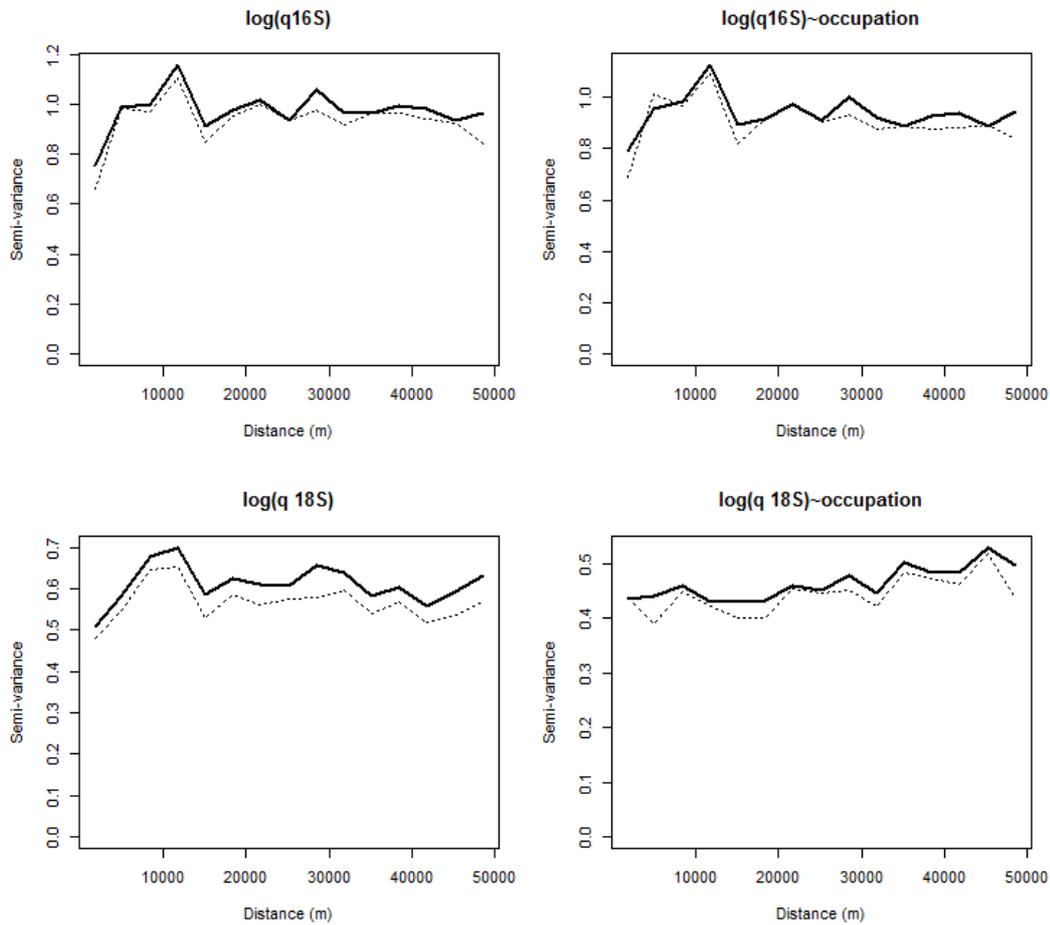


Le rapport Champignons/ Bactéries (F/B) varie de façon significative entre les modes d'usage des sols présent au sein de l'Allier (Figure 23). Nos résultats confirment la dominance des populations de champignons sous forêts et de bactéries sous prairies et en grande culture. La dominance des champignons sous forêts s'expliquent par leur plus grande aptitude métabolique à dégrader de la matière organique récalcitrante comme celle trouvée classiquement dans les litières forestières (de Boer et al., 2005).

Cartographie de la densité bactérienne et de champignons des sols à l'échelle du département de l'Allier

De façon similaire à la Biomasse Moléculaire Microbienne, les densités bactérienne et fongique (figures 13 ci-dessous) ainsi que le rapport Champignons/Bactéries (graphique non présenté) présentent des variogrammes plats traduisant une absence de structuration spatiale de ces populations à l'échelle du département de l'Allier. La prise en compte par REML/MLM de la covariable mode d'usage des sols ne permet pas d'améliorer la prédiction spatiale bien que le mode d'usage ait un impact significatif sur les communautés de bactéries. Le fait de s'appuyer sur un échantillonnage stratifié introduit un biais du fait de la prise en compte d'une variabilité qui peut être très ponctuelle et qui peut expliquer ces résultats.

Figure 24 : Variogrammes des densités bactérienne et fongique à l'échelle du département de l'Allier.

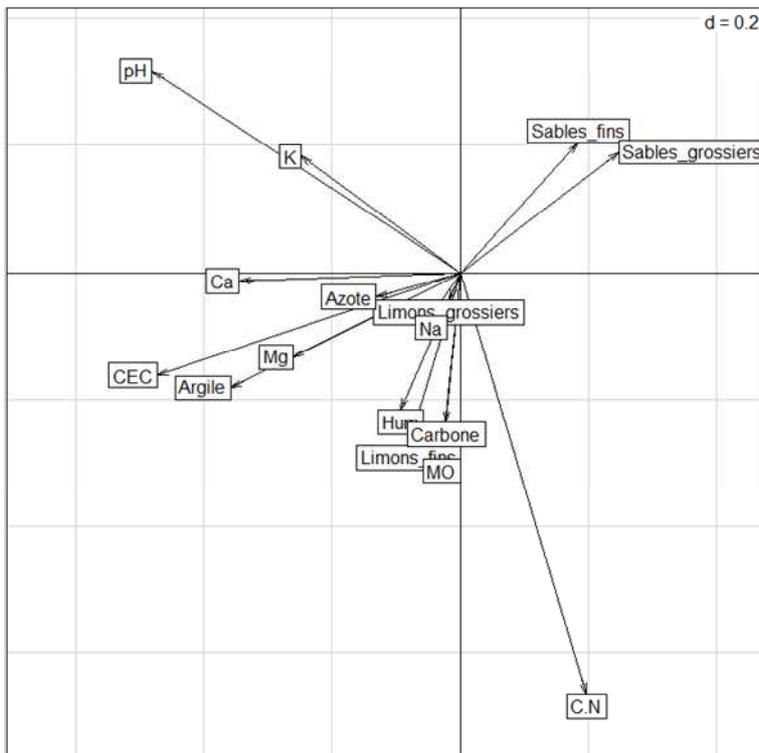


4.4.4. Structure génétique des communautés microbiennes

La structure génétique des communautés de bactéries et de champignons telluriques a été caractérisée par des outils de génotypage de type ARISA (B-ARISA et F-ARISA pour bactéries et champignons, respectivement) à partir de l'ADN extrait du sol. Les profils complexes de bandes obtenus sont ensuite encodés numériquement et analysés statistiquement grâce à des analyses en composantes principales (ACP) qui nous permettent de classer dans un plan factoriel les communautés selon leur similarité génétique.

Influence des caractéristiques physico-chimiques des sols

Figure 26 : Analyse de co-inertie entre les caractéristiques physico-chimiques des sols et les données B-ARISA. Les paramètres les plus structurants étant ceux qui expliquent l'axe 1 de l'ACP.

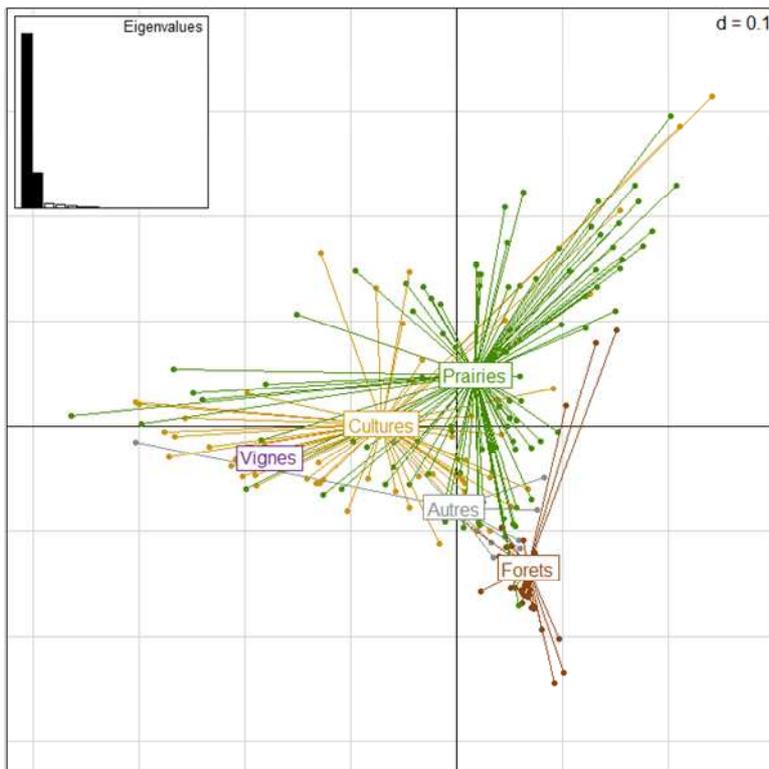


L'analyse de l'influence des caractéristiques physico-chimiques des sols sur la structure génétique des communautés bactériennes a été effectuée grâce à une analyse de co-inertie qui permet de confronter ces deux jeux de données. La résultante de cette analyse est représentée sous la forme d'un cercle de corrélation (Fig. 15). Cette analyse nous permet de hiérarchiser les paramètres physico-chimiques selon leur ordre d'influence sur la structure génétique des communautés bactériennes. Il en ressort que le pH, suivi de la CEC, de la teneur en argiles influencent fortement la composition des communautés bactériennes. Ces résultats sont totalement en accord avec ceux identifiés dans la littérature et au sein du RMQS et donc confirment l'importance de ces filtres à différentes échelles (nationales et régionales).

Influence du mode d'usage des sols

L'analyse des profils B-ARISA en fonction du mode d'occupation des sols (analyse interclasse) montre une influence significative (test Monte Carlo < 1%) du mode d'usage sur la structure génétique des communautés bactériennes. Ainsi nous pouvons déduire que chaque type d'écosystème (forestiers, prairies et culture) induit des compositions particulières des communautés bactériennes telluriques. Ceci confirme la relation écologique entre la diversité biologique au dessus du sol (plante et faune) et la biodiversité du dessous (microorganismes) mais aussi à l'impact des pratiques agricoles et plus largement des activités humaines sur la diversité bactérienne tellurique (gestion des matières organiques indigènes différent entre ces modes d'occupation, travail du sol,...). Toutefois, l'impact du mode d'usage des sols sur la structure génétiques des communautés bactériennes telluriques est plus significatif à l'échelle du département de l'Allier qu'à l'échelle du RMQS. Ceci démontre donc qu'en réduisant la variabilité physico-chimique des sols on augmente l'influence du mode d'usage des sols et donc que le type pédologique des sols est plus structurant sur la diversité bactérienne que le mode d'usage des sols.

Figure 27 : Analyse ACP interclasse des profils B-ARISA en fonction du mode d'occupation des sols.

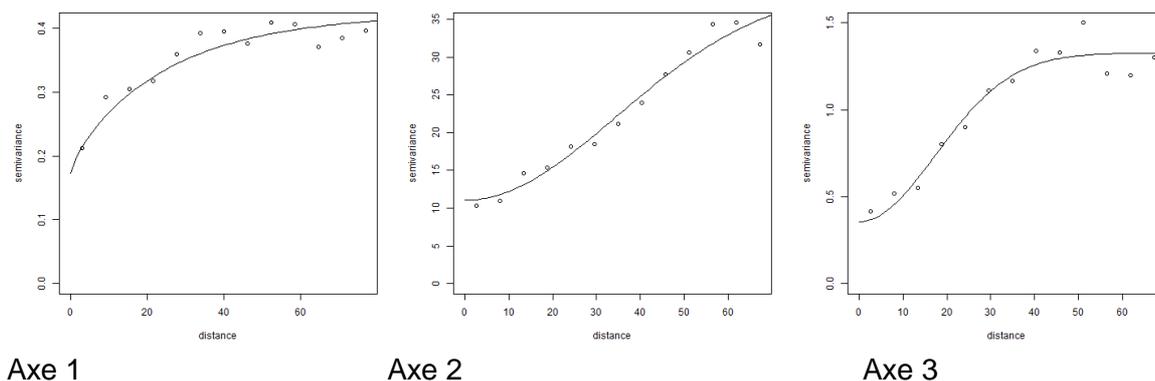


Cartographie de la structure génétique des communautés bactériennes à l'échelle de l'Allier

L'analyse spatiale des matrices complexes que représentent les structures génétiques des communautés (ARISA) est appréhendée par une méthode multivariée sous contraintes spatiales (Multispati avec relation de voisinage de la reine dans notre cas) qui va ordonner les individus sur des axes (comme pour l'ACP) prenant en compte leur auto corrélacion spatiale.

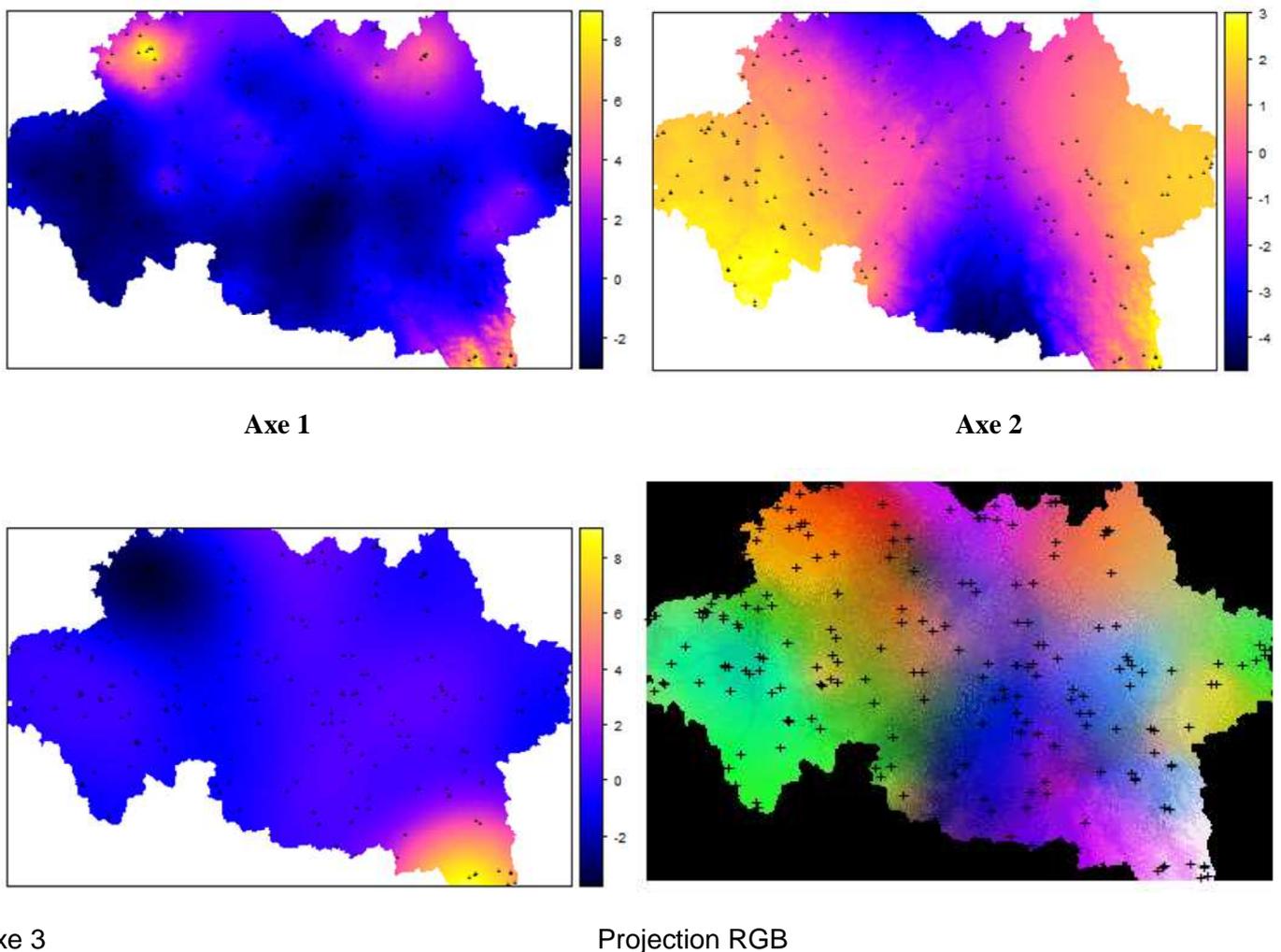
Les variogrammes construits (Figure 28) après l'analyse Multispati des communautés bactériennes montre une structuration spatiale de ces communautés à l'échelle du département de l'Allier. Ces variogrammes montrent une distance d'autocorrélation qui va de 30 à 50km selon l'axe analysé ce qui se traduit par des patches de distribution spatiale de cette structure génétique d'environ 30 à 50 km de rayon. La comparaison avec ceux obtenus sur le RMQS à l'échelle nationale (140 km de rayon) montre que chaque échelle peut mettre en évidence des distributions spatiales particulières et sous la dépendance de paramètres environnementaux différents et plus proximaux aux petites échelles.

Figure 28 : Variogrammes des structures génétiques des communautés bactériennes à l'échelle du département de l'Allier (axes 1, 2 et 3).



La représentation sous forme de cartes révèle l'organisation spatiale des structures génétiques des communautés bactériennes telluriques (Figure 29). L'axe 1 présente une structuration spatiale qui met en opposition les sols de Combraille et de Limagne au sud ouest qui s'oppose aux sols de Sologne Bourbonnaise au nord est mais surtout aux sols de la forêt de Tronçais (au nord ouest) et de la Montagne Bourbonnaise (au sud est). L'axe 2 met en exergue les sols du Val d'Allier qui traverse le département en son centre. L'axe 3 fait lui ressortir l'opposition entre les sols de la Montagne Bourbonnaise et ceux spécifiques à la forêt de Tronçais. La projection RGB confirme la structuration spatiale des communautés bactériennes avec des patches de couleur uniforme qui correspondent à des zones présentant des structures de communautés similaires. Le Val d'Allier, la vallée du Cher à l'Ouest, la forêt du Tronçais ainsi que la Montagne Bourbonnaise montre des structures particulières et marquées à l'échelle du département.

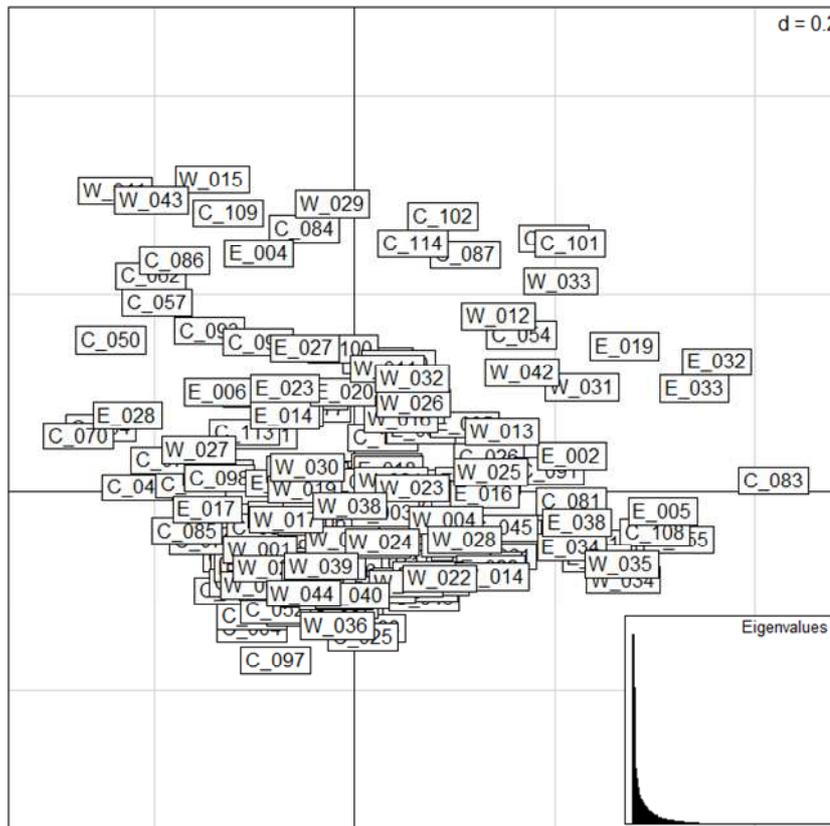
Figure 29 : Cartographie des structures génétiques des communautés bactériennes à l'échelle du département de l'Allier : cartographies des 3 premiers axes de la Multispati (1 à 3) ; projection RGB de ces 3 axes simultanément en attribuant à chaque axe un gradient de couleur : rouge (axe 1), vert (axe 2) et bleu (axe 3)



Les communautés de champignons telluriques

De façon similaire aux communautés bactériennes, nous pouvons observer une grande variabilité de la structure génétique (donc de la composition en populations) des communautés de champignons telluriques à l'échelle de l'Allier (Figure 30).

Figure 30 : Analyse en composante principale des profils F-ARISA obtenus pour les sols du département de l'Allier



La variabilité des communautés de champignons semble aussi significative que celle observée précédemment pour les communautés bactériennes. Nous pouvons donc conclure que le département de l'Allier représente une région écologique renfermant un gradient important de diversité avec des sols dont la composition microbienne est variable.

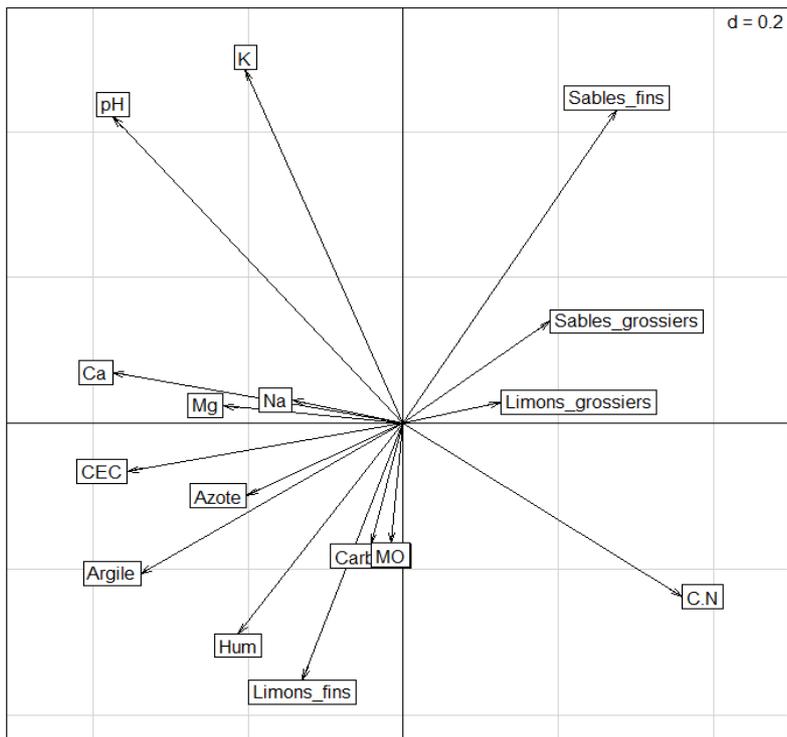
A ce niveau il nous est impossible de comparer les communautés de champignons de ce département avec celles du RMQS car les communautés fongiques ont été peu étudiées sur le réseau de surveillance nationale (seulement quelques dizaines de sols à ce jour).

Influence des caractéristiques physico-chimiques des sols

L'analyse de co-inertie entre les données physico-chimiques des sols et les données F-ARISA (Fig. 19) montre que les paramètres des sols qui sont le plus structurant pour la biodiversité fongique sont, à cette échelle, par ordre d'importance : le C/N, la texture du sol (teneur en argiles et en sable), la CEC, la teneur en Ca et le pH. Le phosphore n'étant pas disponible dans les données analysées nous ne pouvons pas confirmer une tendance classiquement observée entre la teneur en phosphore et la diversité fongique des sols.

Ces résultats démontrent que les paramètres qui structurent la diversité bactérienne et fongique ne sont pas strictement les mêmes et que les communautés de champignons sont fortement influencées par le type de matière organique présent dans le sol (C/N) de part leur implication dans leur dégradation, puis la texture du sol qui conditionne leur aptitude à le coloniser et enfin par le pH.

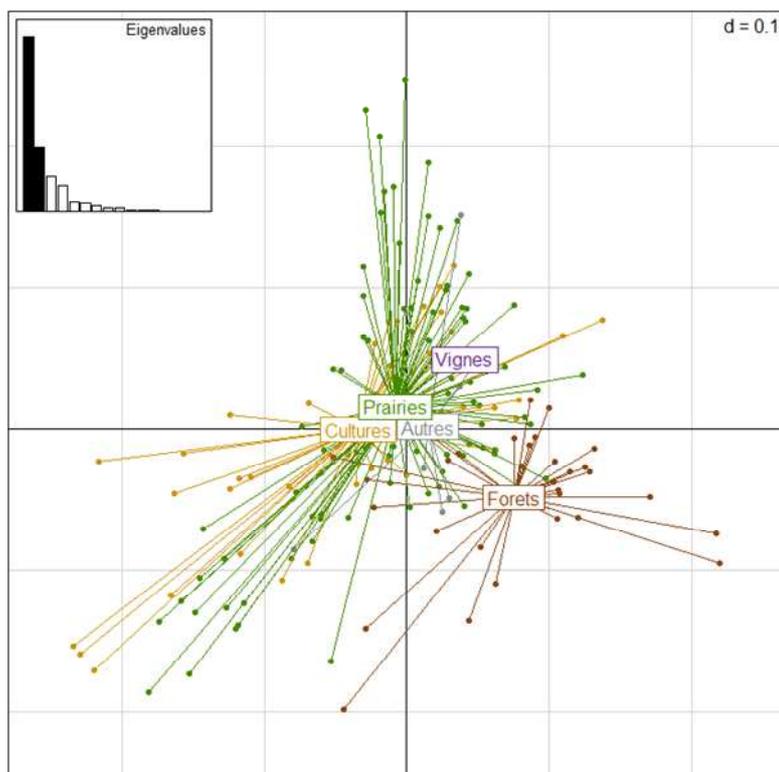
Figure 31 : Analyse de co-inertie entre les caractéristiques physico-chimiques des sols et les données F-ARISA. Les paramètres les plus structurants étant ceux qui expliquent l'axe 1 de l'ACP.



Influence du mode d'usage des sols

L'analyse ACP interclasse des structures génétiques des communautés de champignons des sols de l'Allier en fonction des modes d'occupation des sols (Figure 32) montre une composition particulière de ces communautés en fonction de l'usage du sol. On observe encore un effet significatif du degré d'anthropisation des sols sur la composition en champignon des communautés telluriques puisque les situations sous grandes cultures et prairies sont différenciées des modes d'occupation moins anthropisés que sont les forêts.

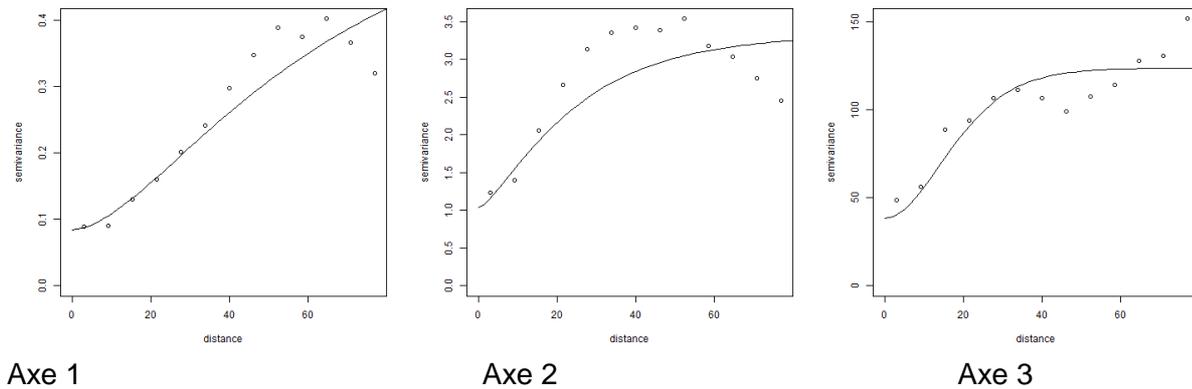
Figure 32 : Analyse ACP interclasse des profils F-ARISA en fonction du mode d'occupation des sols



Cartographie de la structure génétique des communautés de champignons à l'échelle de l'Allier

Similairement aux communautés bactériennes, l'analyse de la composante spatiale des structures génétiques de communautés de champignons permet d'établir des variogrammes (Figure 33) traduisant une organisation spatiale non aléatoire des communautés étudiées à l'échelle du département de l'Allier. Ces variogrammes sont cependant moins robustes avec des oscillations du signal à différentes distances suivant les axes. Les distances d'autocorrélation varient entre 30 et 70 km selon l'axe montrant ainsi des tailles de patches de distribution différents de ceux obtenus pour les communautés bactériennes et donc confirmant que les règles d'assemblages de ces communautés sont sous l'influence de paramètres différents.

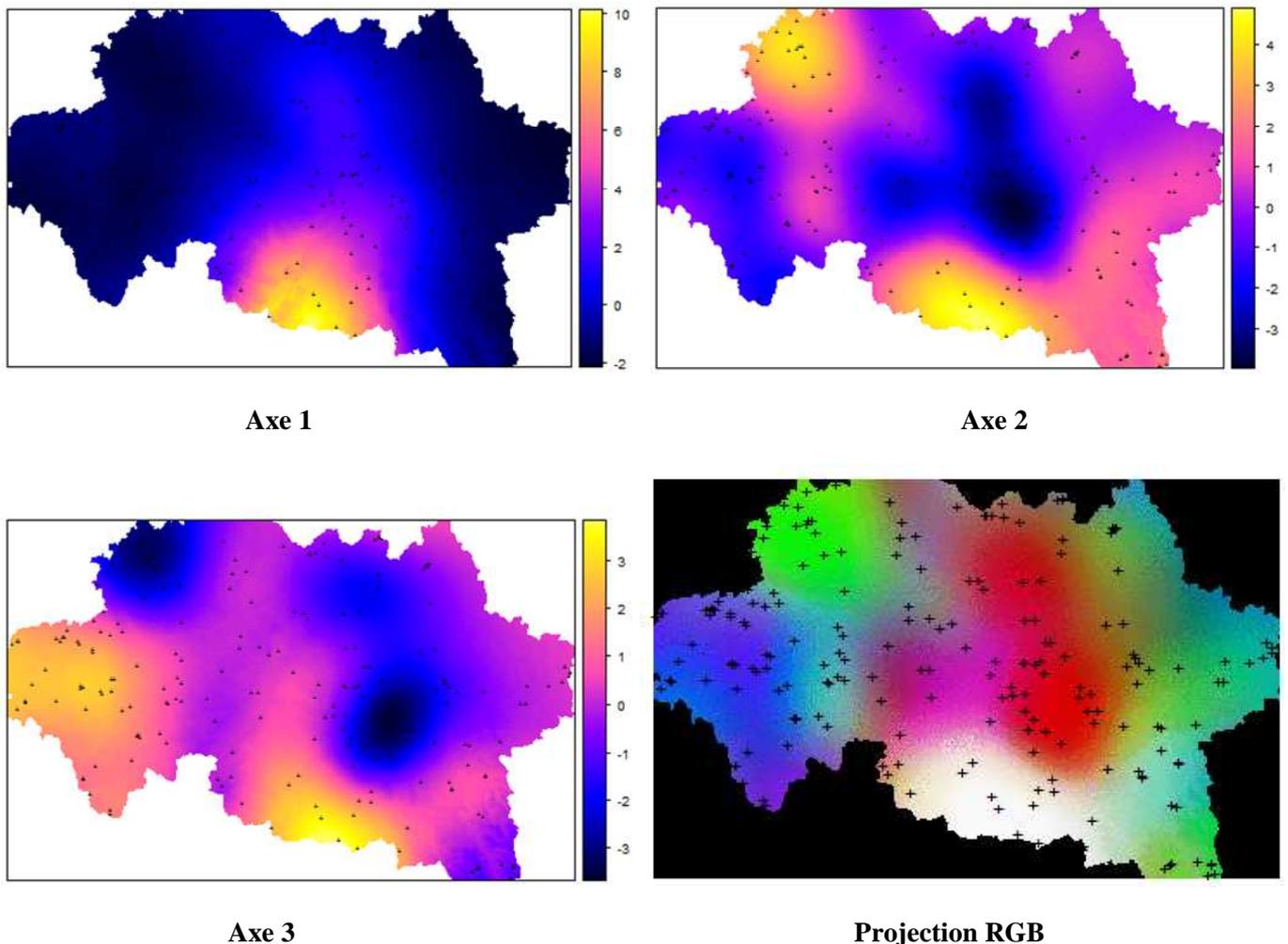
Figure 33 : Variogrammes des structures génétiques des communautés de champignons à l'échelle du département de l'Allier (axes 1, 2 et 3)



Les cartographies des axes 1 à 3 (Figure 34) démontrent des structures spatiales marquées mais faisant moins ressortir les grandes régions pédologiques du département. La Limagne est la zone la plus marquée puisqu'elle est fortement différenciée sur les 3 axes. Les communautés spécifiques des sols de la forêt de Tronçais apparaissent sur les axes 2 et 3 principalement. Une zone centrale le long du Val d'Allier se dégage également sur les axes 2 et 3. La Montagne Bourbonnaise est moins marquée que dans le cas des bactéries.

La cartographie par projection RGB confirme ces résultats avec une structuration spatiale marquée avec 4 zones qui se dégagent fortement : la plaine de Limagne, la forêt du Tronçais, la zone centrale du Val d'Allier et de manière moins importante, la vallée du Cher ainsi que la Montagne Bourbonnaise.

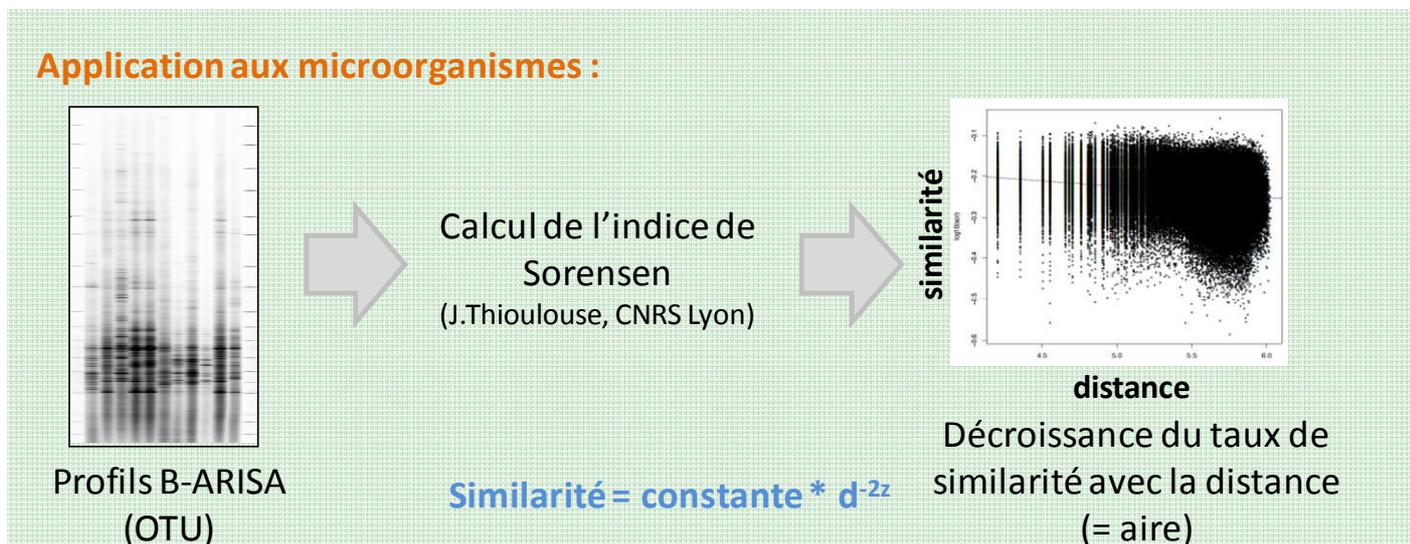
Figure 34 : Cartographie des structures génétiques des communautés de champignons à l'échelle du département de l'Allier : cartographies des 3 premiers axes l'analyse Multispati (1 à 3) ; projection RGB de ces 3 axes simultanément en attribuant à chaque axe un gradient de couleur : rouge (axe 1), vert (axe 2) et bleu (axe 3)



4.4.5. Relation aire espèce

La relation aire-espèce est une loi fondamentale en écologie qui a pour hypothèse forte que le nombre d'espèces échantillonnées sur une zone augmente de façon significative avec l'aire de la zone échantillonnée (Green et al., 2006). Cette relation fortement utilisée pour étudier la diversification des communautés de macroorganismes n'est que peu utilisée en écologie microbienne et encore moins au niveau des communautés microbiennes telluriques. Ce constat peut s'expliquer par la nécessité d'avoir des échantillonnages ambitieux spatialement de part l'aire d'investigation et la répartition des sites de prélèvement. L'échantillonnage de la zone département de l'Allier répond aux critères d'application de cette loi. Par conséquent, nous avons calculé cette relation aire-espèce, non pas sur la base des inventaires de diversité microbienne (qui ne sont pas envisagées à ce jour), mais sur la base des similarités génétiques entre communautés (grâce à la technique ARISA) et à son évolution avec la distance géographique (Figure 35). Brièvement, notre stratégie technique est de calculer la décroissance de similarité génétique (indice de Sorensen) entre les communautés microbiennes en fonction de la distance géographique qui les sépare en appliquant la formule décrite ci-dessous.

Figure 35 : Stratégie d'analyse de la relation aire-espèce

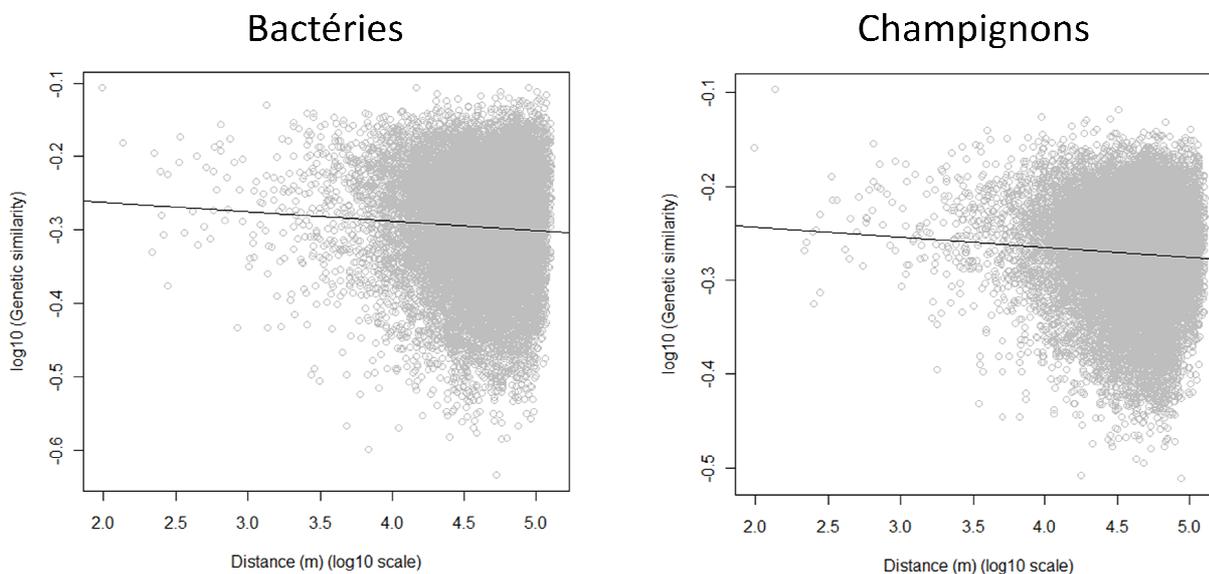


En résumé, nous calculons le « z » qui représente la pente de la droite qui relie la similarité génétique en fonction de la distance géographique et qui correspond à l'intensité de cette relation aire-espèce.

La relation aire-espèce à l'échelle du département de l'Allier est significative pour les communautés bactériennes ainsi que pour les communautés de champignons. La valeur de cette relation (z) est égale à 0.012 pour les bactéries et 0.011 pour les champignons.

Selon Woodcock et al. (2006), la valeur de z pour les communautés bactériennes (tout environnement confondu) est compris entre $0.26 < z < 0.002$ et celui des champignons serait aux alentours de 0.07. Pour comparaison, celui ces organismes supérieurs est proche de 0.23 pour les végétaux, 0.15 pour les oiseaux et 0.08 pour les fourmis (Horner-devine et al. 2004, Nature).

Figure 36 : Relation aire-espèce pour les communautés bactériennes et de champignons à l'échelle du département de l'Allier



Nos valeurs plus faibles peuvent s'expliquer par les techniques de génotypage utilisées pour aborder la diversité qui ne renseignent pas sur le nombre d'espèces décrites mais sur une dissimilarité génétique en fonction de la distance géographique. Par ailleurs, notre échantillonnage de faible ampleur en termes de nombre de sols échantillonnés sur une zone spatialement restreinte peut aussi expliquer nos résultats. Toutefois, nos données permettent de conclure que le turnover de la diversité bactérienne et de champignons à l'échelle de l'Allier sont significatives. Ces résultats confirment la grande variabilité des structures génétiques observées pour ces communautés à l'échelle de ce département mais aussi démontrent que cette variabilité génétique est structurée spatialement.

Ce turnover de diversité bactérienne et de champignons peut s'expliquer par deux processus différents :

- une capacité de dispersion limitée des populations microbiennes qui entraîne un équilibre dynamique entre l'extinction des populations compensées par l'immigration de nouvelles espèces.
- une forte hétérogénéité spatiale des habitats (types de sols, climats, mode d'usage, géomorphologie...) qui entraîne une forte hétérogénéité environnementale et donc une forte sélection des populations composant les communautés. Même si ces deux processus sont différents ils ne sont pas exclusifs dans la diversification des communautés microbiennes à grande échelle. Il est impossible de conclure sur l'importance relative de ces deux processus dans notre étude. Toutefois, la forte hétérogénéité environnementale démontrée par la grande variabilité des types et modes d'usage des sols de l'Allier laisse présager une forte influence de la diversité du paysage.

Si l'on compare ces données à celles obtenues sur le RMQS avec les mêmes outils moléculaires (technique ARISA), la valeur du z à l'échelle du territoire national est 0.006 pour les communautés bactériennes et donc inférieure à celle obtenue. Nous observons donc un turnover de la diversité bactérienne des sols qui est plus important à l'échelle de l'Allier que celui mesuré à l'échelle de la France. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'à l'échelle de la France nous accumulons des régions écologiques où la diversification est forte mais qui est amortie par des régions écologiques où la diversification est faible voire non significative. Pour démonstration, la relation aire-espèce a été calculée à l'échelle de différentes régions françaises. Les résultats sont les suivants :

- Sud-est : 0.013 ($p < 0.01$)
- Sud-ouest : 0.008 (NS)
- Bourgogne : 0.009 ($p < 0.01$)
- Bretagne : 0.007 ($p < 0.01$)

Par conséquent, la valeur obtenue pour le département de l'Allier est relativement élevée en comparaison de la gamme de variation observée dans différentes régions écologiques françaises.

La valeur du z pour les communautés de champignons est de 0.011 ce qui signifie que la diversification des communautés de champignons est significative dans le département de l'Allier et similaire à celle de communautés de bactéries. Toutefois, notre étude montre que si les turnovers de diversité des communautés bactériennes et de champignons sont similaires les filtres environnementaux l'expliquant (en termes de physico-chimie et de mode d'usage des sols) sont différents. Ceci conforte l'hypothèse que les diversités des communautés bactériennes et de champignons ne sont pas structurées spatialement de la même manière et sous la dépendance de filtres environnementaux différents.

Les valeurs de z obtenus sur les régions du RMQS pour les communautés de champignons sont :

- Sud-est : 0.009 ($p < 0.05$)
- Sud-ouest : 0.006 (NS)
- Bourgogne : 0.0075 (NS)
- Bretagne : 0.0085 ($p < 0.05$)

Ces résultats démontrent que la diversification fongique est moins significative que celle des communautés bactériennes à l'échelle de régions écologiques françaises mais pas au niveau du département de l'Allier.

Conclusion

La base de données géographiques des sols de l'Allier à 1/250 000^{ème} correspond d'une part, à une synthèse réalisée à partir de bases cartographiques existantes à une échelle moindre, le 1/100 000^{ème}, dans la partie centrale du département, et d'autre part, à des levés complémentaires réalisés en 2011 dans ses parties Est et Ouest.

Les pédopaysages de l'Allier se répartissent au sein de 4 grands domaines morphologiques :

- vallée de la Loire pour reprendre le nom du fleuve mais qui concerne principalement le val d'Allier,
- plaine et collines de Limagne,
- bassins et plateaux d'épandage,
- massifs cristallins

Les sols les plus favorables aux cultures se rencontrent en Limagne et dans le Val d'Allier, ces deux petites sous-régions occupant moins de 20% de la surface du département. En 2011, les céréales à pailles et le maïs grain sont les principales cultures

Sur de plus petites surfaces, au sein du Bocage Bourbonnais, le bassin de Bourbon-l'Archambault et le Sud de la dépression du Val de Germigny (Berry) présentent des sols à bons potentiels agronomiques.

L'hydromorphie est une caractéristique de nombreux sols du département, notamment en Bocage Bourbonnais et en Sologne Bourbonnaise. Les descriptions de sols réalisées pour les études au 1/100 000 durant la période 1965-1975 et celles réalisées en 2011 témoignent de 2 périodes climatiques différentes. En 2011, les sols étaient secs en comparaison de 1965-1975. Le degré d'hydromorphie était moins marqué mais les traces d'hydromorphie ont pu être observées.

Dans les massifs cristallins (Combraille et Montagne Bourbonnaise), les sols sont majoritairement sableux et filtrants, avec localement des pentes importantes.

Les prairies et les forêts sont les principales occupations des sols du Bocage Bourbonnais (dont la forêt de Tronçais), de la Sologne Bourbonnaise et des massifs cristallins.

En dehors des domaines de vallée et de plaines, les recouvrements de limons sont présents par plages sur tout le département, avec un gradient du Sud au Nord, donnant naissance à des sols épais mais lessivés.

Le vignoble de St Pourçain est situé sur des coteaux entre la bordure de Combraille, les Côtes calcaires, la plaine de Limagne et le Val d'Allier.

L'échelle du 1/250 000, la méthode et la mise en forme des résultats rend exploitable cette étude à l'échelle du territoire national.

Dans cette étude nous avons analysé l'abondance et la diversité microbienne des sols du département de l'Allier. L'échantillonnage spatialisé (stratifié) a aussi permis de dessiner des cartes d'abondance et de diversité des communautés microbiennes telluriques.

Grâce aux données accumulées sur le RMQS et plus largement au référentiel MicroSol[®], nous avons pu comparer l'écologie microbienne de ce département avec celui de différentes régions françaises et même le territoire national.

L'étude montre que l'abondance microbienne de cette zone est relativement moyenne par rapport à d'autres régions françaises. Ceci s'explique par les caractéristiques physico-chimiques des sols (texture sableuse et pH acide) qui limitent le développement microbien dans les sols.

En termes de diversité et de structure génétique, nous observons une grande variabilité des communautés microbiennes à l'échelle du département de l'Allier. Ceci est confirmé par la relation aire-espèce qui est significative et supérieure à celle rencontrée à l'échelle du territoire national et de la plupart des régions françaises. Cette forte diversification des communautés microbiennes telluriques à l'échelle de ce département résulte pour partie de la grande hétérogénéité de ses sols et de ses modes d'usages et de leur organisation spatiale.

L'identification et la hiérarchie des filtres environnementaux expliquant les variations d'abondance et de diversité microbienne sur cette zone démontrent que ce sont les mêmes filtres qui agissent à cette échelle en comparaison que ceux identifiés à l'échelle du RMQS. Nous mettons en évidence une forte influence du type de sol (avec des filtres différents en fonction des bactéries et champignons) suivi en second ordre d'un effet mode d'usage des sols avec un effet du degré d'anthropisation des sols (culture > prairie > forêts). Une meilleure exploitation des données climatiques (T°C, précipitations...) et géomorphologiques (pente, altitude...) associées aux sols échantillonnés permettrait d'améliorer les analyses et leur puissance en termes de hiérarchie des paramètres environnementaux structurant le plus l'abondance et la diversité microbienne dans les sols de l'Allier.

Les analyses cartographiques révèlent une structuration spatiale peu significative pour les données d'abondance microbienne alors qu'elle est assez marquée pour les données de géotypage des communautés microbiennes. Ceci confirme bien que l'abondance et la diversité microbienne ne sont pas des covariables spatiales, ni même temporelles. Ces résultats montrent aussi une distance d'auto corrélation qui peut être différente en fonction de l'échelle d'investigation (RMQS vs Allier) et en fonction des organismes ciblés (bactéries vs champignons) et donc que des filtres environnementaux différents structurent ces assemblages microbiens spatiaux.

La carte des pédopaysages avec la caractérisation des communautés microbiennes des sols du département de l'Allier serviront d'outil pour évaluer l'impact des usages sur la qualité de sols et la biodiversité des sols dans des grands projets d'aménagement à l'échelle départementale ou régionale.

Perspectives

Si l'objectif était d'établir une première cartographie de l'ensemble de ce département, ce n'est pas une fin en soi. En effet, l'échelle du 1/250 000 permet de structurer les connaissances existantes et d'avoir un aperçu des conséquences sur les sols de grandes décisions d'aménagement régional ou départemental. En revanche, elle ne permet pas de donner des réponses d'une précision suffisante à l'échelle intercommunale ou locale, par exemple sur des sujets tels que les opérations d'aménagement foncier ou la délimitation des zones humides et leur niveau d'intérêt écologique. Pour cela, les cartographies actuellement disponibles pourraient être complétées en 2 temps :

- à court terme d'une part, à l'échelle du 1/50 000ème, pour laquelle le secteur particulier du bassin de Montluçon, sous pression d'aménagement urbain et industriel, pourrait être cartographié, car susceptible d'apporter un gain réel de précision pour les quelques 35 000 ha qui le composent (Figure 37) ; il constituerait ainsi un 4ème « secteur » de référence départemental, d'autre part sur les surfaces forestières, à l'aide des observations existantes en nombre suffisant déjà établies par les services forestiers de l'IFN,
- à plus long terme, à l'échelle du 1/10 000ème - 1/25 000ème, pour les opérations d'aménagement à l'échelle communale ou inter-communale. Cette échelle est nécessaire pour les diagnostics d'expertise de plus en plus pointus et les interventions de plus en plus fines qui devront être faits pour s'assurer du fonctionnement durable des sols ; environ 100 000 observations seraient nécessaires à cette échelle pour tout le département.

Pour les fosses (ou profils), il serait intéressant de réaliser une vingtaine de fosses supplémentaires pour les US de 500 à 2000 ha, ce qui rendrait ainsi compte de la quasi-totalité des surfaces cartographiées.

Une digitalisation et une mise en base DoneSol des études de sols des 3 cantons de référence (Chantelle, Cérilly, Dompierre-sur-Besbre) pourraient aussi être programmées.

Du fait des modèles cartographiques existants dans la partie centrale, les nouveaux levés réalisés ont aussi permis de produire un zonage de base au 1/100 000ème. Ainsi, sous réserve d'en établir une synthèse homogène, une cartographie des sols d'ensemble au 1/100 000ème du département de l'Allier et la base DoneSol correspondante pourrait être présentée à terme. Le nombre des observations réalisées à ce jour dans le département pour l'établissement de ces cartographies (près de 20 000 sondages et plus de 900 profils) conduit à des ratios au prorata des surfaces compatibles avec cette échelle, soit respectivement 1 sondage pour 35-40 ha et un profil de sol pour 800 ha.

Rappelons que pour atteindre la précision du 1/50 000ème, il faut 1 sondage pour 20 à 30 ha et 1 profil de sol pour 200 à 500 ha, alors que la précision du 1/25 000ème exige 1 sondage pour 5 à 20 ha et 1 profil de sol pour 50 à 200 ha. Pour atteindre ces précisions vis-à-vis de l'existant, il faudrait presque autant de sondages et de profils qu'il en a été fait à ce jour pour le 1/50 000, soit respectivement 15 000 et 600, et ajouter 2 000 profils supplémentaires pour le 1/25 000.

La cartographie du département au 1/25 000^{ème} reste pour l'instant partielle et représente à peine 15 % de la surface départementale. Une couverture complète au 1/25 000ème ou plus précise, nécessitera donc environ 10 fois plus de données ponctuelles que celles qui existent à ce jour, soit au moins 100 années/homme (soit 25 à 35 ans pour une équipe de 3 ou 4 pédologues) pour l'ensemble, 25 années/homme en envisageant uniquement les zones agricoles et péri-urbaines.

Cette précision, si elle n'est pas actuellement requise, sera nécessaire à terme, car les exigences des projets d'aménagement s'élèvent d'années en années et s'élèveront sans doute encore à l'avenir.

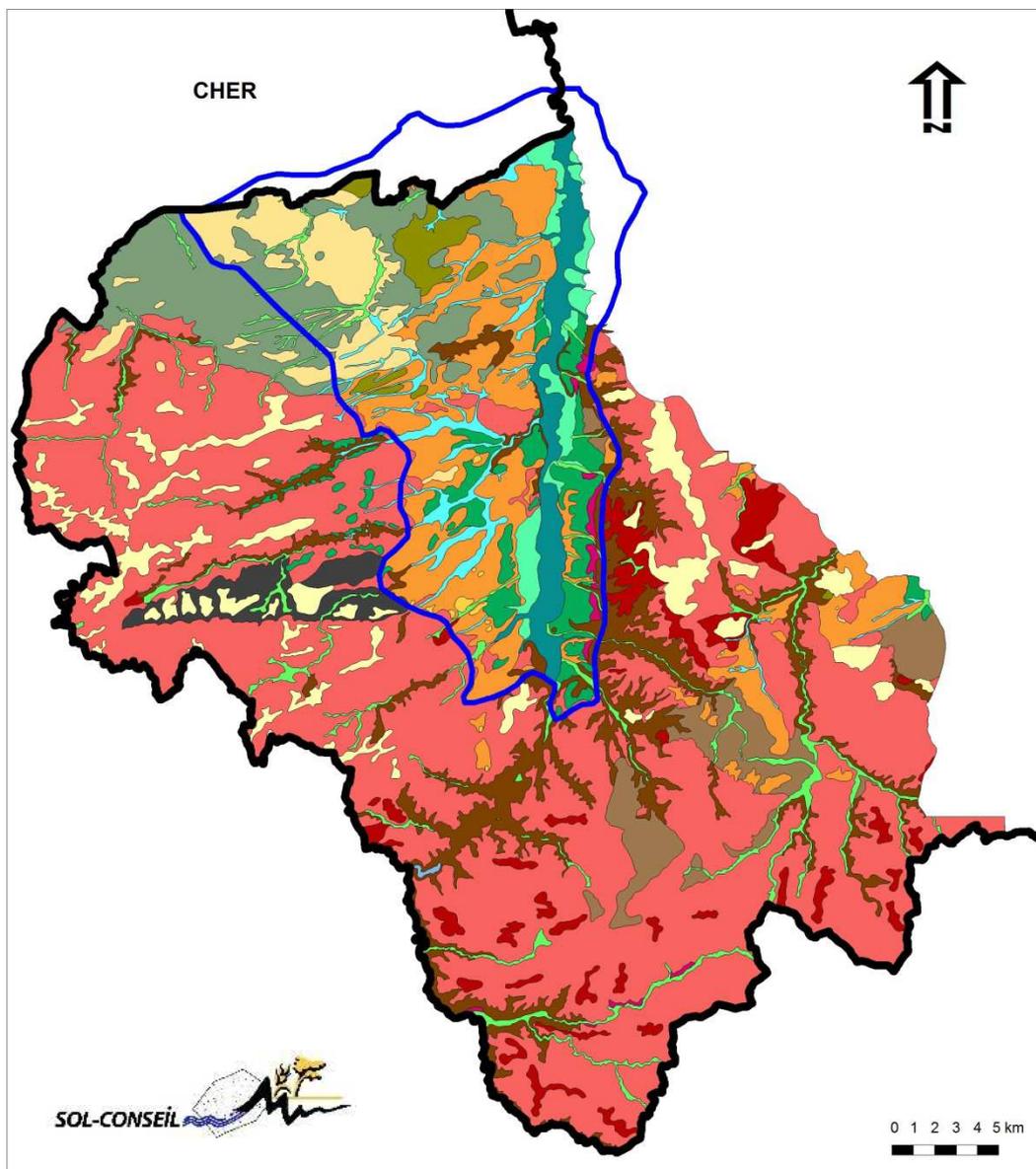
Les documents existants sur les sols, l'agronomie et la foresterie à propos de l'Allier sont en nombre limité. La recherche bibliographique menée n'a permis d'établir qu'une liste limitée comportant moins de 15 références dont une dizaine de références cartographiques.

En fait, depuis environ 30 ans, aucune étude de cartographie des sols n'avait été réalisée dans l'Allier. En 2012, on peut cependant considérer comme établies :

- une couverture SIG à 1/250 000 et sa base de données associée DoneSol, valide à l'échelle régionale et départementale,
- une couverture SIG à 1/100 000, emboîtée dans la précédente, cependant sans base de données associée, valide à l'échelle de la petite région,
- des cartographies de sols à 1/25 000 pour 3 cantons, couvrant moins de 100 000 ha, valide à l'échelle intra-communale et à l'îlot de parcelles.

Un long travail est donc encore nécessaire pour parvenir un jour à des cartes de sols suffisamment précises pour être utilisées directement à l'échelle de l'exploitation agricole.

Figure 37 : Proposition de secteur à cartographier au 1/50 000ème dans l'Allier



La caractérisation des communautés microbiennes des sols de l'Allier ouvre des perspectives complémentaires.

En terme de perspectives techniques, il serait intéressant et pertinent d'analyser la diversité microbienne des sols par des inventaires taxonomiques précis et sensibles des espèces bactériennes et fongiques de sols de l'Allier. Pour ceci nous pourrions utiliser la technique de pyroséquençage haut débit des gènes taxonomiques ribosomiques microbiens, qui vient d'être optimisée au sein de la plateforme GenoSol. Une telle approche permettrait de décrire environ 10 000 espèces microbiennes par sol et ainsi de dégager de véritables indices de diversité microbienne et la possibilité de calculer précisément la relation aire-espèce. Une telle approche permettrait aussi de traduire la diversité taxonomique et ses variations spatiales en termes de fonctionnement biologique potentiel par la connaissance des attributs écologiques des populations décrites.

D'un point de vue plus scientifique, le département de l'Allier ne représente qu'une partie du Massif central qui peut être considéré comme une région écologique à part entière. Il serait donc intéressant de compléter cette étude par une extension géographique à l'échelle de tout le Massif afin d'analyser la diversité microbienne de cette région écologique.

Par ailleurs, au sein de la plateforme GenoSol nous accumulons les données sur d'autres zones paysagères (paysage agricole Fenay (21), paysage agricole Bretagne, paysage ANDRA...), présentant une échelle spatiale proche de celle du département de l'Allier ou complémentaire. Il serait donc pertinent de comparer les règles d'assemblages des communautés microbiennes sur ces différents paysages afin d'améliorer notre interprétation de l'écologie spatiale et des niveaux d'abondance et de diversité aux différentes échelles.

Bibliographie

- AFNOR, 2007. Norme NF X 31-560. Qualité des sols. Cartographie des sols appliquée à toutes les échelles. Acquisition et gestion informatique de données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols.
- Baize, D., 1995. Les sols argileux appauvris en argile sous climat tempéré humide, Planosols texturaux, pélosols différenciés et autres solums. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 4, pp. 227-240.
- Baize, D. et Jabiol, B., 1995. Guide pour la description des sols. INRA Édition, 375 p.
- Baize, D., 2000. Guide des analyses en pédologie. INRA Editions. 257p.
- Baize, D., Girard, MC., Association Française pour l'Étude des Sols (AFES), 2009. Référentiel Pédologique 2008. Éditions QUAE, 480 p.
- Bonfils, P., 1970. *La forêt de Tronçais. Etude pédologique*. Biologie et Forêt. pp. 35- 43
- Bonfils, P., et Labau, G., 1969. *Carte pédologique du canton de Cérilly au 1/25 000ème*. INRA. SES n°109. Notice + Carte + Annexes analytiques 107p.
- Bornand, M., Callot, G., Favrot, J.-C., et Servat, E., 1966. *Étude pédologique du Val d'Allier*, (échelle 1/1000 000). INRA, Service d'étude des sols, Montpellier, SES n°64, 800p.
- Bornand, M., Callot, G., Favrot, J.-C., et Servat, E., 1968. Les sols du Val d'Allier, notice explicative de la carte pédologique au 1/100 000ème, *INRA, Service d'étude des sols*, Montpellier, 199p.
- Bornand, M., Arrouays, D., Baize, D., Jamagne, M., 1989. « Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250 000 » *Sciences du sol*, vol. 27, n°1, pp.17-20.
- Bouet, G et Fel, A., 1983. Atlas et géographie du Massif central (Portrait de la France moderne). Lausanne : Flammarion. 348 p.
- BRGM. Cartes Géologiques au 1/50 000. Bourbon l'Archambault, Bourbon-Lancy, Charenton ^S/Cher, Châteaumeillant, Le Donjon, Lurcy-Lévis, Hérisson.
- Chemidlin Prevost-Bouré, N., Mougel, C., Dequiedt, S., Lelievre, M., Christen, R., Ranjard, L., 2011. Optimization and validation of real time PCR of fungal communities in soils. *Plos One* 6, e2466.
- De Boer, W., Folman, L.B., Summerbell, R.C., & Boddy, L. 2005. Living in a fungal world: impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews*, 29,795-811
- Dequiedt, S., Saby, N., Lelievre, M., Jolivet, C., Thioulouse, J., Toutain, B., Arrouays, D, Bispo, A., Lemanceau, P., and Ranjard, L., 2011. Biogeographical Patterns of Soil Molecular Microbial Biomass as Influenced by Soil Characteristics and Management. *Global Ecology and Biogeography*. 20: 641-652.
- Dequiedt, S., Thioulouse J., Jolivet, C., Saby N., Lelievre, M., Maron P-A., Martin M-P., Chemidlin-Prévost-Bouré N., Toutain, B., Arrouays, D., Lemanceau, P., Ranjard, L., 2009. Biogeographical patterns of soil bacterial communities. *Environmental Microbiology Report*, 1:251-255.
- Favrot, J.C., 1969. *Carte pédologique de France au 100 000ème. Feuille de Vichy*. INRA. Annexe analytique + Carte + Notice 158p.
- Favrot, J.C., et Legros, J.P., 1972. A propos d'un type de sol hydromorphe observé en France I le planosol lithomorphe. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol*, n°6, pp. 243-249.
- Favrot, J.C., Guyon, A., 1973. *Étude pédologique de la Combraille et du Bocage Bourbonnais (échelle 1/100 000)*, INRA, Service d'étude des sols, Montpellier, SES n°197. Annexes + Carte + Rapport, 130p
- Favrot, J.C., et Guyon, A, 1973. Étude pédologique de la Combraille et du bocage bourbonnais. Carte papier, notice, profil et annexes. Echelle 1 : 100 000. INRA – ENSAM Montpellier.
- Favrot, J.C., 1974. *Carte pédologique de France au 100 000ème. Feuille de Moulins*. INRA. Annexe analytique + Carte + Notice 177p.

- Green, J.L., Holmes, A.J., Westoby, M., Oliver, I., Briscoe, D., Dangerfield, M., Gillings, M., & Beatle A.J. 2004. Spatial scaling of microbial eukaryote diversity. *Nature*, 432, 747-750.
- Horner-Devine, M.C., Lage, M., Hughes, J.B., & Bohannan B.J.M. 2004. A taxa-area relationship for bacteria. *Nature*, 432, 750-753
- INRA, Unité Infosol, 2005. Référentiel Régional Pédologique. Cahier des Clauses Techniques Générales. De la réalisation à la labellisation des bases de données sols au 1/250 000. Orléans, 20p.
- INRA, Unité Infosol, 2010. Dictionnaire DoneSol - version 2.0.4. 351p.
- Larue, J.P., 1972. *Le contact entre le massif central et le bassin parisien de la vallée du Cher au bassin de Bourbon l'Archambault. Etude géomorphologique.* Mémoire de DESS. Faculté des lettres et des sciences humaines de Clermont-Fd. 80p.
- Larue, J.P., 2008. Profils longitudinaux des cours d'eau et tectonique : l'exemple du bassin de l'Aumance (Massif Central, France). *Norois*, n°207, 2008/2, pp . 71-84.
- Legros, J.P., et Boyer, G., 1969. Étude pédologique du Canton de Dompierre-sur-Besbre au 1/25 000ème. INRA. SES n°108. Notice + Carte + Annexes analytiques 196p.
- Legros, J.P., 1996. Cartographie des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 321 p.
- Méloux, J-L., 1993. *Le Bocage et la Sologne Bourbonnaise. Etude morphopédologique.* C.R.P.F de l'Allier, C.E.R.E.F Moulins, Univ Blaise Pascal Institut de Géographie, Clermont-Fd II, 191p.
- Méloux, J-L., 1994. *La Combraille Bourbonnaise. Etude morphopédologique*, Université de Clermont-Ferrand II, CRPF de l'Allier, CETEF, Moulins, 81 p.
- Méloux., J-L., et Nebout, J-P., 1995. Arbres et terroirs de Sologne Bourbonnaise. Guide pratique pour le choix des essences forestières. CRPF Auvergne, Centre d'Etudes Forestières de l'Allier, 71p.
- Méloux., J-L., et Nebout, J-P., 1995. Arbres et terroirs du Bocage Bourbonnais. Guide pratique pour le choix des essences forestières. CRPF Auvergne, Centre d'Etudes Forestières de l'Allier, 74p.
- Méloux, J-L., 1995. *Diagnostic des potentialités forestières en milieu ouvert aux marges nord du Massif Central. Approche morphopédologique*, Université de Clermont-Ferrand II, C.E.M.A.G.R.E.F. de Riom, 98 p.
- Méloux, J-L., 1997. *Etude morphopédologique des plateaux nord-occidentaux du massif central. La Marche, le Boischaut et le Bocage Bourbonnais.* Thèse de doctorat de Géographie de l'université Blaise Pascal, Clermont-Fd II, 510p.
- Méloux, J-L., 2005. *Paysages et milieux naturels en Auvergne.* Ed Chamina, Auvergne, Patrimoine. 127p.
- MUNSELL Soil color charts ., 2000.
- Servant. J., 1966. *Carte pédologique du canton de Chantelle.* INRA. Carte+notice 52p.
- Servant. J., Dupont. J., 1986. *Carte des sols de la région Centre au 1/50 000ème, Châteaumeillant.* Chambre d'agriculture du Cher. Carte + Notice, 151p.
- Servant. J., Dupont. J., 1996. *Carte des sols de la région Centre au 1/50 000ème, Sancoins, Vallée de Germigny.* Chambre d'agriculture du Cher. Carte + Notice, 99p
- Servant. J., Prochasson. V., Dupont. J., Morin. J-F., 2006. *Carte des sols de la région Centre au 1/50 000ème, Charenton^s/Cher.* Chambre d'agriculture du Cher. Carte + Notice, 110p
- Strickland, M Rousk J. 2010. Considering fungal:bacterial dominance in soils – Methods, controls, and ecosystem implications. *Soil Biology Biochemistry*, 42:1385-1395.
- Van Vliet-Lanoë, B., 1986. Le pédocomplexe du dernier interglaciaire (de 125 000 à 75 000 BP). Variations de faciès et signification paléoclimatique du Sud de la Pologne à l'Ouest de la Bretagne. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, Vol. 23, n°1-2, pp. 139-150.
- Woodcock, S Curtis, TP Head, IM Lunn, M Sloan. WT 2006. Taxa-area relationships for microbes: the unsampled and the unseen. *Ecology Letters*, 9:805-812.

Annexes

Annexe 1 : Liste des études pédologiques recensées dans l'Allier en 2011	71
Annexe 2 : Caractéristiques des UC (n°, surface, % département, nombre de plages, nombre US) ..	72
Annexe 3 : Aperçu des principaux types de sols de l'Allier, zones Est et Ouest	74

Annexe 1 : Liste des études pédologiques recensées dans l'Allier en 2011

Ce répertoire comporte les 14 études pédologiques recensées dans l'Allier fin 2011 (source : refersols.gissol.fr/georefersols/).

Auteur(s)	Organisme	Année	Titre	Echelle	Dépt	Surface (ha)	Thématique	Demandeur(s)	Profils	Sondages
-	SOGREAH	1961	Mise en valeur des Limagnes du département de l'Allier	1/100 000	03	4 225	Aménagement hydraulique	-	-	-
J. SERVANT et R. DURAND	INRA	1966	Etude pédologique du Canton de Chantelle	1/25 000	03	25 000	Aménagement hydraulique	-	-	-
JC. FAVROT, M. BORNAND, G. CALLOT, E. SERVAT	INRA	1966	Etude pédologique du Val d'Allier	1/100 000	03	550 000	Aménagement hydraulique	-	500	5000
JC. FAVROT, M. BORNAND, G. CALLOT, E. SERVAT	INRA	1969	Etude pédologique du Val d'Allier - Synthèse	1/100 000	03	550 000	Aménagement hydraulique	-	500	5000
JC. FAVROT, M. BORNAND, J. SERVANT, G. CALLOT, E. SERVAT	INRA	1969	Carte pédologique de France : Vichy - L15	1/100 000	03	222 845	Connaissance des sols	INRA	-	-
P. BONFILS et G. LABAU	INRA	1969	Etude pédologique du Canton de Cérilly	1/25 000	03	33 000	Aménagement hydraulique	-	-	-
JP. LEGROS et G. BOYER	INRA	1969	Etude pédologique du Canton de Dompierre-sur-Besbre	1/25 000	03	30 322	Aménagement hydraulique	-	-	-
P. BONFILS	INRA	1970	Etude pédologique de la Forêt de Tronçais	1/50 000	03	10 000	Aménagement forestier	-	-	-
JC. FAVROT, A. GUYON et P. BONFILS	INRA	1973	Etude pédologique de la Combraille et du Bocage Bourbonnais	1/100 000	03	220 000	Aménagement hydraulique	-	-	-
JC. FAVROT, M. BORNAND, J. SERVANT, G. CALLOT, E. SERVAT	INRA	1974	Carte pédologique de France : Moulins - L14	1/100 000	03	221 375	Connaissance des sols	INRA	-	-
DUPIN M., LESAGE B.	ASADIA	1983	Secteur de Référence Drainage – Pierrefitte-sur-Loire	1/10 000	03	574	Drainage	-	-	-
T. BEAUFILS	-	1989	Catalogue des stations forestières de Sologne Bourbonnaise	-	03 et 58	-	Typologie des stations forestières	-CRPF	-	-
T. BEAUFILS	-	1991	Catalogue des stations forestières du Bocage Bourbonnais et de la Forêt de Tronçais	-	03 et 18	-	Typologie des stations forestières	-CRPF	-	-
JL. MELOUX	-	1993	Bocage et Sologne Bourbonnaise. Etude morphopédologique	-	03	-	Connaissance géomorphologique et pédologique	-	-	-

Annexe 2 : Caractéristiques des UC (n°, surface, % département, nombre de plages, nombre US)

N° UC	Surface UC (ha)	Surface UC (% du département de l'Allier)	Nombre plages cartographiques	Nombre US
-6	2 603	0,35	7	
-4	542	0,07	23	
-3	527	0,07	13	
1101	6 742	0,91	45	2
1102	3 550	0,48	10	3
1103	4 639	0,63	15	4
1104	4 393	0,60	8	4
1201	17 988	2,44	13	4
1202	3 455	0,47	26	3
1203	12 613	1,71	42	9
1204	30 814	4,18	96	8
1301	4 214	0,57	5	4
1302	2 831	0,38	32	3
1303	3 299	0,45	65	4
1304	1 178	0,16	7	5
1401	2 612	0,35	1	2
1402	2 502	0,34	24	4
2101	10 010	1,36	36	6
2102	21 613	2,93	36	5
2103	5 699	0,77	69	5
2104	1 318	0,18	5	2
2105	3 502	0,47	7	4
2106	3 511	0,48	5	2
2107	2 391	0,32	28	1
2201	5 718	0,77	7	7
2202	4 544	0,62	5	5
3101	3 867	0,52	22	5
3102	10 686	1,45	50	5
3103	123	0,02	12	2
3104	2 035	0,28	18	3
3201	10 673	1,45	28	9
3202	1 190	0,16	7	4
3203	1 623	0,22	1	1
3204	172	0,02	2	4
3205	138	0,02	5	2
3301	16 216	2,20	15	6
3302	9 655	1,31	9	4
3303	3 722	0,50	6	4
3304	1 050	0,14	11	2
3305	248	0,03	7	3
3306	3 731	0,51	8	2

N° UC	Surface UC (ha)	Surface UC (% du département de l'Allier)	Nombre plages cartographiques	Nombre US
3401	2 141	0,29	20	4
3402	265	0,04	3	3
3403	57	0,01	1	1
3501	17 519	2,37	42	6
3502	5 871	0,80	18	5
3503	14 760	2,00	32	3
3504	153	0,02	3	3
3505	4 460	0,60	33	2
3601	18 772	2,54	19	4
3602	11 414	1,55	39	3
3603	1 164	0,16	8	5
3604	834	0,11	13	4
3701	21 028	2,85	148	3
3702	75 231	10,20	85	9
3703	33 665	4,56	66	7
3704	987	0,13	9	3
3705	6 584	0,89	35	6
4101	10 402	1,41	49	7
4102	12 710	1,72	78	5
4103	559	0,08	15	3
4104	105 313	14,27	100	8
4105	6 248	0,85	56	6
4106	5 689	0,77	4	8
4107	2 229	0,30	6	4
4108	7 643	1,04	21	4
4109	10 283	1,39	30	7
4110	187	0,03	2	3
4111	25 674	3,48	114	3
4112	7 845	1,06	109	4
4201	3 401	0,46	5	4
4202	7 597	1,03	26	5
4203	637	0,09	1	3
4204	2 975	0,40	11	4
4205	4 061	0,55	3	4
4301	18 748	2,54	30	6
4302	28 085	3,81	46	6
4303	5 958	0,81	33	6
4304	4 071	0,55	4	7
4305	4 766	0,65	2	4
4306	2 117	0,29	14	6
4307	2 060	0,28	19	4
4401	13 368	1,81	12	9
4402	1 599	0,22	7	6
4403	742	0,10	10	4
Total	737 809	100,00	2 212	363

Annexe 3 : Aperçu des principaux types de sols de l'Allier, zones Est et Ouest

Sont présentés ci-après les 40 types de sols et les paysages associés les plus représentatifs des parties Est et Ouest de l'Allier. Ils correspondent à plus de la moitié des surfaces cartographiées dans ces secteurs.

Tous les profils de sols décrits et analysés en 2011 ainsi que les principaux paysages ont fait l'objet de photographies numériques de qualité. Elles ont été archivées sur DVD et seront intégrées à la base DoneSol.

1 - Val de Loire et Sologne Bourbonnaise





Les berges de la Loire...



FLUVIOSOL juvénile SL-S
P13E – UC1101 – US343



et ses bras alluviaux inondés.



FLUVIOSOL typique LS
P14E – UC1101 – US346

Alluvions récentes de la Loire

Sables et argiles du Bourbonnais
Fluviolacustre Pliocène

Alluvions anciennes de la Loire



LUVISOL-REDOXISOL SA / A
(à PLANOSOL typique)
P32E – UC4102 - US323

BRUNISOL S fluviq
faiblement rédoxique
P34E – UC4102 – US324



LUVISOL dégradé
LS / LAS
P04E – UC4102 – US321



BRUNISOL S
cailloutique
(Cran)
UC4102 - US319



Chênaie à pin sylvestre hygrophile à molinie



Chênaie-charmaie neutrophile



Chênaie à pin laricio mésoxéroacidophile

Versant concave
P03E – UC4102 - US322Versant rectiligne
P04E – UC4102 – US321Sommet ± convexe
P06E – UC4101 – US323

Niveau rédoxique à 20/30 – 40/50 – 60/70 cm

2 - Collines Bourbonnaises et vallée de la Besbre





LUVISOL rédoxique SA / LAS
de sable Pliocène
P10E – UC4102 – US320



BRUNISOL eutrique LSA
de schistes
P21E – UC5304 – US314



BRUNISOL dystrique S
de grès Permien
P31E – UC5305 – US312

BRUNISOL eutrique SA
de grès Permien





**CALCOSOL argileux
issu de marnes
P19E – UC2501 – US318**



**PELOSOL (vertique) faiblement
rédoxique issu de marnes
P22E – UC2501 – US317**



Fentes de retrait associées...



sur des collines à pente convexe et ruptures de pente.

Les Forterres

Alluvions récentes



FLUVIOSOL typique LAS/ALS

UC1401 – US341

Alluvions anciennes



BRUNISOL dystrique S
fluvique rédoxique en profondeur
P20E – UC1403 – US329



Erosion des berges sans ripisylve.

3 - Montagne Bourbonnaise



Hêtraie à moder



ALOCRISOL typique
P07E – UC5401 – US304

ALOCRISOL typique ocreux
P08E – UC5401 – US301

*Hêtraie-sapinière
à myrtilles*

PODZOSOL ocrique
P35E – UC5401 – US302





RANKOSOL
ocreux
P37E – UC5401 – US305

Versants à pente forte et roche affleurante



RANKOSOL
humifère
P41E – UC5401 – US306

Tourbière bombée



COLLUVIOSOL rédoxique pierrique à hydromoder P36E – UC5401 – US336



REDUCTISOL typique à anmoor P09E – UC5401 – US354



HISTOSOL saprique
P11E – UC5402 – US361



L'art roman est omniprésent dans l'Allier...

...faisant ainsi apparaître les matériaux parentaux associés aux pédopaysages.



4 – Basse Combraille et vallée du Cher amont





RANKOSOL SA
P06W – UC5101 – US104

BRUNISOL eutrique LSA
P07W – UC5103 – US109



BRUNISOL eutrique SAL
rédoxique
P08W – UC5103 – US109



LUVISOL-REDOXISOL
LSA de limons
P05W – UC5103 – US116



COLLUVIOSOL pierrique
rédoxique en profondeur
P13W – UC5101 – US139

FLUVIOSOL-REDOXISOL SA-AS
P10W – UC5109 – US143



Vallée du Cher amont et ses versants à LITHOSOLS-RANKOSOLS (UC5101 – US 102)

5 – Bocage Bourbonnais et Val de Cher





BRUNISOL dystrique SL
P29W – UC5103 – US108

BRUNISOL eutrique SAL
 légèrement rubéfié
P17W – UC5108 – US110



BRUNISOL eutrique
 fersiallitique SAL-LAS
P18W – UC3101 – US134



BRUNISOL dystrique
 LS caillouteux
P21W – UC3101 – US134

Micaschistes alumineux et quartzites



PALEO-FERRALITISOL leptique / cuirasse
P45W – UC3101 – US132

COLLUVIOSOL rédoxique LSA issu de S et L éocènes
 sur **PALEOSOL** ferrallitique **P19W** – UC3101 – US142



PALEO-FERRALLITISOL
 brunifié
P20W – UC3101 – US133





**Chapelle Ste Agathe
(quartzites)**



Cuirasses paléoferrallitiques



CALCISOL-CALCOSOL SA-AS issu de calcaire éocène
P42W – UC3103 – US124



COLLUVIOSOL-FLUVIOSOL réductique SA
analogue P33W – UC3104 – US148

**Buttes résiduelles et vallons
de l'Eocène**



Val de Cher

LUVISOL dégradé L_{Sa}-L_{AS}

P37W – UC1303 – US125



PLANOSOL lithomorphe
(/PALEOSOL pliocène)

P39W – UC1303 – US127



FLUVIOSOL typique L_S

P35W – UC1301 – US135

*Alluvions
récentes*

Alluvions anciennes