

PRECONISATION D'UTILISATION DES SOLS ET QUALITE DES SOLS EN ZONE URBAINE ET PERI-URBAINE – APPLICATION DU BASSIN MINIER DE PROVENCE

SOIL QUALITY ASSESSMENT FOR SPATIAL PLANNING IN URBAN AND PERI-URBAN AREAS. THE PROVENCE COAL FIELD CASE STUDY.

Samuel ROBERT
ESPACE (UMR 7300)
Faculté des sciences de Luminy. Case 901.
163, avenue de Luminy 13288 MARSEILLE Cedex 9
samuel.robert@univ-amu.fr

Rapport final

28 novembre 2012

REMERCIEMENTS

UQUALISOL-ZU est un projet financé par le programme **GESSOL** du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Il a bénéficié d'un support financier et logistique de l'Observatoire Hommes-Milieux « Bassin minier de Provence » du CNRS. Les auteurs tiennent à remercier ces deux institutions pour leur soutien.

Le projet est le fruit d'une collaboration scientifique entre plusieurs unités de recherche du **CNRS**, d'**Aix-Marseille Université** et de l'**Université de Turin** (Italie), dont le support logistique et financier a également été déterminant.

Conçu et appliqué dans le cadre du bassin minier de Provence, le projet a bénéficié de la bienveillance et de la collaboration des acteurs locaux, en premier lieu les élus, techniciens et habitants des **communes de Gardanne et Rousset**, dans les Bouches-du-Rhône. Les travaux ont également profité de la plate-forme de mutualisation des données à référence spatiale du Centre régional de l'information géographie (**CRIGE**) de la Région Provence Alpes-Côte d'Azur. Nous tenons à remercier chaleureusement ces partenaires.

Par ordre alphabétique, les acteurs du projet ont été :

- Franco Ajmone-Marsan, *Professeur, Université de Turin, DiVaPrA*
- Jean-Paul Ambrosi, *Chargé de recherche, CNRS, CEREGE*
- Mattia Biasioli, *Chargé de recherche, Université de Turin, DiVaPrA*
- Chloé Cormier, *Ingénieure d'étude, Aix-Marseille Université, LIEU*
- Stéven Criquet, *Maître de conférences, Aix-Marseille Université, IMBE*
- Catherine Keller, *Professeure, Aix-Marseille Université, CEREGE*
- Marie-Laure Lambert-Habib, *Maître de conférences, Aix-Marseille Université, LIEU*
- Eva Rabot, *Ingénieure d'étude, CNRS, CEREGE*
- Samuel Robert, *Chargé de recherche, CNRS, ESPACE*

... ainsi que de nombreux étudiants (Eva Charpentier, Caroline Defaux, Coralie Demazeux, Albane Falconnier, Saïd Kadafi, Chrislov Kimbangui, Martin Métayer, Sabine Périer, Marion Quarantel-Colombani, Thomas Schellenberger) et Thomas Menard, Ingénieur d'étude sur le projet Astuce et Tic.

RESUME

Dans la plus grande partie du monde, le rôle tenu par les sols dans le développement économique et social des territoires est tout à fait majeur. Support des activités humaines, les sols sont d'abord un substrat, une surface sur laquelle se déploient et s'organisent les sociétés (sol-espace). Ils sont aussi et surtout une ressource pourvue de qualités et de propriétés qui permettent à certaines activités, en premier lieu l'agriculture, de prospérer (sol-épaisseur). Simultanément, les sols remplissent des fonctions qui ne servent pas directement la société, mais qui n'en sont pas moins essentielles, comme par exemple la conservation d'une partie de la biodiversité ou encore l'épuration ou la filtration de certaines substances contenues dans l'environnement. Les différentes dimensions des sols font qu'ils sont une composante fragile et indispensable des anthropo-systèmes, notamment dans les zones urbaine et périurbaine où la pression exercée sur les sols est intense. Du fait de l'étalement urbain, des contaminations diverses liées aux activités urbaines, et des friches créées par l'évolution des villes, la gestion et la conservation des sols apparaissent comme un enjeu de premier ordre. Ces objectifs posent tout particulièrement la question de la planification des usages des sols, c'est-à-dire les choix et les réglementations en matière d'occupation et d'usage possible dans les documents d'urbanisme, et celle de la prise en compte de la qualité des sols dans l'élaboration de ces choix et règlements.

Dans le cadre de l'Appel à Propositions de Recherche 2008 du programme GESSOL 3, le projet UQUALISOL-ZU s'est donné pour ambition de mettre en perspective le droit de l'urbanisme avec la connaissance scientifique de la qualité des sols. L'objectif était triple : évaluer comment le droit permet d'intégrer une connaissance de la qualité des sols dans le processus de planification de l'usage des sols (1), évaluer quelle connaissance de la qualité des sols peut être produite pour être utilisée par le planificateur (2), et produire une application dans le contexte périurbain du bassin minier de Provence, aux portes d'Aix-en-Provence et de Marseille (3).

Les travaux ont été conduits de façon interdisciplinaire par une équipe de chercheurs issus des sciences du sol, de la géographie, des sciences juridiques et de l'écologie. Ils ont permis d'établir un état de l'art critique de la prise en compte de la qualité des sols dans les démarches d'élaboration des règlements d'urbanisme en France et un état de l'art des indices de qualité des sols dans la littérature scientifique. A partir de l'étude approfondie de deux communes péri-urbaines de la région de Marseille / Aix-en-Provence, (cartographie de l'évolution de l'occupation des sols sur plusieurs décennies et à plusieurs échelles ; études de documents d'urbanisme réglementaire ; entretiens avec les acteurs locaux), une expérimentation consistant à proposer un indice de polyvalence d'usage des sols a été menée et discutée. Cet indice, dont les résultats sont spatialisés et peuvent être intégrés dans un SIG, constitue un résultat inédit dont la mise à l'épreuve future sur d'autres terrains est souhaitée.

Mots-clés : qualité du sol, occupation des sols, planification, urbanisme, indice, réglementation, SIG

ABSTRACT

Soils are considered as a major constituent of anthroposystems as well as a non-renewable resource. They are of utmost importance for the economical and social development of territories, particularly in urban and peri-urban areas where they undergo urge pressure. But soils are also a resource with properties and qualities on which many human activities rely on, first of all food and energy production. Moreover, soils fulfill various ecological functions which may not be considered useful to human beings, but which are undoubtedly essential, such as support filtering of water or biodiversity tank. Because of urban sprawl, soil contaminations due to human activities, as well as urban waste land, soil management and soil conservation have emerged as a critical issue. A thorough management and conservation of the soil resource appears thus necessary for sustainable land management. To achieve this goal, there is a need for tools and dedicated approaches that would raise awareness on the importance of soil quality in urban planning.

Within the framework of the GESSOL program the Uqualisol-ZU project aims at investigating whether and how a scientific knowledge on soil quality can be integrated into urban planning so as to allow soil quality to be taken into account in all its dimensions, which has not been the case so far in France. Its objectives are 1) the assessment of a legal concept of soil that would lead to integrate soils in preliminary studies and preserve economic and ecosystemic functions of soils, by choosing the best adapted uses in land use planning; 2) the production of a scientifically-sound SQI (soil quality index) including all soils and adapted to the needs of land planners; 3) to perform a knowledge transfer to urban planners so that soil quality is understood and taken into account.

The work was conceived as a pluridisciplinary approach and performed by researchers from various fields: soil sciences, geography, ecology and law sciences. As background information, a state of the art on regulations involving soils at the local, national and supra-national levels was undergone simultaneously with a state of the art on soil quality indices. Then, an experiment was conducted on two municipalities within the peri-urban outskirts of Marseille and Aix-en-Provence (southern France): Gardanne and Rousset. A preliminary data compilation and analysis was necessary to get the historical background (several decades) of both municipalities as well as to identify the challenges for land planning on both territories. Various possibilities of introducing the concept of soil functions into local land use planning were identified and proposed. Preliminary interviews of local stakeholders and analysis of the land planning documents (POS and PLU) orientated the research towards the development of a soil suitability index related to land use. The results were spatialised and integrated into a GIS to obtain maps of soil "land use polyvalence". The outcomes of the research were presented for discussion to the local authorities. This index, the first of its kind, was found to fulfill the requirement of integrating soil quality knowledge into an operational form for potential use within the framework of the PLU (*plan local d'urbanisme*), but will need to be tested in other situations in the near future.

Key words: soil quality, land use, land planning, index, urban planning, regulation, GIS

SOMMAIRE DÉTAILLÉ

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract.....	4
Sommaire détaillé	5
Introduction.....	7
I. Problématique et objectifs.....	8
A- Etalement urbain et consommation des terres.....	9
1- Urbanisation.....	9
2- Etalement urbain et patrimoine sol.....	10
B- Nécessité de renouveler la prise en compte juridique de la qualité des sols.....	12
1- Contexte européen	12
2- Contexte national.....	12
C- Occupation des sols et qualité des sols	14
1- Occupation des sols	14
2- Qualité des sols et construction d'indices	14
D- Objectifs du projet.....	17
II. Méthodologie	18
A- Méthodologie globale du projet	19
1- Volonté d'approche commune de l'objet « sol ».....	19
2- Liaisons avec les acteurs locaux.....	19
3- Développement de la recherche et articulation des différentes interventions.....	20
B- Contexte de la recherche et zone d'étude.....	21
1- Observatoire Hommes-Milieus « bassin minier de Provence »	21
2- Zone et sites d'étude	21
C- Précisions sur les actions de recherche	30
1- Recensement et évaluation de la pertinence des dispositions juridiques concernant la qualité des sols	30
2- Caractérisation de l'occupation des sols des deux territoires	31
3- Evaluation de la qualité des sols et définition d'un indice d'adéquation usages / qualité des sols	35
4- Restitution, transfert, échanges sur les résultats avec acteurs publics	45
III. Résultats	46
A- Quelle possibilité d'intégrer des éléments de qualité des sols dans la réglementation locale d'urbanisme ?.....	47
1- Analyse de l'intégration de la protection du sol dans le droit positif supérieur (international, communautaire, et national).....	47
2- Intérêt de l'intégration « bottom-up » de la prise en compte du sol dans le droit local, à travers les documents d'urbanisme.....	48
3- Pertinence de la démarche à Gardanne et à Rousset : évolution de l'occupation des sols, gestion des sols et discours d'acteurs.....	51
1- L'occupation des sols et son évolution.....	51
2- Gestion des sols et discours d'acteurs.....	58
4- Qualité des sols à Gardanne et Rousset.....	63
1- Apports des sondages effectués sur les deux communes.....	63
2. Les « fonctions satisfaites » dans l'espace géographique	66
3. Géographie de la polyvalence d'usage	70
5- Notion de polyvalence d'usage des sols et planification urbaine	73
1- Principe d'utilisation de l'information de polyvalence d'usage des sols	73
2- Polyvalence d'usage des sols et planification en vigueur à Gardanne et Rousset.....	75

IV. Discussion	81
A- À propos de la pertinence de questionner l'usage et la qualité des sols dans le processus de planification urbaine.....	82
B- Quelle échelle opérationnelle pour une prise en compte de la qualité des sols dans les politiques d'urbanisme ?.....	84
1- Du national au local	84
2- Du local au national	84
C- Retour sur l'évaluation de la qualité des sols et sa réception par les acteurs locaux	86
1- Données et paramètres : entre choix et approximations.....	86
2- Echelles de travail et prise en compte des configurations spatiales	88
3- Réception des apports du projet par les acteurs locaux	91
Conclusion	92
Références bibliographiques	93
Liste des figures	98
Liste des tableaux.....	99
Liste des annexes.....	100

INTRODUCTION

Dans la plus grande partie du monde, le rôle tenu par les sols dans le développement économique et social des territoires est tout à fait majeur. Support des activités humaines, les sols sont d'abord un substrat, une surface sur laquelle se déploient et s'organisent les sociétés (sol-espace). Ils sont aussi et surtout une ressource pourvue de qualités et de propriétés qui permettent à certaines activités, en premier lieu l'agriculture, de prospérer (sol-épaisseur). Simultanément, les sols remplissent des fonctions qui peuvent apparaître non directement utiles la société, mais qui n'en sont pas moins essentielles, comme par exemple la conservation d'une partie de la biodiversité ou encore l'épuration ou la filtration de certaines substances contenues dans l'environnement.

Les différentes dimensions des sols font qu'ils sont une composante fragile et indispensable des anthropo-systèmes, notamment dans les zones urbaine et périurbaine où la pression exercée sur les sols est intense. Du fait de l'étalement urbain, des contaminations diverses liées aux activités urbaines, et des friches créées par l'évolution des villes, la gestion et la conservation des sols apparaissent comme un enjeu de premier ordre. Ces objectifs posent tout particulièrement la question de la planification des usages des sols, c'est-à-dire les choix et les réglementations en matière d'occupation et d'usage possible dans les documents d'urbanisme, et celle de la prise en compte de la qualité des sols dans l'élaboration de ces choix et règlements.

Dans le cadre de l'Appel à Propositions de Recherche 2008 du programme GESSOL 3, le projet UQUALISOL-ZU s'est donné pour ambition de mettre en perspective le droit de l'urbanisme avec la connaissance scientifique de la qualité des sols. L'objectif était triple : évaluer comment le droit permet d'intégrer une connaissance de la qualité des sols dans le processus de planification de l'usage des sols (1), évaluer quelle connaissance de la qualité des sols peut être produite pour être utilisée par le planificateur (2), et produire une application dans le contexte périurbain du bassin minier de Provence, aux portes d'Aix-en-Provence et de Marseille (3). La restitution des travaux conduits dans le cadre de ce projet comprend trois « volumes : le présent document ou « rapport » ; les annexes au rapport ; le dossier des sorties « opérationnelles » et des sorties scientifiques.

Le présent rapport s'organise en quatre parties :

- problématique et objectifs du projet
- méthodologie
- résultats
- discussion

I. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

L'impact des activités humaines sur les sols constitue depuis quelques années un sujet de préoccupation grandissant. Consommés par l'étalement urbain, contaminés par les activités industrielles, surexploités et transformés par l'agriculture, les sols sont désormais considérés comme une ressource patrimoniale dont il faut penser la gestion et parfois la restauration. Dans ce contexte, plusieurs questions se posent concernant les pratiques d'urbanisme et la planification spatiale. En premier lieu, il convient de s'interroger sur le niveau de connaissance de la qualité des sols lors de l'élaboration des documents d'urbanisme définissant les orientations d'aménagement sur un territoire et réglementant l'usage des sols. En effet, si la conservation des sols devient un objectif collectif affiché, il doit influencer la conception des règlements d'urbanisme. Ensuite, il importe de réfléchir aux connaissances établies par les sciences des sols ; sont-elles produites aux bonnes échelles, sur les espaces les plus sensibles ? Sont-elles suffisantes ? Quels sont les caractéristiques ou groupes de caractéristiques des sols nécessaires à l'établissement des plans d'urbanisme et permettant de répondre aux nouvelles questions posées par la société ?

Dans de nombreux pays, l'échelle de gestion et de planification de l'usage des sols est celle des communes. A travers les documents d'urbanisme (Plan d'Occupation des Sols et Plan Local d'Urbanisme, pour la France ; Piano Urbanistico Comunale en Italie, par exemple), ce sont en effet les autorités municipales (dans le cadre de démarches plus ou moins participatives, selon les lieux) qui déterminent les usages possibles des sols. L'élaboration de ces documents se fait dans le respect des lois relatives à l'urbanisme et à la prévention des risques, et en conformité avec les orientations prises dans d'autres documents réglementaires établis à un échelon territorial de niveau supérieur (SCOT, Schéma directeurs, SDAGE, Plan de Prévention des Risques, Piano Regolatore, etc.). Ce mode opératoire est-il efficace pour prendre en considération la qualité des sols dans la réflexion devant présider à la planification de l'usage des sols ? En d'autres termes, la planification de l'usage des sols tient-elle compte d'une quelconque connaissance de la qualité des sols ? Y a-t-il obligation réglementaire ou n'est-ce réservé qu'à des situations particulières ? Quels peuvent être les apports des sciences du sol pour une prise en compte facilitée de la qualité des sols dans les documents d'urbanisme ?

L'exposé du cadre problématique du projet nous conduit à aborder :

- la question de l'étalement urbain et de la consommation des terres
- la prise en compte actuelle de la qualité des sols dans le droit
- les notions d'occupation des sols et de qualité des sols
- les objectifs assignés au projet.

A-Etalement urbain et consommation des terres

L'urbanisation est un phénomène complexe, qui désigne à la fois le processus de production des espaces urbains, l'état actuel de l'emprise spatiale des villes et le passage d'une population d'un statut rural à des conditions urbaines. Dans le cadre de la recherche conduite dans UQUALISOL-ZU, ce sont les deux premières acceptions qui sont considérées. Elles permettent d'aborder la question de la consommation des sols par l'expansion des villes.

1- Urbanisation

Les territoires anthropisés, formule conventionnelle désignant les espaces concernés par les aménagements de types urbains (villes et infrastructures de transport, principalement), représentaient en France environ 27 000 km² en 2004 selon Naizot (2005), soit 8,3% du territoire métropolitain. Entre 1994 et 2004, les sols artificialisés bâtis ont augmenté de 16%, les routes et parkings de 10%, les sols artificialisés non bâtis (jardins, pelouses, chantiers, terrains vagues, décharges, carrière) de 19%, tandis que la population n'a augmenté que de 5%. On estime que les espaces résidentiels, de services et récréatifs consomment près de 50 000 ha/an contre environ 30 000 pour les espaces industriels et commerciaux, alors que les infrastructures, les réseaux de transport, mines, carrières et décharges n'atteignent pas 20 000 ha/an. Cette urbanisation s'effectue au détriment des terres agricoles - la plupart ayant un fort potentiel agronomique (Slak *et al.*, 2001) - situées principalement en périphérie des grandes métropoles françaises et des capitales régionales en expansion, ainsi que dans les zones littorales (inventaire CORINE Land Cover). Le même constat est fait ailleurs, comme en Italie (Biasioli *et al.*, 2006) ou en Asie (Zhang *et al.*, 2007). En Europe, c'est l'urbanisation résidentielle qui est principalement responsable de l'artificialisation effrénée des sols, mais l'appréciation de cette urbanisation demeure relativement grossière. Les changements d'affectation des sols sont en effet mesurés à partir de données de type TERUTI (Lee et Slak, 2007) ou CORINE Land Cover (Laroche *et al.*, 2006), dont la précision ne permet pas une approche fine du phénomène et qui se révèle finalement assez peu compatible avec l'échelle communale utilisée en planification urbaine. En dépit de ce manque d'information précise, la Stratégie nationale de développement durable révisée fin 2006 a inscrit parmi ses objectifs de "veiller à freiner le rythme d'artificialisation du territoire, qui est actuellement plus rapide que la dynamique démographique, notamment en localisant les infrastructures sur les espaces déjà artificialisés" (Déléguée interministérielle au Développement Durable, 2010). Des changements, bien que limités, peuvent d'ailleurs se faire dans le sens inverse, notamment des espaces artificialisés vers les espaces naturels ainsi que le montre la **figure 1**.

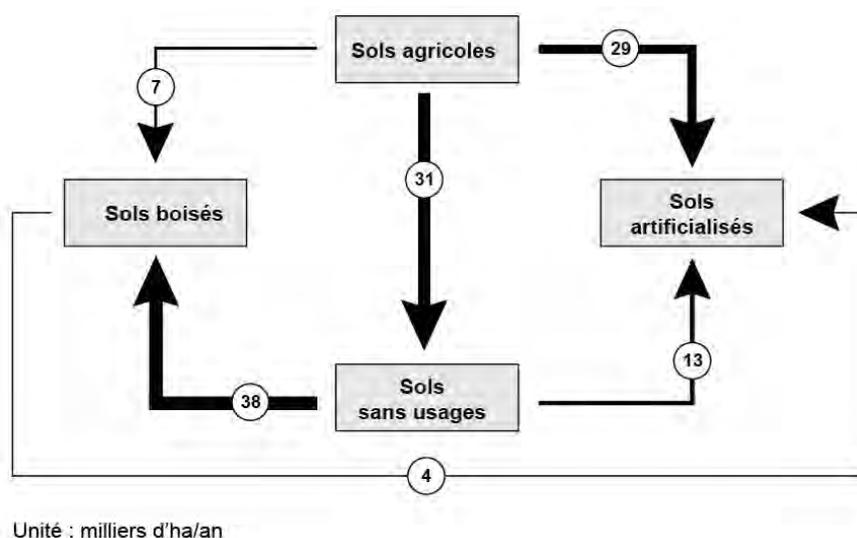


Figure 1 : Echanges nets de surfaces entre les 4 types d'espace entre 1992 et 2002
 Source : Agreste –TERUTI 1992-2002 in Lee et Slak (2007)

Bien souvent, les sols soumis à l'anthropisation sont des sols initialement dévolus à l'agriculture. En région Provence Alpes Côte d'Azur, par exemple, la pression foncière est élevée du fait de la forte dynamique des villes (Avignon, Aix-en-Provence, Marseille, Toulon, Nice) et de l'attractivité du littoral méditerranéen. La consommation de sol y est particulièrement importante. Dans les Bouches-du-Rhône, il a ainsi été calculé sur la base des chiffres de la période 1988-1999 qu'il faudrait 66 ans de progression des surfaces urbanisées pour annuler les surfaces agricoles (DRE PACA, 2008). Toutefois, en Provence Alpes Côte d'Azur comme ailleurs, il existe au cœur même des agglomérations ainsi qu'à leur périphérie des espaces urbanisés dont il faut envisager la reconversion, permettant par là même de contenir l'étalement urbain. C'est ce qu'on a parfois appelé le redéploiement urbain (Häberli *et al.*, 1991) et qui a concerné en premier lieu les grands bassins industriels tels que la Ruhr en Allemagne (Genske, 2003). En France, c'est le concept de la « reconstruction de la ville sur elle-même », consacré dans le cadre de la loi Solidarité et renouvellement urbain de 2000.

2- Etalement urbain et patrimoine sol

L'extension des territoires artificialisés, c'est-à-dire principalement l'urbanisation, conduit le plus souvent à une érosion du patrimoine sol. Le décapage, l'imperméabilisation, la compaction ou la contamination des sols sont courants dans le développement urbain. Le phénomène d'imperméabilisation, par exemple, affecte les ressources pédologiques et hydrologiques. Les surfaces imperméabilisées condamnent des superficies de sols mais elles réduisent aussi de manière qualitative la diversité des sols et leurs effets sont souvent irréversibles. De manière générale, les caractéristiques physico-chimiques du sol (structure, texture, profondeur, compacité, humidité, pH, teneurs en ions...) sont modifiées et le fonctionnement du sol est irrémédiablement perturbé. Le sol n'a plus son potentiel, si ce n'est celui de support à la construction. Les conséquences dépassent largement la pédosphère et s'expriment sur les court, long et moyen termes (Scalenghe et Ajmone Marsan, 2009). Par conséquent, l'artificialisation conduit généralement à une dégradation des sols impliquant une diminution des fonctions qui leur sont potentiellement attribuées.

Les actions de recherche scientifique concernant la qualité des sols dans un contexte d'artificialisation de l'espace sont encore relativement peu nombreuses. Parmi elles, beaucoup visent d'une part à évaluer l'extension des sols impactés par le développement urbain et d'autre part à évaluer leur qualité en regard de l'infiltration de l'eau. Ces travaux ont le plus souvent un objectif très précis tel que la consommation des terres agricoles ou la modélisation de l'hydrologie urbaine. Les méthodes de travail utilisées et les modes de calcul sont différents mais la plupart utilise la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) comme outils de traitement et d'analyse. Les données traitées sont des images satellites ou des photos aériennes ainsi que des bases de données géographiques thématiques (relief, bâti urbain, voirie, réseaux, cadastre, etc.). Leur but est d'utiliser ou de développer des méthodologies permettant de construire un modèle d'occupation des sols et de caractériser finement les modalités de l'urbanisation (emprises spatiales, règles de transitions entre types d'occupation des sols, etc.). La plupart des études existantes offrent ainsi un état des lieux renouvelé du territoire (Jacquin *et al.*, 2005 ; Latry, 2005), s'appuyant sur une classification d'occupation des sols plus détaillée et plus précise, éventuellement approfondie pour l'urbain. Outre ces études, l'évaluation des impacts de l'étalement urbain est un thème de recherche qui tend à s'affirmer ces dernières années. Ces travaux sont encore peu nombreux et les thématiques restent assez ciblées. On notera le travail pionnier de Schulte *et al.* (1989) sur la biologie des sols urbains, mais plus généralement les recherches portent par exemple sur l'impact du changement de l'occupation du sol péri-urbain sur la qualité pédo-agronomique des sols (Leyval *et al.*, 1999 ; Laroche *et al.*, 2006) ou sur l'impact de l'urbanisation sur le cycle de l'eau et le régime hydrique (Raimbault et Alfakih, 2002). Dans ce dernier cas, les travaux font souvent un simple état de l'occupation du sol en zone urbanisée et proposent des techniques alternatives d'assainissement en milieu urbain (IGEAT (ULB), 2006 ; Raimbault et Alfakih, 2002) pour la rétention et la filtration des eaux de pluies. Plus rarement, elles s'intéressent à la nature du sol et du sous-sol et à leur rôle dans l'infiltration des eaux de pluie (Goutaland *et al.*, 2007). Récemment une synthèse sur les sols urbains à destination du grand public a été publiée qui souligne l'urgence d'une meilleure connaissance et gestion de ces sols (Cheverry et Gascuel, coord., 2009).

Dans ce contexte, il apparaît qu'une étude fine de l'effet de l'urbanisation sur le patrimoine sol ne doit pas exclure certaines occupations de sols et/ou types de sols. L'idée n'est pas de traiter les sols (et donc de choisir leurs paramètres descriptifs) différemment selon leur nature, mais d'inclure dans la réflexion toutes les surfaces possédant des parties non imperméabilisées. Afin de rendre compte au mieux des caractéristiques de ces milieux très divers, il semble nécessaire de s'appuyer sur une large palette de descripteurs.

B-Nécessité de renouveler la prise en compte juridique de la qualité des sols

Du point de vue du droit, et notamment du droit de l'urbanisme, la question de l'étalement urbain et de la qualité des sols conduit à s'interroger sur l'écart existant entre d'une part, les diverses fonctions physiques et écologiques du sol, et d'autre part, les notions restreintes prises en compte aujourd'hui par le droit français, à savoir : l'usage et l'occupation du sol. Il apparaît en effet que les diverses **fonctions physiques et écologiques du sol** sont aujourd'hui identifiées par les pédologues et les écologues, mais qu'elles ne sont pas encore intégrées dans des objectifs juridiques qui viseraient à protéger le sol en tant que milieu naturel.

1- Contexte européen

Au niveau européen, les textes les plus récents font aujourd'hui référence aux fonctions physiques et écologiques du sol. Par exemple, la directive responsabilité environnementale de 2004 fut la première à introduire la nécessité de préserver les fonctions des écosystèmes, des habitats et des ressources naturels¹. Surtout, les textes européens portant explicitement sur les sols - Stratégie thématique pour la protection des sols proposée par la Commission européenne le 19 avril 2002 et texte en discussion de la **proposition de Directive** définissant un **cadre pour la protection des sols**, (*COM(2006) 232 final*, Olazabal, 2007) - intègrent aujourd'hui explicitement les fonctions des sols, et les objectifs de préservation de la capacité des sols à remplir ces fonctions (voir notamment les articles 1, 4, 5, 8, 9 de la proposition de directive sur les sols). Cependant, la directive n'en est toujours qu'à l'état de proposition et l'on peut s'interroger sur le texte final qui sera éventuellement adopté : intégrera-t-il réellement, *in fine*, un objectif de protection de la multi-fonctionnalité des sols (Sol, 2007 ; Billet, 2007) ?

2- Contexte national

Dans le droit français, les rares dispositions qui permettent de repérer un souci de préservation de certaines ou de toutes les fonctions des sols sont éparpillées, ce qui leur ôte aujourd'hui toute réelle lisibilité. On peut donc s'interroger sur ces lacunes et avancer qu'il sera nécessaire d'introduire, dans l'avenir, des dispositions complémentaires (Lecomte, 2008). Quelques pistes sont ouvertes mais méritent d'être approfondies. Pour l'heure, seules les notions restreintes d'usage du sol et d'occupation du sol sont prises en compte par le droit de l'urbanisme et de l'environnement. Pourtant, des pistes d'intégration des questions liées à la qualité des sols peuvent émerger dans trois directions.

En premier lieu, dans le domaine de la **réhabilitation des sites industriels** pollués, le corpus juridique, fortement marqué par la notion de réhabilitation du sol selon l'usage futur du site (Razafindratandra, 2007), permettrait d'**introduire la notion de qualité du sol** dans le droit de l'urbanisme et de l'environnement (même si la question de la reconstruction sur sites pollués est encore réglée de façon imparfaite). En effet, jusqu'ici appréhendé uniquement du point de vue de sa stabilité et de son aptitude à recevoir les fondations d'un bâtiment, le sol devient, par les procédures de réhabilitation, l'objet d'investigations sur sa qualité chimique (arts L 512-6-1, R 512-39-3-1° et R 512-39-4 du Code de l'environnement). Par exemple, des études visent à identifier la présence et la quantité de polluants ou de contaminants dans les sols d'anciens sites industriels : études simplifiées des risques (ESR), interprétation de l'état des milieux (IEM)². De même, depuis plusieurs années, les études cherchent à révéler si la présence de polluants présente un risque ou un danger pour la santé humaine ou l'environnement, en relation avec un usage donné du sol. Mais la seule identification des polluants présents peut-elle rejoindre ou préfigurer une étude de la qualité du sol en tant que milieu

¹ Directive 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux (Doussan, 2005).

² http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=20870

biotique à part entière ou en tant que réservoir de biodiversité ? Est-il question d'analyser la qualité du sol en relation avec ses fonctions multiples, notamment écologiques, ou seulement en relation avec deux fonctions isolées du sol : support d'activités économiques (construction de bâtiments à usage industriel, tertiaire ou d'habitation, ou de lieux de loisir....); vecteur des polluants, c'est-à-dire permettant un transfert des polluants vers des milieux qui sont, eux, juridiquement protégés : l'eau et l'air ambiant ? Nombre d'imprécisions demeurent donc, auxquelles s'ajoute une question essentielle par rapport à l'objectif de connaissance de la qualité des sols en vue d'une planification urbaine : dans quelle mesure la qualité des sols peut-elle être mesurée sur la totalité d'un territoire administratif et comment ?

En second lieu, la qualité des sols peut également être abordée à travers la **fonction d'imprégnation des sols**, car le droit de l'urbanisme se préoccupe de plus en plus des questions de ruissellement urbain et de risques d'inondation. En effet, le droit de la construction et de l'aménagement urbain s'est attaché à autoriser, voire multiplier, les dispositifs de récupération des eaux pluviales, dans un objectif affiché d'économie de la ressource en eau, mais également, sans toujours l'avouer, dans un objectif d'atténuation des inondations urbaines (Lambert-Habib, 2006). Or, dans le domaine de la régulation des eaux de surface pour la gestion du ruissellement urbain, le droit de l'urbanisme semble faire l'impasse sur le rôle potentiel des sols laissés à l'état naturel ou semi-naturel, et consécutivement sur la limitation indispensable de leur imperméabilisation. Cependant, le droit récent n'est pas entièrement muet. En effet, les dispositions sur l'assainissement des eaux usées imposent au maire d'effectuer un zonage distinguant sur sa commune les zones d'assainissement collectif, les zones relevant de l'assainissement non collectif, mais également « les zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols et pour assurer la maîtrise du débit et de l'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement » (Art. L2224-10 du Code général des collectivités territoriales). De même, dans le cadre de la police de l'eau, le régime de déclaration ou d'autorisation au titre de la loi sur l'eau des installations, ouvrages, travaux et activités qui entraînent l'imperméabilisation de superficies importantes (arts L214-1 et s. du Code de l'environnement) permet-il d'apprécier, voire d'éviter les impacts de l'imperméabilisation de surfaces de sols importantes, comme les parcs de stationnement des grandes surfaces commerciales. De même, le projet de directive européenne sur les sols incite-t-il les Etats à **lutter contre l'imperméabilisation** (considérants 4, 13, articles 2 et 5), voire le tassement des sols (considérants 5, 14, 15, articles 6 et 8). On peut donc se demander si le droit de l'urbanisme ne pourrait pas à l'avenir prendre plus directement et systématiquement en compte la « fonction d'imprégnation » des sols, dans une optique de rétention des eaux pluviales et d'entraînement ou de percolation de ces eaux vers des couches plus profondes du sol ou vers les aquifères.

En troisième lieu enfin, une autre fonction du sol pourrait être réintroduite dans le droit de l'urbanisme : la **fonction de production alimentaire ou vivrière**. Si cette piste de recherche peut surprendre, on doit toutefois estimer qu'elle n'est pas dictée par une vision utopiste mais bien par l'observation de la réalité urbaine. En effet, la fonction de production alimentaire, qui semblait avoir disparu du tissu urbain, ou être reléguée à ses marges (jardins ouvriers, espaces péri-urbains - Debeaurain, 2005), réapparaît aujourd'hui au sein même de la ville. Les pratiques observées (jardins partagés, réappropriation de terrains vagues dans une optique récréative ou de maraîchage de proximité) sont-elles liées à un phénomène de mode ou à un mouvement plus tendanciel ? A plus long terme, ces pratiques ne s'inscrivent-elles pas très logiquement dans les volontés récentes, traduites dans le droit, de rendre la ville plus humaine, plus mixte, plus conviviale, plus partagée (loi Solidarité et Renouvellement Urbains - Le Louarn, 2001), et de limiter l'empreinte écologique urbaine (consommations de proximité) ?

C-Occupation des sols et qualité des sols

Caractériser les sols en vue de faciliter la prise de décision politique en matière de planification urbaine suppose de décrire leurs qualités mais également de connaître leur extension spatiale. Cette double exigence s'explique par le fait que les propriétés physiques et écologiques doivent être connues partout sur le territoire dont on projette le futur via la planification. Elle soulève à ce titre plusieurs difficultés : comment déterminer la qualité des sols ?, comment la spatialiser ?

1- Occupation des sols

Si la nature des sols n'est pas toujours connue, l'occupation des sols peut être décrite relativement aisément. Faute de données sur la qualité même des sols, l'occupation des sols renseigne sur de possibles propriétés des sols (un sol avec une occupation agricole ne sera pas considéré comme le sol situé à l'intérieur d'une zone urbanisée) et permet d'avoir une information continue sur la totalité d'une zone d'étude. La cartographie de l'occupation des sols peut faire l'objet de diverses approches méthodologiques et être réalisée à différentes échelles. Une nomenclature standard comme Corine Land Cover (CLC) permet d'appréhender un territoire aux échelles comprise entre le 1 : 50 000 et le 1 :100 000. Des déclinaisons régionales ou locales offrent une cartographie plus fine comme Ocsol PACA en région Provence Alpes Côte d'Azur. Mais, l'enjeu du moment est de gagner en précision (spatiale et thématique) afin de caractériser au mieux les espaces constitutifs des zones urbaines et péri-urbaines, et ainsi délimiter des surfaces dont on peut plus aisément déterminer les propriétés pédologiques. Les images sources (aériennes ou satellitaires), désormais très précises, autorisent ces évolutions, que celles-ci résultent d'un travail de photo-interprétation ou d'un traitement automatique ou semi-automatique d'images.

Ces dernières années, les méthodes automatiques et semi-automatiques de traitement d'images ont offert des perspectives intéressantes, avec deux approches. En premier lieu, les méthodes courantes de classification par pixel à partir d'images satellites multispectrales permettent de travailler à grande échelle. La plupart des études utilisent ce mode de classification en s'appuyant sur l'utilisation d'indices spectraux ou de traitement statistiques avancés pour parfaire leur classification (He *et al.*, 2010). Certaines données permettent, à partir de classifications par pixel, de développer et d'identifier finement les composantes du milieu urbain en termes de types de matériaux ou d'espèces végétales (Heiden *et al.*, 2007 ; Wania *et al.*, 2007). En second lieu, la classification orientée objet est également utilisée en particulier dans l'urbain. Les études utilisant cette approche ont permis de produire une donnée d'occupation du sol beaucoup plus satisfaisante et plus précise (Jacquin *et al.*, 2005 ; Weber *et al.*, 2002 ; Ohlhof *et al.*, 2006), même si elle doit être couplée à de la photo-interprétation pour valider certains résultats.

Dans les limites d'une commune, territoire de référence en matière de planification urbaine, il est donc possible d'obtenir une occupation du sol détaillée ainsi qu'une évolution de cette occupation à partir de l'interprétation d'orthophotographies aériennes ou d'images satellitaires à haute résolution obtenues à différentes dates. Ces approches permettent de mesurer la dynamique de l'étalement urbain et de caractériser finement l'occupation des sols. Elles constituent donc un préalable nécessaire mais non suffisant pour une évaluation de la qualité des sols. Couplées à des mesures de qualité, elles peuvent permettre de quantifier les types de sols impactés par le développement urbain (« urban sprawl ») et les effets sur la pédodiversité, ainsi que proposé par Zhang *et al.* (2007). Cependant, à notre connaissance, ces couplages n'ont que très rarement été tentés jusqu'à présent.

2- Qualité des sols et construction d'indices

La qualité des sols est souvent évaluée et traitée distinctement de l'occupation des sols. Elle est opérée à travers la construction d'indices de qualité, dont un très grand nombre a été proposé. Karlen *et al.* (2003) présentent une revue de littérature complète dans le domaine et soulignent que le concept s'est développé afin de répondre à deux attentes distinctes : la mise à disposition de

connaissances pour tout à chacun (but « éducatif ») et l'évaluation de la qualité des sols pour la gestion des ressources en sols. Dès la fin des années 1970, Warkentin et Fletcher (1977) ont été les premiers à proposer le développement d'un concept de qualité des sols pour appréhender la multiplicité des fonctions et services que les sols doivent fournir. Depuis, de nombreux indices de qualité des sols ont été proposés mais tous n'offrent pas les mêmes niveaux d'information et ne satisfont pas tous les usages.

Le plus souvent, la qualité du sol est évaluée au travers de paramètres simples et en nombre limité (caractéristiques physico-chimiques, concentrations en polluants...). Cette approche ne permet pas d'avoir une vision synthétique de la qualité du sol et surtout elle est difficile à manier pour un non-pédologue. Des indices combinant un nombre variable de paramètres (avec recherche du « nombre minimum de variables requis »), avec ou sans utilisation de fonctions de pédo-transfert ont également été proposés. L'indice de qualité d'un sol peut théoriquement recouvrir un large spectre de caractéristiques intrinsèques ou acquises du sol. Cependant, il reste lié aux usages et aux fonctions que l'on attribue à ces sols, lesquels vont conditionner les caractéristiques prises en compte ainsi que leur poids dans la construction de l'indice (Laroche *et al.*, 2006).

Les premiers indices ont été développés afin de mieux prendre en compte la qualité des sols et de favoriser un management durable dans la production agricole (par exemple Hussain *et al.*, 1999 ; Shukla *et al.*, 2006). En France, des indices privilégiant le potentiel agronomique du sol ont par exemple utilisé la réserve utile comme paramètre synthétique (Laroche *et al.*, 2006), en y incluant parfois les contraintes de milieu (Ballestrat *et al.*, 2008). Dans le cadre du SCOT de Toulon, une carte au 1 : 50000 de la qualité des sols agricoles a été produite à partir de cartes pédologiques existantes et intégrée dans le SIG de l'Agence d'Urbanisme de l'Aire Toulonnaise afin de permettre le suivi et une préservation des sols agricoles adaptés à leur qualité. De telles cartes d'aptitude ne sont malheureusement pas disponibles partout. D'autre part, en milieu urbain et péri-urbain, les cartes au 1 : 50 000 n'ont pas une précision suffisante. Il a en effet été souligné que l'approche généralement suivie pour les sols agricoles n'était pas applicable aux sols en zone urbaine et péri-urbaine du fait de l'échelle spatiale généralement plus fine à laquelle varient les caractéristiques des sols (Zhao *et al.*, 2007). Les sols en zone urbaine et péri-urbaine étant soumis à des sources de pollution diverses, leur charge en polluants est souvent une préoccupation (Kelly *et al.*, 1996 ; Andersson et Ottesen, 2007) : certaines études se sont ainsi attachées à synthétiser la qualité chimique du sol, en particulier au regard des polluants inorganiques (Lee *et al.*, 2006).

Des indices plus complexes ont été proposés pour s'adapter à l'utilisation actuelle et envisagée du sol. Li *et al.* (2007) ont proposé de combiner des paramètres du sol avec des paramètres relatifs à l'utilisation du sol et à son évolution dans le temps. Ils soulignent l'importance de choisir, en plus des paramètres particulièrement déterminants tels que la teneur en matière organique des sols, des paramètres sensibles aux changements d'utilisation. On retrouve cette démarche dans le projet européen TUSEC-IP³, qui avait pour thème central l'évaluation des propriétés des sols en urbanisme. Cette étude a permis de proposer un indice de qualité des sols ainsi qu'une évaluation de la valeur écologique des sols à l'échelle du 1 : 5 000, à partir des caractéristiques physico-chimiques et physiques des sols (charge en polluants, caractéristiques courantes, perméabilité...), et a aussi proposé une méthode d'évaluation des risques sanitaires pour l'homme (Vrscaj *et al.*, 2008). Parmi les paramètres mobilisables pour la construction des indices de qualité des sols, les paramètres biologiques – excepté le % de carbone organique - sont en revanche encore rarement pris en compte. Pourtant, les propriétés biologiques et biochimiques tels que l'activité microbienne⁴, semblent particulièrement vulnérables à la moindre perturbation, et pourraient, par conséquent, être bien adaptées au développement de bioindicateurs de la qualité et du fonctionnement des sols (Yakovchenko *et al.*, 1996). Les activités enzymatiques pourraient notamment s'avérer être un bioindicateur particulièrement significatif de l'état de détérioration des sols, en raison de leur implication majeure dans les principaux cycles biogéochimiques (Frankenberger et Dick, 1983). Impliquées dans la minéralisation du carbone, de l'azote, du phosphore et du soufre, elles sont d'un intérêt particulier car vraisemblablement les plus représentatives, à une échelle moléculaire, du fonctionnement d'un sol (Criquet, 1999). Ainsi Floch *et al.* (2009) ont pu montrer l'impact du mode de gestion agronomique sur le fonctionnement enzymatique de sols agricoles. Plus généralement, les

³ Projet financé par le programme INTERREG IIIB Espace Alpin de l'Union Européenne.

⁴ Par exemple, les activités enzymatiques responsables du recyclage des principaux éléments tels que C, N, P et S permettent de mettre en évidence une perturbation pouvant potentiellement engendrer des conséquences néfastes sur l'ensemble du fonctionnement écosystémique, ainsi que d'évaluer l'efficacité de leur restauration naturelle ou anthropique (Floch *et al.*, 2009).

paramètres biologiques sont de plus en plus utilisés seuls (Yan *et al.*, 2012 ; Moeskops *et al.*, 2012) ou en combinaison avec des paramètres physico-chimiques dans les indices de qualité des sols (Blecker *et al.*, 2012). L'ADEME pour sa part soutient un programme de recherche intitulé « bioindicateurs de qualité des sols » en phase de finalisation.

Pour la planification urbaine, un indicateur de la qualité du sol ne paraît avoir d'intérêt que s'il est effectif à orienter la politique d'aménagement urbain, c'est-à-dire s'il est suffisamment explicite pour éclairer et faciliter les décisions politiques. Cela implique qu'il fournisse une information sur le succès ou l'échec des orientations choisies (Piorr, 2003). Cela suppose aussi qu'il ait des caractéristiques relativement précises (Piorr, 2003) relevant de l'objectif visé, et nécessitant sa compatibilité avec les réglementations locales et nationales voire internationales. Un tel indice se caractérise par sa robustesse, sa validité scientifique, l'accessibilité des données nécessaires à sa construction et une capacité à offrir des seuils interprétables pour les décideurs. Il ne peut être construit qu'avec leur collaboration et doit, bien sûr être spatialisé sur l'ensemble du territoire considéré.

D-Objectifs du projet

La problématique du projet UQUALISOL-ZU renvoie à un grand nombre de questions, tant pour les sciences du sol ou le droit, que pour la gestion et la planification de l'espace. Par exemple, quels peuvent être les apports des sciences du sol pour une prise en compte facilitée de la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme ? Cette éventuelle prise en compte pourrait-elle se généraliser, voire devenir obligatoire ? A quelle échelle l'information sur les sols doit-elle être produite ? Quels sont les caractéristiques ou groupes de caractéristiques des sols nécessaires à l'établissement des plans d'urbanisme et permettant de répondre aux nouvelles questions posées par la société ?

En vue de permettre la proposition de pistes concrètes pour l'action publique, tout en permettant aux différents champs disciplinaires impliqués dans le projet de progresser sur les questions qui leur sont propres, la recherche a été organisée autour de trois objectifs :

- évaluer comment le droit permet d'intégrer une connaissance des fonctions des sols dans le processus de planification de leur usage ;
- évaluer quelle connaissance de la multifonctionnalité des sols peut être produite pour être utilisée par le planificateur ;
- évaluer la pertinence d'une démarche de prise en compte des sols dans les politiques d'urbanisme en se confrontant à une réalité territoriale déterminée.

Ces objectifs sont servis par une démarche emboîtée qui définit d'une part les grandes étapes du projet et la manière dont elles sont abordées et qui, d'autre part, inclut les méthodologies de mise en œuvre pratique du projet spécifiques aux disciplines scientifiques impliquées.

II. METHODOLOGIE

Dans le cadre du projet Uqualisol-ZU, la recherche s'est effectuée en combinant des éléments de méthodologie relevant de plusieurs champs disciplinaires. Le sol a en effet été étudié à partir de plusieurs entrées : en tant que milieu, que l'on a cherché à caractériser en termes géo-écologiques ; en tant que ressource et support d'usages pour la société, dont on a recherché la prise en compte par le droit ; en tant que substrat des activités et du peuplement humains, que l'on a analysé en termes d'occupation des sols et de planification spatiale. Ces trois approches du sol ont été menées à la fois simultanément, avec des protocoles et des démarches propres à chaque spécialité disciplinaire impliquée, et de façon articulée, afin de répondre à l'objectif de départ : évaluer la faisabilité et définir une méthodologie de prise en compte de la qualité des sols dans la planification de l'espace à l'échelle communale.

L'objet de cette partie du rapport est de présenter la manière dont le projet a été conduit. Seront abordées successivement :

- la méthodologie globale
- le contexte local de la recherche et la zone d'étude
- des précisions sur les cinq actions de recherche

A-Méthodologie globale du projet

1- Volonté d'approche commune de l'objet « sol »

UQUALISOL-ZU est un projet pluridisciplinaire associant les sciences de l'environnement et les sciences humaines et sociales, puisqu'il convoque les sciences du sol, le droit, la géographie et l'écologie. Ces différents champs disciplinaires n'ont pas coutume de collaborer pour traiter un même objet d'étude, ce qui constitue une originalité qu'il convient de souligner. Dans le cadre du projet, un effort constant a été réalisé pour tendre vers l'interdisciplinarité et éviter la juxtaposition d'approches sectorielles. La méthodologie globale a donc consisté à mener la recherche le plus possible ensemble : nombreuses réunions d'échanges sur la conduite et l'avancée des travaux (**Tableau 1**), explicitation par les uns de leurs approches et de leurs méthodologies aux autres, mises au point scientifiques et méthodologiques partagées, rencontres des acteurs locaux en présence de représentants d'au-moins deux champs disciplinaires, visites et travaux de terrain en commun, etc.

Tableau 1 : Réunions d'échanges du groupe de travail

Date	Lieu	Labos représentés
03-02-2010	CEJU, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV
20-04-2010	CEREGE, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV
19-05-2010	CEJU, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV
29-06-2010	CEJU, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV
15-10-2010	CEREGE, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV, DiVaPra
02-02-2011	CEJU, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV, IMEP, DiVaPra
31-03-2011	DiVaPra, Turin	CEREGE, ECCOREV, DiVaPra
08-04-2011	CEREGE, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV, IMEP
24-06-2011	CEREGE, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV, IMEP, DiVaPra
05-01-2012	CEREGE, Aix-en-Provence	CEREGE, ECCOREV
16-02-2012	CEJU, Aix-en-Provence	CEJU, CEREGE, ECCOREV

En procédant ainsi, de substantiels résultats ont pu être réalisés pour une meilleure compréhension mutuelle, un dépassement des spécificités propres à chaque champ disciplinaire, et une étude plus intégrée et plus aboutie de l'objet « sol », tel qu'envisagé dans le périmètre du projet.

2- Liaisons avec les acteurs locaux

Simultanément à l'effort de dépassement des approches disciplinaires stricto sensu, la recherche s'est développée en établissant des liaisons avec les acteurs publics locaux, ainsi qu'avec des représentants du monde agricole. Ceci a consisté à recueillir de l'information sur les usages, les évolutions constatées et les aspirations pour l'avenir concernant la gestion de l'espace et des sols, en général et dans l'aire d'étude en particulier. Relevant de différents champs de compétences et opérant au sein de structures ayant un intérêt plus ou moins affirmé pour une meilleure connaissance des sols, les acteurs rencontrés ont été des élus, des techniciens et des chargés d'étude, émergeant à des collectivités territoriales (commune, établissement public de coopération intercommunale, conseil général), des services de l'Etat (DRAAF, CETE Méditerranée), des organismes interprofessionnels (chambre d'agriculture), une société d'économie mixte (Société du Canal de Provence), etc. Le secteur de l'agriculture a été approché via des exploitants agricoles, des élus en charge du développement économique, la chambre d'agriculture, la SCP, des associations d'aide à l'installation des jeunes agriculteurs, le Lycée agricole de Valabre. Sans remettre en cause l'objectif de recherche initial, les entretiens accordés par ces interlocuteurs ont permis d'inscrire le projet dans la « réalité terrain » et de s'assurer du caractère opérationnel et transférable de certains résultats. Cette démarche a pris une place plus importante que ce qui avait été pensé lors de la conception du projet. Elle s'est imposée lors du déroulement du projet et constitue un point méthodologique essentiel.

3- Développement de la recherche et articulation des différentes interventions

Conformément à ce qui avait été envisagé et proposé dans le projet soumis à l'appel à propositions de recherche, la démarche suivie a consisté en étapes de travail qui ont été articulées les unes aux autres.

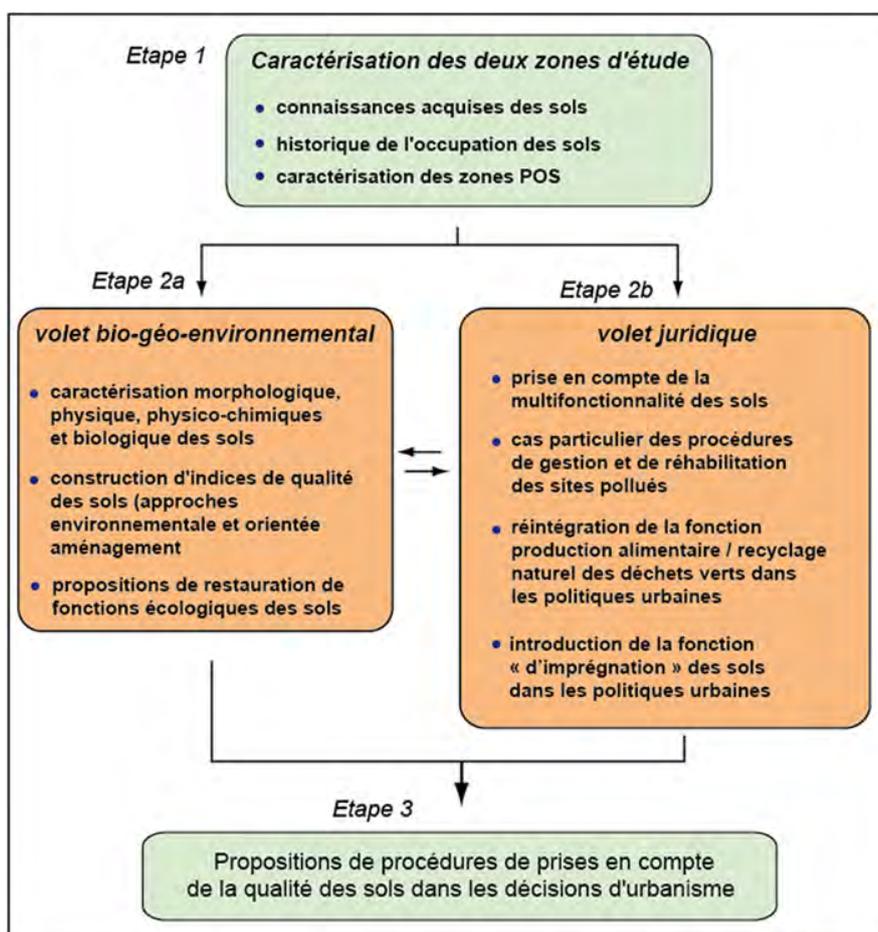


Figure 2 : Déroulement de la recherche tel que prévu dans le projet initial

La **figure 2**, reprise du projet tel qu'il a été soumis en décembre 2009, donne une représentation simplifiée des principales actions de recherche qui étaient envisagées. La réalisation de la recherche a suivi ce schéma, tout en y apportant quelques amendements. Dans le détail, plusieurs actions se sont développées simultanément et se sont nourries les unes des autres. Ainsi les volets bio-géo-environnemental (2a) et juridique (2b), n'ont pas attendu l'achèvement de la caractérisation des deux zones d'étude (1) pour débiter. De même, l'étape 1 s'est développée en fonction de réflexions et de décisions arrêtées dans le cadre des étapes 2a et 2b (à quelle échelle produire la donnée d'occupation des sols pour qu'elle soit pertinente pour la suite ?, par exemple) et a dépassé la seule caractérisation de la zone d'étude par l'espace, en y ajoutant une approche davantage socio-culturelle (rencontres et entretiens de divers acteurs locaux, cf. point précédent). L'étape 2a, quant à elle, a été fortement déterminée par les acquis de l'étape 1 et par les recommandations de l'étape 2b quant aux possibilités et aux éventuelles modalités de transposition dans la loi ou dans la réglementation d'urbanisme de recommandations sur la qualité des sols. Et l'étape 2b s'est profondément construite à partir des possibilités de production de connaissances scientifiques sur les sols offertes par l'étape 2a.

Au final, la méthodologie du projet a été fortement conditionnée par un objectif fort : proposer un outil d'aide à la décision publique pour intégrer une connaissance scientifique de la qualité et des potentialités offertes par les sols dans la planification de l'espace.

B-Contexte de la recherche et zone d'étude

1- Observatoire Hommes-Milieus « bassin minier de Provence »

Le projet a été conduit dans le cadre de l'Observatoire Hommes-Milieus « Bassin minier de Provence » (OHM-BMP)⁵, dispositif de l'Institut écologie et environnement du CNRS créé en 2008. Dédié à la mise en œuvre de recherches interdisciplinaires en environnement, cet Observatoire s'intéresse à l'étude de l'après-mine sur le territoire de l'ancien bassin charbonnier des Bouches-du-Rhône, où l'extraction minière a cessé en 2003, et aux dynamiques socio-environnementales en contexte péri-urbain. Mobilisant des acteurs scientifiques issus de différents champs disciplinaires relevant des sciences de l'univers, de l'écologie et des sciences de l'homme et de la société, l'OHM-BMP s'emploie à organiser les échanges interdisciplinaires, à collecter, organiser et diffuser des données, et à établir des liaisons entre le monde de la recherche et les acteurs publics. Il a procuré un cadre contextuel déterminant pour le développement du projet. La problématique de la recherche développée dans UQUALISOL-ZU est, en effet, commune à de très nombreux territoires de France et d'Europe. Le projet aurait donc pu être mené sur des terrains localisés dans différentes franges périurbaines concernées par l'étalement urbain, la consommation des terres, la nécessité de réfléchir à une meilleure gestion des sols, et intéressées par l'établissement de connaissances nouvelles sur la qualité des sols en vue d'une planification avisée. Cependant, une telle démarche de recherche implique l'existence d'un contexte scientifique et institutionnel favorables aux échanges entre scientifiques et acteurs publics. Il suppose également que des données soient déjà produites localement sur les sols, l'occupation des sols, voire la gestion publique de l'espace et des sols. Le traitement de la question posée nécessite non seulement des données nombreuses, mais aussi certaines qui sont tout simplement indispensables comme une carte des sols à une échelle suffisamment précise (1 : 25 000 à 1 : 50 000), ou encore des jeux de données géographiques de référence (de précision similaire) produites à intervalles de temps réguliers (cartes topographiques, ortho-photographies, etc.). Dans ce contexte, le projet impliquait de sélectionner une aire d'étude à la fois représentative de la problématique initiale, propice aux échanges scientifiques/acteurs publics, objet de recherches connexes et d'intérêt pour le sujet, et couverte par des données institutionnelles et scientifiques sur l'environnement et les milieux naturels. En partie du fait de l'existence de l'OHM-BMP, le bassin minier de Provence a donc constitué une zone d'étude particulièrement appropriée à la recherche proposée. UQUALISOL-ZU a ainsi profité du dispositif OHM tout en y apportant sa contribution en approfondissant la question des sols sur le territoire de l'Observatoire (identification de partenaires nouveaux, création de données inédites, etc.).

2- Zone et sites d'étude

Contexte géographique et historique

Situé à l'Est du département des Bouches-du-Rhône, le **bassin minier de Provence** est une zone de transition entre le cœur de l'aire urbaine de Marseille – Aix-en-Provence et l'arrière-pays provençal (**Figure 3**). Sur le plan administratif, il correspond à 17 communes identifiées par l'Etat dès la fin des années 1960, pour qu'y soit conduite une politique de reconversion économique et industrielle en prévision de l'arrêt des mines aux alentours des années 2000. Sa partie occidentale, traversée par l'axe reliant les deux villes, est davantage urbanisée que ses confins orientaux, où l'agriculture est encore relativement active, en particulier la viticulture (AOC Provence). Occupant principalement la vallée de l'Arc, qui s'écoule entre la montagne Sainte-Victoire au Nord et la chaîne de l'Etoile au Sud, le bassin minier présente à la fois des paysages caractéristiques et symboliques de la Provence (chaînes calcaires saillants, noyaux villageois perchés, oliveraies, haies coupe-vent, vignes et forêts mixtes méditerranéennes) et des traits paysagers communs à tous les espaces péri-urbains (lotissements pavillonnaires, habitat diffus dans les espaces agricoles et forestiers, zones commerciales et industrielles, voies de communication à grand gabarit). Ce cadre paysager

⁵ Pour plus d'information : URL : <http://www.ohm-provence.org>

relativement attractif motive une certaine mobilité résidentielle, auprès d'actifs désireux de se retirer « à la campagne » ou de retraités faisant de choix de s'installer dans le midi provençal à proximité de villes dynamiques. Proche des principales zones d'emplois de l'aire urbaine, mais aussi siège de pôles d'activités importants, le bassin minier est particulièrement bien desservi par les voies de communication routières et dans une moindre mesure par le train. Dès les années 1970, cette situation a notamment contribué à l'étalement urbain en facilitant les navettes domicile-travail.

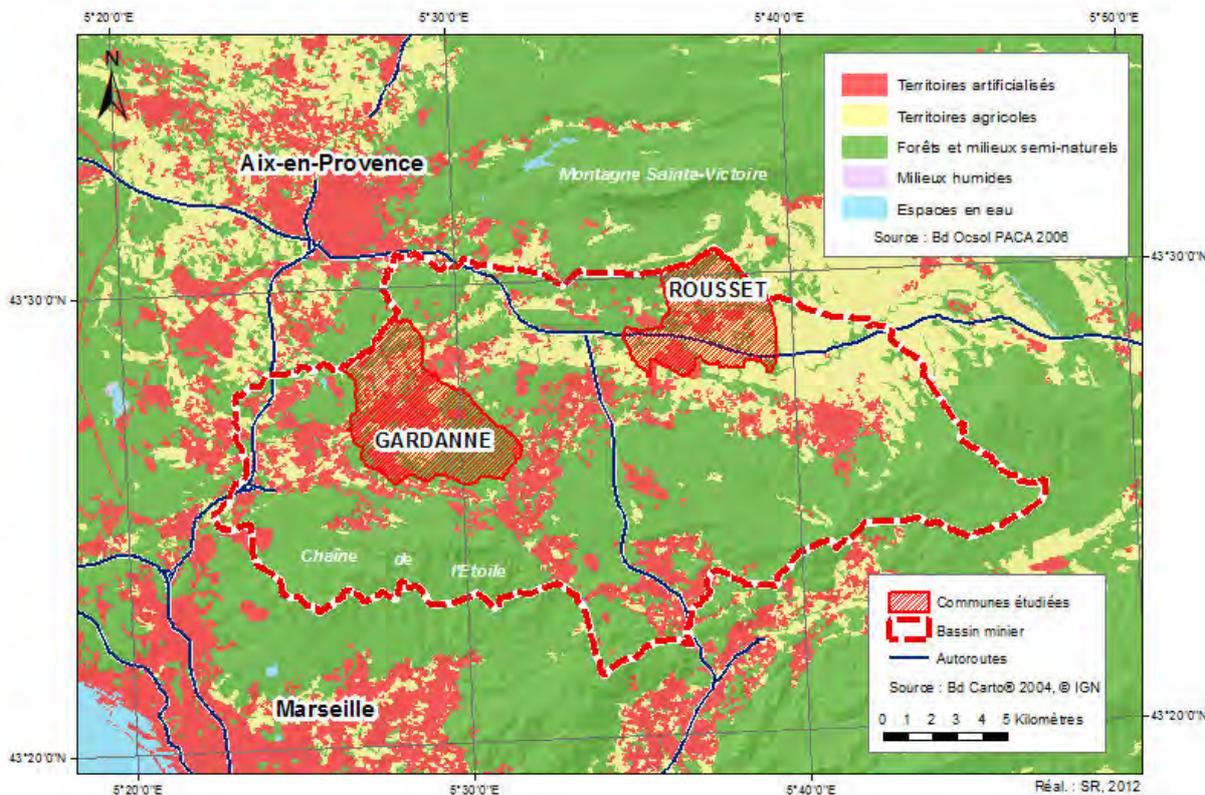


Figure 3 : Le bassin minier de Provence et les deux communes d'étude

En 2011, la population totale s'établit à un peu plus de 105 000 habitants (Source : INSEE, RGP, 2011), en progression de +13,4 % par rapport au recensement de 1999. Cette croissance démographique est inférieure à celles enregistrées lors des périodes intercensitaires précédentes (**Figure 4**), mais elle reste supérieure à celle de l'ensemble du département des Bouches-du-Rhône (+8,7%) et témoigne d'une dynamique péri-urbaine indiscutable (croissance 1999-2011 de la population française totale : +6,3%).

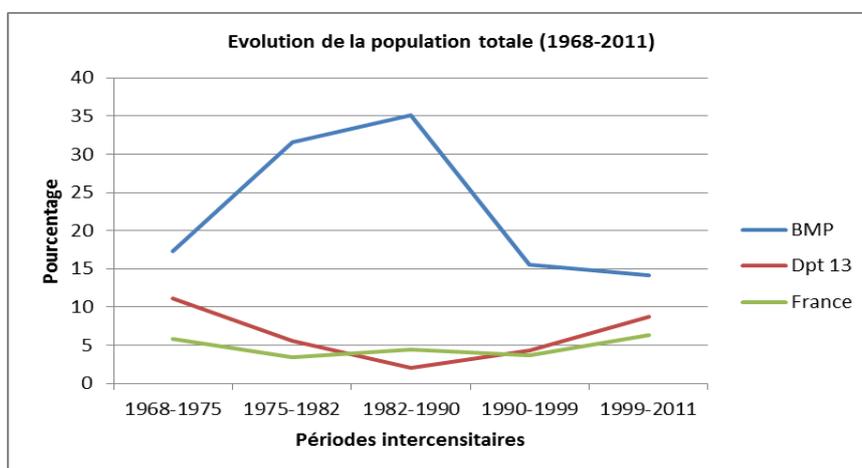


Figure 4 : Rythmes d'évolution récente de la population dans le bassin minier de Provence
Source : INSEE.

Dans ce contexte péri-urbain caractéristique, la recherche s'est plus particulièrement portée sur deux communes, localisées sur le gradient Ouest-Est d'urbanisation décroissante : **Gardanne et Rousset**. Choies pour leurs différences et parce qu'elles illustrent chacune la réalité péri-urbaine, ces deux localités sont toutes deux engagées dans l'élaboration de leur plan local d'urbanisme (PLU) au commencement du projet. Ce contexte a permis des échanges fructueux avec les équipes municipales sur la thématique étudiée, car les élus comme les techniciens étaient investis dans les réflexions relatives à l'élaboration de la planification de l'espace au moment même où l'équipe de recherche développait ses propres travaux.

Gardanne, la plus grande des deux communes, est la principale ville du bassin minier. Son territoire s'étend sur 27 km². Il occupe une dépression topographique (divisée en deux par une petite ondulation boisée de direction nord-sud) et entourée de petits massifs collinaires plus élevés couverts par de la forêt (**Figure 3**). La ville se compose de deux noyaux urbains distincts qui tendent aujourd'hui à se rejoindre : le village provençal d'origine grossi des extensions urbaines datant principalement de la seconde moitié du XXe siècle, au centre, et le quartier de Biver, la cité minière apparue au cours du XIXe siècle et qui a connu elle-aussi une extension spatiale, au sud. La ville est une cité industrielle ancienne, toujours marquée par l'industrie, et demeure un pôle d'emploi notable. Les usines s'étendent sur des superficies conséquentes avec notamment un très important complexe de production d'alumine et une centrale thermique au charbon. L'agriculture persiste au nord et, très secondairement au sud de l'agglomération. En 2011, la population s'élève à 21 000 habitants. Elle est en progression mais le rythme de croissance est inférieur à la moyenne du bassin minier et à la croissance enregistrée à Rousset (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Taux de variation récente de la population totale dans la zone d'étude (en %)

	Périodes intercensitaires	
	1990-1999	1999-2011
Gardanne	8,32	8,91
Rousset	23,15	24,34
BMP	15,59	14,11

Source : INSEE, RGP 2011

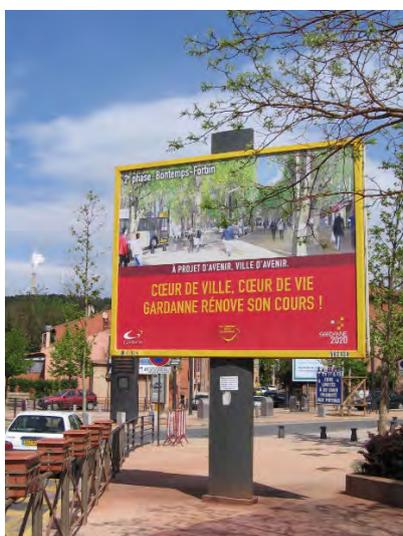
Rousset est une commune plus petite (19 km²) et moins peuplée (4500 habitants en 2011). Elle s'étend sur le versant Sud du plateau du Cengle, qui appartient au massif de la montagne Sainte-Victoire, occupe une partie de la vallée de l'Arc et est principalement dominé par l'agriculture (vignes, céréales), la garrigue et la pinède. L'urbanisation se concentre au chef-lieu, situé au centre du territoire, ainsi que dans la plaine alluviale de l'Arc où se localise une très importante zone d'activités cumulant plus de 7000 emplois en 2008, soit plus que le nombre d'habitants ! Avec la proximité d'Aix-en-Provence et l'esthétique paysagère, cette concentration d'entreprises contribue à l'attractivité de la commune, dont la croissance démographique est très soutenue depuis plusieurs décennies (**Tableau 2**).



Cités minières du quartier de Biver



Zone agricole au nord



Centre-ville en rénovation



Usine d'alumine vue du nord. Arrière-plan : terril de Biver et l'Etoile



Centrale thermique vue du nord. Arrière-plan : chaîne de l'Etoile.

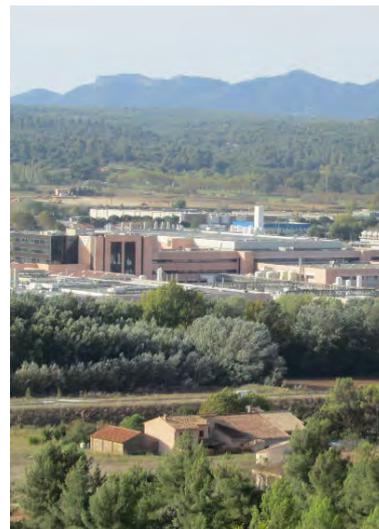


Réhabilitation d'un carreau de mine

Planche I : Quelques vues sur le territoire de Gardanne



Vue sur le nord de la commune. Arrière-plan : Sainte-Victoire



Zone industrielle



Vignes, oliviers et garrigue.



Vue sur les extensions pavillonnaires et la vallée de l'Arc.



Vue sur le village, en direction de l'ouest

Planche II : Quelques vues sur le territoire de Rousset

Cadre physique

A quelques exceptions près, le cadre physique est commun aux deux communes et est représentatif de la région provençale. Ce contexte physique contraint pour partie l'approche que l'on peut avoir des sols. De même, les connaissances que nous avons de cette région sont très variables, en quantité comme en qualité, ce qui oblige à procéder à des développements que nous présentons ultérieurement. Nous n'offrons donc ici qu'une présentation succincte du cadre physique.

1. Géologie et géomorphologie

Les communes de Gardanne et Rousset sont couvertes par la carte géologique d'Aix-en-Provence (BRGM, 1969). Gardanne est intégralement comprise dans une unité formant le bassin de l'Arc, dont la structure est un synclinal d'axe NW-SE, plus précisément au niveau de sa terminaison périclinale. Un accident majeur est présent dans la partie sud de la commune : la faille de la Diote, d'orientation WNW-ESE, qui correspond à la limite nord d'un chevauchement et permet l'individualisation de l'« écaille de Gardanne ». Rousset se situe sur le flanc nord de ce même synclinal, à la jonction avec le massif calcaire de la Sainte-Victoire. Ainsi, une partie des formations en présence sont identiques sur les deux communes.

A Gardanne (**Figure 5**), les lithologies affleurantes sont essentiellement d'origine sédimentaire. La formation la plus ancienne se situe au sud, au niveau de l'écaille de Gardanne. Elle correspond à des formations calcaires du Campanien supérieur (C6b). Le Maestrichtien (C7) recouvre une large partie SW de la commune. Ce sont des argiles et marnes à lentilles gréseuses. Elles alternent avec des faciès calcaires (C7c). Le Rognacien (C8), se compose de puissantes formations d'argiles et grès, dans lesquelles est intercalée la formation des calcaires de Rognac (C8b), dont le relief constitue un bourrelet contraignant la morphologie du centre-ville de Gardanne.

Le Rognacien présente de nombreuses variations latérales de faciès. Le Cénozoïque débute, dans la partie NW de la commune, par la formation du Montien, constitué des calcaires de Vitrolles (e1V) à sa base, puis d'argiles et marnes rouges (e1). Le Thanétien correspond à un niveau calcaire (e2M), surmonté d'argiles et marnes rouges (e2). Enfin, le Sparnacien comprend également un niveau calcaire (e3M). Des placages quaternaires recouvrent par endroit les formations Mésozoïque et Cénozoïque. Il s'agit de colluvions du Würm (Py), décrites comme des limons et cailloutis, et sont présentes dans la plupart des thalwegs, et d'alluvions (Px) (BRGM, 1969). Les limites des dépôts artificiels, correspondant aux terrils, sont également retranscrites (X). Les terrils du nord de la commune, plus imposants, sont récents et soit déjà fermés soit en cours de fermeture. Les terrils les plus anciens (minimum 50 ans depuis leur fermeture) sont plus petits et situés au sud de la commune.

A Rousset (**Figure 6**), la formation la plus ancienne est également le Rognacien (C8). C'est la plus représentée et elle affleure dans la partie médiane de la commune. Le Rognacien terminal se compose des poudingues de la Galante (C8G), à ciment gréseux, présents uniquement sur Rousset. Le Cénozoïque débute par les argiles et marnes rouges du Montien (e1) et du Thanétien (e2). Elles sont surmontées des calcaires formant le plateau du Cengle, d'âge Sparnacien (e3M). Comme à Gardanne, mais sur de plus larges surfaces, des placages quaternaires recouvrent les formations Mésozoïque et Cénozoïque. Il s'agit de colluvions du Riss (PFx) et du Würm (Py). Au nord, sur les flancs du plateau du Cengle, des éboulis soliflués wurmiens (Esy) viennent recouvrir les formations d'argiles et de marnes. Des alluvions récentes (Px) sont présentes dans le lit de l'Arc et de la Groule. Rousset ne présente pas de dépôts artificiels identifiés de type terril.

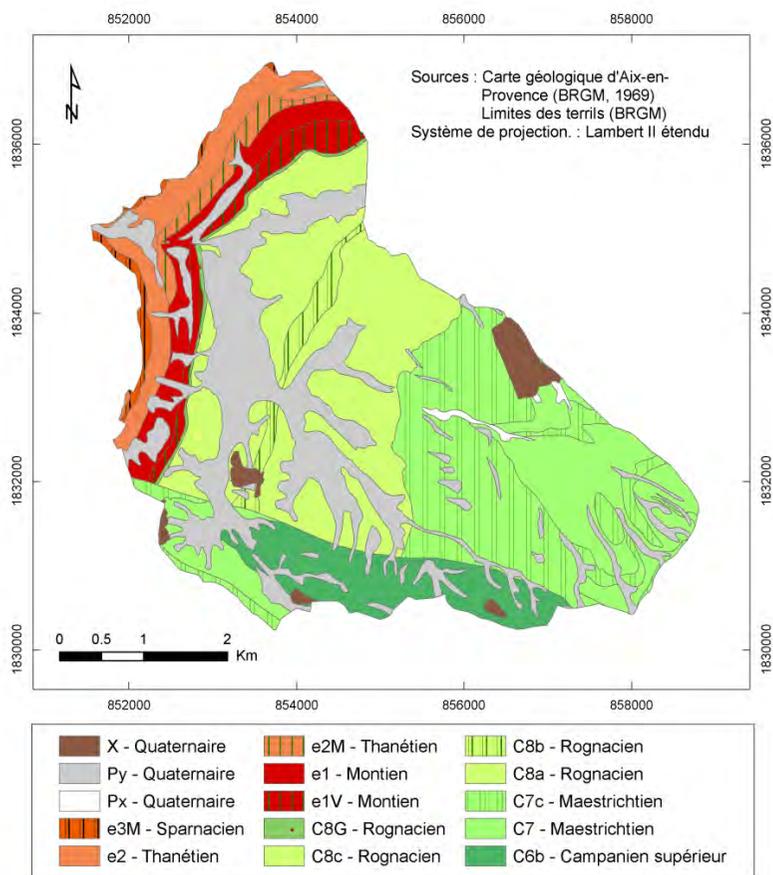


Figure 5 : Carte géologique au 1 : 50 000 de la commune de Gardanne (d'après BRGM, 1969).

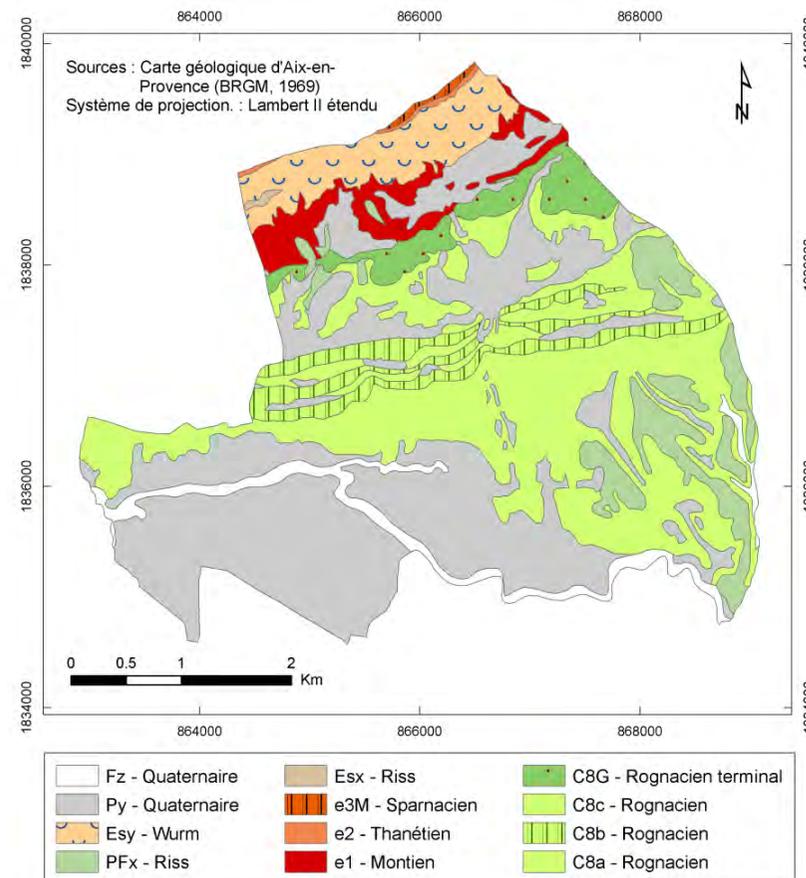


Figure 6 : Carte géologique au 1 : 50 000 de la commune de Rousset (d'après BRGM, 1969).

Les géomorphologies de Gardanne et Rousset sont en lien étroit avec les lithologies rencontrées. A Gardanne, la partie nord-ouest de la commune présente un modelé en « marches d'escalier » avec des pentes marquées, construites par l'alternance de formations argileuses, tendres, et calcaires (**Figure 7**) qui supportent des activités agricoles. Les altitudes y atteignent un maximum d'environ 300 m. Au sud de ces escarpements, on trouve les altitudes minimales, de l'ordre de 200 m, qui correspondent à des formations argileuses. La partie SE de la commune présente les altitudes les plus importantes, pouvant aller jusqu'à 380 m en limite sud de la commune. Les pentes peuvent être localement fortes au niveau des vallées creusées par la Luynes et le ruisseau de Saint-Pierre.

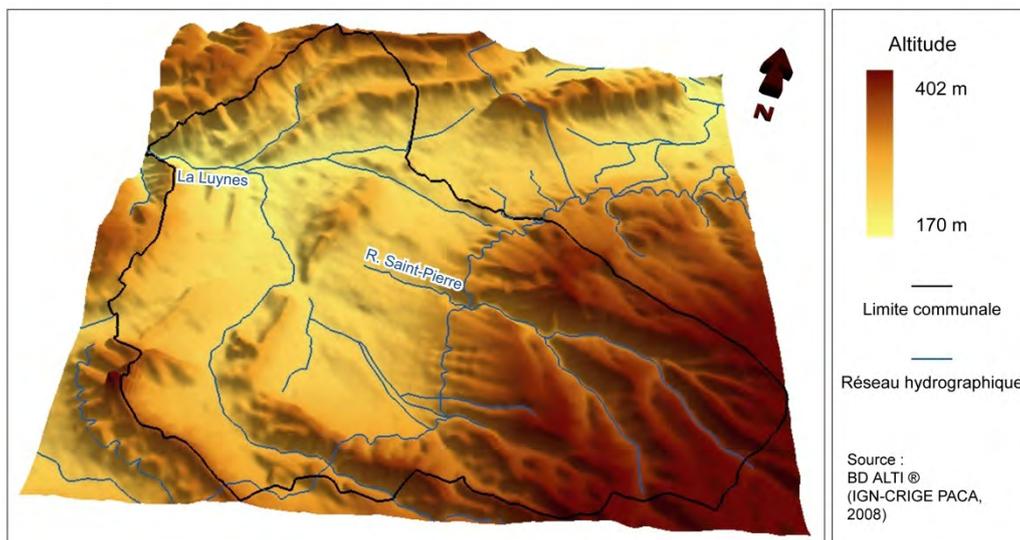


Figure 7 : Représentation en trois dimensions de la topographie de Gardanne.

A Rousset, les flancs du plateau du Cengle, au nord, offrent les altitudes les plus importantes, jusqu'à 570 m, et des pentes d'environ 30 % (**Figure 8**). Les calcaires de Rognac et, dans une moindre mesure, les poudingues de la Galante, constituent deux barres successives. Le centre historique de Rousset est adossé aux calcaires de Rognac. La vallée de l'Arc, au sud, forme une large plaine, et présente les altitudes les plus faibles, de l'ordre de 200 m. Gardanne présente donc plutôt une géomorphologie en cuvette (bassin de Gardanne) alors que Rousset se trouve plutôt en position de versant.

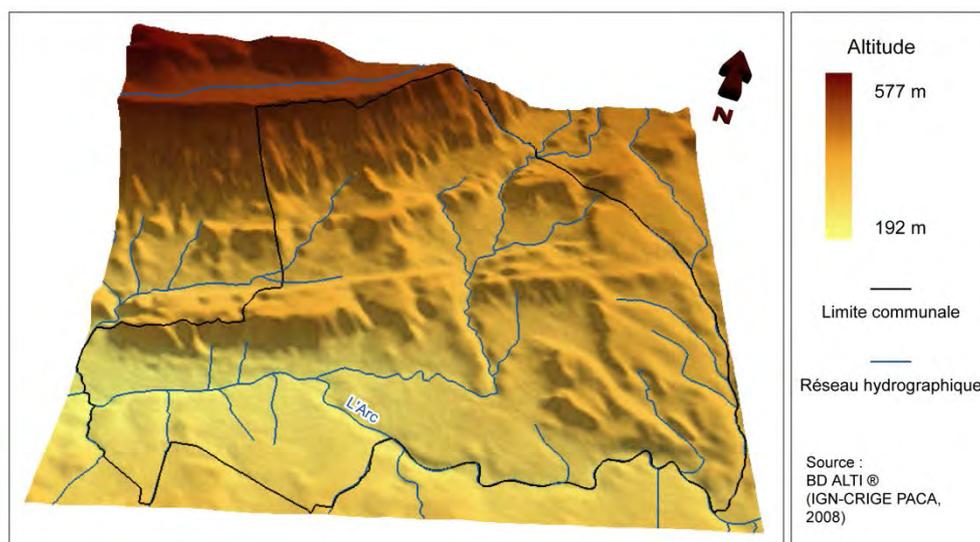


Figure 8 : Représentation en trois dimensions de la topographie de Rousset.

2. Sols et végétation naturelle

Il n'existe pas de carte des sols de la commune de Gardanne. Les seules informations disponibles sont à l'échelle régionale : il s'agit la carte des pédo-paysages au 1 : 250 000, de l'atlas des sols de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Duclos, 1994) et de la base de données DONESOL-PACA⁶. Le bassin de Gardanne est décrit dans l'atlas comme possédant les principaux groupes de sols suivants : des anthroposols artificiels, des lithosols, régosols, rendosols et calcosols, des fersialsols sur les plateaux et des colluviosols et fluviosols dans les parties en pente faible ou bordure de rivière. A noter également que les anthroposols sont de nature très variée puisqu'ils comprennent, entre autre, des sols des terrils récents possédant une couche de fermeture de sol rapporté et les sols des terrils anciens se développant directement à partir du matériau déposé.

La partie nord de la commune de Rousset, sur la rive droite de l'Arc (rivière principale de la région s'écoulant vers l'ouest), a fait l'objet d'une étude pédologique et est, à ce titre, couverte par une carte des sols au 1 : 20 000, accompagnée de sa notice explicative, dans l'ancienne classification des sols CPCS (Société du Canal de Provence, 1970). Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'aptitude des sols à la mise en valeur et à l'irrigation en préalable au déploiement d'un réseau d'irrigation par la SCP. Elle ne couvre par conséquent ni les zones urbanisées, ni les zones forestières. La partie sud-ouest de la commune est, quant à elle, couverte par une carte au 1 : 10 000 donnant les caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques des sols (Michaut *et al.*, 1958). Elle avait été initialement conçue afin de déterminer l'aptitude des sols aux différentes cultures irriguées. La carte des pédopaysages au 1 : 250 000 couvre également Rousset, de même que l'atlas de la région PACA. On retire de ces différentes sources les informations suivantes. Les sols rencontrés sont des fluviosols aux abords de l'Arc, des colluviosols au niveau des vallons, des brunisols, des pélosols et des sols plus ou moins évolués développés sur calcaire ou grès (rendosols et calcosols). Quelques sols hydromorphes sont indiqués sur la carte (Société du Canal de Provence, 1970). La texture des sols varie énormément en fonction des placages alluviaux ou colluviaux et des roches sous-jacentes. L'ensemble des sols est carbonatés à quelques exceptions près : quelques sols « reliques » non carbonatés sont présents en zone forestière sur poudingue. Certains, identifiés sur la carte, ont disparu par le fait des labours profonds effectués pour implanter des vignes. La partie nord (contre-fort du Cengle) n'a pas fait l'objet de beaucoup de prospections et il n'existe sur ces sols aucune analyse ni description détaillée, de même que pour toutes les zones en gar rigues à l'époque de la cartographie. Duclos (1994) mentionne des lithosols, des régosols, des solums calcimagnésiques plus ou moins profonds et développés selon le substrat, les sols les plus épais se rencontrant dans les matériaux colluviaux.

La végétation naturelle est représentative du climat et des sols de la région. Elle est diversifiée mais typiquement méditerranéenne. Sur les collines et en adret, les forêts de pins d'Alep dominent avec des chênes verts plus ou moins présents et le cortège floristique habituel. Le chêne pubescent apparaît dans les vallons plus humides. La garrigue est présente lorsque le pin a disparu (Duclos, 1994).

⁶ Cette base de données a été exploitée pour l'interprétation des résultats analytiques.

C-Précisions sur les actions de recherche

La recherche a été menée aussi loin que possible dans une démarche interdisciplinaire. Elle s'est toutefois appuyée sur des actions plus proprement disciplinaires dont il importe de détailler le déroulement. Comme indiqué précédemment, ces actions n'ont pas été conduites sans s'influencer les unes les autres, mais elles comportent des spécificités propres qui sont exposées ci-après. L'ordre de leur présentation ne renvoie pas nécessairement à leur succession chronologique dans le cadre du projet.

1- Recensement et évaluation de la pertinence des dispositions juridiques concernant la qualité des sols

Les juristes ont recherché, parmi les dispositions du droit international et des codes nationaux (Code de l'environnement, Code forestier, Code rural, Code de l'urbanisme, Code de la construction et de l'habitation, disponibles sur Legifrance), quelles étaient les dispositions qui permettaient d'appréhender, d'évaluer et de préserver la qualité ou les fonctions des sols. Cette recherche systématique a été proposée à des étudiants de Master 2, dans le cadre d'enseignements de droit de l'environnement. L'intérêt manifesté par les étudiants s'expliquait par deux caractéristiques de ces travaux. D'une part, il s'agissait de défricher une branche du droit, le droit de la protection des sols, encore très peu cohérente, et donc de participer à une approche créatrice du droit. D'autre part, l'ancrage du projet dans la réflexion de deux communes, et donc l'aspect de recherche appliquée, intéressait les étudiants, par la découverte de pratiques et de vécus professionnels parfois peu accessibles.

Dans un premier temps, il s'est agi d'effectuer une recherche exhaustive, par mots clés, dans les sources textuelles du droit (codes cités ci-dessus), ainsi que dans les articles et les commentaires de doctrine, publiés dans les revues juridiques (essentiellement *Revue Juridique de l'Environnement*, *Droit de l'Environnement*, *Bulletin de Droit de l'Environnement Industriel*, *Revue de Droit Rural*). Ce premier regard a permis d'identifier les corpus juridiques prenant en compte les sols, les projets de textes inaboutis proposant une nouvelle approche plus protectrice des sols, et finalement de mettre en lumière les lacunes des textes de droit positif. Plusieurs mémoires de Master 2 ont été rédigés dans ce sens (**Annexe II-1**).

Dans un second temps, il a été possible d'avancer dans les propositions d'amélioration du droit positif. D'une part, en repérant le degré de maturité des textes sources et en indiquant dans quels codes et à quelle « place » dans ces codes, il serait envisageable d'intégrer des dispositions permettant une meilleure prise en compte du sol en tant que milieu naturel. D'autre part, en élaborant une première rédaction de certains articles « virtuels » qui pourraient constituer le socle d'un nouveau droit des sols. La méthodologie de ces propositions s'appuie autant sur la transposition anticipée du projet de directive européenne sur les sols, que sur l'observation et l'inspiration d'autres branches du droit de l'environnement (notamment le droit de l'eau, qui est le plus abouti), ainsi que sur la capacité des chercheurs d'imaginer un « idéal » du droit des sols.

Cependant, il paraît évident que, devant le blocage politique du projet de directive communautaire sur les sols et devant l'absence de la protection des sols dans le processus de discussion du Grenelle de l'environnement (Lambert-Habib et Schellenberger 2012), une modification prochaine du droit national et du Code de l'environnement dans ce sens paraît peu envisageable. Les juristes s'en sont donc tenus à une proposition d'article unique reconnaissant le sol comme un enjeu, sans rechercher une rédaction aboutie d'un droit des sols cohérent et complet, ce qui n'était pas l'enjeu du présent projet de recherche.

2- Caractérisation de l'occupation des sols des deux territoires

Pour appréhender la « réalité terrain », une caractérisation des territoires des deux communes retenues pour l'étude a été conduite en matière d'occupation et d'usages des sols. Sur le plan méthodologique, ceci s'est décliné en plusieurs opérations :

- Observation *in situ* et lecture des paysages
- Constitution d'une chaîne de traitement de l'information et d'une base de données à références spatiales
- Cartographie diachronique de l'occupation des sols à différentes échelles et analyse des évolutions
- Entretiens auprès des acteurs locaux : élus, agents municipaux en charge de l'urbanisme et du développement économique, agriculteurs
- Etude des documents locaux d'urbanisme

Observation in situ et lecture des paysages

Cette étape correspond à une « prise de contact » directe et concrète avec le terrain. Elle constitue un préalable indispensable à toute étude qui s'inscrit dans le champ de l'évaluation environnementale et qui ambitionne d'établir un dialogue avec les acteurs locaux, dans une perspective d'aide à la décision. Il convient en effet de connaître, reconnaître, nommer et caractériser les lieux, les milieux et les paysages pour les analyser et en discuter avec les acteurs. Il s'agit également de repérer des marqueurs paysagers caractéristiques d'activités en cours ou passées, de détecter des signes avant-coureurs de changements à venir, de conflits d'usages en cours, *etc.* Cette « prise de possession » du terrain s'opère d'abord par l'observation attentive des lieux lors de déplacements sur les sites. Les paysages sont scrutés, pris en photos, décrits. Les observations sont consignées, replacées sur des cartes et éventuellement synthétisées dans des représentations schématiques. Sans atteindre un degré d'approfondissement aussi poussé que dans la démarche préconisée par les maîtres du genre à propos des territoires ruraux notamment (Benoit *et al.*, 2006 ; Deffontaines *et al.*, 2006 ; Deffontaines et Prigent, 1987 ; *etc.*), cette lecture du paysage permet de préparer le diagnostic territorial en constituant une base de connaissances qualitatives. Plusieurs déplacements ont ainsi été effectués et des centaines de photographies ont été prises sur les deux communes.

Constitution d'une chaîne de traitement de l'information et d'une base de données à références spatiales

Simultanément aux observations *in situ*, des données géographiques permettant de décrire les deux communes ont été rassemblées dans une base de données gérée avec un système d'information géographique (SIG). Selon une démarche classique en géomatique, une chaîne de traitement de l'information a été mise en place afin de collecter, organiser, analyser et restituer l'information (**Figure 9**). Cette chaîne de logiciels a constitué le référentiel technique central du projet car, outre la caractérisation des deux territoires d'étude, elle a permis le traitement et la spatialisation des données acquises sur les sols, de proposer une cartographie des potentialités des sols dans une perspective d'aide à la planification et de communiquer les résultats aux acteurs locaux.

Le dispositif technique s'est basé sur le logiciel ArcGIS (ESRI), auquel d'autres outils ont été articulés. Des traitements d'image ont nécessité le recours à Er-Mapper (géo-référencement, mosaïque et compression de cartes anciennes), à Envi (traitement d'images satellites à haute résolution, en vue d'extraire la tâche urbaine), mais également à Adobe Photoshop pour des post-traitements. Le SIG MapInfo a été utilisé pour certains traitements concernant les données de la matrice cadastrale ou pour opérer des transformations de formats. Des liaisons ont été réalisées entre le SIG et des logiciels de gestion de données de type tableur (Microsoft Excel) ou SGBD⁷ (Microsoft Access), utilisés dans le volet spécifique à l'évaluation de la qualité des sols. Enfin, les principaux résultats cartographiques ont été exportés vers un logiciel de dessin assisté par ordinateur (Adobe Illustrator) pour parfaire les documents, en améliorant leur lisibilité graphique par exemple.

⁷ SGBD : Système de Gestion de Base de Données.

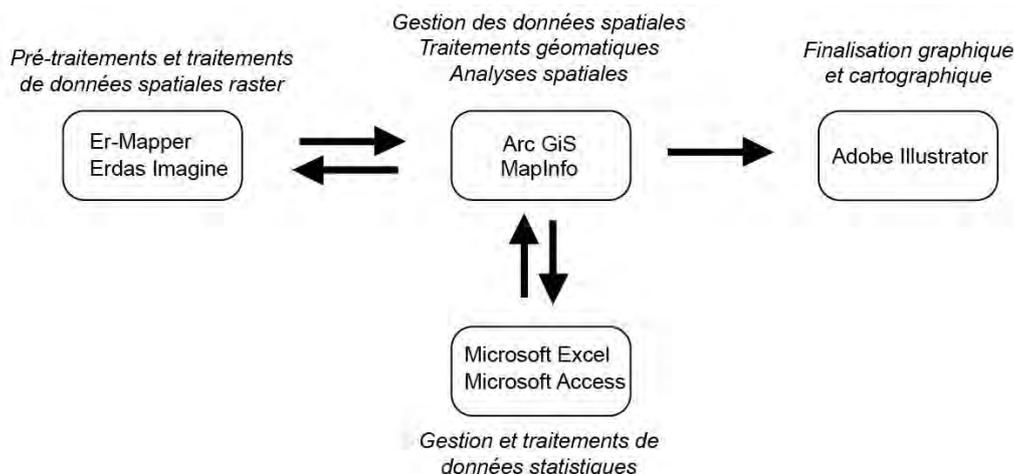


Figure 9 : Chaîne logicielle de traitement de l'information

Issues de différents corpus, les données réunies dans la base ont parfois dû faire l'objet d'une mise en cohérence géométrique. A l'origine en effet, les données récoltées étaient dans des systèmes de référencement spatial distincts : NTF / Lambert 3, NTF / Lambert 2 étendu, WGS84, ou RGF / Lambert93. Par commodité, le jeu de données a été harmonisé dans le référentiel spatial le plus fréquemment rencontré, soit NTF / Lambert 2 étendu.

La construction de la base de données géographique a résulté de quatre types d'opérations :

- l'intégration de données numériques sans traitement : les fichiers étaient dans le bon format logiciel et dans le référencement spatial choisi ;
- l'intégration de données après traitement (numérisation et géo-référencement de données cartographiques « papier » ; changement de format et/ou changement de référencement spatial) ;
- la production de données par numérisation et traitements manuels ;
- la production de données par traitements automatiques.

Compte-tenu des exigences de précision, l'échelle des données collectées a varié entre le 1 : 5 000 et le 1 : 25 000. Pour une part, les données ont été extraites du référentiel numérique national constitué par l'IGN : photographies aériennes, cartes topographiques numériques raster, modèles numériques de terrain, données cartographiques vecteurs. D'autres données issues de l'IGN mais non disponibles au format numérique (cartes topographiques anciennes, par exemple) ont été intégrées après traitements. Il en a été de même pour des données métiers issues d'entreprises et d'organismes locaux comme la Société du Canal de Provence ou les Charbonnages de France. Enfin, des fichiers produits par des organismes publics ou para-publics ont également collectés (parcellaire cadastral informatisé, par exemple). La liste complète de ces données est indiquée dans l'**Annexe II-2**.

Cartographie diachronique de l'occupation des sols à différentes échelles et analyse des évolutions

Dans le but d'établir un diagnostic de l'occupation et des usages des sols, un travail inédit de cartographie a été entrepris à partir de la base de données géographique constituée. Trois opérations ont été menées simultanément.

Dans un premier temps, une mise en perspective sur le temps long (plusieurs décennies) a été entreprise. Pour cela, des cartes topographiques raster de 1935, 1972 et 1999 (**Figure 10**) ont été étudiées afin d'en dériver une cartographie d'occupation des sols compatible avec la nomenclature Corine Land Cover (CLC), considérée comme le standard sur lequel la plupart des volets environnementaux des diagnostics de territoire actuels sont réalisés (voir classes à l'**Annexe II-3**). Les postes de légende et l'implantation des figurés sur les cartes ont été analysés. Un protocole de numérisation manuelle des cartes a ensuite été élaboré afin de produire une cartographie exhaustive

(tout le territoire est couvert) de l'occupation des sols dans les deux communes à chaque date. Comme dans Corine Land Cover, les postes de la nomenclature ont été définis sur une base hiérarchique, permettant une cartographie de niveau 1, de niveau 2 et de niveau 3. Conformément aux cartes sources, la précision géométrique des données produites est bien supérieure à celle des données CLC (1 : 20 000 et 1 : 25 000 contre 1 : 50 000 voire 1 : 100 000). En revanche, la précision thématique est moindre : il n'est pas possible d'identifier autant de postes de niveau 3 que dans CLC. Les données obtenues ont ensuite servi de support à des analyses spatiales descriptives : quantification des superficies consacrées aux principales catégories d'occupation des sols, mesure des variations, mesure de concentration ou de dispersion spatiale, etc. Les cartes ont également permis de rendre compte de l'étalement urbain sur l'ensemble de la période.

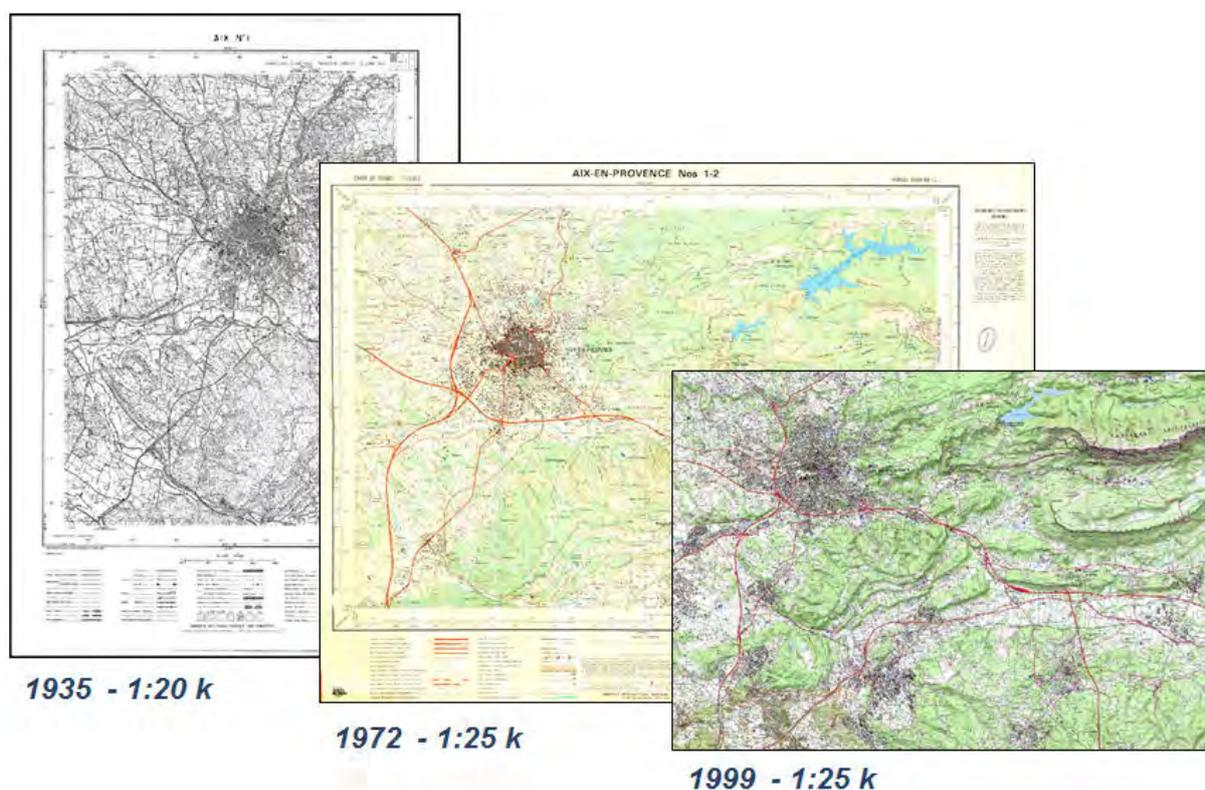


Figure 10 : La zone d'étude à travers trois couvertures topographiques à grande échelle.

Dans un second temps, les travaux se sont portés sur la période la plus récente et ont cherché à fournir une information plus fine, tant sur le plan thématique que sur le plan géométrique. En rapport avec les activités d'un groupe de travail du Centre régional de l'information géographique de la Région Provence Alpes Côte d'Azur (CRIGE PACA), une cartographie à grande échelle de l'occupation des sols a été expérimentée sur les deux communes⁸. Elle a consisté à établir une description fine de l'occupation des sols en suivant une nomenclature – « occupation du sol grande échelle pour l'urbain » : OcsolGeu - proposant un quatrième niveau de détail à la catégorie « Territoires artificialisés » de la classification CLC, qui n'en compte que trois. En procédant par photo-interprétation assistée par ordinateur de photographies aériennes et en se basant sur un protocole précis de numérisation, le photo-interprète procède à la délimitation manuelle de zones homogènes d'occupation des sols en étudiant une image source. Il dessine les contours de ces zones de façon à couvrir la totalité d'une aire déterminée, et ce de manière continue. Cette saisie fait ensuite l'objet d'un contrôle qualité par d'autres photo-interprètes, afin de déboucher sur une cartographie normalisée et validée. Cette cartographie a été menée de façon expérimentale dans la mesure où aucune mise en production sur un vaste périmètre n'avait été tentée jusqu'alors. Elle a permis de produire une carte d'occupation des sols exploitable à l'échelle du 1 : 5 000, autorisant à la fois une description thématique fine des espaces urbanisés (**Annexe II-4**), et une délimitation précise des zones homogènes d'occupation du sol. Initiée à partir de la photographie aérienne de 2003 sur la commune

⁸ Groupe de travail Occupation du sol à grande échelle. Pour plus d'information : URL : <http://www.crig-paca.org/poles-metiers/pole-metier-urbanisme.html>

de Gardanne, la démarche a été reconduite pour 1998 et 2008, après validation. Elle a ensuite été étendue à Rousset. Comme dans le cas de la cartographie réalisée à partir des cartes topographiques, les données produites ont ensuite été analysées avec des opérateurs d'analyse spatiale.

La troisième opération a consisté à développer une cartographie de l'occupation des sols par analyse d'images de télédétection. Basée sur deux images du satellite Quickbird à 60 cm de résolution (chacune ayant un mode panchromatique et un mode multispectral), cette étape a permis de produire une cartographie des états de la surface des sols en utilisant une méthode dite « orientée objet ». Traditionnellement en télédétection, les traitements consistent à caractériser la surface des sols en fonction de leurs propriétés physiques (énergie solaire réfléchie). Ils s'attachent à classer les pixels qui constituent l'image en fonction de leur valeur de réflectance (ou radiométrie) et à extraire des zones plus ou moins homogènes en termes de réponses spectrales. Ceci permet d'aboutir à une cartographie relativement précise de l'occupation des sols à échelle moyenne (1 : 20 000 – 1 : 100 000, images de résolution 10m – 30m), en particulier pour les espaces naturels ou les surfaces en eau. Avec des images à haute résolution, qui restituent plus finement la complexité de l'occupation des sols, ces méthodes se révèlent moins performantes. Elles tendent à « atomiser » la réalité terrain et à produire des résultats difficilement interprétables, notamment pour les espaces urbains (Myint *et al.*, 2011). Un quartier de petites maisons entourées de jardins, complété par quelques immeubles collectifs, est par exemple difficilement identifié par ce genre de méthodes. La méthode « orientée objet », en revanche, se fonde à la fois sur le traitement de la valeur prise par les pixels et sur les agencements de ces mêmes pixels dans l'espace (Bhaskaran *et al.*, 2010). Elle procède par segmentation des images sources et repose assez largement sur la compétence et les arbitrages d'un opérateur qui intervient pour décider des seuils de segmentation et pour procéder à des ajustements par photo-interprétation (Myint *et al.*, 2011 ; Jacquin *et al.*, 2008 ; Sparfel *et al.*, 2008). Elle se révèle plus appropriée pour extraire des zones possédant une hétérogénéité et une complexité interne en termes de radiométrie, mais cohérentes du point de vue de la caractérisation de l'occupation du sol. Complémentaires de la cartographie par photo-interprétation, les données obtenues ne caractérisent pas aussi finement l'occupation des sols sur le plan sémantique (les classes ne renseignent pas sur les usages de l'espace par exemple), mais elles offrent une précision spatiale supérieure. La démarche a été appliquée sur la commune de Gardanne uniquement. Elle a permis de représenter l'occupation des sols en 7 classes (**Annexe II-14**), d'affiner l'appréciation de la tache urbaine en distinguant les espaces effectivement artificialisés (lieux dont la surface n'est pas un sol support de végétation) et de caractériser la variabilité des états de surface à l'intérieur des classes d'occupation du sol déterminées dans la cartographie OcsolGeu. Ces données ont été exploitées dans le volet « Evaluation de la qualité de sols ».

Approche qualitative de la dynamique territoriale et de la gestion des sols (étude des documents locaux d'urbanisme, des pratiques de planification, entretiens, rencontres d'acteurs, etc.)

Simultanément à l'analyse de l'occupation des sols, les deux communes ont été étudiées en ce qui concerne l'appréciation de la problématique « étalement urbain – gestion des sols » par les acteurs locaux et les pratiques locales d'urbanisme et de planification de l'espace.

Dans un premier temps, plusieurs entretiens libres ont permis de recueillir de l'information concernant la gestion de l'espace et des sols. Les thèmes abordés ont porté sur la perception de l'évolution de l'occupation des sols, l'étalement urbain et les efforts pour le contenir, les conflits d'usage de l'espace, le maintien de l'agriculture en zone péri-urbaine, le développement local, la conservation de l'environnement et, *in fine*, la connaissance qualitative des sols. Il s'agissait de rassembler des éléments de cadrage pour replacer la problématique centrale du projet dans son contexte territorial. Cette première vague d'entretiens a concerné :

- des responsables élus : les maires et les élus municipaux en charge de l'urbanisme et du développement économique dans les deux communes,
- des techniciens municipaux en charge de l'urbanisme et du développement économique dans les deux communes,
- des chargés d'étude au Conseil Général des Bouches-du-Rhône : développement économique, planification de l'espace

- des responsables, chargés d'étude et techniciens œuvrant dans le domaine du développement rural et/ou agricole : Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, Société du Canal de Provence, ADEAR 13 (Association pour le développement de l'emploi agricole et rural des Bouches du Rhône), Lycée agricole de Valabre.

Dans un second temps, des entretiens plus ciblés ont été menés auprès des acteurs les plus à même d'avoir un discours sur le sol, du fait de leurs responsabilités ou de leurs activités. Les points abordés ont été la connaissance de la qualité des sols, sa prise en compte éventuelle dans l'élaboration actuelle de la planification spatiale et l'intérêt d'une réflexion sur la possibilité de l'intégrer dans la planification de l'espace et la gestion de l'environnement. Ces entretiens ont eu lieu avec :

- les techniciens municipaux en charge de l'urbanisme dans les deux communes,
- des chargés d'étude et techniciens œuvrant dans le domaine de l'ingénierie territoriale : CETE Méditerranée
- des responsables, chargés d'étude et techniciens œuvrant dans le domaine du développement rural et/ou agricole : Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, Société du Canal de Provence,
- des agriculteurs de Gardanne.

En complément de ces entretiens, les documents réglementaires ainsi que les documents de communication produits par les collectivités locales en matière d'urbanisme et de gestion de l'environnement ont été étudiés. Dans les deux communes, les projets de développement et d'aménagement durable (PADD), les plans locaux d'urbanisme (PLU), et les anciens plans d'occupation des sols (POS) ont été analysés (règlements et zonages d'urbanisme). A ces documents, se sont ajoutés la Charte de l'environnement de Gardanne, la Directive Territoriale d'Aménagement des Bouches-du-Rhône, le Schéma de Cohérence Territoriale du pays d'Aix. Leur étude a consisté à repérer les priorités locales relatives à l'aménagement de l'espace et à l'environnement, à rechercher les éventuelles préoccupations et/ou initiatives relatives à la conservation et à la gestion des sols, et à identifier les possibilités d'introduire des dispositions innovantes concernant la prise en compte d'une connaissance qualitative des sols. Parallèlement, les zonages des PLU récupérés à cette occasion ont été numérisés manuellement avec le SIG et intégrés à la base de données géographiques, en vue d'une exploitation ultérieure.

3- Evaluation de la qualité des sols et définition d'un indice d'adéquation usages / qualité des sols

Objectif majeur du projet, l'évaluation de la qualité des sols dans les deux communes en vue rendre possible sa prise en compte dans les politiques locales d'urbanisme a impliqué le développement d'une recherche à plusieurs facettes. Dès le départ, l'idée retenue était de concevoir un indice de qualité des sols simple de compréhension et d'utilisation pour les acteurs publics. La conception de cet indice, que l'on peut assimiler à un « outil », constituait donc le cœur de la démarche plus que l'indice lui-même. Pour les sciences du sol, il est alors apparu que les données et connaissances à disposition, de même que la volonté de valider l'outil sur les communes de Gardanne et Rousset en utilisant les données les plus fiables possibles, impliquait des recherches en amont de la création de l'indice. Ces travaux, qui ont été pour partie seulement financés par le programme GESSOL, sont retranscrits ici car ils apparaissent à nos yeux comme faisant partie intégrante du projet. Ceux qui ont bénéficié tout ou partie d'un financement autre que GESSOL sont identifiés par (*). In fine, la démarche suivie s'est déclinée sur trois niveaux :

- une réflexion sur la notion d'indice de qualité des sols et la méthodologie de construction de l'indice ;
- une réflexion sur les données nécessaires à une bonne connaissance de l'état des sols et l'établissement de procédures et de méthodologies originales afin d'acquérir l'information si nécessaire ;
- la construction d'un indice de qualité des sols

La notion de qualité des sols

Préalable indispensable à toute démarche scientifique, un état de l'art a été réalisé sur la notion de qualité des sols et les indices de qualité des sols (IQS). Les aspects conceptuels et méthodologiques développés dans la littérature ont été analysés en vue de définir le cadre de référence dans lequel il convenait de s'inscrire et, éventuellement, d'identifier une méthodologie transposable à la problématique du projet.

La revue de littérature a porté sur la période 1987-2012 et inclut la consultation d'environ 150 articles traitant d'indice de qualité des sols, issus de recherches effectuées au moyen des moteurs de recherche classiques, y compris le Web of Knowledge. La liste des revues ayant publié ces articles est détaillée à l'**Annexe II-5**. Il s'agit essentiellement de journaux dédiés à la science du sol, à l'agronomie et aux sciences de l'environnement et de sa gestion, selon l'objectif affiché pour l'utilisation de l'indice.

De cet état de l'art (détaillé en **Annexe II-6**), il ressort que la construction d'un indice de qualité des sols (IQS) utilisable en tout lieu, quel que soit la finalité et l'échelle d'application, est illusoire en l'état actuel des connaissances. D'une part, il n'existe pas d'indice universel applicable à tout contexte. En conséquence, les indices de qualité des sols sont multiples et utilisent des méthodes et des données d'entrée différentes selon l'utilisation que l'on veut en faire. Ces indices ont à la fois pour objectif de quantifier cette qualité des sols et de la formuler en une information synthétique de l'état des sols. Leur mise en œuvre est donc confrontée à la difficulté de rendre compte de la complexité du sol à travers un seul indice et parfois une seule valeur. D'autre part, les diverses méthodes développées s'intéressent pour l'essentiel à des sols à usage agricole. Peu sont dédiées à l'aménagement du territoire, permettant d'identifier les zones les plus à même de recevoir un futur usage (ex. : Vrščaj *et al.*, 2008). La raison est à rechercher d'une part probablement dans la complexité de l'évaluation, qui croît lorsque la variabilité du milieu augmente, et d'autre part dans une méconnaissance de la nature des sols en zone non agricole ou forestière, pour lesquels il serait peut-être opportun et pertinent d'intégrer pour leur description et évaluation des paramètres géographiques ou socio-économiques.

Ainsi il reste encore une marge de manœuvre dans l'amélioration de l'adéquation des IQS à leur application. Il apparaît en particulier évident que la prise en compte de la qualité des sols dans les aménagements et la gestion des sols hors contexte agricole implique des IQS adaptés et probablement plus polyvalents. Ainsi, le caractère générique d'un tel indice pourrait sans doute passer par un indice méthodologiquement robuste mais modulable en termes d'usages, de types de sols et d'échelles d'étude. Dans le cadre d'UQUALISOL-ZU, il était nécessaire d'inclure toutes les occupations de sols et/ou types de sols, c'est-à-dire toutes les surfaces possédant des parties non imperméabilisées. Nous avons donc fait le choix de nous orienter vers la conception d'un indice orienté usage des sols et basé sur les fonctions remplies par le sol pour chacun des usages identifiés dans l'espace géographique. Cette approche a l'avantage d'être facilement appréhendable par les décideurs.

Des remarques précédentes et de la revue de littérature, il ressort que l'idée d'un indice « absolu » de qualité des sols est irréaliste et qu'un indice de qualité environnementale tel que proposé par Vrščaj *et al.*, (2008) n'est pas pertinent pour l'utilisation que l'on désire en faire (utilisation dans le cadre de projets d'urbanisme) ni pour le public ciblé par cet indice (décideurs publics, éventuellement bureaux d'étude en charge de la mise en place de la planification urbaine).

Identification des données nécessaires à l'élaboration d'un indice de qualité des sols adapté au projet

La construction d'un indice de qualité des sols, quel qu'il soit, nécessite l'utilisation de paramètres décrivant le sol et permettant de décrire les fonctions du sol. On admet que l'on peut appréhender les fonctions avec un nombre de paramètres plus ou moins grand selon la précision que l'on veut donner à la caractérisation. Bien qu'une réflexion ait été menée sur le nombre minimal acceptable de paramètres à utiliser et l'impact d'une réduction des paramètres à disposition sur la validité de l'indice, nous avons choisi dans une première étape de ne pas nous contraindre afin d'avoir un indice aussi

robuste que possible. En effet, comme mentionné précédemment, il nous fallait rendre compte de milieux très divers pour lesquels le niveau des connaissances n'est pas équivalent (sols agricoles versus sols urbains). Ceci nous a conduit à établir l'inventaire des données à disposition sur les deux terrains d'étude, puis à procéder à l'acquisition d'un jeu de données supplémentaire afin de pouvoir nous appuyer dans un premier temps sur une large palette de descripteurs sans préjuger des paramètres les plus pertinents.

b1. Inventaire des données à disposition : délimitation, nature des paramètres, échelle à laquelle est fournie la donnée, fiabilité de la donnée et accessibilité.

Un inventaire des documents à disposition nous a permis d'identifier les données disponibles sur les deux communes, à savoir :

- carte géologique 1 : 50 000 (substrat géologique ou matériau parental du sol) ;
- modèle numérique de terrain (pente, réseau hydrographique, hydromorphie) ;
- « Etude pédologique moyennement détaillée des secteurs Puylobier-Pourrières-Pourcieux » (1 : 20 000), septembre 1970, Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale (Carte pédologique de la haute vallée de l'Arc : unités de sol et caractéristiques physico-chimiques moyennes par unité) - commune de Rousset uniquement ;
- « Etude pédologique du périmètre de la Haute vallée de l'Arc (Trets-Peynier-Rousset-Châteauneuf-le-Rouge-Fuveau-Meyreuil) » (1 : 10 000), juillet 1958, Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale (SCP) (carte des textures destinée à définir les potentialités d'irrigation) (commune de Rousset uniquement) ;
- Fiches de terrain avec analyse (ayant servi de base à l'élaboration de la carte au 1 : 20 000) ;
- Cartes d'aptitude des sols à l'assainissement non collectif réalisées par les communes (perméabilité).

Toutes les cartes étaient sur support papier et ont été numérisées préalablement à leur utilisation avec le SIG. De cet inventaire, il ressort que la connaissance du territoire physique est partielle et inégale lorsque l'on compare les deux communes : Gardanne ne possède aucune information sur les caractéristiques de ses sols et il existe sur Rousset 2 cartes couvrant partiellement le territoire communal. Les deux communes sont couvertes entièrement par la carte géologique et le MNT. Les cartes pédologiques n'étaient pas connues des services communaux et étaient consultables uniquement à la SCP (qui nous les a fournies gracieusement). Il n'existe pas à notre connaissance d'analyses ponctuelles de sols.

b2. Acquisition sur le terrain de données complémentaires

Les données existantes et disponibles sur les deux sites d'étude ont donc dû être complétées. Cet apport de données nouvelles a nécessité un ensemble d'opérations qui sont décrites ci-dessous (avec renvoi aux Annexes pour les éléments de détail).

b2.1. Acquisition de données de terrain

La campagne de terrain a rempli plusieurs objectifs : acquérir des informations sur les types de sols de la commune de Gardanne pour laquelle il n'existe pas de carte des sols ; prélever des échantillons pour effectuer des analyses physico-chimiques, microbiologiques et physiques détaillées, complémentaires ou non des données existantes ; acquérir des informations de nature et de précision comparables sur l'ensemble des deux territoires communaux, en particulier sur les horizons de surface ; vérifier les états de surface identifiés par photo-interprétation.

Nombre et localisation des sites échantillonnés

Le nombre de points d'échantillonnage (environ 50 par commune), ainsi que le nombre d'horizons analysés, sont un compromis entre la nécessité d'acquérir des informations et le coût - monétaire et en temps - de cette acquisition. Le choix des points a été guidé par le souci d'avoir des sites représentatifs de l'ensemble des types de sols potentiels et de l'occupation des sols des communes. Les sols présentent une grande variabilité spatiale, en particulier en milieu urbain, en relation avec la variabilité des facteurs ayant déterminé leur formation. Un échantillonnage exhaustif des sols à l'échelle de la commune devient par conséquent un objectif difficile à atteindre. Ainsi, une méthode d'échantillonnage de type stratifié est privilégiée, plutôt qu'une méthode dirigée ou systématique. Elle

consiste à subdiviser la zone en secteurs homogènes, appelés strates et d'affecter un même nombre d'échantillon à chaque strate. L'intérêt de cette méthode est que la stratification est faite selon les variables ayant la plus grande incidence sur les éléments étudiés, ce qui oriente l'échantillonnage et permet de réduire le nombre d'échantillon nécessaire. Les strates sont définies à partir des facteurs de la pédogénèse sélectionnés comme ayant un effet significatif à l'échelle de la commune, pour des sols aussi divers que des sols forestiers, agricoles ou urbain. Il s'agit de la lithologie de la roche mère, du relief, par l'intermédiaire de l'intensité de la pente et de l'occupation du sol car nous avons émis l'hypothèse (qui devra d'être vérifiée) d'un lien entre l'occupation d'un sol et les caractéristiques de ce sol. Le détail de la méthode pour la production d'un plan d'échantillonnage est présenté en **Annexe XII-7**.

Pour Rousset, une carte des sols au 1 : 20 000 existait sur une partie du territoire et une carte des textures au 1 : 10 000 sur une autre partie. Ces informations ont été utilisées pour valider le plan d'échantillonnage et les données acquises. Une fois les zones d'échantillonnage identifiées, les points exacts d'échantillonnage ont été choisis en fonction des autorisations liées au passage des réseaux divers et en fonction de la réalité de terrain et de l'accessibilité (autorisation préalable du locataire ou du propriétaire). Certaines zones n'ont pas pu être échantillonnées pour cause de refus des propriétaires (en particulier les sites de Rio Tinto à Gardanne). Les cartes de la **Figure 11** indiquent la localisation des points finalement échantillonnés et la nature de l'occupation du sol associée.

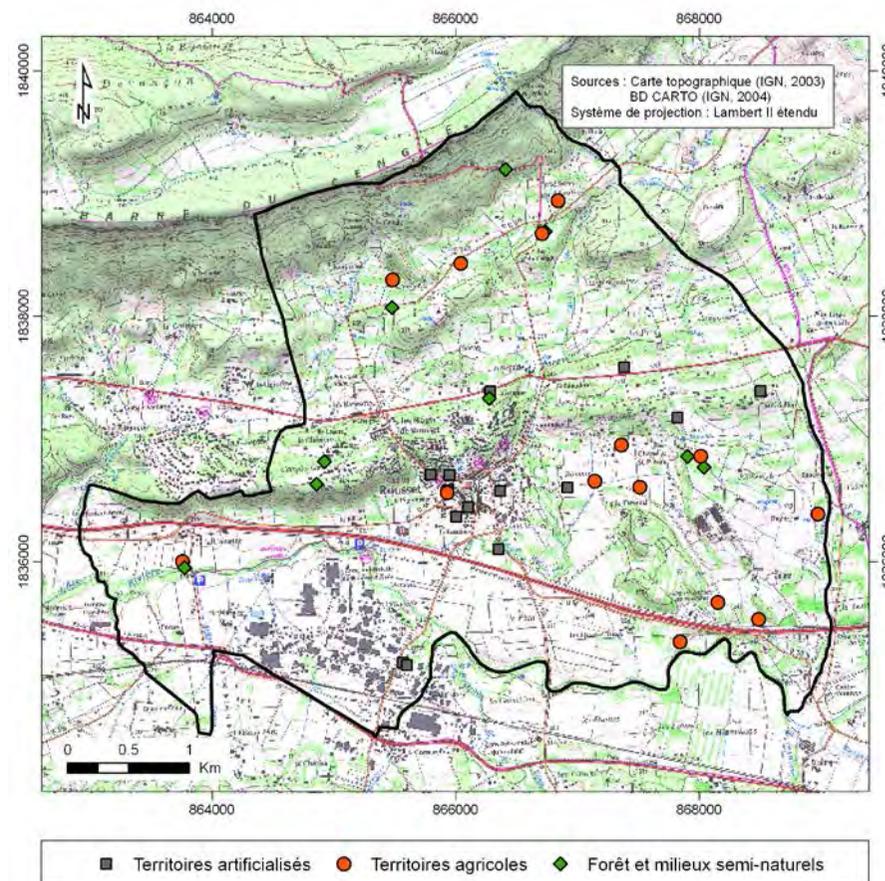
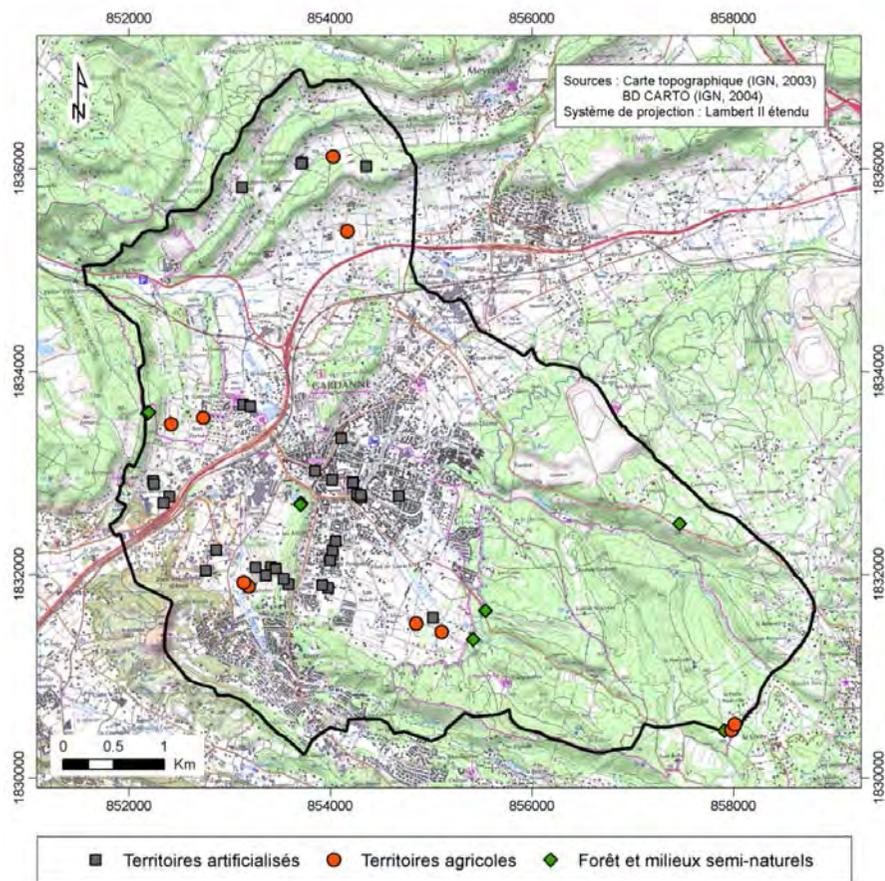


Figure 11 : Localisation des points d'échantillonnage à Gardanne (à gauche) et à Rousset (à droite)

Choix des paramètres mesurés

A partir de la bibliographie sur les indices et les sols urbains, nous avons relevé que les indices, souvent orientés utilisateurs, ne prennent généralement en compte que quelques paramètres ayant une signification pour l'utilisation envisagée. Or nous envisageons un indice applicable à tous les sols. Nous avons relevé également que les sols urbains et péri-urbains ne sont généralement pas cartographiés, même dans le cas où il existe une carte de sols. Or ces sols sont potentiellement soumis à des atteintes physiques, biologiques et chimiques plus importantes que les sols agricoles ou forestiers et ont probablement des caractéristiques différentes de ces derniers. Ils doivent donc être caractérisés au même titre que les autres. Pour toutes ces raisons, il est apparu important de prendre en compte le plus grand nombre de caractéristiques raisonnablement accessibles pour décrire les sols afin de ne pas préjuger des paramètres discriminants. Cela a conduit à proposer un large spectre de paramètres à analyser. Toutes ces informations ont été utilisées afin de comprendre individuellement l'historique de chaque sol et, dans un second temps, pour procéder à des généralisations pour la conception de l'indice de qualité.

Nous présentons ci-dessous la liste des paramètres mesurés. Les **Annexes II-8** et **II-9** apportent la justification du choix de chacun des paramètres et précisent sur quels horizons ces mesures ont été effectuées, ainsi que les méthodes de mesures et le calcul des paramètres dérivés utilisés pour caractériser les sols.

Description morphologique du profil de sol effectuée à partir d'un sondage à la tarière.

Caractérisation physique : essai au pénétromètre dynamique afin de déterminer la résistance du sol.

Caractérisation physico-chimique complète classique pour les sols agricoles et forestiers complétée de paramètres plus appropriés pour les sols en zones urbaine et péri-urbaine.

- granulométrie (texture : teneurs en argiles (%A), sables (%S), limons (%L)),
- pH_{eau},
- azote total, phosphore total,
- carbone organique total (%Corg) ou teneur en matière organique (%MO = 1.72 %Corg),
- capacité d'échange cationique (CEC, capacité de fixation des éléments),
- teneur en carbonates (CaCO₃),
- susceptibilité magnétique,
- humidité (teneur en eau),

Caractérisation de la contamination des sols avec les teneurs totales en éléments traces métalliques.

Caractérisation microbiologique des sols.

- respiration basale (respiration par incubation),
- activité enzymatique globale (FDA),
- diversité fonctionnelle (évaluation de la diversité des fonctions microbiennes de dégradation de la matière organique à partir du kit BIOLOG).

b.3. Traitement et utilisation des données nouvellement acquises - préalablement à la construction de l'indice

Nous avons choisi d'interpréter les données globalement, même si une interprétation à l'échelle du profil et par paramètre pouvait être envisagée. Il nous a en effet semblé plus judicieux de réfléchir à une interprétation qui nous permettrait de dégager des tendances quant aux liens entre caractéristiques des sols et occupation du sol dans le contexte d'un projet.

Ainsi, nous avons tout d'abord brièvement **décrit le jeu de données** obtenu et situé les résultats en termes de similitudes par rapport à ce que nous connaissons des sols de la région (voir chapitre résultats et annexes associées). Ensuite, nous avons évalué dans quelle mesure, les caractéristiques actuelles des sols sont le résultat et/ou la raison de l'occupation actuelle du sol. Nous avons donc vérifié l'hypothèse d'une relation de causalité entre caractéristiques et occupation des sols. Pour ce faire, **une typologie des sols** a été réalisée à l'aide d'un traitement statistique (**Figure 12**). Elle consiste à regrouper les sols, de manière objective, en classes de caractéristiques similaires. La démarche complète ainsi que les résultats obtenus et leur interprétation sont présentés en **Annexe II-10**. Dans un troisième temps nous avons proposé un **indice de polyvalence d'usage** (voir § construction de l'indice) intégrant les paramètres dérivés des données existantes ou nouvellement acquises pour la caractérisation des fonctions du sol.

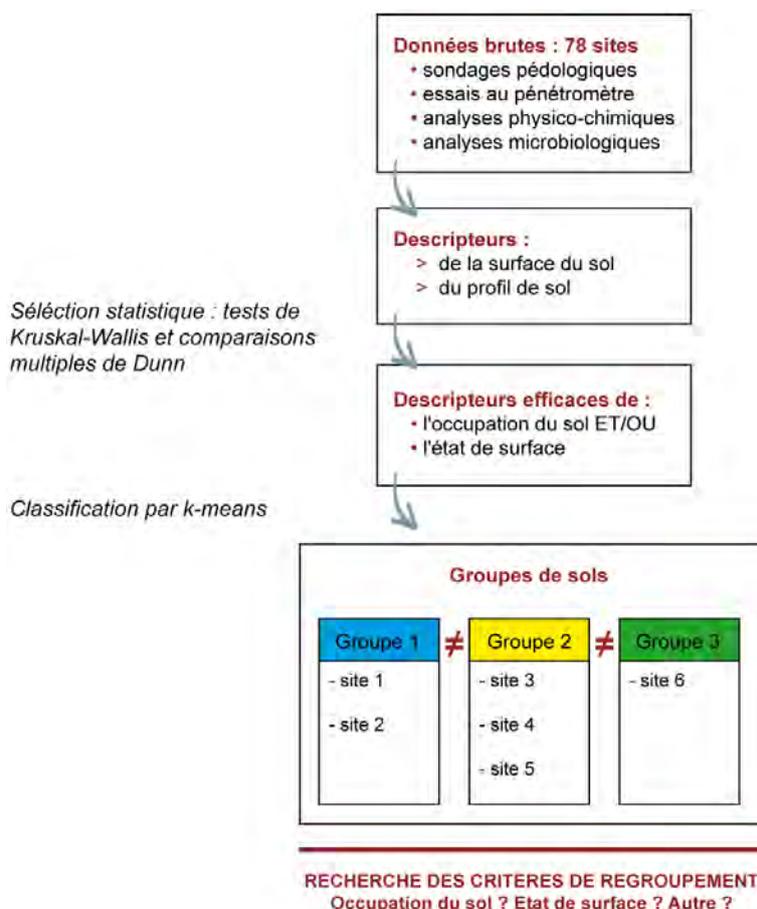


Figure 12 : Traitement statistique employé pour l’élaboration de la typologie des sols.

La carte des sols, complétée des données nouvellement acquises, a pu être utilisée directement pour le calcul de l'indice d'adéquation sol/usage du sol dans le cas de la commune de Rousset. Dans le cas de Gardanne, les données issues de la campagne de terrain ont été les seules données d'entrée disponibles. Or, pour la construction d'un indice d'adéquation sol/usage du sol les paramètres physiques, chimiques et microbiologiques mesurés ponctuellement doivent pouvoir être associés à une emprise surfacique, afin de fournir un résultat sous forme cartographique. Pour Gardanne, il a donc été nécessaire de concevoir une démarche permettant de spatialiser des données de sols à partir des informations à disposition et prédire les paramètres du sol à l'aide de méthodes de cartographie numérique.

La similitude des environnements géomorphologiques et des caractéristiques des facteurs de la pédogénèse des sols (climat, lithologie, topographie, végétation, type d'agriculture) sur les deux communes nous a conduit à utiliser d'une part les sondages effectués dans le cadre de cette étude et d'autre part les fonctions de pédotransfert calculées sur la commune de Rousset. Ainsi l'idée a donc été de déterminer les facteurs responsables des valeurs de paramètres du sol relevées à Rousset et, en fonction de l'existence et de l'intensité de ces facteurs à Gardanne, les valeurs de paramètres du sol mesurées à Rousset lui ont été transférées. Rousset a constitué ainsi une « zone d'apprentissage », permettant la production d'une **cartographie numérique** des sols de Gardanne, à l'aide de variables auxiliaires. Cette étape a été un préalable indispensable à la construction d'un indice spatialisé sur la commune de Gardanne. La démarche complète est présentée en **Annexe II-11**.

b.4. Traitement des données nouvellement acquises

Simultanément à la démarche décrite ci-dessus, divers traitements de données nouvellement acquises ont été effectués afin d'affiner des méthodologies en développement et/ou de comprendre des résultats qui ne sont pas encore couramment proposés pour la caractérisation des sols et pour lesquels nous n'avons pas de références solides pour servir de base à leur interprétation. Il s'agit des données de pénétrométrie, des plaques Biolog et de la susceptibilité magnétique.

b.4.1. Tests de préparation des échantillons pour l'application de la technique des plaques Biolog ()*

Ce travail méthodologique a fait l'objet d'un financement par l'OHM-BMP. Dans le but d'améliorer la description des sols de la zone urbaine et péri-urbaine et, éventuellement, permettre la mise en évidence de caractéristiques particulières à ces sols, nous avons choisi d'inclure dans les paramètres descriptifs de l'indice, un panel de paramètres microbiologiques (voir ci-dessus, choix des paramètres mesurés). Dans le cadre d'un échantillonnage de grande ampleur, il faut préciser qu'il n'est pas toujours possible de procéder selon les standards habituels et il faut s'attendre à une très grande hétérogénéité des échantillons d'un point de vue microbiologique. Par ailleurs, il y a très peu d'information concernant l'impact des protocoles de traitement des échantillons sur les résultats. De plus ces protocoles doivent pouvoir permettre de traiter tous les types d'échantillons aussi différents soient-ils. En conséquence, ce volet doit être considéré comme exploratoire. Au terme d'un an de travail, il est apparu nécessaire de mener une réflexion plus approfondie sur les protocoles appliqués pour la mesure des paramètres microbiologiques.

Parmi les méthodes disponibles, la biomasse microbienne et la diversité fonctionnelle bactérienne ont été choisies pour procéder à des tests de validation. L'étude avait donc pour but d'évaluer d'une part l'impact du conditionnement des échantillons sur les résultats de respirométrie (biomasse microbienne) et d'autre part la possibilité d'utiliser les résultats de respirométrie pour normaliser le test BIOLOG (diversité fonctionnelle bactérienne). L'ensemble des résultats devait permettre de fournir des pistes pour le choix d'indicateurs discriminants des sols des zones urbaine et péri-urbaine.

Le détail des tests effectués ainsi que les protocoles appliqués et les échantillons soumis aux différents traitements sont présentés en **Annexe II-12**. Les résultats obtenus (également présentés dans l'**Annexe II-12**) ont permis de justifier et valider les données utilisées dans l'indice.

b.4.2. Données de pénétrométrie

Des essais au pénétromètre dynamique ont été effectués sur l'ensemble des points échantillonnés. Les conditions de mesure étaient tributaires des conditions météorologiques et il n'a été procédé à des ajustements de type humidification du profil. Ce genre de travail a été très effectué de manière systématique sur l'ensemble du territoire et constitue donc une expérience en elle-même permettant d'évaluer la pertinence des paramètres dérivés. Comme il s'agit, contrairement aux autres analyses de sols, d'une information portant sur l'ensemble du profil, il a fallu rechercher les paramètres dérivés les plus pertinents pour la caractérisation à la fois de la couche supérieure mais également de l'ensemble du profil ou de couches remarquables à l'intérieur de ce profil. On a donc construit un profil global de résistance, tel que présenté dans les fiches de restitution aux propriétaires (un exemple est présenté en **Annexe II-15**), et des paramètres dérivés ont été utilisés dans la construction de la typologie des sols d'une part et de l'indice d'autre part. Ces paramètres ont été repris de la littérature ou spécifiquement calculés. Ils sont listés dans l'**Annexe II-8**.

b.4.3. Relation entre susceptibilité magnétique et caractéristiques du sol ()*

La susceptibilité magnétique a été mesurée sur le premier jeu de données acquis sur la commune de Gardanne. Les résultats étant délicats à interpréter, il a été décidé de procéder à une étude plus fine des déterminants de ce paramètre sur un nombre restreint d'échantillons. Ce travail a fait l'objet d'un travail de master 1 spécialité Géosystèmes (C. Kimbangui), et en collaboration avec Pierre-Etienne Mathé du CEREGE. Les résultats n'ont pas permis de conclure que la susceptibilité magnétique contribuait de manière significative à une meilleure caractérisation des sols.

Construction de l'indice

A la suite des échanges avec les acteurs locaux, de l'analyse des documents d'urbanisme et à la lumière d'une analyse bibliographique des méthodes de conception d'indices de qualité des sols, des décisions sur la forme de l'indice ont été prises. Nous nous sommes orientés vers une évaluation non pas de la qualité « absolue » des sols, ce qui aurait été illusoire et non directement utilisable par des décideurs, mais plutôt de la multifonctionnalité des sols (Nortcliff, 2002) selon les différents **usages**

possibles (Pierce et Larson, 1993) à une échelle communale. Les zones définies dans un PLU se réfèrent en effet à l'utilisation effective ou envisagée du sol (ZA, ZN, etc.), lui attribuant de ce fait un usage particulier (ou principal). Il nous a semblé pertinent d'y ajouter l'idée de multiplicité d'usage (potentielle ou effective) permettant d'élargir l'indice à l'évaluation des potentialités d'un sol dans un contexte évolutif d'aménagement du territoire (modification du PLU par exemple).

Cette méthode se veut donc avant tout flexible et a été pensée de manière à ce que chaque niveau de la conception de l'indice puisse être adapté selon le contexte géographique, les moyens humains et financiers pouvant être mis en œuvre et les objectifs de l'évaluation.

c.1. Particularités de l'indice

Par comparaison avec les indices existant à l'heure actuelle, trois particularités de l'indice développé dans cette étude peuvent être dégagées :

- 1) Intégration de la notion d'usage du sol ;
- 2) Raisonnement « naturaliste », par la notion de facteur limitant ;
- 3) Signification de l'indice améliorée par la notion de nombre de fonctions satisfaites et de polyvalence d'usages.

Les objectifs de l'étude conduisent à envisager les différents usages des sols pouvant coexister à une échelle communale et excluent de ne considérer que les seuls usages agricoles. Les usages sont décrits en fonction de leur pertinence au niveau pédologique et de leur signification pour les planificateurs. Un *optimum data set*, listant les paramètres du sol à utiliser, est établi par expertise. Il n'est pas utilisé pour caractériser la qualité globale du sol, comme cela est fait dans de nombreuses études, mais pour caractériser un certain nombre de fonctions remplies par le sol. Ainsi, afin de pouvoir représenter la multifonctionnalité requise pour un bon fonctionnement du sol, le résultat est donné sous la forme d'un nombre de fonctions satisfaites et d'une polyvalence d'usages. Enfin, l'indice est fondé sur la notion de facteur limitant, afin de mettre en avant les potentialités d'un sol à accueillir ou non un usage. Identifier un ou plusieurs facteurs limitant permet par ailleurs de réfléchir à d'éventuelles stratégies d'amélioration. La démarche s'inspire pour partie de l'indice SEQ-Eau pour l'évaluation de la qualité des cours d'eau en France.

c.2. Présentation générale de la construction de l'indice

La construction de l'**indice d'adéquation d'usage des sols** est basée sur un système de trois grilles et est détaillée en **Annexe II-13**.

L'indice a été élaboré sur la base de six grands thèmes, correspondant chacun à une fonction :

- Circulation et rétention de l'eau,
- Rétention et cycle des nutriments,
- Stabilité physique et support,
- Biodiversité,
- Filtration et pouvoir tampon,
- Patrimoine pédologique (non pris en compte sur nos communes-test)⁹.

On peut souligner que ces fonctions sont similaires à celles listées dans la Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil (COM, 2006). Pour chaque fonction, on a établi par expertise un jeu optimum de paramètres à mesurer (**optimum data set**) afin de caractériser ladite fonction. Le choix des paramètres a été fait à la fois sur une base scientifique et en fonction de l'accessibilité de la donnée. Par exemple, pour la fonction « circulation et rétention de l'eau », les paramètres déterminants sont la réserve utile en eau, la perméabilité et le degré d'hydromorphie¹⁰ (Lozet et Mathieu, 1990). Dans le cadre de l'étude, les valeurs disponibles pour ces paramètres étaient de qualité inégale dans les deux communes, voire inexistantes pour Gardanne. Les données nécessaires - optimum data set - ont donc été obtenues par le croisement de données environnementales connues (carte géologique, modèle numérique de terrain, etc..) - pour Gardanne, de données dérivées par similitude avec la carte pédologique de Rousset- et de prospection de terrain. Dans un souci de simplification, ces traitements préalables de l'information ne sont pas présentés ici.

⁹ La fonction patrimoine pédologique implique qu'il existe sur la commune des unités de sols caractéristiques ne représentant pas plus de 10% de la surface totale de la commune. Ce type d'unités n'a pas été identifié à Gardanne et Rousset.

¹⁰ Le «degré d'hydromorphie» est une caractéristique des sols servant par ailleurs de référence pour la définition et la délimitation des zones humides (arrêté modifié du 01/06/2008) en l'absence de végétation « marqueur ».

Pour l'évaluation des fonctions des sols retenues pour la construction de l'indice, le « jeu optimal de données » comprend les paramètres suivants : réserve utile en eau, présence d'hydromorphie, teneur en matière organique, CEC, pH, profondeur du sol, pente, état de surface, érodibilité, résistance à la pénétration et respiration microbienne. Cependant, un jeu réduit de données a aussi été testé. Il reprend les mêmes paramètres que précédemment à l'exclusion de l'érodibilité, la résistance à la pénétration et la respiration microbienne. Les paramètres restant sont facilement extraits de cartes des sols préexistantes. Nous avons donc tenté d'évaluer la perte d'information (et de précision) liée à une réduction des paramètres utilisés. Les résultats et la discussion sur cet aspect sont présentés dans la partie perspective du rapport. Dans les deux cas, le statut de la contamination n'a pas été intégré car il ne discriminait pas les sols (pas de contamination mise en évidence par les sondages effectués). La conductivité électrique, indicatrice du degré de salinisation des sols n'a pas été intégrée non plus car elle était sans objet dans les cas de Gardanne et Rousset.

Les différents usages n'ont pas la même exigence vis-à-vis des paramètres du sol. De ce fait, il convient de vérifier si chacun des paramètres présente une valeur acceptable ou non (seuil) selon l'usage considéré. Pour cela, les paramètres du sol sont confrontés à une **grille d'adéquation (Tableau 22 de l'Annexe II-13)** définissant ces valeurs seuil en fonction de l'usage. Selon le résultat, le paramètre est dit en adéquation ou en non-adéquation avec l'usage considéré. Enfin, l'indice étant fondé sur la notion de facteur limitant, si au moins un des paramètres décrivant une fonction est en non-adéquation, la fonction n'est pas satisfaite, même si les autres paramètres présentent des valeurs adéquates.

Afin de représenter la multifonctionnalité requise pour le bon fonctionnement d'un sol, le résultat est fourni sous la forme d'un nombre de fonctions satisfaites (maximum 5 dans notre cas) pour chaque usage (**Tableau 3**). Une liste hiérarchique des usages a été établie à cet effet. Bien que les deux premiers niveaux s'inspirent des termes de la nomenclature Corine Land Cover, ils ont dû être adaptés pour être pertinents et compatibles avec une étude sur la qualité des sols. Le dernier niveau correspond à différentes utilisations du sol rassemblées d'après leur état de surface. Ce type d'énumération permet au planificateur une bonne image des potentialités du sol en fonction de son utilisation. Le résultat est donc une évaluation de l'adéquation des sols pour chacun des usages identifiés (au nombre de 9) sur le territoire d'étude. Ensuite, il est possible d'additionner le nombre total de fonctions satisfaites pour tous les usages, créant ainsi un **indice de polyvalence d'usage des sols (voir aussi Annexe II-13)**.

Tableau 3 : Nomenclature des usages pris en compte dans l'élaboration de l'indice d'adéquation d'usage du sol.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Territoires agricoles		Cultures annuelles, prairies temporaires
		Cultures permanentes
Forêts et milieux semi-naturels		Forêts
		Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
Zones humides		Zones humides intérieures et maritimes
Territoires artificialisés	Zones urbanisées	Places, cours, parkings, voies de communication, équipements sportifs et de loisirs artificialisés
		Jardins d'agrément, équipements sportifs et de loisirs non artificialisés, plates-bandes
		Jardins potagers et familiaux
		Jardins et assainissement non collectif
	Zones industrielles et commerciales	Places, cours, parkings, voies de communication, surfaces techniques
		Jardins d'agrément, plates-bandes

Les deux premiers niveaux s'inspirent de la nomenclature européenne de l'occupation du sol Corine Land Cover. Le dernier niveau correspond à différentes utilisations du sol rassemblées d'après leur état de surface.

Rappelons que nous avons travaillé sur la base de données constituant un « *optimum data set* » et que ce jeu de données a été pour partie acquis en toute connaissance de cause, et spécifiquement pour cette étude. La possibilité de réduire le nombre de parcellaires et/ou de points de mesure constitue pour nous la base d'une réflexion que nous avons menée dans le cadre des ouvertures offertes par le projet et des axes de recherche prospectifs. Cet aspect est donc traité dans la discussion et les conclusions du projet.

c.3. Spatialisation de l'indice

L'indice d'adéquation des sols et l'indice de polyvalence peuvent tous les deux être spatialisés par unités élémentaires de caractérisation du sol (pixel), par unités de sol ou par zones de planification d'usage du sol telles que définies dans le PLU. Cela permet ainsi de visualiser les potentialités du patrimoine sol de la commune et de les confronter aux choix d'urbanisme identifiés dans les PLU de Gardanne et Rousset.

Il avait été initialement proposé de valider en retour les informations obtenues et spatialisées par un retour sur le terrain. Cet aspect n'a pas pu être mené à bien par manque de temps et de moyens (cette phase n'avait pas été budgétée).

4- Restitution, transfert, échanges sur les résultats avec acteurs publics

Dans la phase finale de la recherche, les principaux résultats ont été présentés aux décideurs locaux, en vue d'une discussion critique. Rassemblés dans deux rapports de synthèse (un par commune), ils ont été transmis à leurs destinataires une semaine avant une séance de travail décidée préalablement. Concernant Gardanne, la rencontre a eu lieu le 22 février 2012 en présence du directeur des services techniques et de l'élue en charge de l'urbanisme (qui n'a pas pu assister à toute la durée des échanges). A Rousset, la séance a réuni le maire, l'élue à l'urbanisme et la personne responsable du service urbanisme. Elle s'est tenue le 19 mars 2012.

Composé de 25 pages, le rapport de synthèse a été conçu comme un document de travail aussi compréhensible que possible en évitant le jargon de laboratoire, mais sans éluder le contenu scientifique nécessaire à la compréhension de la démarche suivie. Il se focalise sur le résultat central du projet (un indice spatialisé de polyvalence d'usage des sols (cf. partie suivante consacrée aux résultats) et présente :

- un résumé du projet UQUALISOL-ZU
- une collection de cartes sur le territoire étudié, avec notamment l'occupation des sols, la planification d'usage des sols, la polyvalence d'usage des sols (donnée inédite créée à l'occasion du projet)
- des recommandations pour l'interprétation et l'usage des données produites
- les perspectives opérationnelles et scientifiques ouvertes par le projet UQUALISOL-ZU
- des annexes sur la conception de l'indice de polyvalence d'usage des sols.

Autour de ces rapports assez succincts du point de vue de la recherche, mais déjà très consistants pour les partenaires locaux, les discussions se sont portées sur la facilité de compréhension des données produites, leur interprétation, leur utilité et les possibilités de les prendre en compte dans les démarches à venir en matière d'urbanisme (révision des documents réglementaires, par exemple). La pertinence des données a également été recherchée à travers l'interprétation des cartes tentée par les acteurs locaux et la confrontation avec leur « connaissance-terrain ».

Le projet a également donné lieu à des échanges directs avec les populations des deux communes. Les sondages effectués chez les propriétaires privés ont fait l'objet de fiches de restitution synthétique qui ont été transmises directement aux intéressés. Cet aspect ne sera pas repris dans les résultats mais un exemple de ce type de document est présenté en **Annexe III-2**.

III. RESULTATS

Les investigations menées dans le cadre du projet ont donné lieu à de nombreux travaux, relevant de différents champs disciplinaires (droit, sciences du sol, géographie, écologie) mais tous imbriqués et articulés pour explorer la faisabilité et la pertinence de l'intégration d'une information de qualité des sols dans les démarches locales d'urbanisme. Les domaines étudiés ont concerné des questions de portée générale (recherche dans le droit ou sur la construction d'indices de qualité des sols) sur lesquelles il importait de faire le point avant d'engager plus avant les travaux. Ils ont aussi et bien sûr consisté en une analyse approfondie des deux terrains d'étude, en vue de mesurer la pertinence de la question posée à l'échelle des territoires, et en une expérimentation consistant à produire une information de qualité des sols à même d'alimenter les réflexions préalable à la planification de l'espace. Ils ont *in fine* fait l'objet d'une présentation suivie d'une discussion avec les acteurs publics locaux.

Par commodité, mais aussi par cohérence, les résultats sont présentés par rubriques et ne correspondent pas à l'exhaustivité des éléments produits au cours de la recherche. Seuls sont restitués ici les acquis les plus utiles pour permettre d'apprécier la faisabilité et la pertinence d'incorporer une information de qualité des sols dans les démarches et réglementations locales d'urbanisme.

A-Quelle possibilité d'intégrer des éléments de qualité des sols dans la réglementation locale d'urbanisme ?

1- Analyse de l'intégration de la protection du sol dans le droit positif supérieur (international, communautaire, et national)

Au niveau international, il découle des recherches menées que le seul accord juridiquement contraignant liant l'environnement, le développement et la promotion de la santé des sols est la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (Cnuld) de 1994. Au niveau européen, il apparaît que le droit communautaire souffre toujours de l'absence d'adoption du projet de directive sur les sols. Actuellement, seuls deux textes visent spécifiquement le sol : la Charte européenne des sols de 1972¹¹ et le Protocole de Bled sur la protection des sols alpins, adopté en 1998 en application de la Convention alpine¹².

En droit interne, le sol est notamment évoqué dans le Code de l'urbanisme, comme une ressource à gérer de façon économe¹³, mais il ne figure pas au nombre des éléments énoncés dans le Code de l'environnement comme composant le patrimoine commun de la nation¹⁴. Plus précisément, le principe de gestion économe du sol est inscrit dans l'article L. 110 du Code de l'urbanisme, qui dispose, entre autres objectifs, que :

« afin (...) de gérer le sol de façon économe, [...] d'assurer la protection des milieux naturels et des paysages, la préservation de la biodiversité notamment par la conservation, la restauration et la création de continuités écologiques, [...] les collectivités publiques harmonisent, dans le respect réciproque de leur autonomie, leurs prévisions et leurs décisions d'utilisation de l'espace. [...] ».

On retrouve le même objectif à l'article L. 121-1 du même Code qui énonce les règles générales d'urbanisme applicables aux Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT), aux PLU et aux cartes communales :

*« Les schémas de cohérence territoriale, les plans locaux d'urbanisme et les cartes communales déterminent les conditions permettant d'assurer :
[...]*

3° Une utilisation économe et équilibrée des espaces naturels, urbains, périurbains et ruraux, [...], la préservation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et du sous-sol, des écosystèmes, des espaces verts, des milieux, sites et paysages naturels ou urbains, [...]. »

En outre, il semble que dans l'énoncé de cet alinéa, le sol et le sous-sol soient assimilés à de véritables milieux naturels, au même titre que l'air et l'eau (classés dans le livre relatif aux milieux physiques dans le Code de l'environnement), puisqu'ils apparaissent ici à la fin d'une énumération de ces milieux.

Par ailleurs, l'article L. 121-1 du Code de l'urbanisme concerne les sols, en tant que support pour constructions et activités. Il s'agit du principe d'équilibre, résultant du premier alinéa de l'article précité qui dispose que :

¹¹ Résolution (72)19 du Comité des Ministres du Conseil de l'Europe, Charte européenne des sols du 30 mai 1972, 5 p.

¹² Protocole d'application de la Convention alpine de 1991 dans le domaine de la protection des sols (protocole « Protection des sols »), fait à Bled le 16 octobre 1998.

¹³ Cf. article L. 110 du Code de l'urbanisme.

¹⁴ Cf. article L. 110-1 et L. 210-1 du Code de l'environnement.

« les schémas de cohérence territoriale, les plans locaux d'urbanisme et les cartes communales déterminent les conditions permettant d'assurer :

1° L'équilibre entre le renouvellement urbain, un développement urbain maîtrisé, le développement de l'espace rural, d'une part, et la préservation des espaces affectés aux activités agricoles et forestières et la protection des espaces naturels et des paysages, d'autre part, en respectant les objectifs du développement durable ».

Plus récemment, l'ordonnance n° 2010-1579 du 17 décembre 2010, portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne dans le domaine des déchets, a créé une nouvelle « police des sols pollués ».

Quelques remarques permettent de mesurer la difficulté de construire un droit des sols cohérent en France. L'ordonnance ne saisit pas l'occasion de créer un nouveau chapitre dans le livre II du code de l'environnement sur les milieux physiques, qui concernerait les sols en général, en les traitant comme les deux autres milieux naturels (air et eau). Au contraire, le texte crée un chapitre pour le moins étonnant, d'un seul article, dans le livre V sur les pollutions, risques et nuisances, au sein d'une rubrique hétéroclite du code (Titre cinquième : dispositions particulières à certains ouvrages ou installations, qui concerne aussi bien les garanties financières, les éoliennes ou les canalisations de gaz), ce qui démontre bien la gêne du législateur français face aux textes concernant les sols.

L'ordonnance confère des pouvoirs nouveaux à une « autorité compétente » non définie, qui pourra être le préfet mais aussi, dans certains cas, le maire. Surtout, elle introduit une nouveauté dans le droit des sols pollués (nouvel article L. 555-1 CEnv). En effet, le texte ne définit plus la pollution du sol par rapport au seul usage des terrains, contrairement à toute la procédure de réhabilitation définie aux articles L 512-6-1 et R512-39 C. Env. Certes, on peut comprendre que ce nouvel article ait été prévu pour faire cesser des pollutions accidentelles ou critiques, et non pas pour enjoindre une dépollution ou une réhabilitation poussée du site. Mais rien n'interdira néanmoins, en cas de carence du préfet, que se prévale de cet article un maire qui souhaite agir en cas de pollution ou de risque de pollution des sols. Certes, ce nouvel avatar du droit français des sols ne concerne pas la planification urbaine, mais il semble introduire la possibilité pour le maire d'agir contre n'importe quelle pollution des sols (puisque celle-ci n'est définie nulle part), ou n'importe quel risque de pollution qui pourrait menacer une fonction naturelle des sols.

Finalement, l'observation des lacunes du droit international, communautaire et interne des sols nous conduit à estimer que l'un des moyens de préserver les fonctions des sols pourrait être de proposer d'intégrer cet objectif, dans une approche locale, dans les documents d'urbanisme au niveau local, communal ou intercommunal. Il s'agirait donc d'une vision « bottom-up » de la construction d'une politique de protection des sols, en remettant les compétences du maire en première ligne, d'autant plus que la nouvelle police des sols pollués semble ouvrir la voie vers cette hypothèse. Nous y revenons dans la partie Discussion du rapport.

2- Intérêt de l'intégration « bottom-up » de la prise en compte du sol dans le droit local, à travers les documents d'urbanisme

Si les principes généraux du Code de l'urbanisme (gestion économe du sol, art. L110) prévoient que le PLU a vocation, entre autres objectifs, à préserver l'environnement au sens large et la qualité de la ressource sol en particulier (art. L121-1-3° C.urb), il apparaît que concrètement, les PLU, en l'absence de dispositions plus précises, ne prennent que peu en compte le sol et ses différentes fonctions. Pourtant la protection du sol pourrait être renforcée en insérant, dans les différents éléments constituant le PLU, la référence à un indice évaluant l'adéquation des sols à certains usages.

En premier lieu, cette insertion pourrait concerner les éléments du PLU relatifs à l'ensemble de la commune. Ainsi, la référence à cet indice pourrait permettre, lors de **l'évaluation environnementale** de certains documents d'urbanisme, d'évaluer les incidences des choix d'urbanisme proposés sur les fonctions des sols (art. L. 121-10, 4° C.urb.). De même, le **rapport de présentation** comporte une analyse de l'état initial de l'environnement qui doit être établie dans tous les cas. Elle pourrait donc être l'occasion, puisque les sols sont un élément de l'environnement, d'évaluer l'importance du

« capital-sol » de la commune, et de faire apparaître les zones où sont présents des sols riches de fonctions diverses. Le rapport ayant également pour fonction d'évaluer les incidences du plan sur l'environnement (art R. 123-2, 4° C.urb), il pourrait faire apparaître les perspectives d'évolution des sols, en mettant en relief les menaces qui pèsent sur leur conservation (imperméabilisation, artificialisation, pratiques agricoles, etc...). Mais surtout, « le rapport de présentation peut se référer aux renseignements relatifs à l'environnement figurant dans d'autres études, plan et documents » (art. R. 123-2-1, dernier alinéa C.urb.). Ainsi peut-on facilement envisager l'insertion de renseignements résultant d'études pédologiques ou d'un indice caractérisant les sols dans le rapport de présentation des PLU.

Certes, le rapport de présentation est dépourvu de portée normative, mais la jurisprudence considère que l'absence ou l'insuffisance de l'analyse de l'état initial de l'environnement dans le rapport de présentation est un vice de forme affectant la légalité externe du PLU¹⁵. Notamment, l'insuffisance de l'analyse de l'état initial de l'environnement dans le rapport de présentation est de nature à entacher la légalité du PLU¹⁶. De son côté, le **PADD** du PLU « définit les orientations générales d'aménagement et d'urbanisme retenues pour l'ensemble de la commune » (art. L. 123-1, al 2 C.urb) qui doivent être définies dans le respect des principes de gestion économe du sol (arts L. 110 et L. 121-1 C.urb). Même si le PADD n'est pas directement opposable, il conditionne néanmoins le règlement et les orientations particulières d'aménagement, éléments opposables du PLU, qui doivent être établis en cohérence avec lui (art L. 123-1, al 2 et 4 C.urb).

En second lieu, la préservation des sols pourrait être intégrée dans les **orientations particulières d'aménagement** relatives à certains quartiers ou secteurs « à mettre en valeur, réhabiliter, restructurer ou aménager ». Ces orientations peuvent ainsi prévoir des mesures pour mettre en valeur l'environnement, les paysages et le patrimoine (art L. 123-1, al 3 C. Urb). En considérant de façon large ces objectifs, la prise en compte de la qualité des sols aurait sa place dans ce cadre. En outre, ces orientations particulières, bien que facultatives, présentent l'intérêt d'être opposables.

Le **règlement du PLU** fixe ensuite les règles applicables dans les zones urbaines (ZU), les zones à urbaniser (ZAU), les zones agricoles (ZA) et les zones naturelles et forestières (ZN). Si actuellement la qualité des sols n'est pas un critère pris en compte dans l'élaboration du règlement du PLU, il reste que certaines fonctions des sols peuvent être directement impactées ou indirectement préservées par certaines règles posées dans le PLU. Ainsi, dans le cas particulier de l'assainissement non collectif, la prise en compte de la fonction « circulation et rétention en eau » des sols est effective en pratique. En effet, pour qu'un dispositif d'assainissement non collectif puisse être installé, la perméabilité du sol fait partie des renseignements requis pour déterminer l'aptitude de ce dernier à accueillir un tel système d'assainissement. Ce sont donc ces cartes d'aptitude des sols à l'assainissement non collectif qui permettent aux communes d'établir un zonage d'assainissement.

Outre ces zones spécifiques, il apparaît que les zones agricoles (ZA) et les zones naturelles (ZN) permettent le plus facilement de prendre en compte la multifonctionnalité des sols. En ce qui concerne les ZA, la notion de « potentiel agronomique ou biologique des terres agricoles », qui justifie une constructibilité très limitée, doit en effet être appréciée. Or cette notion fait l'objet d'une interprétation souple par le juge administratif, qui reconnaît facilement le potentiel agronomique, justifiant une protection des terres par leur classement en ZA, sans même qu'il soit besoin de lui fournir de preuves concrètes de ce potentiel. Par extension, les fonctions environnementales remplies par les sols qui, notamment, abritent de la biodiversité, semblent pouvoir entrer dans le cadre de la notion de « potentiel biologique » - qui pourtant, n'est pas prise en considération en pratique. Ainsi peut-on penser qu'un indice mettant notamment en évidence l'importance des fonctions

¹⁵ Dans ce sens : CE, sect., 5 mai 1995, « Sté coopérative maritime Bidassoa et a. » : Juris-Data n° 1995-045203 ; *AJDA* 1995, p. 463, concl. Lasvignes. - CE, 12 juin 1995, « Assoc. intercommunale contre un projet de carrière » : Juris-Data n° 1995-048162 ; *BJDU* 4/1995, p. 281, concl. J.C. Bonichot. - CE, 3 novembre 1997, « Jegou », req. n° 161763 : Juris-Data n° 1997-051177 - CE, 19 mars 2008, n° 296504, « Cne Saint-Cast-le-Guildo » : JurisData n° 2008-073329. - CAA Bordeaux, 22 février 2008, n° 05BX01785, « Zubialde ». - CAA Nancy, 7 février 2008, n° 07NC00086, « Cne Muespach, Cté cnes III et Gersbach ».

¹⁶ Voir par exemple CE, 8 mars 1996, « Port autonome de Nantes et Cne Donges » : Juris-Data n° 1996-050266 ; *BJDU* 1996, p. 100, concl. C. Maugué ; *AFDUH* 1996, chron. J.-P. Demouveau et J.-P. Lebreton *Planification urbaine et règles générales de l'urbanisme*, n° 232 - CE, 25 mars 1996, « Assoc. des propriétaires et résidents pour la sauvegarde du Moulleau » : *BJDU* 1996, p. 109, concl. St. Fratacci, obs. L. Touvet ; *AFDUH* 1996, chron. J.-P. Demouveau et J.-P. Lebreton *Planification urbaine et règles générales de l'urbanisme*, n° 230 - CE, 5 févr. 1997, « Cne Roquevaire » : Juris-Data n° 1997-050208 ; *BJDU* 2/1997, p. 100, concl. Delarue, obs. L. Touvet ; *AFDUH* 1998, chron. J.-P. Demouveau et J.-P. Lebreton, *Planification urbaine et règles générales de l'urbanisme*, n° 230) - TA Strasbourg, 19 mai 2009, n° 06.06389, « Assoc. Sauvegarde de la faune sauvage ».

« environnementales » de certains sols serait pertinent pour fonder la protection de certaines zones. Pour ce qui concerne les ZN, elles peuvent être classées dans ce zonage de protection en raison de la qualité des sites, des milieux naturels, des paysages et de leur intérêt, notamment du point de vue écologique (art R. 123-8, al 1er C. urb). Ainsi, parmi les raisons justifiant une protection particulière de certains secteurs de la commune, le sol est protégé, de manière indirecte, par le classement en ZN, qui rend en principe inconstructibles les secteurs concernés (art. R123-8, al 3 C. urb). C'est pourquoi un indice intégrant la multifonctionnalité des sols pourrait s'avérer utile, non seulement pour aider les auteurs de PLU dans leur décision de classement de terrains en ZN, mais également en cas de litige, pour justifier un classement en ZN.

Enfin, les PLU peuvent délimiter des emplacements réservés soumis à un statut particulier et destinés à l'aménagement d'installations d'intérêt général ou d'espaces verts. Ce classement rend les parcelles concernées inconstructibles pour toute autre opération et pourrait avoir pour objectif de préserver certaines fonctions du sol, reconnues comme présentant un intérêt général : on peut penser par exemple à la fonction « circulation et rétention de l'eau » sus-mentionnée, ou à plus long terme, la fonction « puits de carbone ». Cependant, l'emplacement réservé demeure un outil ponctuel, qui ne concerne généralement que des espaces limités.

En revanche, le classement en espaces boisés peut concerner des surfaces plus importantes. Il peut s'appliquer à des bois, des forêts, des parcs mais également à « des arbres isolés, des haies ou réseaux de haies, des plantations d'alignements » (art L. 130-1, al 1° C. urb). Il a pour effet d'empêcher les défrichements et d'interdire « tout changement d'affectation ou tout mode d'occupation du sol de nature à compromettre la conservation, la protection ou la création des boisements » (art L. 130-1, al. 2 C. urb). Il peut donc aboutir à une protection notable d'une superficie importante de sols. Néanmoins dans la pratique, le classement en ZN se superpose fréquemment avec le classement en espace boisé classé.

En troisième lieu et enfin, en-dehors des éléments élaborés dans le PLU, on peut noter que **d'autres outils locaux de planification spatiale** pourraient intégrer un indice « sols ». Il en va ainsi des plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRNP, art.L126-1 C. urb) et des zones agricoles protégées (ZAP, art.L112-2 C. rural).

3- Pertinence de la démarche à Gardanne et à Rousset : évolution de l'occupation des sols, gestion des sols et discours d'acteurs

1- L'occupation des sols et son évolution

Comme dans la plupart des espaces péri-urbains, la problématique de la gestion et de la conservation des sols dans le Bassin minier de Provence est liée à la question du développement urbain. C'est sur les marges des villes, en effet, que le besoin d'espace pour l'extension ou l'implantation de nouvelles zones d'activités, de nouvelles infrastructures de communication, de quartiers résidentiels, etc. conduit à la plus forte consommation de sols. Gardanne et Rousset sont à cet égard parfaitement représentatives de l'étalement urbain que l'on peut observer en contexte péri-urbain.

Evolution générale de l'occupation des sols

Si l'on considère la dynamique de l'occupation des sols sur plusieurs décennies, la progression de l'urbanisation est un fait indiscutable et remarquable sur la période 1935-1999. La cartographie établie à partir des cartes topographiques de 1935, 1972 et 1999 aux échelles 1 : 20 000 et 1 : 25 000, permet en effet de quantifier les surfaces dévolues aux différentes catégories d'occupation et d'usage des sols et d'apprécier l'ampleur des changements (Figure 13).

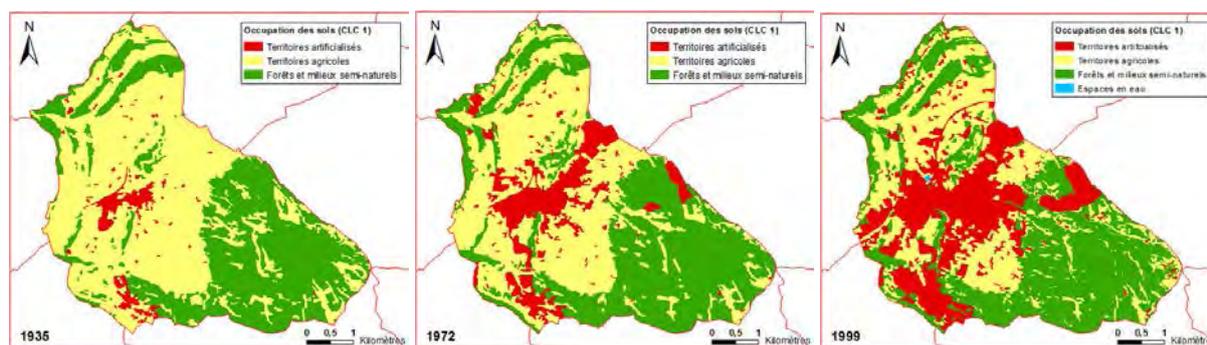


Figure 13 : Evolution de l'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)
Nomenclature Corine Land Cover de niveau 1

Dans les deux communes, les territoires artificialisés (classe 1 de CLC) occupent moins de 4 % de la superficie communale totale en 1935 : Gardanne 3,5 % et Rousset 0,9 %. En 1999, ils sont supérieurs à 10 % : Gardanne 26,8 % et Rousset 10,6 %. Ainsi, **en un peu plus d'un demi-siècle** (il est très probable en effet que le mouvement d'urbanisation n'ait été guère initié avant la deuxième Guerre mondiale), **la proportion des espaces artificialisés dans la superficie totale a été multipliée par 7,5 à Gardanne et par 11,7 à Rousset !** Dans les deux communes, la progression de l'urbanisation s'est faite selon un processus présentant des similitudes mais aussi des particularités (Figure 14). Plus forte à Rousset, elle s'est principalement réalisée après 1972, alors qu'à Gardanne, elle est entamée bien avant (l'année 1972 n'imprime qu'une faible inflexion à la courbe d'évolution de la classe CLC1). Un lien avec l'histoire industrielle de la région permet d'éclairer ce décalage : dès après la guerre, l'effort de reconstruction relance l'activité charbonnière et crée les conditions d'un développement urbain à Gardanne (Mioche, 2006), ce qui n'est pas le cas à Rousset où il n'existe pas de puits de mine. A partir du milieu des années 1970, en revanche, la décision d'implanter l'activité micro-électronique puis le succès qui s'en est suivi lance le développement industriel et urbain de Rousset, qui s'engage alors dans une transformation considérable et sans précédent. Dans les deux communes, **la progression de l'urbanisation s'est principalement faite aux dépens des territoires agricoles** (CLC2), tout particulièrement à Gardanne où ils ont été presque divisés par 2

(45 % en moins, contre 13 % en moins à Rousset). A contrario, les milieux naturels et forestiers (CLC3) se sont maintenus et ont même légèrement progressé sur les deux territoires. Dans les deux communes, ces chiffres témoignent toutefois d'une évolution que l'on peut estimer comparable : rurales avant la guerre, ces communes sont dorénavant péri-urbaines voire urbaines, avec plus du quart de la superficie consacré aux espaces urbanisés à Gardanne.

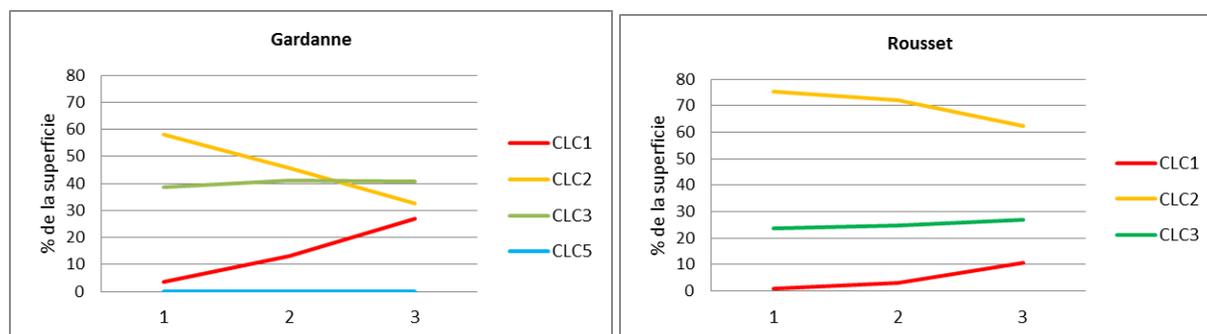


Figure 14 : Evolution de l'occupation des sols dans les deux communes (1935-1999)
 1 : 1935, 2 : 1972, 3 : 1999 - CLC1 Territoires artificialisés, CLC2 Territoires agricoles, CLC3 Forêts et milieux semi-naturels, CLC5 Espaces en eau

L'évolution de l'occupation des sols dans le détail

Au-delà de la simple appréciation de la progression des territoires artificialisés, de la diminution des espaces agricoles et de la stabilité des milieux naturels et forestiers, les données cartographiques produites autorisent une description plus fine de l'évolution de l'occupation des sols.

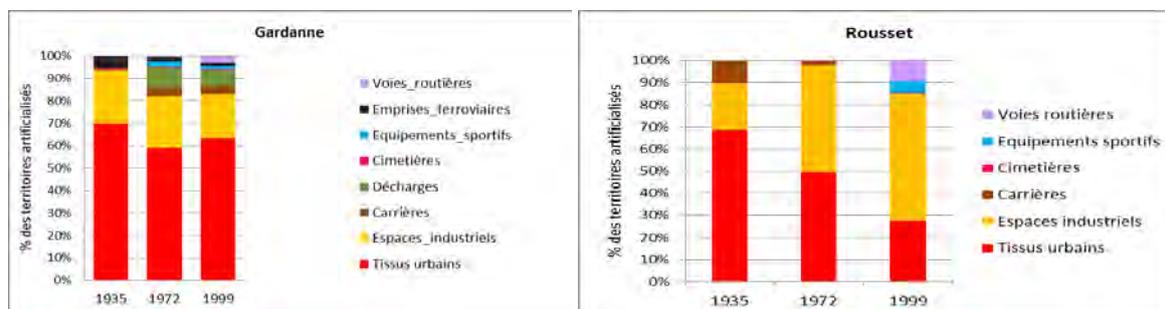


Figure 15 : Evolution des différents types d'espaces dans le total des territoires artificialisés (1935-1999)

Concernant les territoires artificialisés, les deux communes se distinguent par des espaces urbanisés légèrement différents et surtout par l'évolution différenciée de ceux-ci sur la période (Figure 15). En 1935, Gardanne présente davantage de types d'espaces artificialisés que Rousset, ce qui s'explique par le fait que la ville est plus grande et l'industrialisation plus ancienne. Cependant, les proportions de tissus urbains et d'espaces industriels dans la superficie totale des territoires artificialisés (CLC1) sont à peu près équivalentes dans les deux communes (autour de 70 % pour les premiers et entre 21 et 23 % pour les seconds). Cette relative similitude de la structure des territoires artificialisés disparaît dès 1972. A Rousset, la part des tissus urbains diminue fortement (49 % en 1972, puis 27,5 % en 1999), alors que celle des espaces industriels progresse considérablement (48 % en 1972, puis 57,5 % en 1999). Gardanne, en revanche, voit stagner puis diminuer la proportion des espaces industriels (23 % en 1972, puis 20 % en 1999). Le pourcentage des tissus urbains y régresse entre 1935 et 1972 et augmente légèrement en 1999, pour atteindre les deux tiers de la superficie des territoires artificialisés. En fin de période (1972-1999), l'artificialisation est également due à l'apparition d'infrastructures routières de grande taille, tout particulièrement à Rousset. La comparaison de l'évolution de la structure de l'urbanisation permet ainsi de mettre en évidence l'originalité de Rousset où, à la différence de Gardanne, la majeure partie des territoires artificialisés produits sur la période est due à l'industrie. Dans la vieille commune minière, les espaces dévolus aux activités

économiques conservent certes une importance relative, mais l'essentiel de l'espace urbanisé demeure celui constitué par les tissus urbains (63 % contre 27,5 % à Rousset).

Concernant les territoires agricoles, les deux communes ont connu des évolutions diverses (**Figure 16**). En 1935, l'usage agricole des sols n'est pas identique. Rousset présente plus de deux fois plus de terres consacrées à la vigne, proportion tout à fait importante qui tend à se maintenir sur la période avec un léger fléchissement en 1972, suivi d'une reprise. A Gardanne, le sort de la viticulture est tout autre. En 1935, elle occupe moins de 15% des espaces agricoles. Elle entame par la suite une forte régression au point de disparaître presque entièrement en 1972, avant de réapparaître en 1999. Sa place actuelle dans les territoires agricoles de la commune est tout à fait marginale. Cette évolution de la viticulture gardannaise est semblable à ce qu'ont connu les vergers (oliviers et fruitiers) au cours de la période. Très peu présents avant la guerre, ils ont disparus en 1972 et reviennent dans le paysage en très faibles proportions en 1999. Dans une certaine mesure, l'évolution des vergers est presque identique à Rousset : très peu nombreux en 1935, ils le sont encore moins en 1999. Pour les autres occupations agricoles du sol, les sources exploitées n'ont pas permis d'obtenir de l'information de même précision. Une classe « autre » recouvre ainsi les cultures annuelles, les prairies, les cultures maraîchères de plein champ ou sous serres, etc. Ces espaces ont plutôt eu tendance à se renforcer à Gardanne, alors qu'ils sont restés à peu près dans les mêmes proportions à Rousset.

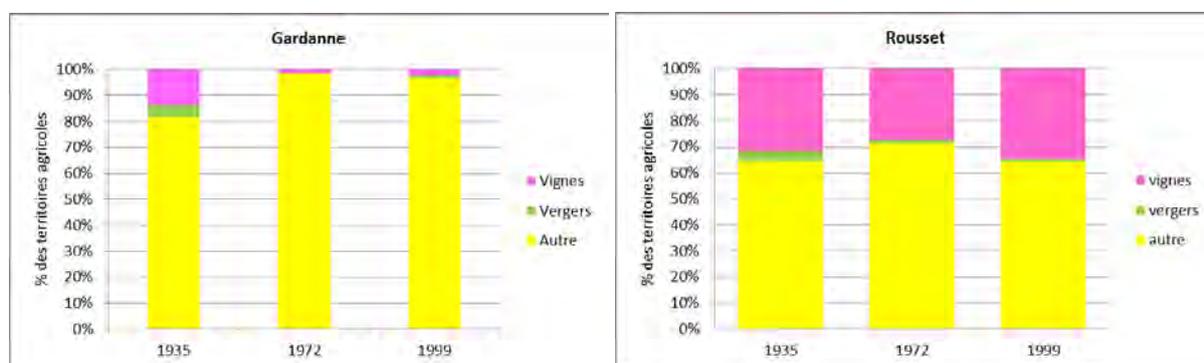


Figure 16 : Evolution des différents types d'espaces dans le total des territoires agricoles (1935-1999)

Transitions complexes

Contrairement à ce que l'on pourrait penser en première analyse, la transformation de l'occupation des sols sur plusieurs décennies s'opère selon des transitions ou trajectoires qui peuvent se révéler complexes. Ainsi, à Gardanne comme à Rousset, l'étalement urbain, le recul de l'agriculture et le maintien des espaces naturels ne se sont pas réalisés selon un unique et simple mouvement d'avancée de la ville sur les espaces agricoles, tandis que les forêts auraient « résisté » au front pionnier urbain. Les analyses spatiales révèlent en effet que, d'une année à l'autre, les changements d'occupation des sols traduisent des avancées de l'urbanisation mais aussi des reculs, une régression des espaces agricoles face à l'urbain mais également des avancées de l'agriculture sur des espaces naturels et forestiers, ou encore des progressions de ces mêmes espaces naturels et forestiers aussi bien sur les territoires artificialisés que sur les espaces agricoles. Aussi, même si à l'échelle d'une commune toute entière les grandes évolutions déjà soulignées sont indiscutables, les dynamiques de transformation de l'occupation des sols se caractérisent par des changements parfois contradictoires selon les lieux.

En ce qui concerne Gardanne, les principaux faits à retenir au sujet des transitions entre types d'occupation des sols dans l'espace sont la remarquable stabilité des espaces urbanisés et des milieux naturels et forestiers sur l'ensemble de la période, ainsi que la plus grande variabilité des espaces agricoles (**Figure 17**). En effet, pour plus de 80 %, les territoires artificialisés et les espaces naturels de 1935 le sont restés en 1972 et en 1999. En revanche, les espaces agricoles de 1935 qui sont encore agricoles en 1972 et en 1999 ne s'élèvent qu'à 47,6 % d'entre eux. Dès 1972, sans que cela change en 1999, 14,5 % des espaces agricoles de 1935 sont définitivement passés en territoires

artificialisés et 11,5 % sont devenus des espaces naturels et forestiers. Cependant, dans le même temps, 3,2 % des espaces naturels et forestiers de 1935 sont passés agricoles en 1972 et le sont restés en 1999. Et 5,2 % des espaces naturels et forestiers de 1935, qui sont restés espaces naturels et forestiers en 1972, sont devenus agricoles en 1999. Ainsi, si l'agriculture a régressé face à l'urbanisation ou aux espaces naturels, elle a pu se redéployer partiellement sur les espaces naturels et forestiers : en 1999, 85 ha de terres agricoles correspondaient à des espaces qui n'étaient pas en territoires agricoles en 1935, soit l'équivalent de 5,5% de la surface agricole de cette époque. Des transitions « contraires » ou opposées sont donc observables ; des « compensations » se sont mises en place.

Si l'on s'intéresse plus en détail aux territoires artificialisés, la catégorie supposée s'imposer le plus face aux autres, on note qu'elle s'est principalement étendue aux dépens des territoires agricoles. Ce processus s'est développé de diverses manières. Ainsi, dès 1972, des espaces agricoles sont transformés en espaces urbanisés et le demeurent en 1999 (transition de la classe 2 à la classe 1-1). D'autres restent agricoles en 1972 mais sont urbanisés en 1999 (transition de la classe 2 à la classe 2-1). Enfin, des territoires urbanisés en 1935 disparaissent en tant que tels et deviennent agricoles en 1972 avant de redevenir urbanisés en 1999 : phénomène de déprise agricole, suivie d'une réutilisation de sites anciennement habités et contribuant ainsi à la diffusion du bâti en zone agricole (transition de la classe 1 à la classe 2-1). L'extension spatiale des territoires artificialisés s'est également réalisée sur les espaces naturels et forestiers, mais dans une proportion beaucoup plus faible. Comme l'indique la **Figure 17**, elle concerne davantage la période 1972-1999 que la période précédente : transition de la classe 3 à la classe 3-1 plus de deux fois supérieure à la transition de la classe 3 à la classe 1-1.

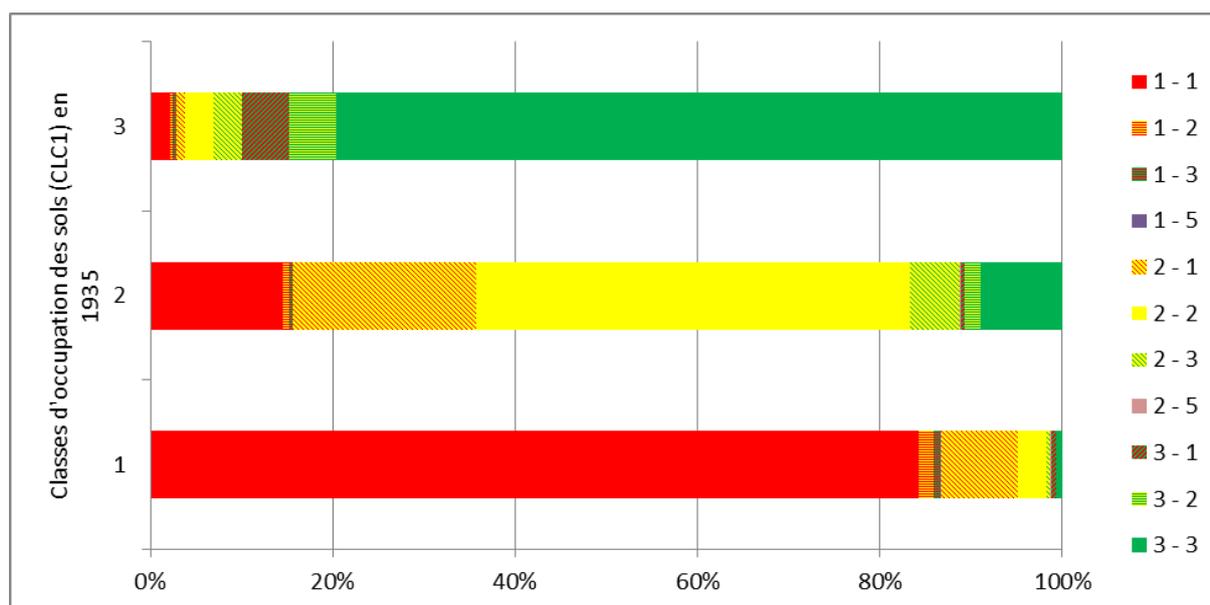


Figure 17 : Transitions entre les principales classes d'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)

Clés de lecture :

- les trois bandes représentent l'occupation des sols en 1935 selon le niveau 1 de CLC, soit Territoires artificialisés (1), Territoires agricoles (2) et Milieux forestiers et semi-naturels (3).
- les couleurs représentent les transitions : le premier chiffre désigne la classe CLC niveau 1 en 1972 et le second la classe CLC niveau 1 en 1999. Ainsi, 1-1 représente ce qui est Territoires artificialisés (1) en 1972 et ce qui est toujours Territoires artificialisés (1) en 1999. 1-2 représente ce qui est Territoires artificialisés (1) en 1972 et qui est devenu Territoires agricoles (2) en 1999

Exemple de lecture :

- près de 85 % de ce qui était Territoires artificialisés (1) en 1935 (bande du bas dans le graphique), est resté Territoires artificialisés en 1972 et est toujours Territoires artificialisés (1) en 1999 (il s'agit de la partie rouge).
- environ 5,2 % des Milieux forestiers et semi-naturels (3) de 1935, sont restés Milieux forestiers et semi-naturels en 1972, mais sont devenus Territoires agricoles en 1999 (classe 3-2, couleur vert clair)

La situation de Rousset diffère quelque peu de celle de Gardanne (**Figure 18**). Les trois grands types d'occupation des sols ne présentent pas de fortes différences en termes de stabilité spatiale sur la période. Les milieux forestiers et semi-naturels et les territoires agricoles font même jeu égal, puisque dans les deux cas 76 % de ces espaces consacrés à ces deux classes d'occupation des sols en 1935 sont restés avec la même occupation des sols en 1972 et en 1999. Les territoires artificialisés, eux, ne sont que 67 % dans ce cas. Cependant, davantage qu'à Gardanne si l'on considère les chiffres en valeur relative, l'extension des territoires artificialisés est une caractéristique de Rousset. Elle s'est principalement réalisée aux dépens de l'agriculture (transitions de la classe 2 à la classe 1-1 et à la classe 2-1) et surtout après 1972 (transition de la classe 2 à la classe 2-1). Dans le même temps, la perte d'espaces agricoles a été légèrement compensée par des gains faits sur des milieux préalablement forestiers et semi-naturels (transitions de la classe 3 à la classe 2-2 et à la classe 3-2). Mais comme à Gardanne, les transitions entre classes ont souvent suivis des schémas complexes, conduisant parfois à des évolutions presque opposées. Par exemple, 34 ha de milieux forestiers et semi-naturels de 1935 sont devenus des territoires agricoles en 1972 et le sont restés en 1999. En revanche, 35 autres hectares de milieux forestiers et semi-naturels de 1935 qui sont devenus des territoires agricoles en 1972 sont retournés en milieux forestiers et semi-naturels en 1999...

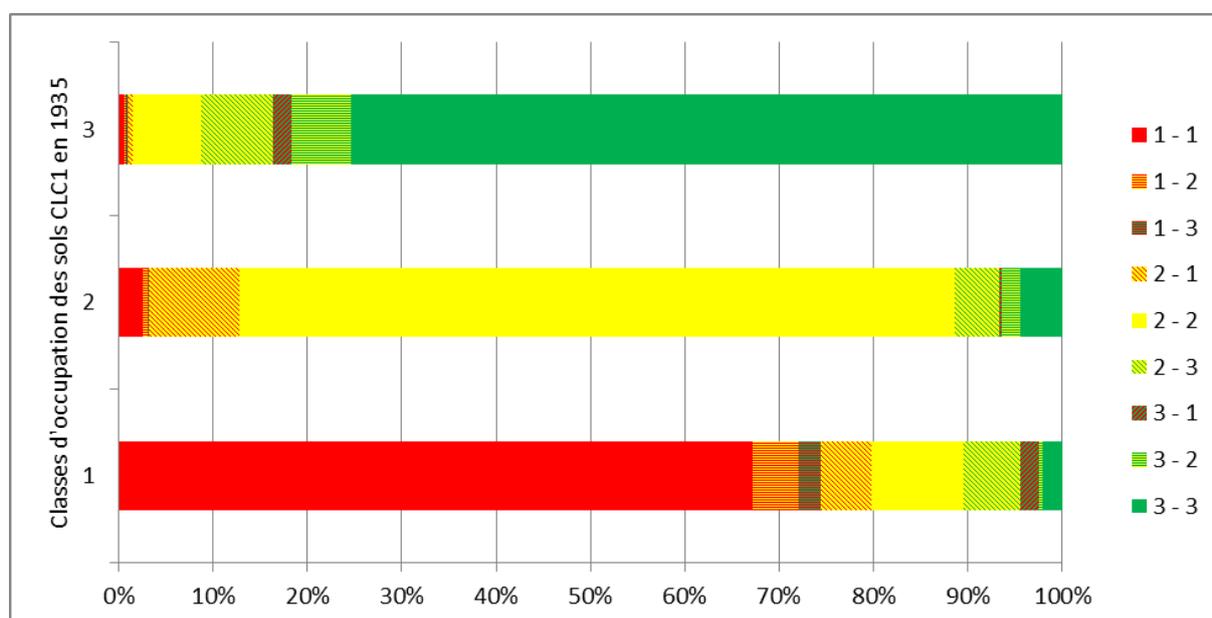


Figure 18 : Transitions entre les principales classes d'occupation des sols à Rousset (1935-1999)

Structures et dynamiques spatiales

Les changements d'occupation des sols ont également été appréciés en termes de localisations, de formes et d'agencements dans l'espace géographique. Au-delà des changements de superficies et des transitions entre classes, qui permettent de mesurer les évolutions qui ont caractérisé les deux communes, l'approche par l'espace apporte un complément d'information particulièrement pertinent. A Gardanne comme à Rousset, l'occupation des sols a certes évolué quantitativement en termes de superficies mais elle a également été caractérisée par divers processus spatiaux : repositionnements dans l'espace, concentrations géographiques, émiettements, déplacements ou au contraire stabilité, pour ne donner que quelques exemples.

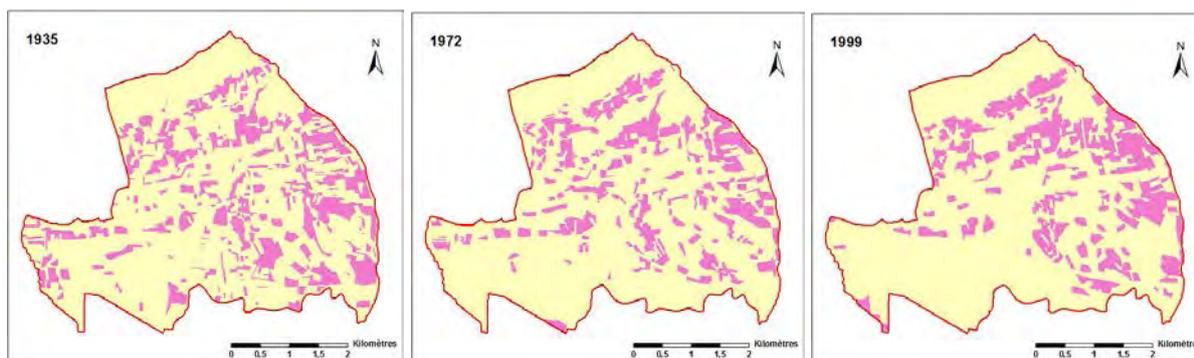


Figure 19 : Variation de l’emprise géographique des vignes à Rousset (1935-1999)

A **Rousset**, plusieurs phénomènes ont eu lieu au cours de la période. Le plus spectaculaire d’entre eux est la très forte concentration spatiale des superficies dédiées à la vigne (Figure 19). De 1935 à 1972, le nombre d’unités spatiales de vignes dans la base de données cartographique a chuté de 157 à 62, alors que la surface totale n’a fait que passer de 472 à 428 ha. Dans le même temps, les forêts ont connu une évolution contraire : leur surface totale a fortement diminué (de 445 à 229 ha), alors que le nombre d’unités spatiales a augmenté (de 28 à 55) . En d’autres termes, la vigne s’est concentrée dans l’espace sans perdre beaucoup de surface (**Figure 20**), alors que les forêts se sont morcelées et ont beaucoup perdu en étendue. Cette évolution est à mettre en regard avec celle des broussailles, qui ont progressé très fortement en surface et pas en nombre d’unités, et s’explique par les incendies qui ont ravagé le nord de la commune dans les années 1990 et qui ont contribué à la disparition des forêts. Enfin, que ce soit en nombre ou en superficie, les vergers se sont quant à eux effacés du paysage. Simultanément à ces changements concernant des espaces naturels et agricoles, les superficies de tissus urbains ont augmenté, mais moins vigoureusement que le nombre d’unités spatiales, ce qui peut accréditer le processus de diffusion du bâti dans les espaces agricole ou forestier (mitage). Les espaces industriels, quant à eux, se sont considérablement agrandis en surface mais pas en nombre d’unités spatiales, traduction de la constitution progressive d’une très importante et quasi unique zone industrielle sur la commune (il n’existe qu’une seule autre implantation industrielle, de très petite dimension, en 1999).

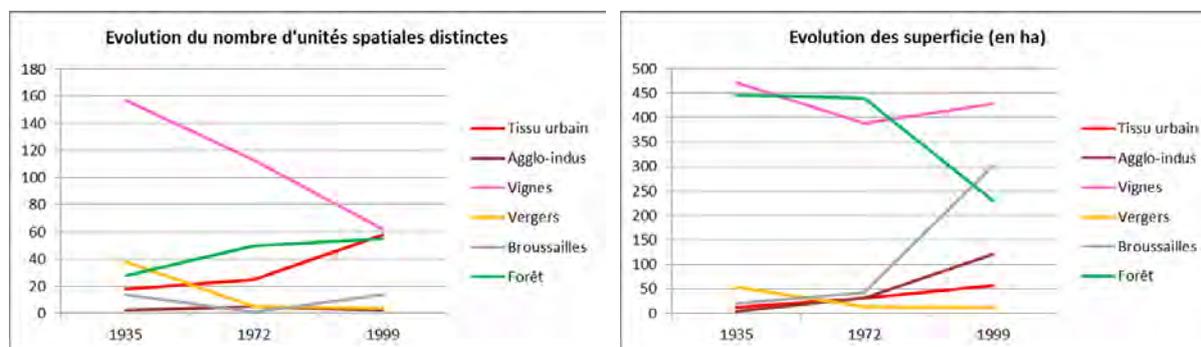


Figure 20 : Evolution comparée des superficies et des unités spatiales distinctes de quelques types d’occupation des sols à Rousset (1935-1999)

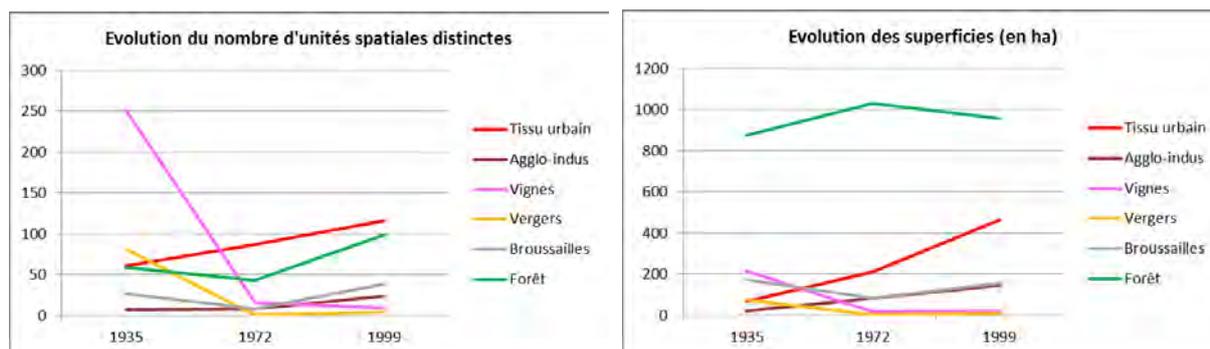


Figure 21 : Evolution comparée des superficies et des unités spatiales distinctes de quelques types d'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)

A **Gardanne**, le nombre d'unités spatiales pour les différents types d'occupation des sols retenus ont évolués dans le même sens qu'à Rousset : le nombre des vignes et des vergers s'est effondré ; celui des forêts et des broussailles a augmenté ; les unités de tissus urbains et d'espaces industriels ont progressé (**Figure 21**). Cependant, les superficies associées n'ont pas évolué comme à Rousset. Ainsi, Gardanne n'a pas réussi à conserver ses vignes, ni ses vergers. Les forêts n'y ont pas diminué en surface sur la totalité de la période, situation contraire à celle observée à Rousset. Corrélativement, les broussailles n'ont progressé qu'en très faible proportion. Fait particulièrement intéressant, les tissus urbains ont progressé plus fortement en surface qu'en nombre d'unités spatiales, ce qui laisse penser que l'urbanisation s'est davantage faite en continuité du bâti existant et moins par mitage. Les espaces industriels ont également plus augmenté en superficie qu'en nombre, tendant ainsi à montrer que des logiques de concentration spatiale ont été à l'œuvre. En 1935, même si les territoires artificiels étaient beaucoup moins nombreux, ils étaient davantage dispersés en unités isolées par rapport à la situation en 1999 (**Figure 22**).

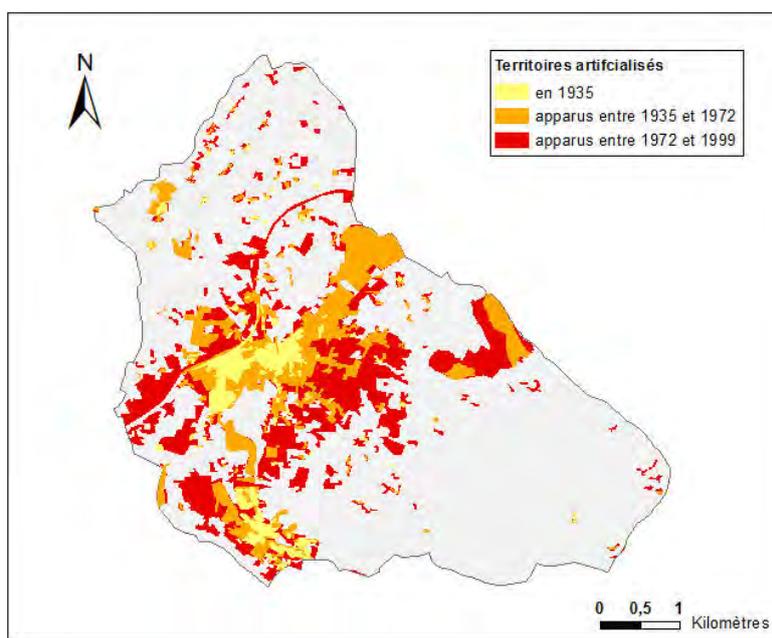


Figure 22 : Progression des territoires artificialisés à Gardanne (1935-1999)

Étalement urbain marqué, mais en relative continuité avec les agglomérations de bâtis existantes.

A retenir

- étalement urbain dans les deux communes, mais plus fort à Rousset en valeur relative
- croissance des territoires artificialisés principalement due aux espaces industriels à Rousset
- urbanisation davantage en continuité du bâti existant à Gardanne
- maintien relatif de l'agriculture à Rousset, en particulier la vigne ; fort recul à Gardanne
- forte dynamique de transition entre types d'occupation des sols sur la période

2- Gestion des sols et discours d'acteurs

Outre la mise en situation des objectifs du projet avec la réalité de l'évolution de l'occupation des sols, la pertinence de l'intégration d'une connaissance de la qualité des sols dans les politiques d'urbanisme de Gardanne et Rousset a été recherchée dans les pratiques et les discours des acteurs locaux en matière de gestion de l'espace et des sols. Au moment de l'étude, les deux communes étaient en cours d'élaboration de leurs plans locaux d'urbanisme, contexte particulièrement favorable à la promotion de questions fondamentales pour le thème d'étude.

Les priorités des deux communes

L'analyse des PADD (Projet d'Aménagement et de Développement Durable) des deux communes permet de dégager les priorités affichées par les deux municipalités pour leur développement futur et d'y repérer les éventuelles dispositions ou prédispositions à tenir compte des sols. Document à caractère politique, le PADD peut traduire des sensibilités locales et affirmer le projet de territoire qu'une collectivité souhaite développer sur 10 à 20 ans. Dans le cas de Gardanne et Rousset, l'analyse comparée des deux PADD présente un intérêt certain, car **les deux projets**, qui diffèrent quelque peu sur le fond, **présentent des objectifs qui font inégalement écho à la problématique de l'étalement urbain et de l'évolution de l'occupation des sols.**

Tableau 4 : Superficies des zones à urbaniser dans les PLU des deux communes

Zones à urbaniser	Gardanne		Rousset	
	Codes des zones	Superficie	Codes des zones	Superficie
AU habitat	AUH1, AUH2, AUH3, AU1	217	1AUa, 1AUb, 2AU	30
AU économie	AUE1, AUE1a, AUE1b, AUE2, AUE3, AU2	145,5	AUe, AUE	29,5
AU loisirs	AUL	0,5	-	-

*A Rousset, les superficies prévues pour accueillir de nouvelles activités économiques sont équivalentes à celles destinées à recevoir de l'habitat. A Gardanne, en revanche, la vocation habitat des zones AU est nettement affirmée par rapport à la vocation économique.
Calculs réalisés avec le SIG, valeurs en ha arrondies au dixième d'ha.*

Dans les deux communes, le **souci de limiter l'étalement urbain** est clairement mis en avant. A Gardanne, on décide ainsi « la confirmation des limites de l'urbanisation » et « la valorisation et l'optimisation du foncier disponible dans les zones urbaines, [soit] recentrer la ville sur elle-même et finaliser les quartiers » (Axe 1 du PADD). A Rousset, la première des quatre orientations majeures du PADD consiste à ce que « le village se développe autour du noyau villageois », ce qui implique « la poursuite d'un développement regroupé autour du centre du village ». Ces orientations semblent viser le bâti diffus, qui apparaît comme une forme de développement à bannir, et s'inscrivent bien dans l'esprit des articles L.110 et L.121.1 du Code de l'urbanisme, issus de la loi SRU. Cependant, l'objectif de limitation de l'urbanisation apparaît **substantiellement tempéré par les objectifs de création de nouveaux espaces à vocation économique**, tout particulièrement à Rousset (**Tableau 4**). La seconde orientation majeure du PADD roussetain est à ce titre tout à fait claire : « Le pôle d'activités poursuit son développement ». En deux pages très explicites (sur les 8 que compte le document), le projet expose le succès et l'impact majeur de cette concentration d'entreprises à l'échelle du département tout entier, pour mieux motiver l'impérieuse nécessité de lui permettre de s'étendre dans un proche avenir. Le projet indique ainsi qu'il « faut prévoir d'accroître les capacités d'accueil du site en réservant de nouveaux terrains à l'urbanisation », soit « une trentaine d'hectares, proches des équipements, en façade du RD6 » (le pôle d'activités occupent actuellement 181 ha). A Gardanne, les mêmes préoccupations en matière d'accueil d'entreprises et de soutien à l'emploi prévalent. La ville,

qui souhaite ardemment « poursuivre le redéploiement de l'activité économique » (Axe 2), envisage d'ouvrir environ 30 ha de terrains nouveaux à l'urbanisation à vocation économique et elle compte réemployer autour de 20 ha de friches industrielles issues de la mine. Si la reconversion d'anciens espaces industriels aux fins d'accueillir de nouveaux espaces d'activités à Gardanne apparaît indiscutablement comme un moyen de limiter l'extension des superficies urbanisées, force est de constater qu'une augmentation de l'emprise urbaine est encore planifiée sans qu'il y ait de véritables efforts d'innovation en matière de réduction des emprises industrielles, commerciales et logistiques. **A la différence des tissus urbains résidentiels, que l'on souhaite densifier pour en limiter l'extension spatiale, les espaces d'activités économiques ne semblent pas faire l'objet d'objectifs semblables**, ce qui pourrait pourtant être préconisé. Le PADD de Rousset précise ainsi que le pôle d'activité « occupe 181 ha dont 8 ha de bâtiments industriels ». N'y a-t-il pas là matière à s'interroger sur la consommation d'espaces et donc de sols par les activités économiques ? Ne serait-il pas judicieux d'innover pour encourager par exemple la superposition d'activités en un même lieu : parking en sous-sol, activités de production en RDC et aux étages inférieurs, activités administratives aux étages supérieurs, par exemple, ou au moins, éviter d'avoir d'immenses surfaces de parkings en plein air sans rien au-dessus ? Qu'il s'agisse de sols à usage d'habitat ou pour l'accueil d'activités économiques, les deux documents se contentent d'affirmer l'ambition de limiter la consommation d'espace et ne mentionnent jamais l'enjeu de conservation des sols pour leur caractère patrimonial ou leurs fonctions écologiques.

Outre les dispositions concernant l'urbanisation, les deux PADD énoncent des **objectifs de protection et de gestion du cadre de vie et du patrimoine naturel**. Toutefois, aucune attention explicite n'est portée aux sols en tant que composante essentielle des écosystèmes, réservoirs de biodiversité ou encore régulateurs des flux hydriques, des échanges terre-atmosphère, etc., ce qui est assez normal dans un document d'orientation. De façon globale, les considérations environnementales paraissent davantage motiver le projet de Gardanne que celui de Rousset. L'axe 4 du projet gardannais, intitulé « *Préserver et valoriser un environnement de qualité* », laisse entendre qu'une vision assez large de la collectivité prévaut, ce qui peut signifier une capacité à s'intéresser au sol comme ressource et comme bien commun : « *Le PADD intègre la volonté de la commune de préserver et valoriser la richesse et la qualité des ressources naturelles du territoire tout en veillant au maintien des équilibres entre urbanisation, vocation agricole et protection des qualités et des potentialités naturelles de l'espace* ». Le souci de se prémunir contre les risques incendie et inondation peut également conduire à une prise en compte des sols. Mais ce sont les notions plus englobantes de paysage, d'espace naturel ou de zone agricole qui sont les plus utilisées, ce qui induit que les sols ne sont concernés au mieux que de manière incidente. **A Rousset, les dispositions en faveur de la conservation des sols semblent en revanche encore moins présentes**. La quatrième orientation majeure du projet paraît d'ailleurs moins fondée sur la préservation que sur la gestion de l'environnement. Intitulée « *Vers une gestion diversifiée du patrimoine naturel* », elle ne présente pas le positionnement général de la collectivité par rapport aux questions environnementales et se focalise sur quatre objectifs : protection stricte des espaces remarquables, gestion des « zones de campagnes », développer les activités de plein air et mises en valeur du patrimoine bâti existant. L'accent est mis sur la nécessaire protection des sites remarquables, alors que la souplesse d'usage est admise pour les autres espaces. Rien n'est dit sur les éventuelles préoccupations de la collectivité pour les composantes ordinaires de l'environnement, dont le sol fait partie, ni sur les risques. L'évocation de considérations relatives au patrimoine bâti localisé en zones rurale et naturelle au sein même de l'orientation du PADD concernant le patrimoine naturel parachève l'impression d'une absence de positions affirmées de la commune sur la gestion du patrimoine naturel. Le traitement des espaces dévolus aux activités agricoles (3^{ème} orientation : « *Protection durable du patrimoine agricole* ») n'introduit pas de nuance sur ce plan. L'objectif de conservation des terres agricoles n'est jamais étayé par de quelconques considérations sur les sols et l'intérêt de les conserver pour eux-mêmes. Les questions économiques priment : « *la protection des terres agricoles est reconduite à travers le PLU avec une attention particulière portée aux secteurs de forte production : viticulture, secteurs AOC, plantations, secteurs irrigués* ». A Gardanne aussi, le maintien de la zone agricole est souhaité car l'agriculture est une activité économique à part entière, pour laquelle il importe de préserver des surfaces conséquentes et d'un seul tenant. Mais à la différence de Rousset, on prête à l'agriculture un rôle important « *sur un plan économique comme paysager* ». Le paysage semble ici davantage signifier l'esthétique du cadre de vie que le milieu bio-physico-chimique, mais on peut à nouveau relever la vision moins sectorielle du PADD gardannais.

Zonages PLU et occupation des sols

L'examen approfondi des zonages d'urbanisme des PLU en termes d'occupation des sols permet de compléter l'appréciation des enjeux de gestion et de conservation des sols par les deux collectivités. Intégrées dans le SIG, les zones d'urbanisme ont été caractérisées en termes d'occupation effective des sols grâce à la cartographie à grande échelle réalisée à partir de photographies aériennes de 2008 (cf méthodologie). L'emploi de l'opérateur spatial « intersecter » a permis de produire l'information d'occupation des sols de chaque zone PLU et d'en analyser ensuite la composition. Il en ressort des similitudes entre les deux communes mais aussi des différences concernant les zones agricoles (A) et à urbaniser (AU) (**Figure 23**).

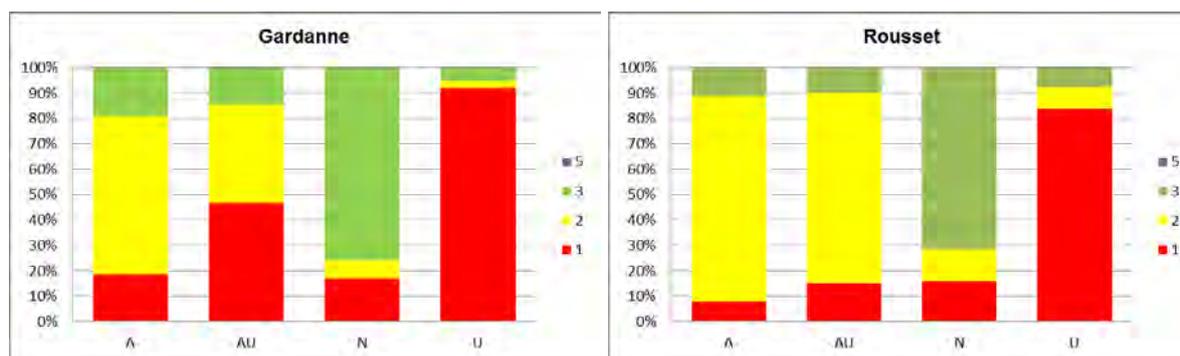


Figure 23 : Occupation des sols dans les zones PLU des deux communes

Occupation des sols en 2008 pour des zones d'urbanisme définies en 2008 et 2009. Pour les zones à vocation agricoles (A), à urbaniser (AU), à vocation naturelle (N) et à vocation urbaine (U), le graphique indique le pourcentage de territoires artificialisés (1), de territoires agricoles (2), de forêts et de milieux semi-naturels (3) et d'espaces en eau (5)

Si les deux communes affirment vouloir limiter l'étalement urbain, maintenir les espaces agricoles et protéger leur patrimoine naturel, Gardanne et Rousset n'ont pas décidé de s'y prendre de la même façon et l'examen de l'occupation des sols dans les zones d'urbanisme définies à cet effet soulèvent quelques interrogations. Ces divergences reflètent les choix des municipalités mais aussi les spécificités des deux territoires. Il apparaît ainsi que les zones AU de Rousset sont en très grande majorité des territoires agricoles (75%), alors qu'elles sont d'abord des territoires artificialisés à Gardanne (46%). En d'autres termes, Gardanne prévoit sans doute de densifier des espaces déjà urbanisés et de réduire l'impact de son urbanisation sur des terrains agricoles. Rousset, en revanche, n'en a pas décidé ainsi, peut-être parce que les espaces à densifier ne sont pas suffisamment nombreux, mais ce n'est pas certain. L'occupation des sols dans les zones à vocation agricole des deux PLU complète et nuance l'analyse. Si Rousset a défini des zones A dans lesquelles l'occupation agricole des sols représente 81% de la superficie totale, à Gardanne cette proportion n'atteint pas les deux tiers. Ceci introduit un bémol notable dans le projet proposé par Gardanne, car si le PADD affirme vouloir maintenir l'agriculture, l'espace qui lui est réservé est déjà urbanisé à plus de 18%... Les zones naturelles des deux PLU sont quant à elles presque aux trois quarts occupées par des forêts et milieux semi-naturels, ce qui apparaît cohérent. On note néanmoins une part notable d'espaces urbanisés (principalement du bâti diffus en milieu forestier), dont on peut se demander s'il n'aurait pas pu faire l'objet d'une densification, permettant par là même de limiter la soumission de milieux semi-naturels et agricoles aux zones AU.

Il est difficile de préjuger de l'impact des orientations d'urbanisme sur le devenir des milieux et en particulier sur les sols. Les données d'occupation des sols dans les zones d'urbanisme définies dans les PLU de Gardanne et Rousset permettent cependant de souligner quelques contradictions entre le projet et sa mise en œuvre, ce qui revient également à mettre en lumière les difficultés de la planification spatiale. Autant que possible, il conviendrait que les espaces à vocation agricole soient très majoritairement des terrains effectivement agricoles, que les zones à vocation d'espaces naturels soient effectivement des forêts ou des milieux semi-naturels, et que les zones à urbaniser soient un subtil équilibre entre terrains agricoles, forêts et milieux semi-naturels et territoires artificialisés que l'on cherche à densifier. Plus les vocations sont déterminées sur des milieux hétérogènes, plus la conservation de ces milieux devient difficile. Dans le cas de Gardanne et Rousset, si un effort de mise

en cohérence des zones à vocation naturelle avec les forêts et milieux semi-naturels est perceptible, la situation est moins évidente pour les zones à vocation agricole, notamment à Gardanne. Quant aux terrains urbanisés, ils se retrouvent dans toutes les zones, ce qui fait peser un doute sur la possibilité de véritablement maintenir l'intégrité des espaces et de leurs vocations.

Discours et pratiques d'acteurs

Rencontrés à diverses reprises au cours de la recherche, les acteurs locaux ont livré leur opinion et leurs connaissances sur la gestion des sols, tant en rapport avec leurs pratiques que par rapport à la perspective d'intégrer une connaissance sur la qualité des sols, comme le propose le projet UQUALISOL-ZU.

En ce qui concerne les **acteurs publics**, principalement les élus et les techniciens des deux municipalités, la gestion des sols est d'abord et avant tout une affaire de gestion foncière. Au quotidien, il s'agit d'accorder ou pas des droits à construire en fonction du règlement d'urbanisme local en vigueur. Cependant, l'élaboration du PLU a été l'occasion de se projeter dans l'avenir, de prévoir les usages de l'espace à 10 ans et, pour cela, de produire un état des lieux, un diagnostic du territoire tel que le recommande la loi. Cette obligation a notamment conduit les équipes locales à se pencher sur la question des sols à travers le sujet de l'aptitude des terrains à l'assainissement non collectif, donnée nécessaire pour l'autorisation de constructions nouvelles en dehors des zones reliées à un réseau de collecte des eaux usées, et à travers la problématique du risque inondation. En dehors de ces deux démarches, le sol n'est pas pris en considération et n'existe pas autrement que comme une surface sur laquelle des usages sont ou non autorisés. Pour au moins deux raisons, ce constat n'est pas étonnant et ne doit pas étonner. Dans ces deux communes comme dans la plupart des communes françaises, la mise en application du code de l'urbanisme est une tâche complexe et très lourde qui ne laisse guère de place et de temps à l'innovation. Les municipalités, aidées par des cabinets spécialisés, s'attachent surtout à mettre correctement en œuvre les recommandations du législateur, tout en essayant de produire un projet de territoire cohérent, respectueux des divers intérêts en jeu et compatible avec les principes de durabilité. Outre la lourdeur de l'opération, l'absence de compétences locales expliquent la non prise en compte des sols au-delà du minimum réglementaire. Avec respectivement 21 000 et 4 500 habitants, Gardanne et Rousset sont des communes relativement petites, dont le personnel peu nombreux présente davantage des compétences en termes de polyvalence que de spécialisation. Elles ne sont donc pas en mesure de développer elles-mêmes une planification des sols innovante quant à son contenu. Il s'agit là d'une banalité partagée par beaucoup de collectivités, souvent plus grandes encore. Aussi, les élus et techniciens rencontrés ont bel et bien montré de solides connaissances dans la mise en œuvre de la démarche de PLU. Ils ont su travailler avec leurs bureaux d'études respectifs et mener à bien leurs projets. Mais **l'introduction d'innovations, aller plus loin dans la prise en compte des sols et de leurs qualités, ne relève pas de leurs préoccupations premières**. Ils n'ont pas cette obligation et elle ne leur paraît pas s'imposer à eux. En revanche, les discussions initiées avec les chercheurs engagés dans UQUALISOL-ZU ont fait apparaître une curiosité et un réel intérêt pour la démarche proposée. Assez facilement convaincus du bien-fondé des objectifs de la recherche, nos interlocuteurs se sont montrés intéressés par le projet, ont fait preuve de coopération et ont souhaité être informés des résultats. Selon eux, innover relève d'abord et avant tout du domaine des chercheurs.

Outre les acteurs publics, la pertinence d'une intégration d'une connaissance de la qualité des sols dans la planification de l'espace a été évaluée auprès d'acteurs directement concernés par cette qualité mais également par l'étalement urbain : les **agriculteurs de Gardanne**. Sur les quinze exploitants que compte la commune, dix ont été rencontrés et se sont prêtés au jeu de l'entretien. Particulièrement peu optimistes quant à l'avenir de leur activité sur ce territoire, la grande majorité d'entre eux s'est déclarée **peu concernée par la question de la qualité des sols**, laissant paraître que la première de leurs préoccupations est de pouvoir maintenir leur activité sur la commune. Qu'ils soient en faire valoir direct ou en fermage, les agriculteurs considèrent en effet que la tendance est au recul de l'agriculture et que les dispositions du PLU n'y changeront rien. Les bailleurs seraient en attente du passage de leurs biens en constructible, les fermiers sont prêts à se replier sur d'autres terres voire d'autres communes au cas où cela arriverait, et la plupart des exploitants-proprétaires ne se préoccupent que de pouvoir arriver à l'âge de la retraite sans veiller à la reprise de leurs exploitations. Ce constat assez noir s'inscrit dans le contexte du recul ininterrompu depuis plusieurs

décennies des espaces agricoles sur la commune, mais aussi d'une défiance vis-à-vis des pouvoirs publics locaux (municipalité, SAFER, chambre d'agriculture, etc.) quant à leurs réelles volontés et capacités à infléchir le phénomène. Dominée par la céréaliculture, le maraichage et l'élevage équin, l'activité agricole de Gardanne traverse une crise de confiance sérieuse qui interroge quant aux modalités de construction de projets de territoires équilibrés, où la gestion des sols fait sens. Si préserver des sols agricoles semble un atout pour conserver le patrimoine sol, on peut se questionner sur la pertinence de délimiter des zones agricoles dans les documents d'urbanisme si les agriculteurs disparaissent et si les politiques publiques ne leur permettent pas de se maintenir.

La même démarche n'a pas été conduite à Rousset. Il aurait été certainement intéressant de recueillir la position des agriculteurs de cette commune et de la mettre en comparaison avec celle des agriculteurs de Gardanne. On pourrait en effet s'attendre à ce qu'elle diffère du fait de l'existence d'un plus grand nombre d'exploitants, d'une plus grande spécialisation dans la vigne (AOC Provence), de la moindre pression foncière (commune moins peuplée et plus distante d'Aix et de Marseille). L'espace agricole y est encore conséquent, moins atomisé par l'urbanisation. Le PLU prévoit même la possibilité d'y créer une zone de protection agricole.

4- Qualité des sols à Gardanne et Rousset

Les travaux relatifs à la caractérisation des sols et à l'évaluation de leur qualité ont donné lieu à plusieurs opérations, dont les résultats valent autant pour la validation des étapes de construction de l'indice que pour leur apport à la connaissance de la qualité des sols sur les deux communes. Aussi, nous avons choisi de présenter ces résultats selon le schéma suivant :

- évaluation critique succincte du jeu de données issues de la campagne de terrain
- essai de construction d'une typologie des sols en support à notre interprétation des données
- présentation des résultats intermédiaires à la construction de l'indice
- présentation de l'indice final (indice de polyvalence d'usage des sols) et de ce qu'il permet de dire de la qualité des sols dans les deux communes.

1- Apports des sondages effectués sur les deux communes

Analyse descriptive

Les prélèvements supplémentaires entrepris sur les deux communes représentent un total de 95 sondages sur lesquels des mesures et analyses ont été effectuées. Comme précédemment indiqué, ces données nous ont permis de compléter la connaissance que nous avions des sols et de nous fournir des informations plus détaillées sur leurs caractéristiques physico-chimiques, physiques et microbiologiques. Elles ont également aidé au choix des paramètres utilisés dans l'indice. Une partie des paramètres analysés ou mesurés n'étant pas classiquement utilisée, le travail a aussi consisté à identifier les paramètres dérivés pouvant être discriminants pour notre jeu de données. Ceci a été fait en particulier pour les données de microbiologie et de pénétrométrie. Les résultats spécifiques des analyses microbiologiques sont présentés en **Annexe II-12**. Nous ne repreneons ici que les conclusions générales.

Nous avons résumé ici les grandes tendances qui ressortent des résultats afin d'avoir une image synthétique des caractéristiques des sols des deux communes, sans toutefois entrer dans le détail de l'interprétation des données. L'ensemble des données analytiques ou paramètres dérivés (microbiologie et pénétrométrie) dont les mesures ont été effectuées sur les horizons de surface (sauf pour la pénétrométrie) est présenté en **Annexe III-1**. Le **Tableau 1** de cette annexe présente en outre une synthèse des caractéristiques des points d'échantillonnage sans la description complète des profils (disponible mais non présentée dans ce rapport). Ainsi, nous nous sommes permis à la fois de présenter et discuter les résultats analytiques sachant que la discussion du rapport n'avait pas comme objectif d'entrer dans les détails et de discuter tous les résultats issus du projet.

On retiendra tout d'abord que les sols que nous avons rencontrés (**Annexe III-1**) appartiennent tous aux types de sols déjà identifiés dans la région et présentés de manière globale dans la partie méthodologie. Par contre l'atlas des sols (Duclos, 1994) ne faisait pas mention de redoxisols ni de réductisols plus ou moins drainés que nous avons rencontrés dans la partie urbanisée et correspondant à d'anciennes zones humides localisées dans la partie basse de la commune de Gardanne (cependant identifiée comme zone inondable). A l'inverse, des sols hydromorphes identifiés à l'est du village de Rousset sur la carte pédologique au 1 : 20 000 semblent avoir disparus par effet du drainage agricole entrepris dès les années 70.

On retiendra que l'environnement général est carbonaté avec des pH toujours supérieurs à 7,1 pour l'ensemble des horizons (à savoir 257 échantillons), y compris les horizons de surface. La teneur en carbone organique est comprise entre 2 et 220 g kg⁻¹, selon l'occupation du sol, ce qui donne des moyennes et médianes supérieures aux valeurs trouvées pour les sols agricoles dans les Bouches-du-Rhône (<http://bdat.gissol.fr>, période 2005-2009). Les C/N associés sont très élevés pour les sols avec un état de surface qualifié d'artificialisé (parking, carreau de mine, terrain de sport...), le reste des sols présente des C/N en général <15. Les teneurs en P Olsen sont basses mais conformes aux valeurs trouvées dans le département pour les sols agricoles (<http://bdat.gissol.fr>, période 2005-2009).

Il en est de même pour la CEC. Les teneurs en argiles sont conformes à celles rencontrées dans la région, mais les sites d'échantillonnage de Rousset sont globalement plus sableux et plus argileux que ceux de Gardanne.

En termes de **contamination**, il ne semble pas y avoir de contamination généralisée des sols de la région, malgré son passé industriel et les nouvelles activités qui se développent. Cependant, il a été ponctuellement identifié des concentrations en ETM largement supérieures aux concentrations moyennes mesurées dans le programme ASPITET (Baize, 1997) et à certaines normes (AFNOR, Valeurs indicatives de l'OSOL Suisse...). Il s'agit de Zn, Pb, Cu, Cd et Cr que l'on retrouve dans des sols de la zone urbaine résidentielle ou industrielle. Treize sites sont concernés par un ou plusieurs ETM, mais 2 sites (G41=cours et R33=friche industrielle) présentent des concentrations suffisamment élevées pour qu'ils aient été ôtés des traitements statistiques (voir **Annexe III-1** : statistiques descriptives et tableau des coefficients de corrélation inter-paramètres) car introduisant un biais significatif dans les résultats.

Les valeurs obtenues en **pénétrométrie** sont très variables en fonction des profils de sols. Bien que les profils aient été faits dans des conditions météorologiques variables, il ressort que les sols agricoles et forestiers présentent des valeurs (par exemple de résistance moyenne) couramment rencontrées dans la littérature alors que les sols identifiés comme anthroposols ont des valeurs largement supérieures à la moyenne. Cependant, il existe relativement peu d'études ayant procédé à des mesures systématiques d'un grand nombre de sols sur une région et il est donc difficile d'avancer plus dans l'interprétation.

Les **analyses microbiologiques** ont permis d'appréhender trois aspects de la qualité biologique des sols de Gardanne et de Rousset. La technique Biolog® a permis d'obtenir des empreintes métaboliques des métapopulations bactériennes et ainsi d'évaluer la diversité des fonctions microbiennes dans les sols. La respiration aérobie, principalement d'origine microbienne, a été utilisée comme indicateur de l'impact des pratiques agricoles ou d'intrants chimiques sur le fonctionnement des sols. Enfin, la mesure de l'activité enzymatique FDA, qui reflète la vitalité des processus métaboliques microbiens dans les sols, a été employée pour constituer un indicateur de perturbation, à l'instar de la respiration ou des empreintes biologiques. Les données issues des Biolog ont permis de définir 13 paramètres différents décrivant les cinétiques d'utilisation des différents substrats utilisés par les communautés microbiennes des sols. Le paramètre Biolog_aire_T100 est celui qui contribue le plus à la variance des échantillons (**Annexe II-12**). Les valeurs de respirométrie obtenues grâce à deux techniques radicalement différentes apparaissent bien corrélées entre elles. Elles indiquent une respiration plus élevée dans les sols « naturels – semi-naturels », et ce quel que soit le site considéré. La FDA affiche la même tendance. Globalement les valeurs obtenues en termes de diversité fonctionnelle semblent être inférieures à celles obtenues dans le référentiel ESITPA portant sur des sites échantillonnés sur l'ensemble du territoire français (S. Criquet, communication personnelle), tandis que l'activité enzymatique FDA présente des moyennes similaires mais une moins grande dispersion des valeurs à relier probablement à un échantillonnage effectué dans un environnement similaire.

Recherche d'une structuration du jeu de données

Les résultats ont été traités afin de tenter d'identifier une structuration des données et des sites. Les corrélations entre les paramètres ont été étudiées deux à deux pour l'ensemble du jeu de données et pour chaque commune. Selon que l'on prend le jeu de données de Gardanne, celui de Rousset ou les deux ensemble, les résultats divergent sensiblement. Cependant, on retrouve globalement les relations attendues. La teneur en azote, en carbone organique et la CEC apparaissent très corrélées. On retrouve également les relations entre le pH, la CEC et l'azote total et des corrélations entre les concentrations en ETM dans les horizons de surface mettant en évidence leur origine géogène. Les paramètres microbiologiques sont fortement corrélés entre eux de même que les paramètres dérivés de la pénétrométrie. L'activité FDA, et bien plus encore la respiration, sont significativement structurées par un lot de variables auto-corrélées, constitué par le C org (et par extension la matière organique), N tot et la CEC. En revanche, les biologs n'apparaissent pas comme une variable structurante et explicative de la dispersion des différents échantillons, et ne sont corrélés ni avec la matière organique ni avec aucune autre variable physico-chimique. Dans ce contexte, l'utilisation des microplaques biolog ne constitue donc pas un indicateur pertinent. Ce type de constat a par ailleurs

été établi dans de nombreuses autres études préconisant l'abandon de cet outil au profit d'indicateurs plus performants et qui plus est beaucoup moins onéreux (Floch, 2008). La forte corrélation observée entre la respiration microbienne et la teneur en matière organique constitue un résultat tout à fait conforme à ce que l'on peut retrouver dans la littérature. En effet, la matière organique constitue le « carburant » nécessaire à la croissance des microorganismes des sols et il n'est donc pas surprenant que ces deux variables soient liées. En revanche, la question qui se posait étant de savoir si de trop fortes pressions anthropiques pouvaient affecter cette structuration, une analyse de cette relation a été effectuée en fonction des différents modes d'occupation des sols.

D'une manière générale, la présence des sols anthropisés (identifiés comme anthroposols) modifie énormément les statistiques globales sur les données. En effet ces profils ont des caractéristiques souvent très différentes de celles de sols peu anthropisés ou « naturels » et sont responsables des valeurs extrêmes observées pour un grand nombre de paramètres comme des paramètres de pénétration, le carbone organique, la CEC, le rapport C/N et les concentrations en E_{TM}. Ils présentent également une grande variabilité entre eux. Les relations entre les paramètres sont donc souvent contrôlées par quelques points : la comparaison des tableaux de corrélation avec ou sans certains points particuliers (par ex. R33 pour Rousset et G41 pour Gardanne) met bien en évidence cet état de fait. Il ressort également qu'un gradient croissant de perturbation déstructure les relations entre la respiration et la richesse en matière organique des sols. En effet, si respiration et matière organique sont fortement liées en milieu naturel, elles ne le sont plus du tout dans des sols artificialisés. Ce même patron fonctionnel a été observé dans le cas de la FDA mais de façon moins nette.

Au final, une structuration de la population d'échantillons prenant en compte l'ensemble des données quantitatives et qualitatives n'a pas pu être valablement dégagée par le biais d'approches standard comme l'ACP. L'approche qui a donc été privilégiée et utilisée lors de la construction d'une typologie des sols est la classification hiérarchique ascendante qui a permis, sans pour autant identifier de groupes univoques, de dégager des groupes de sols à caractéristiques similaires. Et les relations entre les paramètres les plus intéressantes concernent les paramètres non classiquement mesurés dans les sols et les paramètres qualitatifs.

La classification hiérarchique ascendante a mis en évidence **l'état de surface comme un facteur plus structurant et explicatif des données que le paramètre occupation du sol** car il influence le fonctionnement actuel et l'activité biologique du sol. Ces résultats sont en accord avec Zhao *et al.* (2007) qui ont démontré dans leur étude, à l'aide d'un grand nombre d'échantillons, que l'occupation du sol locale et régionale n'était pas un bon indicateur des caractéristiques des sols. Ils lui ont préféré le type de végétation, divisé en huit classes. Le résultat est probablement lié au fait que l'état de surface est une donnée d'échelle plus fine que l'occupation du sol et reflète bien la spécificité de chaque sol. Elle apporte ainsi un complément d'information important qui n'est pas habituellement pris en compte dans la caractérisation des sols.

La typologie des sols établie a aussi permis d'extraire des informations sur les groupes formés et également sur les similarités des sols artificialisés avec certains sols non artificialisés en fonction des facteurs de la pédogénèse prépondérants. Des similarités ont en effet été mises en évidence entre les sols agricoles et certains sols d'habitat diffus dont la surface est en sol nu, ou des sols de remblais. Les sols d'habitat diffus sont peu affectés par l'artificialisation dans leur composition et sont peu sujets à une dégradation par action mécanique anthropique. Leurs caractéristiques sont plutôt liées à la nature du matériau parental. Ainsi, les sols sur roche mère argileuse en habitat diffus sont classés avec les sols agricoles, eux aussi souvent implantés sur roche mère argileuse sur la commune de Gardanne. De même, des sols d'habitat diffus sur calcaire sont classés comme des sols forestiers sur calcaire. Les sols de remblais, quant à eux, peuvent provenir de zones agricoles, induisant des similarités dans la composition chimique ou la texture. L'impact anthropique y est néanmoins plus marqué, par la présence d'artéfacts d'origine technique et d'une compaction de surface.

Ces résultats parlent en faveur d'une étude plus approfondie des sols anthropisés classifiés ici comme anthroposols et de leur préservation pour une partie d'entre eux. En particulier, Il serait souhaitable d'approfondir nos connaissances quant à la vulnérabilité des fonctions microbiennes dans les anthroposols.

Au final, on notera également que les échantillons analysés ne permettent pas de dégager de différences significatives entre les deux communes pour la majorité des paramètres retenus. Il existe cependant de fortes différences pour certaines valeurs microbiologiques et certains paramètres plus classiques dont il conviendra de comprendre la signification dans le futur. Une part de ces différences est encore une fois à imputer aux échantillons de sols anthropisés responsables de valeurs extrêmes, mais une part de la variabilité reste non expliquée pour l'instant.

2. Les « fonctions satisfaites » dans l'espace géographique

L'indice de qualité des sols conçu dans le projet est une valeur synthétique calculée en chaque point du territoire (selon un pas de 25 m) et qui peut être représenté cartographiquement. Sa construction résulte d'un traitement géomatique dont les différentes étapes peuvent être déclinées en cartes illustrant une composante de l'indice. Ces cartes ont été un préalable utile voire nécessaire à l'établissement des cartes définitives de l'indice, à savoir une spatialisation des fonctions satisfaites en rapport avec l'occupation du sol telles qu'indiquée par le PLU.

L'indice de qualité des sols intègre 5 fonctions et 9 usages de sols qui, dans l'absolu, peuvent être tous combinés et produire des valeurs qui peuvent être spatialisées. Les différentes étapes cartographiques nécessaires sont présentées ci-dessous à l'aide d'exemples. Nous n'avons retenu que les représentations les plus pertinentes pour l'interprétation ; elles nous ont permis d'alimenter notre réflexion. Celles-ci nous ont permis ensuite de choisir les cartes à intégrer dans l'atlas de restitution aux communes.

La première étape a consisté à produire les cartes de chacune des fonctions prise individuellement. Il a été choisi de ne les représenter que pour l'usage actuel des sols et sont présentées respectivement en **Figures 24 et 25** (ce sont les 5 cartes occupant la moitié gauche de la figure). Ces cartes sont vite apparues difficiles à interpréter et peu utiles. En effet, elles sont peu discriminantes et tendent à présenter une fausse impression de « bonne qualité » des sols. Elles sont donc à manipuler avec précaution et n'ont pas été transmises aux communes. Tout au plus remarque-t-on que les sols de Rousset pour une bonne part ne satisfont pas à aux fonctions de filtre et rétention en eau, essentiellement parce que pour une grande partie de ces sols la profondeur est faible et/ou la texture est grossière (partie est de la commune). De plus, ces cartes ne permettent pas de comparer les deux communes sur une base identique : en effet pour des usages peu exigeants, les fonctions seront toujours satisfaites. Autrement dit, à Gardanne, plus urbanisée que Rousset, les sols peuvent apparaître « meilleurs » alors qu'ils ne sont en fait qu'adaptés à la construction qui est peu exigeante en termes de caractéristiques des sols. A l'inverse, Rousset est une commune plus agricole dont les sols peuvent apparaître en comparaison avec Gardanne, moins « bons » alors que l'usage agricole est plus exigeant et requière des caractéristiques des sols plus spécifiques.

Ces cinq cartes thématiques peuvent être combinées en cartes des fonctions satisfaites pour un usage donné. Mais, de la même manière que précédemment, ces cartes n'ont que peu d'intérêt car dans le cas de nos deux communes il est effectivement possible de construire des bâtiments partout et, a contrario, l'agriculture ne peut pas reconquérir les sols urbains en l'état actuel de la situation. Elles ne font donc pas véritablement progresser dans la connaissance et elles ont été abandonnées au profit d'une carte des fonctions satisfaites pour l'usage actuel (**Figures 24 et 25**, carte occupant la moitié gauche de la figure). Cette représentation fournit une spatialisation de l'adéquation des sols à leur usage actuel. Même si les biais précédemment cités ne sont pas totalement éliminés, en particulier si l'on désire comparer les deux communes, cette représentation cartographique permet une lecture du territoire plus appropriée aux objectifs que nous nous sommes fixés. Que nous apprennent ces cartes ?

A Gardanne, les zones présentant 5/5 des fonctions satisfaites sont relativement importantes. Elles correspondent aux espaces artificialisés et forestiers de la commune (respectivement 26.8% et plus de 40% du territoire). Les zones des grands terrils ont été exclus car ceux-ci sont actuellement sous le contrôle du BRGM et ne peuvent accueillir aucune activité, même s'ils sont pour partie déjà boisés. Les catégories 3/5 et 4/5 sont regroupées en deux grandes zones relativement centrales, donc proche du centre de la commune, mais également disséminées sur l'ensemble du reste de la commune à l'exception du tiers sud-est. Elles correspondent clairement aux zones agricoles. Les zones avec 1 ou

2 fonctions satisfaites sur 5 s ont très peu étendues et distribuées sur l'ensemble du territoire. A Rousset ce sont les catégories 2/5 et 3/5 qui dominent le paysage indiquant une adéquation limitée des sols à leur usage actuel. La classe 4/5 est présente dans des zones boisées ou de garrigue (flancs du plateau du Cengle au nord, par exemple) et la classe 5/5 est disséminée sur le territoire, plus particulièrement présente dans les zones urbanisées (centre-ville, zones industrielles).

Ces cartes d'adéquation à l'usage actuel semblent indiquer dans un premier temps une adéquation des sols plus faible à leur usage actuel à Rousset qu'à Gardanne. En fait Rousset, à cause de sa forte composante agricole présente de plus grandes surfaces à usage exigeant, induisant des notes plus faibles sans que l'on puisse réellement en conclure que les sols de cette commune sont « moins adaptés » à leur usage actuel que ceux de Gardanne.

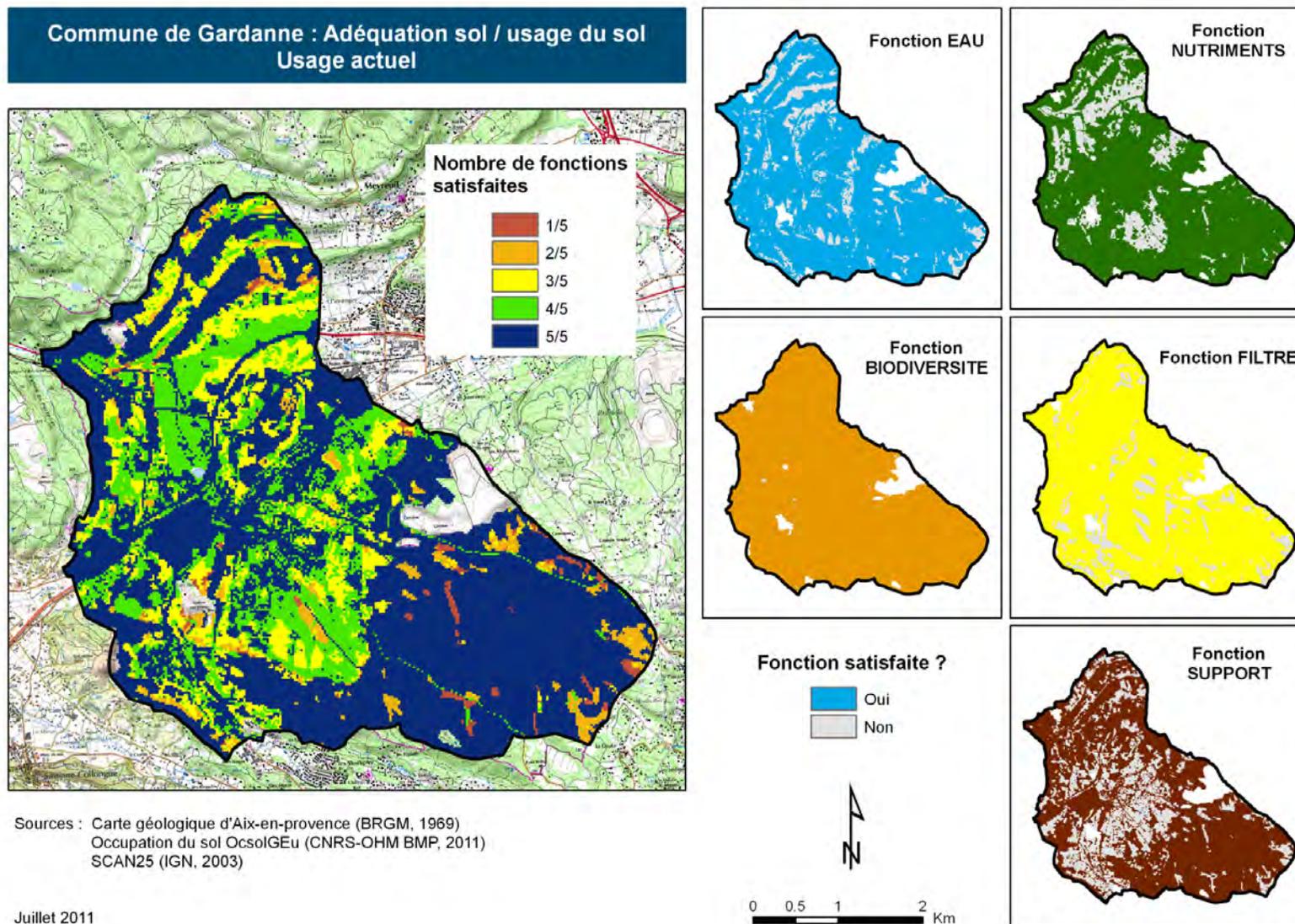


Figure 24 : Carte d'adéquation du sol à l'usage actuel du sol présentée en nombre de fonctions satisfaites (à gauche) et cartes produites par fonction pour l'usage actuel (à droite) pour Gardanne.

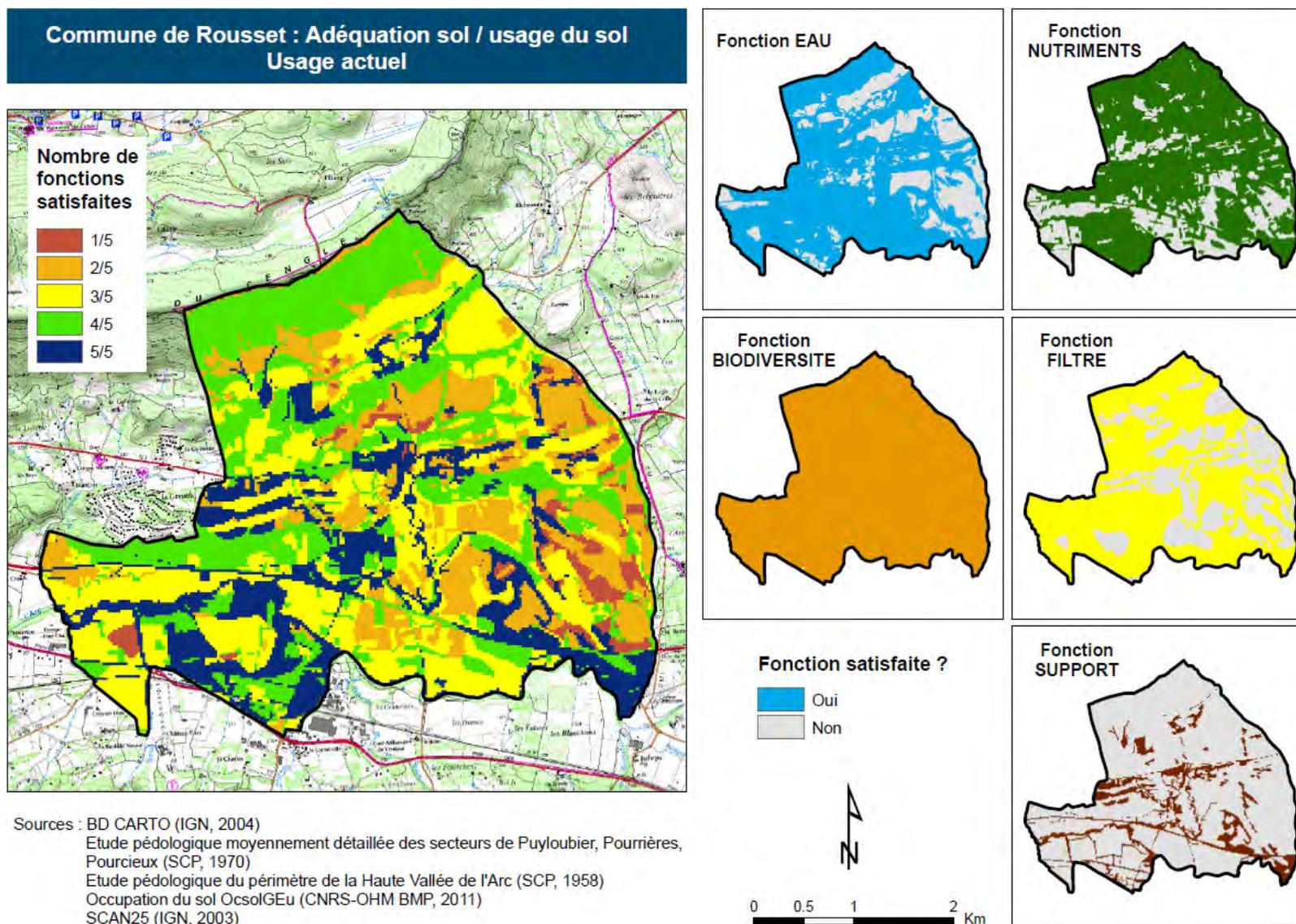


Figure 25 : Carte d'adéquation du sol à l'usage actuel de ce sol présentée en nombre de fonctions satisfaites (à gauche) et cartes produites par fonction pour l'usage actuel (à droite) pour Rousset.

3. Géographie de la polyvalence d'usage

L'étape suivante a consisté à agréger les cartes successives obtenues pour chaque usage en une carte de polyvalence d'usage afin de mettre en évidence les potentialités des sols. Cet indice offre une vision contrastée des deux communes, d'une part en termes de nombre de fonctions satisfaites pour l'ensemble des usages, mais également en termes de répartition spatiale.

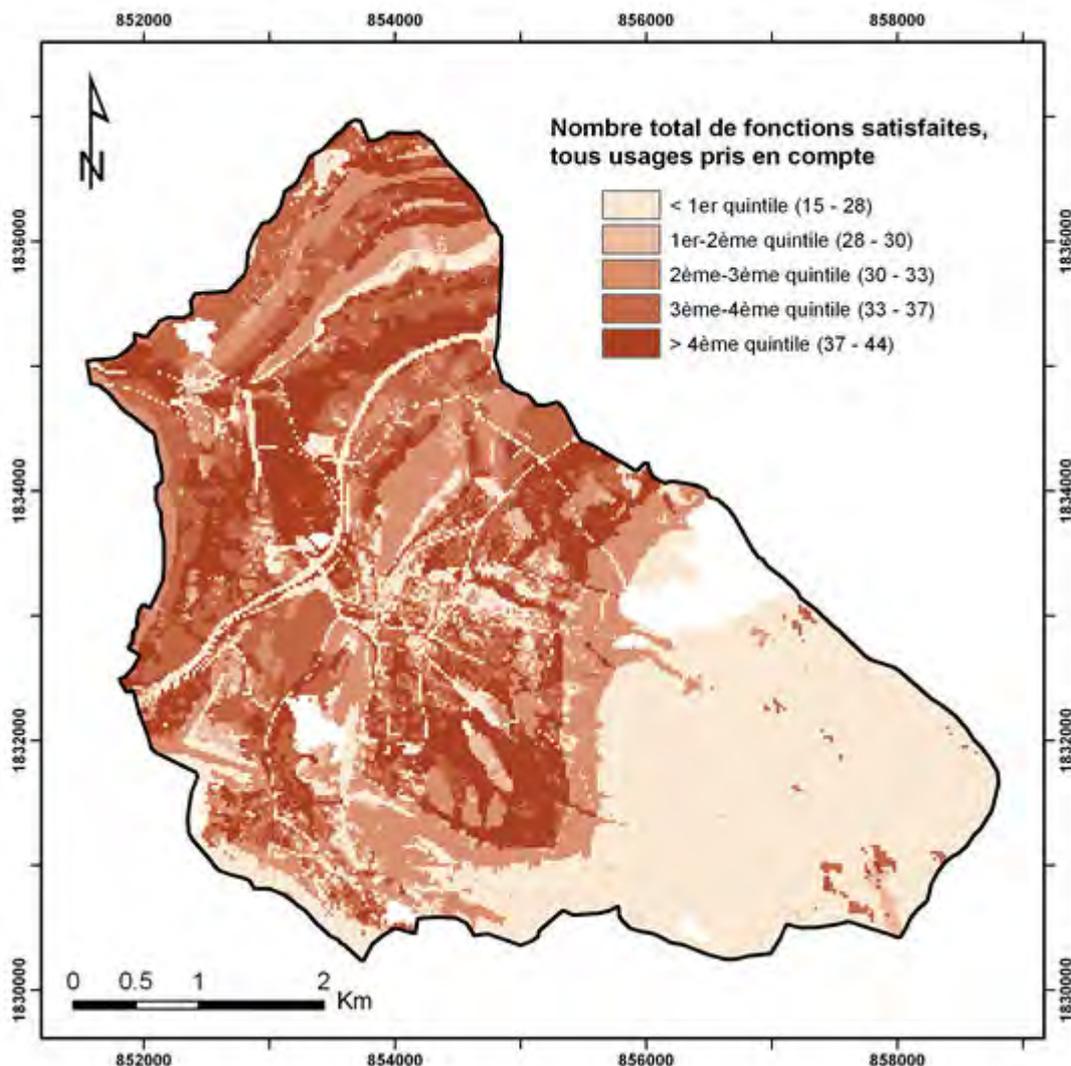


Figure 26 : Carte de l'indice de polyvalence d'usages spatialisé par pixel sur la commune de Gardanne en 2008

Pour Gardanne (**Figure 26**), cette représentation met en évidence de grandes différences au sein de la commune, avec des sols présentant une polyvalence d'usages basse dans le tiers est du territoire et une polyvalence relativement élevée dans le reste. On note ainsi que les sols qui apparaissent en adéquation avec l'usage actuel (Figure III-16) ne sont en fait adéquats *que* pour cet usage-là, alors que les sols moyennement adaptés à l'usage actuel sont par contre potentiellement utilisables pour d'autres usages. Ces résultats mettent en évidence la marge de manœuvre potentielle existant dans l'utilisation des sols de cette commune.

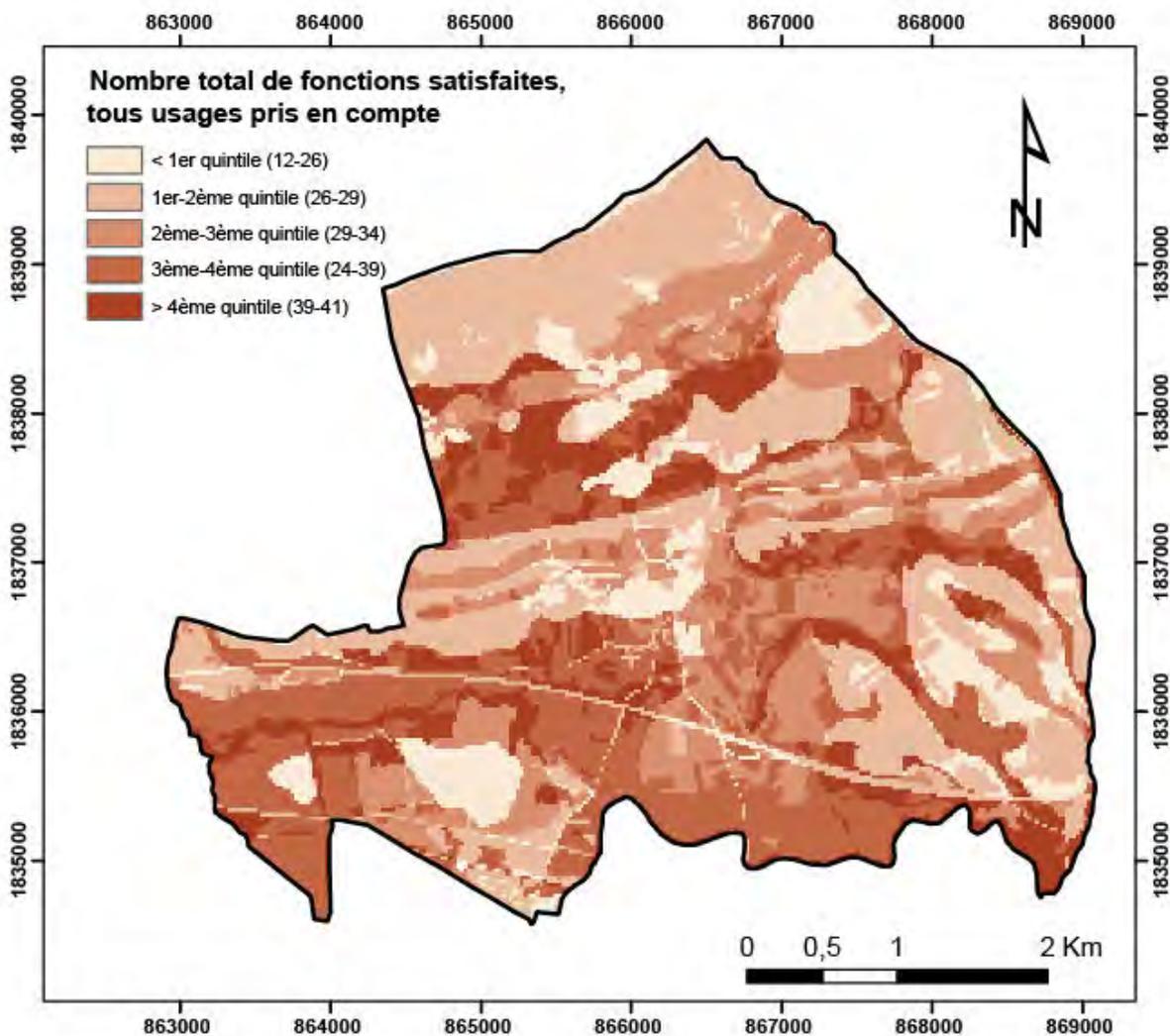


Figure 27 : Carte de l'indice de polyvalence d'usages spatialisé par pixel sur la commune de Rousset en 2008

Contrairement à Gardanne, les sols à forte polyvalence sont très distribués sur l'ensemble du territoire de Rousset, sans véritable « continuité » à l'exception une zone un peu plus homogène au nord-ouest du village (**Figure 27**). Les zones les plus limitées en termes d'usage sont distribuées sur l'ensemble du territoire et semblent toucher toutes les occupations du sol. Malgré tout, les histogrammes de fréquences (**Figure 28**), et surtout les courbes cumulées, indiquent des répartitions dans les différentes classes de polyvalence relativement similaires entre les 2 communes avec cependant une fréquence de sols avec peu de fonction satisfaites plus importante à Rousset qu'à Gardanne.

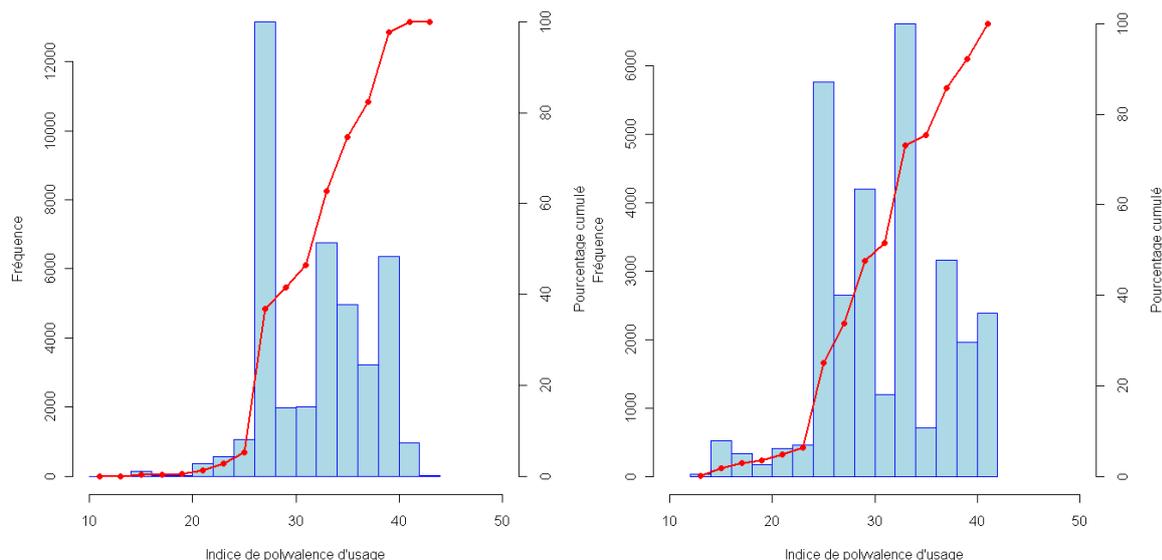


Figure 28 : Histogrammes des fréquences et courbes cumulées du nombre de fonctions satisfaites pour tous usages confondus en 2008 et par pixel pour Gardanne (à gauche) et pour Rousset (à droite).

Cette approche permet de procéder à une évaluation générale de la qualité des sols sur la totalité de l'espace communal. Cette information peut donner lieu à une approche quantitative, en totalisant les superficies des zones offrant des indices de polyvalence les plus élevés, par exemple, ce qui peut être un moyen de suivi et de gestion de la diversité du potentiel pédologique sur la longue durée. Cependant, ces cartes pour intéressantes qu'elles soient pour la compréhension des potentialités des sols, restent difficilement exploitables directement par un décideur. Le concept développé ici peut et doit donc être adapté à la réalité communale.

5- Notion de polyvalence d'usage des sols et planification urbaine

A partir de l'indice de polyvalence d'usage des sols présenté précédemment, il devient possible d'envisager les modalités d'une prise en compte de la qualité des sols dans le processus de planification de l'espace et d'élaboration d'une politique d'urbanisme. Il convient d'en donner les clés et de procéder à quelques recommandations.

1- Principe d'utilisation de l'information de polyvalence d'usage des sols

Disponible sous forme de cartes relativement précises (résolution de 25 m), les données de polyvalence d'usage des sols peuvent servir les collectivités publiques dès lors qu'elles sont « formatées » à l'échelle la plus pertinente et proposées dans le cadre « opérationnel » le plus approprié. L'agrégation de l'information par pixel peut par exemple être effectuée à différents niveaux géographiques correspondant aux niveaux de décision communaux. Elle offre ainsi la possibilité de conduire une approche géographique de la qualité des sols et des opportunités offertes pour construire un projet de territoire conforme aux principes de gestion durable des sols sans compromettre le développement économique et social. L'interprétation et la valorisation de l'information produite est en effet relativement simple : **plus une zone géographique possède un indice de polyvalence d'usage élevé, plus il convient de dédier cet espace à un usage des sols qui ne compromette pas leur qualité et/ou qui requière de bonnes qualités du sol pour se développer** (agriculture, jardins, etc.). A l'opposé, une zone géographique ayant un indice de polyvalence d'usages faible offre de moindres opportunités. La conservation des sols y fait donc moins enjeu et les usages qui peuvent y être planifiés sont précisément ceux qui sont les moins exigeants concernant les fonctions du sol (voirie, habitat, zone d'activités, etc.).

Quand se servir de l'information de polyvalence d'usage des sols ?

Dans le cadre de la définition d'une politique d'urbanisme et de l'établissement de documents réglementaires, l'utilisation de l'information de polyvalence d'usage des sols devrait intervenir lors des études initiales, et alimenter le rapport de présentation qui est produit préalablement au PADD (Figure 29). Combinées aux autres éléments composant l'état initial de l'environnement et les divers diagnostics socio-économiques, les données de distribution spatiale des fonctions écologiques des sols et de polyvalence d'usage des sols seraient à même de compléter les connaissances détenues sur le territoire et d'éclairer la prise de décision en matière de planification.

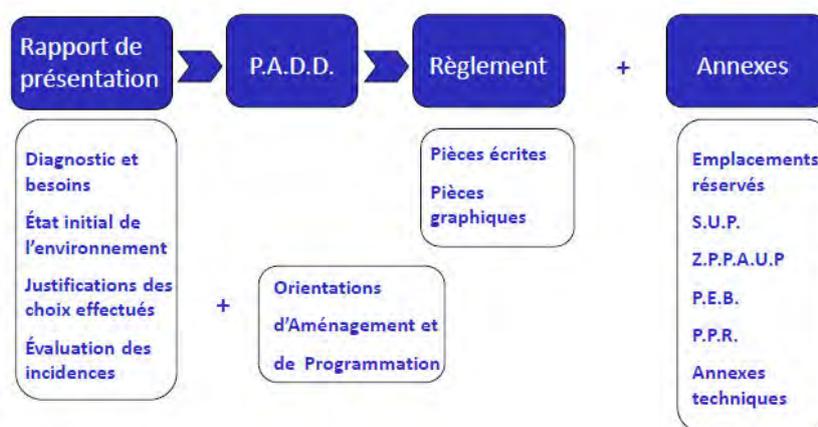


Figure 29 : Une démarche classique d'élaboration d'un PLU (le cas de Marseille)

L'indice de polyvalence d'usage et certaines cartes associées pourraient être utilisés à plusieurs niveaux et à différentes étapes de l'élaboration de la politique d'urbanisme et de la planification des usages des sols d'une commune ou d'une intercommunalité. A ce stade de la recherche, les possibilités d'utilisation suivantes ont d'ores et déjà été identifiées :

- dans le cadre des réflexions générales sur le territoire et l'environnement : Charte de l'environnement, Agenda 21 local, Plan Climat Energie Territorial, etc. ;
- au moment de la réflexion en amont sur les espaces à protéger dans les plans locaux d'urbanisme, en rapport notamment avec les usages qu'ils peuvent accueillir ;
- au moment de la présentation et de l'explication des choix d'urbanisme au public ;
- au moment des décisions sur les autorisations d'urbanisme : la référence à l'indice peut permettre d'expliquer et justifier des refus de permis de construire, par exemple.

Comment exploiter l'information ? A quel niveau de la démarche PLU ?

L'information de polyvalence d'usage des sols peut être demandée dans le cadre de l'évaluation environnementale du document d'urbanisme à élaborer. Il est en effet possible d'intégrer une étude pour connaître les potentialités des sols dans le diagnostic environnemental.

Il est ensuite possible d'insérer la préservation de la multifonctionnalité des sols comme objectif dans les documents d'urbanisme, à différents niveaux :

1) dans les outils généraux du PLU :

- dans le rapport de présentation : ce document est stratégique et non contraignant, mais l'état initial de l'environnement doit néanmoins être exhaustif ;
- dans le PADD : il s'agit d'orientations générales d'aménagement et d'urbanisme, dans le respect des objectifs L110 et L121-1 du Code de l'Urbanisme (gestion économe des sols) ; ce document est stratégique, non contraignant, mais le règlement doit être cohérent avec lui ;

2) dans les outils particuliers du PLU:

- les orientations particulières d'aménagement : celles-ci sont contraignantes, mais ne concernent que certaines zones ;
- le règlement et les zonages du PLU : contraignant pour chaque zone, mais difficile à orienter vers la protection des sols sur les zones urbaines ; plus facile pour les zones agricoles (potentiel agronomique ou biologique des sols) et les zones naturelles ;
- les emplacements réservés : ceci vise les installations d'intérêt général (captage carbone ?) ; contraignant mais ne concerne que certaines zones.

Au final, on peut considérer qu'il existe deux manières de se servir de l'information de polyvalence d'usage des sols :

- soit dans une simple réflexion en interne (au moment de la réflexion en amont sur les sols à protéger, pour divers usages) ;
- soit par un affichage transparent :
 - dans la rédaction du PLU, ainsi qu'au moment de la présentation et de l'explication des choix d'urbanisme au public. Ceci permet une sensibilisation des acteurs ;
 - au moment des décisions sur les autorisations d'urbanisme (la référence à l'indice permet par exemple d'expliquer des refus de permis de construire).

Mais dans les deux cas, l'indice devient alors opposable.

2- Polyvalence d'usage des sols et planification en vigueur à Gardanne et Rousset

Principes d'analyse

Dans le cas du projet UQUALISOL-ZU, la production des données sur les sols ne s'est pas faite dans le cadre décrit précédemment. En effet, le projet ne résulte pas d'une commande des municipalités de Gardanne et Rousset, ou d'une démarche qu'elles auraient voulues conduire avec les laboratoires partenaires en prévision de l'élaboration de leurs PLU respectifs. D'ailleurs, les PLU de ces deux communes avaient déjà été mis en chantier lors du commencement du projet. Les résultats issus d'UQUALISOL-ZU ne permettent donc pas de rendre compte et d'évaluer la pertinence d'une intégration d'une connaissance de la qualité des sols, considérée à partir de la notion de polyvalence d'usages, au départ et tout au long de l'élaboration d'une planification urbaine de type PLU. Cette expérimentation reste à faire et pourrait très opportunément constituer une suite au présent projet, nous y reviendrons. Cependant, les données produites sur Gardanne et Rousset n'en sont pas moins exploitables pour procéder à une évaluation de l'intérêt de connaître la qualité des sols pour l'élaboration d'un PLU *a posteriori*. En effet, **quelle est la polyvalence d'usage des sols dans les zonages fraîchement dessinés par les deux municipalités ?** Quelle information nouvelle ces données nous apportent-elles sur les deux territoires et quelle lecture peut-on faire des choix qui ont été faits avec ce nouvel éclairage ? Sans préjuger du bien-fondé de ces choix et sans intention de défaire ou condamner les orientations prises en matière de planification spatiale, ce qui n'est ni notre rôle ni notre projet, quel commentaire peut-on formuler sur les options d'aménagement de l'espace dans les deux PLU à la lumière de l'information de polyvalence d'usage des sols ?

Pour répondre à ces questions, nous avons cherché à caractériser les zonages d'urbanisme en fonction de ce que sont les données de polyvalence d'usages des sols issues de nos travaux. Pour cela, les données de polyvalence d'usage des sols, produites en mode raster à une résolution de 25 m (les cartes fournissent une valeur de polyvalence d'usage tous les 25 mètres), ont été agrégées pour chaque zone du PLU. Ceci a permis d'obtenir la valeur moyenne de polyvalence d'usage ainsi que les indicateurs statistiques classiques (minimum, maximum, écart-type, etc.) pour chacune de ces zones (**Figures 30 et 32**). Offrant une synthèse des valeurs initiales, ces cartes sont nécessairement moins précises ; chaque zone PLU présente en fait une certaine variabilité de la polyvalence d'usage des sols autour de la valeur moyenne ici représentée, et ce d'autant plus que la zone est étendue. Afin d'améliorer l'appréciation de la polyvalence d'usage des sols dans les zones PLU, la carte de la valeur moyenne est donc complétée par celle de la disparité de la polyvalence d'usage à l'intérieur de chaque zone, représentée par le rapport entre l'écart-type et la moyenne de chaque zone. L'information devient plus aisée à exploiter, permettant une appréciation de la polyvalence d'usage des sols dans les zones A, AU, N et U des deux PLU.

Pour mener l'analyse critique des zonages des PLU en matière de polyvalence d'usage des sols, nous avons retenu le principe d'observer successivement les zones AU, puis les zones A, les zones U et enfin les zones N. L'idée est de s'intéresser au potentiel offert par les sols dans chacune des zones de chaque catégorie, en ayant pour critère d'appréciation de l'adéquation entre polyvalence d'usage et planification urbaine le fait que plus une zone présente des sols avec une polyvalence d'usage élevée, plus il convient que la planification la préserve de l'urbanisation, qui se révèle l'usage le plus destructeur des sols. Ainsi, les zones AU, promises à des aménagements nouveaux pour accueillir de l'urbanisation résidentielle ou des zones d'activités économiques, sont-elles particulièrement intéressante à observer. Si elles sont planifiées en des lieux où les sols offrent une polyvalence d'usage faible ou relativement faible, on peut considérer que le patrimoine pédologique de la collectivité demeure préservé. En revanche, si cette polyvalence d'usage y est élevée, ce sont des sols ayant des fonctions écologiques relativement nombreuses et pouvant accueillir des usages exigeants qui sont promis à la disparition ou à la dégradation. Les zones A, quant à elles, sont intéressantes à analyser notamment pour y vérifier que la polyvalence d'usage des sols y est élevée.

Par commodité de présentation, les résultats sont présentés d'abord pour la commune de Rousset, puis pour Gardanne.

Situation à Rousset

La polyvalence d'usage des sols des zones du PLU de Rousset présente une géographie très contrastée (**Figures 30 et 31**). Elle s'explique par la variabilité de la polyvalence d'usage des sols dans la commune (voir cartes dans la partie précédente), et par l'inégale superficie des zones en question. En procédant selon la démarche énoncée précédemment, l'analyse de la plus ou moins bonne adéquation du zonage aux opportunités offertes par les sols permet d'aboutir aux constats suivants :

- les zones AU offrent des caractères très contrastés. Autour du noyau urbain classé en zone U, quatre zones AU offrent des polyvalences d'usage moyennes relevant de quatre des cinq classes de la carte. On doit en particulier relever que l'une d'elles, située en continuité de la zone U en direction du sud-ouest, appartient à la classe de valeur la plus élevée. Sans connaître le bien fondé du choix de consacrer cet espace au développement futur de l'agglomération, on peut souligner que celui-ci se fera dans une zone où les sols offrent de larges possibilités d'usages, notamment les plus exigeants (la carte de la variabilité de la polyvalence d'usage conforte cette interprétation, car la zone y est présentée avec un faible ratio écart-type/moyenne). Dans le même ordre d'idée, la zone AU située à l'extrême sud-ouest de la commune, dans le prolongement de la grande zone U correspondant à la zone industrielle, présente également des sols intéressants en termes de polyvalence d'usage. La moyenne se situe dans des valeurs centrales mais l'hétérogénéité interne à la zone est très élevée (classe 0,19-0,22).
- les zones A se caractérisent par des sols aux polyvalences d'usages moyennes et élevées, ce qui paraît adéquat. Deux des quatre zones PLU ayant les plus fortes valeurs moyennes de polyvalence d'usage sont d'ailleurs des zones agricoles. Cependant, la très grande majorité des espaces dévolus aux activités agricoles se situent dans la classe intermédiaire.
- la valeur moyenne des zones U se situe en général plutôt dans les classes de faibles valeurs, en particulier la grande zone au centre de la commune. On peut toutefois noter qu'une zone U localisée à l'extrême sud-est du territoire appartient à la seconde classe de valeurs par ordre d'importance (classe 33,03-36,25) et qu'une autre, très petite, au nord-ouest du noyau urbain, appartient même à la classe supérieure.
- les zones N, quant à elles, présentent des polyvalences d'usage relativement disparates, mais davantage situées du côté des valeurs les moins élevées. Seule une zone localisée à l'extrême sud-est du territoire s'inscrit dans la classe des plus fortes valeurs de polyvalence d'usage. Compte-tenu des restrictions d'usage et des limitations relatives aux aménagements dans les zones N, on peut considérer que la réglementation pourra jouer un effet « réserve » sur les sols de cet espace. La grande zone N sur les flancs du plateau du Cengle est un peu particulière car elle est relativement abrupte et est adossée au grand massif de la Ste-Victoire : elle fait partie de la zone du « Grand Site Sainte-Victoire ».

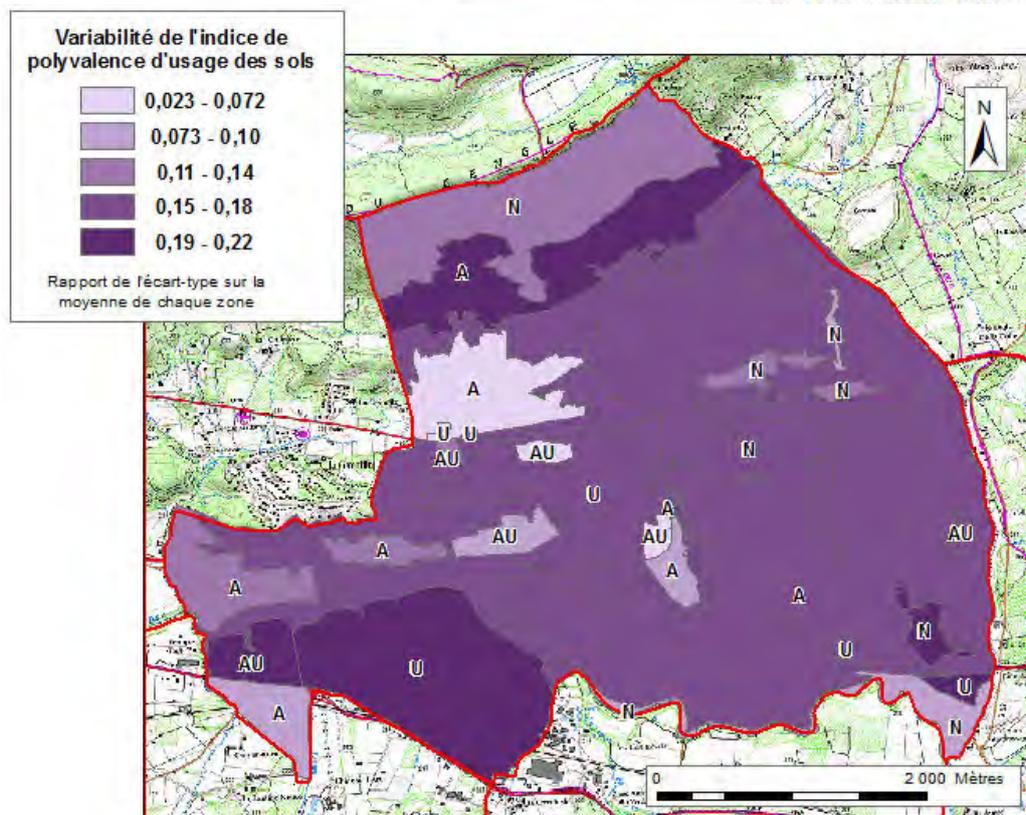
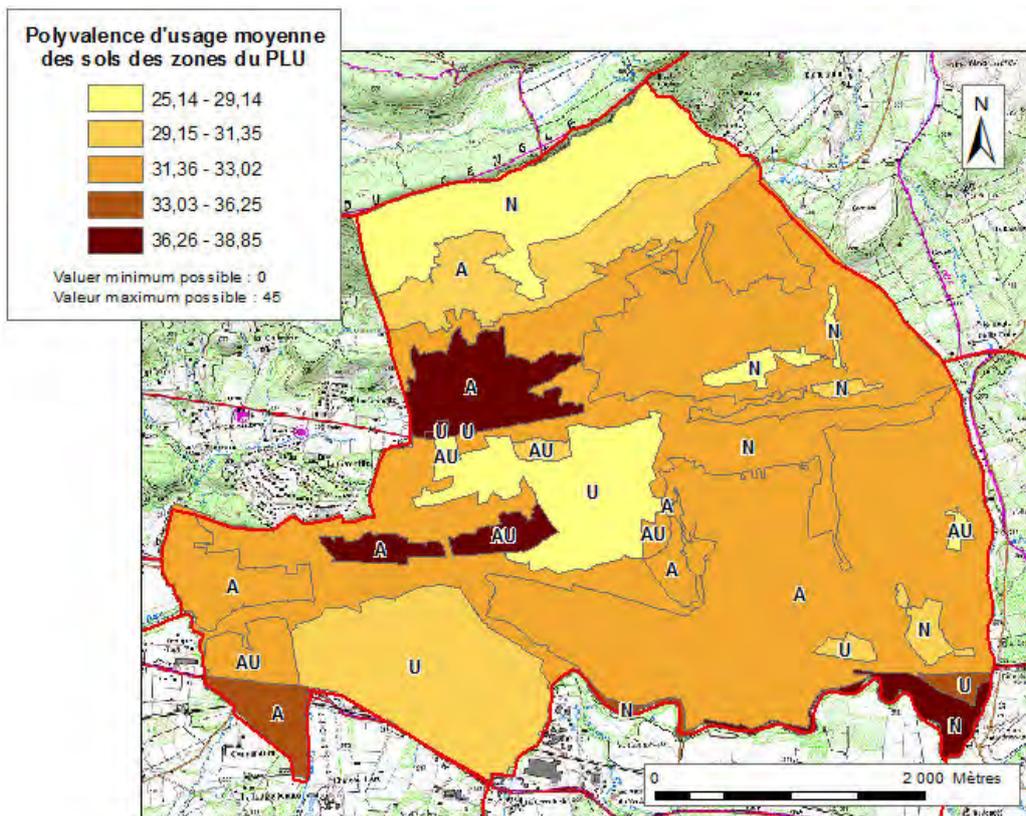


Figure 30 : Polyvalence d'usage des sols par zones du PLU de Rousset
Valeur moyenne (haut) et variabilité intra-zone (bas)

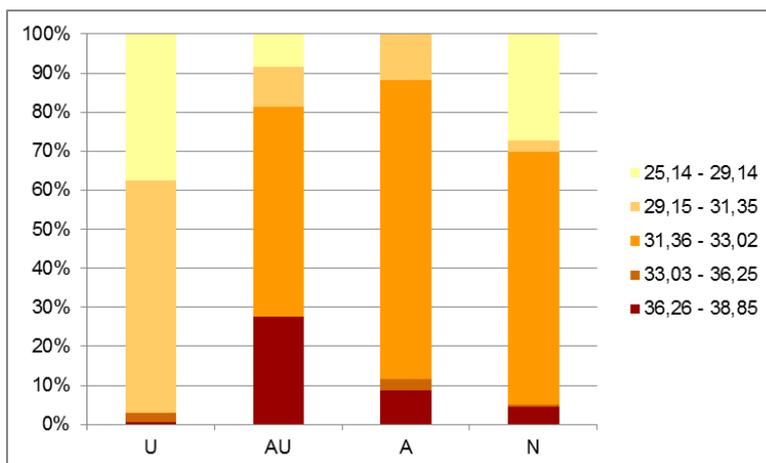


Figure 31 : Part de chaque classe de la carte de la Figure III-22 dans la superficie totale de chaque catégorie de zones du PLU à Rousset

Situation à Gardanne

Comme à Rousset, la polyvalence d’usage des sols de Gardanne présente une assez grande diversité (**Figures 32 et 33**). Cependant, le zonage du PLU gardannais comprend un effectif plus élevé de zones, dont beaucoup sont de petites tailles. Il en résulte une cartographie qui distingue un plus grand nombre de cas de polyvalence d’usage moyenne, donnant lieu à une image semblant montrer une plus forte hétérogénéité qu’à Rousset. Il s’agit ici d’un effet de maille. Il importe donc de conserver en tête qu’un découpage moins fin de l’espace donnerait une autre cartographie, peut-être moins contrastée et ainsi plus proche de celle de Rousset. L’effet de maille joue d’ailleurs sur la carte de la variabilité de l’indice de polyvalence d’usage des sols intra-zone. En effet, à la différence de Rousset, les valeurs de polyvalence d’usage à l’intérieur des zones du PLU de Gardanne varient moins. Les zones semblent ainsi plus homogènes sur ce critère.

L’analyse de la plus ou moins bonne adéquation du zonage aux opportunités offertes par les sols permet d’identifier plusieurs points pouvant alimenter une discussion sur l’intérêt d’une intégration d’une connaissance des sols pour l’élaboration d’une planification de l’espace. Plus précisément :

- les zones AU du PLU de Gardanne, relativement nombreuses, se situent aussi bien sur des espaces présentant de faibles polyvalences d’usages des sols que fortes valeurs. Néanmoins, on doit relever que plusieurs des plus grandes d’entre elles appartiennent aux sites offrant certains des sols les plus polyvalents de la commune, en particulier à l’Est, à l’Ouest et au Sud. Sur les 260 ha de zones AU inscrites au PLU, 48% se situent dans la classe de plus fortes valeurs de l’indice de polyvalence d’usage (36,08 – 39,05) et seuls 8,5% appartiennent à la classe des plus faibles valeurs (moins de 30,54). Indiscutablement, l’urbanisation future de Gardanne est prévue sur des quantités non négligeables de terres offrant de grandes possibilités d’usage. La collectivité en a-t-elle eu bien conscience au moment de ses choix ?
- les zones A, qui ne sont que trois, occupent très majoritairement des sols pour lesquels l’indice de polyvalence est très élevé. En effet, sur les 392 ha d’espaces dévolus aux activités agricoles 97% sont situés dans la classe des plus forts indice de polyvalence. La délimitation de ces zones apparaît tout à fait opportune avec les recommandations qui seraient à faire à partir d’une connaissance de la qualité des sols.

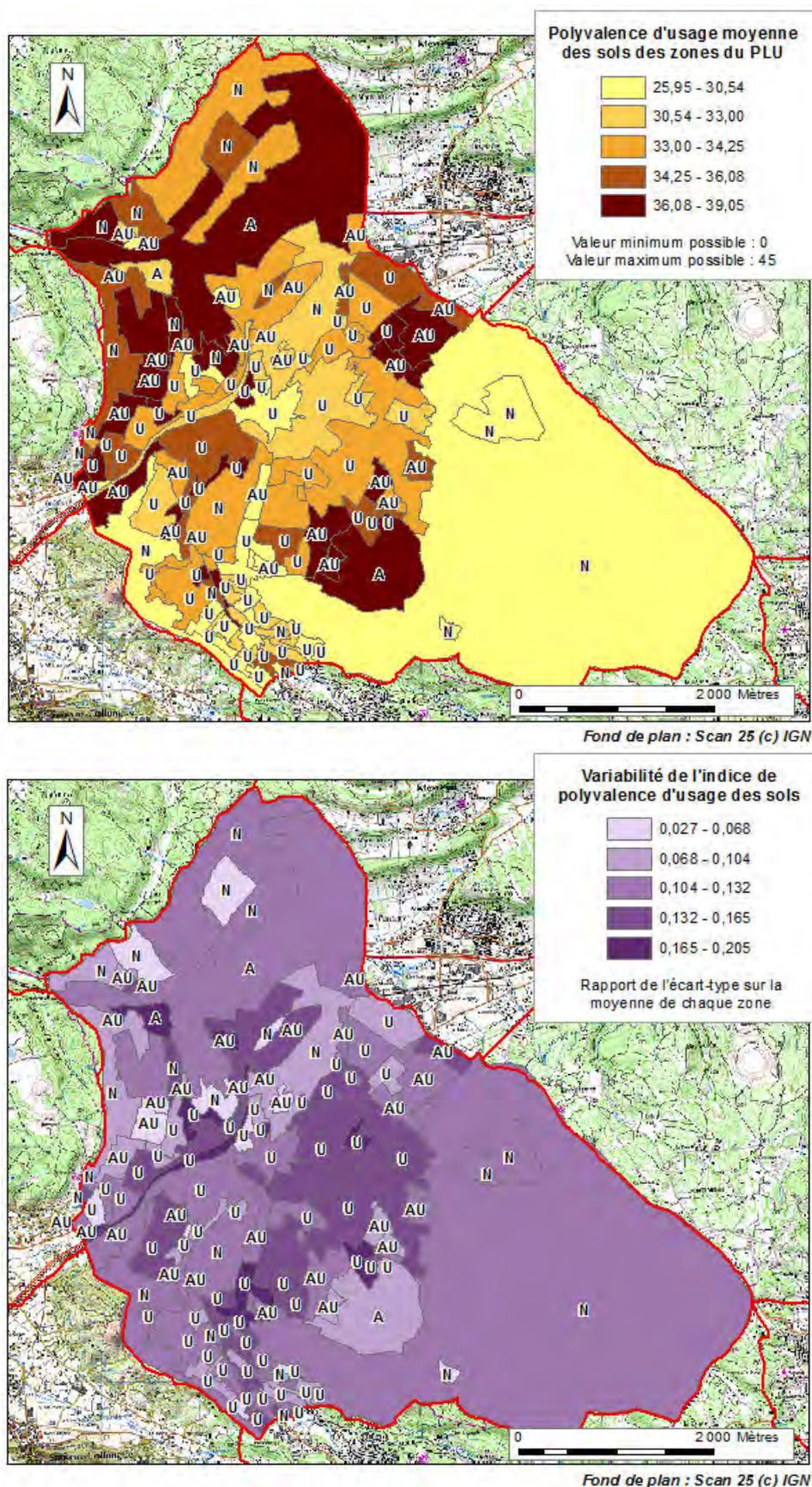


Figure 32 : Polyvalence d'usage des sols par zones du PLU de Gardanne
Valeur moyenne (haut) et variabilité intra-zone (bas)

- à la différence de Rousset, les zones U inscrites au PLU de Gardanne ont en moyenne des indices de polyvalence d'usage plutôt moyens voire élevés. Un peu plus de 40% de la superficie totale des zones U ont un indice placé dans la classe intermédiaire (33,00 – 34,25), et encore plus de 18% relèvent de la seconde plus forte classe (34,25 – 36,08). Cette originalité par rapport à Rousset traduit certainement le fait que la ville, plus grande, s'est déjà étendue sur d'anciennes terres agricoles pouvant remplir de nombreuses fonctions.
- les zones N, quant à elles, sont très majoritairement établies sur des espaces où la polyvalence d'usage des sols est faible.

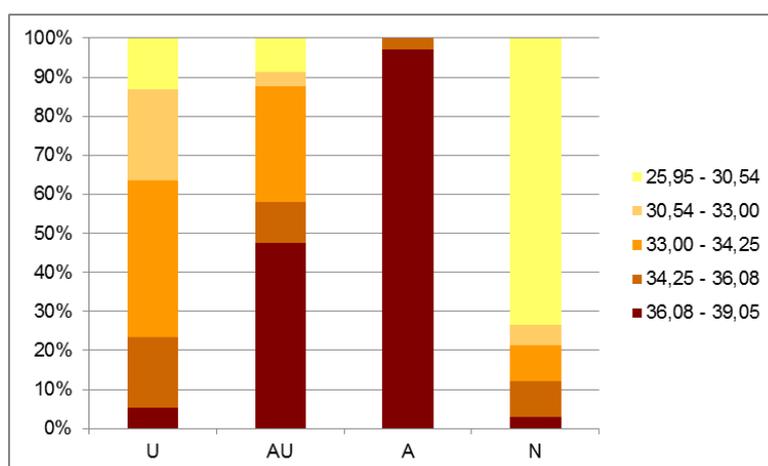


Figure 33 : Part de chaque classe de la Figure III-24 dans la superficie totale de chaque catégorie de zones du PLU à Gardanne

Principaux enseignements

Sans entrer dans les détails, il ressort de notre rapide évaluation de l'adéquation des zonages des PLU avec les potentialités offertes par les sols sur les deux communes que les situations sont assez divergentes et amènent quelques commentaires. En premier lieu, il apparaît que les meilleurs sols, ceux qui offrent la plus grande polyvalence d'usage, sont pour beaucoup d'entre eux voués à des aménagements à usage d'habitat ou à l'accueil d'activités économiques. En d'autres termes, il ne sera guère tiré parti de leurs multiples fonctions puisqu'ils seront très vraisemblablement décapés, artificialisés, clos. Ceci est particulièrement notable à Gardanne, où près de la moitié des surfaces classées en AU appartiennent aux sols les plus polyvalents. Cette situation, qui ne peut pas toujours être évitée, dès lors qu'il s'agit de permettre le développement économique des territoires, peut néanmoins être regrettable lorsqu'elle s'accompagne d'une délimitation spatiale des zones agricoles qui ne concerne guère les meilleurs sols... Tel n'est pas le cas à Gardanne, mais à Rousset on peut s'étonner de constater que les sols offrant les indices de polyvalence les plus élevés n'entrent que pour une faible proportion dans les espaces voués à l'agriculture dans le PLU. Sans préjuger à nouveau de la justesse des choix qui ont été réalisés par les deux collectivités, il nous apparaît que la mise à disposition d'une connaissance sur les sols telle que l'indice de polyvalence d'usage, dès le départ de la démarche PLU, aurait pu conduire à d'autres zonages sans entraver les projets locaux.

Cependant, les spécificités de chaque territoire et les motivations politiques et socio-économiques qui conduisent à l'élaboration d'un PLU ne permettent pas véritablement de comparer rigoureusement les deux situations. Il est recommandé que l'emploi de l'indice de polyvalence d'usage des sols et des cartographies dérivées se fasse pour un territoire en le confrontant avec lui-même, c'est-à-dire en étudiant les différentes sous-parties qui le composent.

IV. DISCUSSION

Les travaux menés dans le cadre du projet ont permis à la fois de produire des connaissances nouvelles sur les sols et d'alimenter la réflexion sur leur gestion au niveau local. Outre des connaissances factuelles sur les caractéristiques pédologiques des sols, l'évolution de l'occupation des sols ou encore la prise en compte des sols dans les choix d'urbanisme des deux communes étudiées, le projet a donné l'occasion d'investir le droit des sols et de réfléchir sur les possibilités d'innovation en matière d'intégration d'une connaissance des sols dans les politiques locales de planification de l'espace.

Au terme de cette recherche, plusieurs thèmes de discussion surgissent et nécessitent d'être abordés. Il est nécessaire en effet de questionner la méthodologie mise en œuvre au regard des résultats obtenus, tout comme il est indispensable d'interroger le bien-fondé de la démarche et de ses objectifs par rapport au contexte social et politique, que ce soit en termes de fiabilité des résultats qu'en terme de portée opérationnelle et de reproductibilité de la méthode. Mains sujets pourraient être ainsi discutés, mais nous avons choisi d'aborder les trois points suivants, qui nous paraissent les plus importants :

- la pertinence de questionner la qualité des sols dans le processus de planification urbaine
- l'échelle opérationnelle pour une prise en compte de la qualité des sols dans les politiques d'urbanisme
- la méthodologie d'évaluation de la qualité des sols

A-À propos de la pertinence de questionner l'usage et la qualité des sols dans le processus de planification urbaine

Dans le projet UQUALISOL-ZU, la question de la qualité des sols a été posée sous un nouvel angle. Nous avons montré que les sols et leurs caractéristiques peuvent ne plus être étudiés pour eux-mêmes, ou pour un usage particulier. Ils peuvent être évalués en vue d'en faire le meilleur usage à l'échelle d'une commune, unité de gestion et de planification de l'espace. Cette approche de la qualité des sols peut étonner ; elle semble pourtant très pertinente au regard de l'évolution des usages de l'espace et de l'influence toujours plus grande des activités et des aménagements humains sur les milieux.

En étudiant les dynamiques d'évolution de l'occupation des sols à Gardanne et à Rousset, on a pu constater que les usages des sols ont souvent varié en un même lieu dans le passé récent. L'occupation humaine des territoires a en effet été caractérisée par des avancées et des reculs, faisant se succéder des espaces habités et des espaces cultivés, des espaces cultivés puis des milieux semi-naturels, des milieux semi-naturels puis des espaces agricoles, etc. D'une certaine façon, il y a donc eu réversibilité dans l'occupation des sols et l'on doit sans doute admettre que c'est là une situation somme toute banale dans l'histoire des sociétés. Cependant, plusieurs questions sont posées.

On est en droit de s'interroger sur les possibilités d'une réversibilité de l'usage et de l'occupation des sols dans les espaces actuellement urbanisés et dans ceux qui l'ont été dans les périodes les plus récentes. En effet, les travaux d'aménagement, de terrassement et de viabilisation des terrains ouverts à l'urbanisation conduisent aujourd'hui à des transformations profondes des sols comme en attestent les observations effectuées sur le terrain des deux communes. Des quantités parfois considérables de sols sont déplacées ou mélangées. Par ailleurs, les implantations industrielles, et ce dès le début de l'ère industrielle, ont pour beaucoup d'entre elles laissé et continuent de laisser des pollutions et des contaminations diverses qui empêchent toute reconversion sans intervention spécifique de restauration par l'ingénierie écologique et/ou pédologique. Il devient donc urgent de caractériser la qualité des sols voire **d'établir de façon systématique une mémoire de l'usage des sols**, dans la mesure où des remaniements très importants peuvent être opérés et que des usages passés peuvent profondément influencer la qualité actuelle. Il s'agirait de repérer la diversité des sols sur un territoire, de caractériser et localiser les sols « endogènes » et les sols d'apport en vue de permettre la meilleure planification d'usage et de changement d'affectation. Il apparaît en effet que la mémoire de l'occupation ancienne des sols n'est pas très solide et l'on peut s'interroger sur l'intérêt qu'il y aurait à sa prise en compte dans la planification actuelle. Si dans un pays comme la France, beaucoup d'anciennes occupations industrielles des sols sont connues dès lors qu'elles ont pu laisser des contaminations (bases de données BASIAS et BASOL), il n'existe pas d'historique pour la plupart des autres occupations et usages des sols. Dans certains pays des investigations historiques sont demandées en préalable aux investigations de terrain sur les sites potentiellement contaminés. Cependant ces compilations d'information sont effectuées *a posteriori* avec le risque de ne pas pouvoir retracer l'histoire exacte du site faute de documentation suffisante. Il apparaît donc important de **mémoriser et d'enregistrer à chaque mutation les changements opérés dans l'occupation du sol**. En effet, les anciennes mises en valeur agricole, la présence d'anciens boisements ou d'anciennes zones humides, ne sont pas systématiquement recensées sur les territoires. En dehors des espaces agricoles exploités depuis quelques décennies, les sols demeurent donc relativement mal connus, ce qui est certainement une difficulté dès lors que l'on prône une gestion économe de l'espace, la reconversion de la ville sur elle-même, la conservation de la biodiversité ou plus simplement une approche plus « écologique » de l'aménagement de l'espace et des territoires. Sur toutes ces questions, une connaissance des sols apparaît évidente. Il ne serait donc pas superflu de **promouvoir la prise en compte des sols dans le processus d'élaboration des politiques d'urbanisme et la planification de l'espace** au plan local. Les **acteurs locaux** avec qui nous avons collaboré ont d'ailleurs semblé **adhérer à cette proposition**. Cependant, il est à noter que les élus et les techniciens de Rousset, la seule des deux communes à avoir été partiellement couverte par une cartographie des sols, ne connaissaient pas l'existence de ces cartes. Il semble donc que, dans ce

cas au moins, ce n'est pas la connaissance qui a fait défaut, mais bien l'idée de prendre en compte la notion de qualité des sols. Il importe à ce propos de mentionner que, dans une très grande majorité de cas, les maîtres d'œuvre des PLU ne sont pas les acteurs communaux, mais des bureaux d'étude. Or bien souvent il s'avère que ces prestataires n'ont pas de connaissances particulières en matière de sol, et qu'ils ne connaissent pas l'existence de documents comme les cartes des sols - il semble que cela ait été le cas pour Gardanne et Rousset. Il serait donc judicieux de porter un effort sur la sensibilisation et la formation des planificateurs à la question des sols. Dans le cadre de cette étude, nous n'avons malheureusement pas pu rencontrer les bureaux d'étude ayant établi les PLU de Gardanne et Rousset. Nous pensons que cela aurait été utile afin de mesurer leur réceptivité à l'introduction de la notion de qualité des sols lors de la construction des PLU.

B-Quelle échelle opérationnelle pour une prise en compte de la qualité des sols dans les politiques d'urbanisme ?

Une fois avérée la pertinence de la prise en compte de la qualité des sols dans la planification urbaine, la question des modalités de cette prise en compte se trouve posée. Sur le plan juridique, la **pertinence des échelles** opérationnelles apparaît en premier lieu concernant l'efficacité du droit : est-elle optimale à l'échelle du droit communautaire ou national, ou sera-t-elle plus effective au plan local ? En d'autres termes, doit-on favoriser une approche locale volontariste de certaines communes, ou conviendrait-il d'imposer la prise en compte du sol par une législation supérieure ?

1- Du national au local

Il convient d'emblée de constater que le droit de l'environnement oscille depuis quelques années entre une double tendance :

- d'une part, la tendance à la multiplication des normes, nécessaire du fait que cette branche du droit est fortement impactée par les découvertes scientifiques et l'évolution des menaces pour la santé de l'homme et son environnement. Le droit de l'environnement est donc engagé dans une course sans fin suivant l'évolution des techniques, des émissions anthropiques, de l'accroissement des pressions sur les ressources et les milieux naturels ;
- d'autre part, une volonté, portée par les milieux économiques, de « simplifier le droit » et les procédures, et plus sérieusement par plusieurs lois de simplification¹⁷. Ce second mouvement, intervenant en période de crise financière et de ralentissement de l'économie, fait légitimement craindre un retour en arrière dans le domaine de la protection de l'environnement (Prieur, 2011), en tout cas le blocage de l'évolution du droit dans le domaine de la protection de l'environnement, que l'on constate précisément sur le projet de directive européenne sur les sols.

Ce phénomène de résistance est accru par l'approche « souverainiste » de quelques Etats européens (cas du Royaume-Uni dans ses votes sur le projet de directive sols) qui peut trouver une certaine justification dans son application au sol, composante du domaine national par excellence. Mais l'on peut objecter que l'élément patrimonial et transgénérationnel que l'on pourrait trouver dans les fonctions du sol, ainsi que le fait que l'agriculture européenne est aujourd'hui intégrée dans une approche communautaire par le biais de la PAC, militent pour une compétence du droit communautaire en matière de protection des fonctions écologiques des sols. En tout cas, l'efficacité du droit de l'environnement communautaire ou national peut être mise en question pour les prochaines années, au moins en ce qui concerne l'évolution nécessaire du droit des sols.

Malgré ces réserves, que l'on peut espérer conjoncturelles, il apparaît que l'intégration de la protection du sol aux plus hauts niveaux de la hiérarchie des normes serait bien évidemment une avancée indéniable, et permettrait ensuite une déclinaison de cette préoccupation au niveau local, à travers quantité de documents stratégiques (Agenda 21, Plans Climat Energie Territoriaux, etc.).

2- Du local au national

Pour l'heure, la démarche locale au sein des PLU proposée par UQUALISOL-ZU demeure conditionnée par la manifestation d'une volonté locale forte. Elle ne peut être d'aucune utilité si les décideurs publics refusent, au niveau local, d'intégrer dans leurs réflexions la nécessité de préserver

¹⁷ Ordonnance n° 2009-663 du 11 juin 2009 relative à l'enregistrement de certaines installations classées pour la protection de l'environnement, Loi n° 2012-387 du 22 mars 2012 relative à la simplification du droit et à l'allégement des démarches administratives

le capital-sol de la commune. Cette limite, qui peut sembler triviale, est particulièrement importante dans le contexte actuel où aucune obligation nationale ne vient encadrer ces démarches.

L'équipe a donc étudié, puis mis en discussion avec l'un des acteurs locaux (le responsable urbanisme de Gardanne), la pertinence de proposer un système de labellisation incitative des PLU, permettant de distinguer les communes qui s'avèreraient volontaristes dans la prise en compte de la qualité des sols. Comme il existe actuellement des PLU « grenellisés », l'idée était de rendre plus visibles et de valoriser les démarches volontaires des communes qui feraient un effort d'intégration de la préservation des sols dans leur planification, à travers l'élaboration d'une certification nouvelle ou d'une labellisation. Cependant, il ressort des conversations avec la commune de Gardanne que les labels sont mal considérés par les élus, ces derniers estimant qu'il s'agit d'une charge supplémentaire, assez « paperassière », et apportant finalement peu de valeur ajoutée du fait de l'abondance des labellisations actuelles dans des domaines très diversifiés.

En revanche, l'adoption de ces démarches de protection des fonctions des sols par certaines communes ou intercommunalités pourrait avoir un effet d'entraînement utile. D'une part, elles constitueraient une exemplarité qui pourrait inspirer d'autres communes. La mise en place de concours ou de prix décernés par le ministère de l'écologie ou l'ADEME pourrait, dans cette optique, rendre plus visibles et valoriser ces efforts.

Mais en outre, du point de vue juridique, en se plaçant dans la posture particulièrement optimiste que nous suggère Michel Prieur (Prieur, 2007 et 2011), l'élaboration d'un droit local de la protection des sols pourrait percoler au niveau national, et finir par s'intégrer aux règles nationales ou communautaires contraires. Il s'agirait là d'une application particulièrement ambitieuse du « principe de non-régression », qui impliquerait de contraindre les législations et la jurisprudence à assurer un progrès continu du droit de l'environnement, tout comme pour les droits de l'homme. Pour cet auteur, la reconnaissance de ce principe pourrait, de manière positive, en donnant effet à la législation la plus protectrice de l'environnement, appeler à négocier la hiérarchie des normes. Ceci permettrait, d'appliquer une loi nationale au détriment d'un traité international supérieur, dans la mesure où la loi assurerait une protection renforcée de l'environnement. Par déduction, on pourrait imaginer qu'une planification locale protectrice des sols puisse faire obstacle, au moins sur le territoire de la commune, à l'invocation d'une loi nationale qui permettrait des dommages aux sols.

Ces hypothèses ne sont avancées qu'avec les plus grandes précautions. En effet, elles sont irriguées par une vision résolument optimiste, voire idéaliste de l'évolution du droit de l'environnement, lequel, on l'a vu plus haut, ne se dirige pas actuellement dans ce sens. En outre, elles se heurtent à la vision classique du droit, marquée par la prédominance du principe de mutabilité du droit : les auteurs classiques notamment, n'envisagent pas, à la suite de Thomas Paine en 1792 « qu'une génération d'hommes ait le pouvoir de lier ou d'astreindre la postérité jusqu'à la fin des temps, ou de décider pour toujours comment le monde doit être organisé ». Il y a, cependant, dans cette vision, un paradoxe dans le sens où l'exception qu'il faudrait faire pour le droit de l'environnement (comme elle apparaît pour les droits de l'homme) vise précisément à prendre en compte les intérêts, la santé et le bien être de ces générations futures, interdisant toute mesure pouvant leur porter préjudice (Vasquez, 2011).

En tout cas, on peut estimer que l'élaboration de ces expériences locales, si elle se concrétisait, ne saurait être considérée comme sans portée, et aurait au contraire, à moyen ou long terme, des conséquences inévitables sur l'ordonnement juridique du droit des sols.

C-Retour sur l'évaluation de la qualité des sols et sa réception par les acteurs locaux

La conception et le calcul de l'indice de polyvalence d'usage des sols a été un exercice de faisabilité de la construction d'un indice à l'échelle communale. Il a aussi été un exercice théorique qui nous a conduits à investiguer des aspects connexes qui ont parfois mis en lumière des difficultés de généralisation et de construction d'un tel indice, tout en ouvrant des champs de recherche nouveaux. Il a donné lieu *in fine* à un exercice de transfert de connaissances, dont il est utile de revenir sur la réception par les acteurs locaux. Ceci nous permet d'envisager l'étendue des améliorations possibles et nous amène à aborder des éléments pouvant faire débat, tout en mettant en relief les apports des résultats du projet.

1- Données et paramètres : entre choix et approximations

L'élaboration de l'indice de polyvalence des sols repose sur une série de paramètres et de critères dont certains peuvent être discutés. En premier lieu, il implique l'existence d'une carte des sols, ce qui lorsqu'elle n'existe pas pose le problème de l'élaboration ou du recours à des données de substitution. En second lieu, il se fonde sur un jeu de paramètres dont le nombre peut être débattu. Enfin, l'indice se base sur la notion de fonction satisfaite, ce qui renvoie aux critères et aux seuils déterminés pour décréter qu'une fonction est satisfaite ou pas. Ces divers points sont discutés ci-dessous.

Estimation des paramètres de sols de Gardanne du fait de l'absence de carte des sols

Le point de méthode probablement le plus discutable est le fait que nous ayons eu à produire une cartographie numérique des paramètres de sol sur la commune de Gardanne. Celle-ci a résulté de traitements géomatiques, en reprenant les caractéristiques propres à Rousset (qui dispose d'une carte des sols) et des données issues des sondages de terrain réalisés à Gardanne. Plusieurs questions se posent : cette cartographie est-elle juste et justifiée ?, pouvait-on dans notre cas s'affranchir de cette étape ?, que faire d'une manière générale dans le cas où une carte des sols n'existe pas ?

L'information sur les sols est un pré-requis pour l'établissement d'un indice. La question de fond est donc de savoir quelle est la quantité de données minimale nécessaire et comment l'acquérir. A Gardanne, il n'existait aucune donnée sur les sols. Or, il était nécessaire de disposer de données et d'avoir suffisamment d'information nous permettant de produire des valeurs d'indice qui soient les plus proches possible de la réalité terrain. Etant dans une démarche de développement d'un outil et non pas d'application d'une méthodologie, il était important de minimiser les erreurs et de maximiser les informations afin de justifier la crédibilité de l'indice. Nous avons donc opté pour, d'une part, effectuer une campagne de terrain et, d'autre part, procéder à une approche spatiale des paramètres de sol de Gardanne. Dans les faits, aucune carte des sols *stricto sensu* n'a été produite ; seules des cartes de paramètres l'ont été. L'important était d'acquérir des valeurs pour les paramètres utiles à l'indice en tout point de l'espace d'étude et non pas de réaliser une carte qui ne pouvait de toute façon pas réellement en être une. La construction a été présentée et discutée en **Annexe II-11**. Comme on s'y attendait, la précision et la fiabilité des données obtenues ne sont pas équivalentes à celles qui auraient pu être atteintes par une cartographie de terrain. Les erreurs sont particulièrement importantes pour la zone urbanisée, qui contient des sols très hétérogènes, et pour laquelle nous avons vu que les fonctions de pédotransfert habituellement utilisées ne sont pas valables. Certains paramètres ont donc été plus ou moins bien prédits. Cependant, les validations internes et externes ont donné des résultats satisfaisants et les données générées sont apparues, au final, relativement fiables.

Cette manière de faire présente l'inconvénient d'être relativement conséquente en termes de travail et la mise en œuvre doit en être assurée par un spécialiste. Elle doit cependant être envisagée dans les cas où l'information sur les sols est très limitée, moyennant l'existence d'une zone de référence. Elle

reste moins lourde que l'établissement d'une carte des sols, qui reste bien sûr l'information de base par excellence pour l'établissement de l'indice. L'utilisation de sondages ponctuels tels qu'effectués dans ce projet ne peut suffire car nous avons vu que certains sols sont particulièrement difficiles à caractériser (les sols de la zone urbaine et péri-urbaine) et la spatialisation des données acquises reste tributaire de fonctions de pédotransfert et d'une typologie qui restent encore à définir.

Jeu de données minimum

Il était important de vérifier la nécessité d'acquérir un grand nombre de paramètres de sols et, le cas échéant, d'évaluer les conséquences de l'utilisation d'un jeu restreint de paramètres. Cette réduction a été testée sur la commune de Gardanne. Les différences obtenues entre les résultats de l'indice de polyvalence d'usage pour le jeu de données total utilisé précédemment (11 paramètres, total data set) et un jeu de données restreint (MDS, minimum data set) ne comportant que 8 paramètres habituellement extractibles des cartes des sols (réserve utile, hydromorphie, teneur en MO, CEC, pH, profondeur, pente et état de surface) sont présentés sur la **Figure 34**.

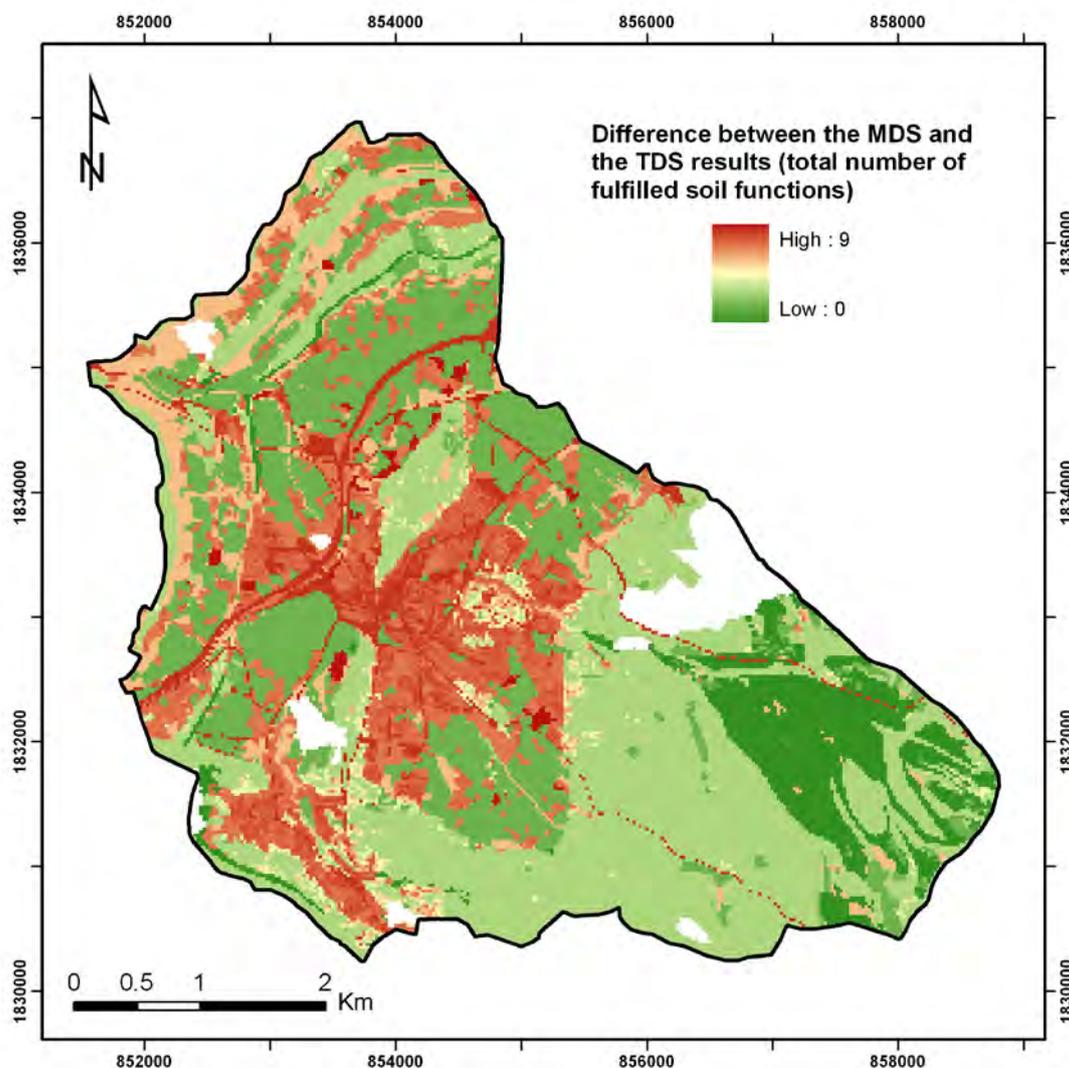


Figure 34 : Différence calculée en termes de nombre de fonctions satisfaites entre la carte utilisant 11 ou 8 paramètres de caractérisation des sols sur la commune de Gardanne.

Cette carte met en évidence des différences sur l'ensemble de la commune. De manière très schématique, elles sont plus importantes pour les sols de la tâche urbaine que pour les sols des zones agricoles ou naturelles, pour lesquels la différence obtenue en termes de fonctions satisfaites est minimale. Deux principaux enseignements peuvent en être déduits. D'une part, une réduction du

nombre de paramètres peut impacter grandement le résultat final - nous n'avons à cet égard pas testé un nombre plus restreint de paramètres car nous avons jugé que l'on ne pouvait alors plus valablement prendre en compte les spécificités des sols. D'autre part, ainsi que déjà mentionné lors de l'interprétation des données de sols, les sols de la tâche urbaine sont insuffisamment connus et probablement pas correctement caractérisés. De nouveau, il apparaît évident qu'un effort devra porter à l'avenir sur cette catégorie de sols appelée à s'étendre.

Seuils, critères et paramètres d'évaluation des fonctions du sol

Un dernier point qu'il convient de discuter concerne les référentiels sur lesquels l'établissement de seuils s'est basé pour les paramètres définissant les fonctions. Ils ne sont pas tous de même origine (et donc de précision et/ou de fiabilité), ni de même portée générique. En effet, lorsqu'il s'agissait de paramètres reconnus et universellement utilisés (pH par ex), les seuils se sont référés aux normes en vigueur. Pour les paramètres plus spécifiques tels que les valeurs de pénétration ou de microbiologie, les valeurs utilisées pour fixer les seuils ont été calculées à partir des valeurs de notre base de données. Ces seuils ont donc été établis à partir de la gamme des valeurs obtenues sur le terrain. On peut supposer que cette gamme, du fait de la faible variabilité pédologique des sols en regard de ce qu'il est possible de rencontrer au niveau français par exemple, peut être biaisée. Ce point pourrait être amélioré par l'acquisition de données supplémentaires dans d'autres contextes pédo-climatiques et d'occupation du sol ; mais cette opération sortait du cadre du projet.

Enfin, il nous faut évoquer le fait que nous avons également voulu intégrer dans les fonctions du sol la fonction « patrimoine » qui peut se comprendre de deux manières. Le sol renferme un patrimoine (archéologique, paléontologique ou autre) et le sol est lui-même un patrimoine (par exemple une rareté ou une spécificité de la région). Cependant, cette fonction n'a pas pu être quantifiée correctement par manque d'information permettant ce type de classification. Concernant la « rareté », nous avons ainsi fixé un seuil quantitatif arbitraire à 10%, issu des informations sur les deux communes. De toute évidence, cette valeur est discutable et il sera certainement nécessaire de l'affiner à l'avenir. Que l'on s'intéresse à l'aspect archives archéologiques ou rareté, il est important de noter encore une fois que les archives et documents anciens (y compris des cartes de sols anciennes) peuvent constituer une source d'information précieuse. Il convient également de souligner que la traçabilité des actions entreprises sur les sols constituera une nécessité sur le long terme si on veut pouvoir renseigner correctement cette fonction des sols. Dans le cadre du projet, nous avons pu retracer l'évolution de l'occupation des sols de 1935 à nos jours et montrer que la tâche urbaine s'est ainsi significativement étendue, en particulier en consommant des sols agricoles. L'artificialisation progressive des sols dans les zones urbaines a pu ainsi être datée et il nous a paru intéressant de tenter de la rattacher aux caractéristiques bio-physico-chimiques de ces sols dans une expérience menée sur une vingtaine de sols. Pour ce faire, la relation existant entre l'ancienneté de la dernière occupation des sols (et en particulier la date approximative de passage en zone urbaine) et la compaction de surface évaluée à partir des données de pénétration a ainsi été testée. Les résultats obtenus sont relativement délicats à interpréter, en particulier car les informations historiques à disposition étaient parcellaires et de fiabilité variable. D'autre part l'échelle à laquelle l'information était accessible n'était pas toujours compatible avec la précision voulue. Il semble pourtant que la succession dans le temps des différents usages des sols puisse expliquer certaines différences observées sur des sols par ailleurs similaires, en termes d'occupation actuels des sols et de caractéristiques physico-chimiques. Cet axe de recherche mériterait un développement ultérieur.

2- Echelles de travail et prise en compte des configurations spatiales

L'approche spatiale de la qualité des sols constitue un second sujet de discussion, sur au moins deux points. Tout d'abord, l'évaluation et la spatialisation de ces données ont en effet été conduites à une seule et unique échelle, ce qui est finalement apparu réducteur. Ensuite, les paramètres pris en compte pour évaluer la qualité des sols ont uniquement été des paramètres bio-physico-chimiques, sans considération aucune des paramètres de localisation géographique, de voisinage avec d'autres composantes de l'espace étudié, etc. En tout état de cause, des améliorations sont possibles sur ces deux aspects.

Approches multi-échelles et multi-niveaux

Compte-tenu de l'échelle des données fondamentales (géologie, carte des sols, topographie), l'échelle à laquelle nous avons travaillé a été le 1 : 50 000, ce qui en mode raster nous a permis d'exploiter une maille de 25m de côté. Il s'est vite avéré que les sols des zones urbaines et péri-urbaines nécessitent d'être appréhendés à une échelle plus fine. On a vu qu'un paramètre tel que l'état de surface des sols, d'ordinaire jamais pris en compte dans la caractérisation d'un sol, était particulièrement discriminant dans le cas de ces sols. Or cette donnée, qui s'est révélée très intéressante pour les résultats qu'elle a permis d'obtenir, a été appréhendée à une résolution de 60 cm. S'il est possible de la produire à une moindre résolution, elle n'a cependant pas de sens à l'échelle habituelle des cartes des sols ou à celle des PLU. Cela pose donc, pour l'acquisition d'une partie des données, la question de l'échelle de travail.

Cette question de l'échelle en rejoint une autre, qui se rattache davantage à celle des niveaux à partir desquels les objets étudiés sont appréhendés. Le cas des zones de caractérisation de l'espace en termes de droits d'usage constitue à ce titre une bonne illustration. Les zones U, par exemple, peuvent aussi bien comprendre des espaces bâtis que des espaces plus ou moins végétalisés et plus ou moins étendus, bien que souvent en discontinuité avec les espaces similaires les plus proches et de tailles parfois très restreintes. Ces espaces végétalisés peuvent recouvrir des usages variés tels que des parcs publics ou privés, des jardins familiaux, voire des ensembles végétalisés non définis, récents ou historiques ayant en commun de posséder une surface perméable permettant l'infiltration de l'eau et des sols pouvant posséder une forte polyvalence d'usage. Ne pas se situer au bon niveau d'appréhension de l'espace urbain (une unité fonctionnelle de l'espace urbain, i.e. un espace vert en l'espèce, plutôt qu'une zone d'urbanisme) conduit à ne pas saisir la diversité et les spécificités propres aux milieux urbains. Or il serait dommage de perdre cette information et par voie de conséquence risquer de perdre certains de ces sols qui ne peuvent pas apparaître comme sols à forte polyvalence d'usage au niveau choisi.

Ces deux considérations amènent à évoquer l'intérêt de raisonner à la fois à différentes échelles et sur différents niveaux d'appréhension des espaces urbains pour étudier et caractériser la qualité des sols. Ceci implique que la démarche que nous avons expérimentée dans ce projet peut gagner en qualité et en précision.

Intégration des configurations spatiales

L'évaluation des potentialités des sols en termes de multifonctionnalité peut être affinée par le biais de paramètres non spécifiquement « sol », mais qui valident ou non la capacité théorique (uniquement liée aux caractéristiques intrinsèques des sols) à remplir une fonction. C'est particulièrement important et utile dans les cas des sols de la tâche urbaine qui peuvent, dans certains cas, offrir un indice de polyvalence d'usage élevé mais qui, en pratique, ne sont pas accessibles ou représentent des surfaces trop restreintes. Pour ce faire, on peut recourir à la métrique paysagère ou métrique spatiale, qui est un ensemble de mesures de la forme et de la distribution des structures spatiales, appliqué initialement à l'étude de l'écologie du paysage (ex. : Gustafson, 1998 ; Jaeger, 2000). Ces mesures sont calculées sur des « taches » du paysage (*patches*, ensembles) définies comme des zones homogènes d'un paysage spécifique (ex. : sols agricoles, zones industrielles, parcs, etc.) (Skupinski *et al.*, 2009). L'intégration de paramètres contextuels, relatifs à la configuration spatiale de la tâche urbaine (densité, forme et fragmentation des surfaces artificialisées) peut apporter des éléments de validation et pourrait donc être utilisée comme filtre après l'établissement de la carte de polyvalence d'usage. En effet, ce type de paramètre permet de mettre en évidence l'isolement ou au contraire la continuité des sols au sein du tissu urbain et l'existence de gradients d'artificialisation.

Afin de tester cette possibilité, des métriques spatiales ont été calculées à l'aide du module Patch Analyst 4 (Rempel *et al.*, 2008), s'intégrant au sein de l'environnement du SIG ArcGIS (Esri), sur les données d'états de surface concernant l'ensemble de la commune de Gardanne. Dans une démarche de test, l'approche a été simplifiée. Les calculs ont été effectués pour caractériser les mailles d'une grille de 50 x 50 m et une autre de 100 x 100 m. La caractérisation a été exprimée en termes de

mosaïque d'états de la surface des sols issus de l'analyse d'image orientée objet. Les paramètres qui ont été calculés pour chaque maille de ces deux grilles ont été :

- l'intensité de l'artificialisation : somme des surfaces des patches appartenant à une même classe (CA) (McGarigal et Marks, 2005) ;
- la fragmentation des sols : nombre de patches de chaque classe (NumP) et taille moyenne des patches d'une même classe (McGarigal et Marks, 2005) ;
- la complexité de la forme : longueur totale de l'interface entre les deux classes, rapportée à la surface de la maille ($m \cdot m^{-2}$) (ED) (McGarigal et Marks, 2005).

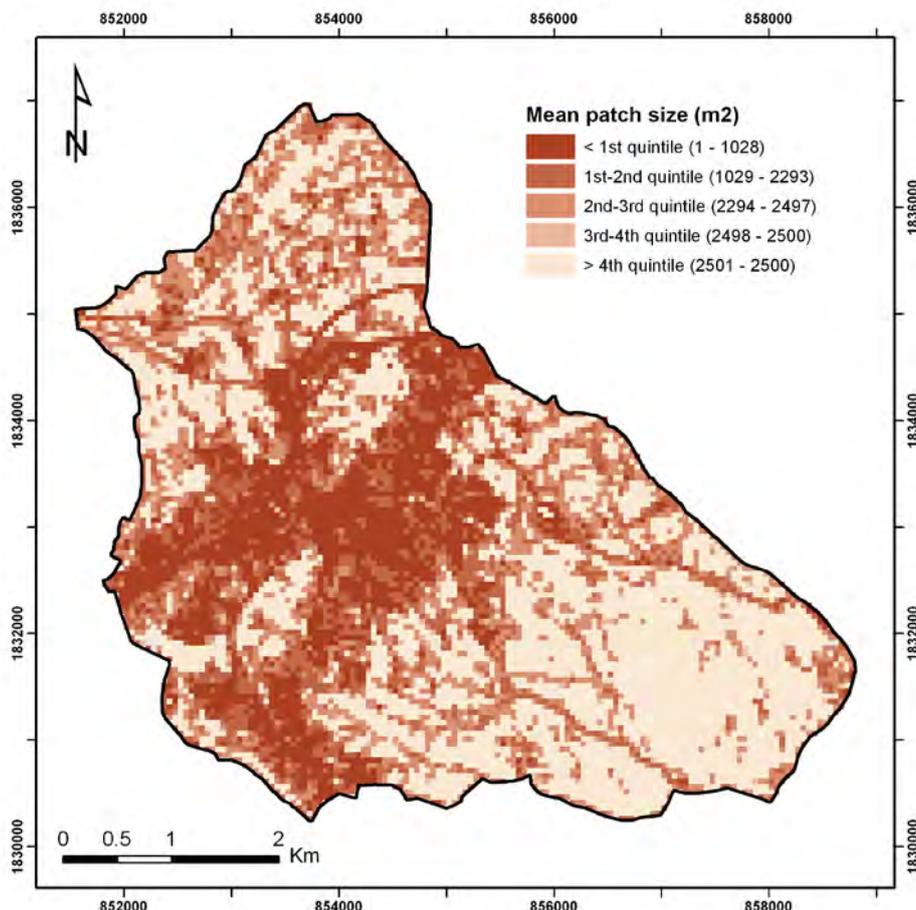


Figure 35 : Fragmentation des sols à Gardanne : taille moyenne des patches d'une même classe (ici les surfaces non artificialisées) sur une grille de 50x50m calculée à partir de la carte des états de surface simplifiée en artificialisé et non artificialisé.

La **Figure 35** présente la fragmentation des unités homogènes en termes d'état de surface pour une grille de 50x50m (surface maximale de 2 500 m²). Cette carte renseigne sur l'hétérogénéité de la surface des sols à l'intérieur de chaque pixel : plus la superficie moyenne des surfaces homogènes non artificialisées est faible, plus la surface des sols à l'intérieur du pixel est fragmentée (en termes d'états des surfaces). Ceci montre que la notion d'occupation des sols est globalisante et que, sur le terrain, une zone dite homogène à une certaine échelle, correspond à des surfaces différentes à une échelle plus grande. Ce qui peut être pertinent pour l'urbaniste ne l'est donc pas nécessairement pour un naturaliste. Ainsi, les territoires artificialisés (se référer aux cartes présentées plus haut) offrent-ils une fragmentation marquée. Les polygones homogènes en termes d'état de surface à l'intérieur de la zone décrite comme « territoires artificialisés » y sont plus nombreux (non présenté ici) et de tailles plus réduites que dans le reste de la commune. En d'autres termes, la zone urbanisée n'est pas uniforme : elle présente aussi bien des surfaces construites ou asphaltées que des espaces de verdure, des plans d'eau ou des sols nus. Ce qui peut apparaître trivial - tout connaisseur des espaces urbains sait l'hétérogénéité de ces milieux - a son importance dès lors qu'il s'agit d'évaluer la qualité et la multifonctionnalité des sols à partir de données d'occupation des sols... De toute évidence, il apparaît ici que la prise en compte de paramètres de configuration spatiale s'avère nécessaire en ce qui concerne l'évaluation des sols de la zone urbanisée. En effet, plus une surface

de sol est de taille réduite, plus elle est susceptible d'être affectée par l'évolution des usages sur les surfaces voisines. De même, la non prise en compte de l'existence de petites surfaces de ce type peut être une lacune pour la compréhension du fonctionnement des milieux urbains et l'évaluation d'apport de ces surfaces à l'écosystème, aussi artificialisé soit-il.

Dans le cadre du projet, notre approche de ces aspects est restée relativement succincte. Elle visait essentiellement à explorer l'intérêt que l'on pouvait tirer de ce type d'information et demanderait donc à être approfondie. On pourrait ainsi réfléchir à d'autres types de métriques tels que la distance à un axe routier, la proximité d'une zone verte, ou la possible intégration à un projet de trame verte et bleue. Les uns et les autres peuvent en effet apparaître comme des facteurs valorisant ou non l'intérêt d'une conservation des sols selon l'usage envisagé. Par exemple la proximité d'un axe routier peut être interprétée comme un facteur positif pour l'accès à des parcelles agricoles ou résidentielles mais négatif pour des zones N, tandis que la présence d'une zone verte peut motiver le développement d'une zone résidentielle ou au contraire la mise en place d'une trame verte si les unités adjacentes présentent également des zones vertes. Bien que ces compléments se justifient dans le cadre de la construction d'un PLU, en particulier lors d'arbitrage entre deux types de zonage, il apparaît que ces ajouts complexifient les interprétations. Il s'agit clairement d'un axe de recherche à approfondir afin de concevoir une intégration simplifiée de cette information.

3- Réception des apports du projet par les acteurs locaux

En dépit des diverses questions faisant discussion et qui laissent entendre que la caractérisation de la polyvalence des sols dans une perspective d'aide à la planification de l'espace peut encore gagner en efficacité, les résultats de nos travaux ont été présentés aux acteurs publics locaux. Il est utile de revenir sur cette phase finale du projet qui a consisté à restituer les résultats de nos réflexions et à tenter de mesurer la réception / la compréhension de notre démarche par nos interlocuteurs. Deux enseignements principaux peuvent en être tirés.

En premier lieu, il apparaît que les éléments de méthodologie sont apparus « hors de portée » de nos interlocuteurs, peu voire pas du tout familiers de ce que peut être la caractérisation des fonctions des sols. Assez désireux de comprendre, ils se sont néanmoins vite déclarés incompetents pour apprécier la plus ou moins grande justesse de la conception de l'indice. Considérant que la validation de la qualité conceptuelle de l'indice et de sa spatialisation relevaient, à juste titre, de la sphère scientifique, ils ont toutefois suggéré que l'on se rapproche de bureaux d'études fréquemment impliqués dans les études relatives à l'élaboration des documents d'urbanisme. Cette piste, qui conduirait à étudier l'opérationnalité de la démarche avec des acteurs fortement engagés dans la réalisation concrète des règlements d'urbanisme, apparaît en effet fort pertinente. Elle permettrait d'obtenir un retour de la part d'opérateurs particulièrement légitimes et critiques, ainsi que d'évaluer le transfert de la méthode depuis la sphère scientifique vers la sphère opérationnelle. Au-delà de cette proposition, les acteurs publics rencontrés se sont néanmoins montrés très intéressés et critiques sur les documents remis, ce qui constitue le second enseignement.

En second lieu, en effet, les résultats de l'étude, transmis sous forme d'un fascicule de synthèse comprenant plusieurs cartes des territoires étudiés (**Annexes IV-1 et IV-2**), ont été abondamment discutés et commentés. Après s'être assurés, dans un premier temps, de la bonne manière de lire les cartes, nos interlocuteurs se les sont vite appropriés et se sont lancés dans une confrontation avec leur propre connaissance du territoire. Les secteurs de plus grande polyvalence d'usage ont par exemple été mis en relation avec les choix d'urbanisme arrêtés dans les PLU en cours d'élaboration. De même, les zones AU des PLU ont fait l'objet d'une ré-interprétation à la lumière des données de polyvalence d'usage des sols. Cet intérêt manifeste pour les résultats du projet est à souligner. Aussi, n'est-il pas présomptueux de penser que les informations issues du projet sont de nature à modifier les pratiques des acteurs publics rencontrés si l'on se montre capable de conforter la démarche et de la rendre la plus explicite possible. On peut à cet égard citer une réflexion à voix haute d'un représentant de Gardanne qui, réalisant qu'une zone prévue pour une densification de l'urbanisation dans la partie ouest de la commune présente une assez forte valeur de polyvalence d'usage des sols, a déclaré : « si on avait eu cette carte, nous aurions peut-être conçu l'évolution de ce secteur différemment ».

CONCLUSION

L'intégration d'une connaissance des sols dans les démarches d'élaboration des politiques locales d'urbanisme, qui constituait la question de départ de la recherche mise en œuvre dans le projet UQUALISOL-ZU, apparaît désormais légitime, nécessaire et réalisable. L'étude, menée à différents niveaux et sur différents champs (approche juridique, pédologique, géographique, microbiologique), permet en effet d'affirmer qu'il existe à la fois des lacunes dans les efforts de limitation de l'étalement urbain et de renforcement de la conservation des sols, et des opportunités pour mieux prendre en compte les sols dans la planification des territoires.

Bien sûr, le projet révèle que les attentes sociales vis-à-vis des fonctions du sol ou de la protection du sol sont relativement hétérogènes. D'une part, la communauté scientifique des pédologues, écologues, voire agronomes, est consciente depuis de nombreuses années de la nécessité d'une connaissance et d'une protection plus poussée du milieu naturel « sol » (travail de l'AFES et du GISSOL), rejointe depuis quelques années par la Commission européenne (projet de directive sur les sols) et les associations de protection de l'environnement (France Nature Environnement notamment). D'autre part, il ne semble pas que certains organismes publics, ainsi que les décideurs publics, au plan national comme au plan local, soient aujourd'hui prêts à prendre en compte le sol comme milieu naturel vivant, objet d'une protection ou d'une attention particulière. Par ailleurs, au sein même des territoires étudiés (deux communes périurbaines provençales), il apparaît que les positions sont très divergentes entre élus, techniciens, citoyens concernant la gestion des sols. Il ressort surtout un manque profond de sensibilisation à cette question, traitement de l'étalement urbain excepté (conséquence de la loi SRU).

Le projet rend toutefois compte de la possibilité de dépasser ces difficultés, en établissant le dialogue entre scientifiques, élus et techniciens, d'une part, et en proposant une piste pour produire et intégrer de façon explicite et rigoureuse une connaissance des sols dans une perspective de planification territoriale à l'échelon local, d'autre part. A travers une expérimentation réalisée sur deux communes provençales, UQUALISOL-ZU livre un diagnostic étayé de l'évolution de l'occupation des sols sur plusieurs décennies, une évaluation de la qualité des sols en termes de multifonctionnalité et une instrumentation de cette information en termes urbanistiques (indice de polyvalence d'usages des sols), tout ceci mis en situation dans le contexte juridique prévalant sur la gestion et la prise en compte des sols en urbanisme. Bien évidemment, cette expérimentation présente des faiblesses et doit être complétée par d'autres travaux afin d'améliorer la robustesse de la méthode proposée et la rendre véritablement généralisable et opérationnelle. D'ores et déjà, plusieurs chantiers peuvent être envisagés. Il apparaît nécessaire d'approfondir la validation des principes de construction de l'indice de polyvalence d'usages des sols proposé, de développer une approche multi-échelle et multi-niveaux de la qualité des sols en dissociant les espaces urbanisés des espaces agricoles et semi-naturels, de raisonner sur les modalités concrètes d'intégration d'une connaissance des sols dès la mise en route de l'élaboration d'un PLU, etc. Il semble également pertinent de questionner la réception des résultats du projet par les décideurs publics et d'étudier les pré-dispositions des principaux acteurs de la réalisation des PLU, les cabinets d'étude, à prendre en main une démarche sinon un « outil » qui, s'il offre une avancée évidente pour intégrer le patrimoine sol dans la planification des territoires locaux, n'est toujours pas rendu nécessaire puisque la prise en compte du sol n'est pas obligatoire dans la réglementation actuelle (sauf quelques cas très particuliers). Ces perspectives constituent autant de suites possibles au projet UQUALISOL-ZU, qui pourraient se développer aussi bien sur les deux communes déjà étudiées (socle de connaissances acquises déjà fort conséquent), que sur d'autres terrains présentant des situations bio-géo-physiques et territoriales distinctes, permettant à la fois des comparaisons et une mise à l'épreuve de la méthodologie proposée. Le chantier ouvert est donc vaste. Il implique des investigations conceptuelles, de terrain et de méthodes et concerne aussi bien les sciences du sol que les sciences de l'homme et de la société. Son traitement interdisciplinaire apparaît donc indispensable, ce qui est finalement bien logique tant le sol constitue une interface majeure des relations hommes-milieus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ces références sont celles indiquées dans le rapport. D'autres éléments de bibliographie ont été exploités dans le cadre du projet et sont cités dans les annexes auxquelles ils sont liés.

Andersson M., Ottesen R.T., 2008 - Level of dioxins and furans in urban surface soil in Trondheim, Norway, *Environmental Pollution*, 152, pp. 553-558.

Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France), INRA éditions, Paris, 409 p.

Balestrat M., Barbe E., Dupuy S., Lagacherie P., Meynard T., 2008 - Analyse du potentiel des terres agricoles affectées par l'aménagement du territoire. Etude méthodologique sur une zone pilote (département de l'Hérault - 34). Rapport d'étude, Cemagref, INRA, DRAAF LR. 56 p.

Benoit M., Lardon S., Deffontaines J.-P., 2006 - Acteurs et territoires locaux. Vers une géoagronomie de l'aménagement. Paris, Quae, 176 p.

Bhaskaran S., Paramananda S., Ramnarayan M., 2010 - Per-pixel and object-oriented classification methods for mapping urban features using Ikonos satellite data. *Applied Geography*, 30, pp. 650-665.

Biasioli M., Barberis R., Ajmone Marsan F., 2006 - The influence of a large city on some soil properties and metals content. *The Science of the Total Environment*, 356, pp. 154-164.

Billet P., 2007 - Protection communautaire des sols : l'érosion parlementaire, *Environnement 2007*, Focus 67.

Blecker S. W., Stillings L. L., Amacher M. C., Ippolito J. A., DeCrappeo N. M., 2012 - Development of vegetation based soil quality indices for mineralized terrane in arid and semi-arid regions. *Ecological Indicators*, 20, pp. 65-74.

BRGM, 1969 - Carte géol. France (1/50000), feuille d'Aix-en-Provence (1021). Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Orléans. Notice explicative par BRGM, 1969.

Cheverry C., Gascuel C. (coord.), 2009 – Sous les pavés la terre : connaître et gérer les sols urbains. Collection Ecrins, Edition Omniscience, Montreuil (F), 207 p.

COM, 2006 - Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions, «Stratégie thématique en faveur de la protection des sols», COM(2006)231 final, 22.9.2006.

Criquet S., 1999 - La litière de chêne vert (*Quercus ilex* L.). Aspects méthodologiques, enzymologiques et microbiologiques. Etude préliminaire des relations in situ entre microorganismes, enzymes et facteurs environnementaux. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille III, 198 pp.

Debeaurain J., 2005 - L'activité agricole en zone périurbaine dans la région PACA (ou le sort de l'agriculture de proximité !), *Droit rural* n° 338, Décembre 2005, 33.

Deffontaines J.-P., Prigent P., 1987 - Lecture agronomique du paysage. *Mappemonde*, 4, pp. 34-37.

Deffontaines J.-P., Ritter J., Deffontaines B., Michaud D., 2006 - Petit guide de l'observation du paysage. Paris, Quae, 32 p.

Déléguée interministérielle au Développement Durable, 2010 - Stratégie nationale de développement durable pour 2010-2013 : vers une économie verte et équitable. 60 p.

Direction régionale de l'Équipement PACA, 2008 - Etudes foncières : la consommation des espaces agricoles NC dans les périmètres des agglomérations.

Duclos G., 1994 – Atlas des sols de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Editions Services techniques – Développement de la Société du Canal de Provence, Aix-en-Provence, 955 p.

Floch C., 2008 - Les enzymes du sol : Etude de leurs potentialités bioindicatrices de contaminations par des métaux et des polluants organiques. Thèse doct. Biologie des populations et Ecologie. Aix-Marseille, Univ. Paul Cézanne.

Floch C., Capowiez Y., Criquet S., 2009 - Enzyme activities in apple orchard agroecosystems: How are they affected by management strategy and soil properties, *Soil Biology and Biochemistry*, 41, pp. 61-68.

Frankenberger, Jr., W.T., Dick, W.A., 1983 - Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Science Society of America Journal* 47, pp. 945-951.

Genske, 2003 - Urban land: Degradation – Investigation – Remediation. Springer Verlag, Berlin, 331 p.

Goutaland D., Winiarski T., Angulo-Jaramillo R., Lassabatère L., Bièvre G., Buoncristiani J.-F., Dubé, J.-S., Mesbah A., Cazalets H., 2007 - Hydrogeophysical study of the heterogeneous unsaturated zone of a stormwater infiltration basin, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées (BLPC)*, 268-269, pp. 1-20.

Gustafson E.J., 1998 - Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? *Ecosystems*, 1, 2, pp. 143-156.

Häberli R., Lüscher P., Prapant Chastonay B., Wyss C., 1991 - L'affaire sol : pour une politique raisonnée de l'utilisation du sol. Georg Ed. S.A., Genève, 192 p.

He C., Shi P., Xie D., Zhao Y., 2010 – Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. *Remote Sensing Letters*, 1, 4, pp. 213-221.

Heiden U., Segl K., Roessner S., Kaufmann H., 2007 - Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, 111, PP. 537-552.

Hussain I., Olson K.R., Wander M.M. et Karlen D.L., 1999 - Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil and Tillage Research*, 50, 3-4, pp. 237-249.

IGEAT (ULB), 2006 - Étude sur l'imperméabilisation en Région bruxelloise et les mesures envisageables en matière d'urbanisme pour améliorer la situation, étude réalisée pour le compte de la Secrétaire d'Etat au Logement - Maître d'ouvrage : Ministère de la RBC / AATL.

Jacquin A., Misakova L., Gay M., 2005 - Très haute résolution spatiale et approche orientée objet pour la cartographie des zones d'interface urbain/agricole. Présentation au GDR 2340 SIGMA dit Cassini Groupe de Travail « Observation de la Terre », 7 novembre 2005, Université de Caen Basse-Normandie, France.

Jacquin A., Misakova L., Gay M., 2008 - A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. *Landscape and Urban Planning*, 84, pp. 152-165.

Jaeger J.A.G., 2000 - Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15, 2, pp. 115-130.

Karlen D.L., Ditzler C.A. et Andrews S.S., 2003 - Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 114, 3-4, pp. 145-156.

Kelly J., Thornton I., Simpson, P.R., 1996 - Urban Geochemistry: A study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and nonindustrial areas of Britain. *Applied Geochemistry*, 11, 1-2 pp. 363-370.

Lambert-Habib M.-L., 2006 - Comment introduire des critères de développement durable dans les opérations d'aménagement urbain ? *RFDA n°4*, pp. 759-765.

Lambert-Habib M.L., Schellenberger T., 2012 - L'absence de protection des sols et du sous-sol dans les lois Grenelle », in *Le Grenelle, les entreprises et l'environnement : vers une économie verte ?*, à paraître, PUAM.

Laroche B., Thorette J., Lacassin J.-C., 2006 - L'artificialisation des sols : pressions urbaines et inventaire des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 223-235.

Latry C., 2005 - Création d'un modèle d'occupation du sol pour l'analyse des espaces bâtis. Mémoire de fin d'études DESS, Université Toulouse le Mirail.

Le Louarn P., 2001 - La loi SRU et le patrimoine environnemental : renouveau ou simple ajustement ?, *Revue de droit administratif n°2*, février 2001.

Lecomte R., 2008 - De la nécessité d'une législation spécifique à la protection des sols l'exemple des sites contaminés et les limites de l'obligation des remise en état, *Droit de l'Environnement*, n°158, mai 2008, p. 11.

Lee A., Slak M.-F., 2007 - Les paysages français changent entre 1992-2002 : artificialisation et fermeture des paysages aux dépens du mitage ou de la déprise des zones agricoles, *Cahiers Agreste n°3*, pp.19-40.

Lee C. S., Li X. Shi W., Cheung S. C., Thornton I., 2006 - Metal contamination in urban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate Statistics. *Science of the Total Environment*, 356, pp. 45-61.

Leyval C., 1999 - Le point de vue du pédologue : Le sol, une ressource négligée en milieu urbain, pp. 129-142. In : Barles, S., Breysse, D., A., G., Leyval, C. (Eds), *Le sol urbain*, Economica, Anthropos, collection Villes, Paris.

Li G., Chen J., Sun Z., Tan M., 2007 - Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land-use changes. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 7, pp. 2715-2724.

Lozet J., Mathieu C., 1990 - *Dictionnaire de Science du Sol*. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, 384 p.

McGarigal K., Marks B., 2005 - *Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*.

Michaut J., Bonnomet F., Finielz H., 1958 - Etude pédologique du périmètre de la Haute vallée de l'Arc (Trets-Peynier-Rousset-Châteauneuf-le-Rouge-Fuveau-Meyreuil) (1:10000), juillet 1958, Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale.

Mioche P., 2006 - Les houillères de Provence, champion national de la productivité charbonnière (1946-2003) ?, In : Daumalin X., Daviet S., Mioche P., *Territoires européens du charbon. Des origines aux reconversions*. Aix-en-Provence, Publications de l'Université de Provence, pp. 118-135.

Moeskops B., Buchan D., Sukristiyonubowo, De Neve S., De Gussemé B., Widowati L. R., Setyorini D., Sleutel S., 2012 - Soil quality indicators for intensive vegetable production systems in Java, Indonesia. *Ecological Indicators*, 18, pp. 218-226.

Myint S. W., Gober P., Brazel A., Grossman-Clarke S., Weng Q., 2011 - Per-pixel vs. Object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115, pp. 1145-1161.

Naizot F., 2005. Les changements d'occupation des sols de 1999 à 2000: plus d'artificiels, moins de prairies et de bocages, *Les données de l'environnement*, 101, pp.1-4.

Nortcliff S., 2002 - Standardization of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, pp. 161-168.

Ohlof T., 2006 - Comparaison study between Cognition and ERDAS Imagine for the classification of high and moderate resolution satellite imagery. Présentation à 4th ESA-EUSC Conference on Image Information Mining for Security and Intelligence. <http://www.docstoc.com/docs/21055481/>

Olazabal C., 2007 - La nouvelle politique de protection des sols en Europe, *Revue du droit de l'Union Européenne*, 2007/1, pp. 155-168.

Pierce F.J., Larson W.E., 1993 - Developing criteria to evaluate sustainable land management, pp. 7-14. In: Kimble J.M. (Ed.), *Proceedings of the 8th International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use*, USDA-SCS, National Soil Survey, Lincoln, NE.

Pierr H.-P., 2003 - Environmental policy, agri-environmental indicators and landscape indicators, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 98, pp. 17-33.

Prieur M., 1987 - La déréglementation en matière d'environnement, *Revue Juridique de l'environnement*, 1987, n°3.

Prieur M., 2011 - De l'urgente nécessité de reconnaître le principe de non régression en droit de l'environnement *IUCN Academy of Environmental Law journal Issue*.

Raimbault G., Alfakih E., 2002 - Hydrologie et infiltration des eaux pluviales, pp. 67-98. In : Barles, S., Breysse, D., A., G., Leyval, C. (Eds), *Le sol urbain*, Economica, Anthropos, collection Villes, Paris.

Razafindratandra Y., 2007 - Une nouvelle politique de gestion des risques en fonction de l'usage des sites pollués, note, *Droit de l'Environnement*, avril 2007, n°147, p.100.

Rempel R.S., Carr A.P., Kaukinen D., 2008 - Patch Analyst extension for ArcMap: Version 4.2. Ontario Ministry of Natural Resources.

Scalenghe R., Ajmone Marsan F., 2009 - The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 90, pp. 1-10.

Schulte W., Fründ H.-C., Söntgen M., Graefe U., Ruszkowski B., Voggenreiter V., Weritz N., 1989 - Zur Biologie städtischer Böden – Beispielraum: Bonn-Bad Godesberg. *Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz*. Kilda-Verlag, Greven (Allemagne), 184 p.

Shukla M.K., Lal R., Ebinger M., 2006 - Determining soil quality indicators by factor analysis, *Soil Tillage & Research*, 87, pp. 194-204.

Skupinski G., BinhTran D., Weber C., 2009 - Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain - Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne]*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 439, mis en ligne le 12 mars 2009. URL : <http://cybergeo.revues.org/21995>.

Slak M.-F., Lee A., Michel P., 2001 - L'évolution des structures d'occupation du sol vue par TERUTI», *Cahiers Agreste n°1*, pp. 13-25.

Société du Canal de Provence, 1970 - Etude pédologique moyennement détaillée des secteurs de Puylobier, Pourrières, Pourcieux.

Sol V., 2007 - Projet de directive sur la protection des sols : de louables intentions mais une approche trop traditionnelle, *BDEI* 2007, n°10, p.7.

Sparfel L., Gourmelon F., Le Berre I., 2008 - Approche orientée-objet de l'occupation des sols en zone côtière. *Téledétection*, 8, 4, pp. 237-256.

Vazquez C. 2011 - Peut-on intégrer un principe de non-recul en droit de l'environnement ? Mémoire de Master 2 DIEE, Aix-Marseille Université

Vrščaj B., Poggio L., Ajmone Marsan F., 2008 - A method for evaluating soil environmental quality for its management and planning in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 88, pp. 81-94.

Wania A., Weber C., 2007 - Images hyperspectrales et caractérisation de la végétation en milieu urbain. Atelier PNTS « Hyperspectral », Nantes : France 2007. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00570390/en/>

Warkentin B.P., Fletcher H.F., 1977 - Soil quality for intensive agriculture. Intensive Agriculture Society of Science, Soil and Manure. Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertilizer Management. National Institute of Agricultural Science, Tokyo, pp. 594-598.

Weber C., (coord.) 2002 - Morphologie urbaine et répartition des polluants : de la rue à l'agglomération. Le cas de la communauté urbaine de Strasbourg. Projet PNTS-INSU (2000-2002), ULP, Strasbourg.

Yakovchenko V., Sikora L.J., Kaufman D.D., 1996 - A biologically based indicator of soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 21, 4, pp. 245-251.

Yan S., Singh A. N., Fu, S., Liao, C., Wang, S., Li, Y., Cui, Y., Hu L., 2012 - A soil fauna index for assessing soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, 47, pp. 158-165.

Zhang X., Chen J., Tan M., Sun Y., 2007 - Assessing the impact of urban sprawl on soil resources of Nanjing city using satellite images and digital soil databases, *Catena*, 69, pp. 16-30.

Zhao, Y.G., Zhang, G.L., Zepp, H., Yang, J.L., 2007 - Establishing a spatial grouping base for surface soil properties along urban-rural gradient - A case study in Nanjing, China. *Catena*, 69, 1, pp. 74-81.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Echanges nets de surfaces entre les 4 types d'espace entre 1992 et 2002.....	9
Figure 2 : Déroulement de la recherche tel que prévu dans le projet initial.....	20
Figure 3 : Le bassin minier de Provence et les deux communes d'étude.....	22
Figure 4 : Rythmes d'évolution récente de la population dans le bassin minier de Provence.....	22
Figure 5 : Carte géologique au 1 : 50 000 de la commune de Gardanne (d'après BRGM, 1969).....	27
Figure 6 : Carte géologique au 1 : 50 000 de la commune de Rousset (d'après BRGM, 1969).....	27
Figure 7 : Représentation en trois dimensions de la topographie de Gardanne.....	28
Figure 8 : Représentation en trois dimensions de la topographie de Rousset.	28
Figure 9 : Chaîne logicielle de traitement de l'information	32
Figure 10 : La zone d'étude à travers trois couvertures topographiques à grande échelle.	33
Figure 11 : Localisation des points d'échantillonnage.....	39
Figure 12 : Traitement statistique employé pour l'élaboration de la typologie des sols.....	41
Figure 13 : Evolution de l'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)	51
Figure 14 : Evolution de l'occupation des sols dans les deux communes (1935-1999)	52
Figure 15 : Evolution des différents types d'espaces dans le total des territoires artificialisés (1935-1999).....	52
Figure 16 : Evolution des différents types d'espaces dans le total des territoires agricoles (1935-1999)	53
Figure 17 : Transitions entre les principales classes d'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)	54
Figure 18 : Transitions entre les principales classes d'occupation des sols à Rousset (1935-1999)...	55
Figure 19 : Variation de l'emprise géographique des vignes à Rousset (1935-1999).....	56
Figure 20 : Evolution comparée des superficies et des unités spatiales distinctes de quelques types d'occupation des sols à Rousset (1935-1999)	56
Figure 21 : Evolution comparée des superficies et des unités spatiales distinctes de quelques types d'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)	57
Figure 22 : Progression des territoires artificialisés à Gardanne (1935-1999).....	57
Figure 23 : Occupation des sols dans les zones PLU des deux communes	60
Figure 24 : Carte d'adéquation du sol à l'usage actuel du sol présentée en nombre de fonctions satisfaites (à gauche) et cartes produites par fonction pour l'usage actuel (à droite) pour Gardanne.....	68
Figure 25 : Carte d'adéquation du sol à l'usage actuel de ce sol présentée en nombre de fonctions satisfaites (à gauche) et cartes produites par fonction pour l'usage actuel (à droite) pour Rousset.....	69
Figure 26 : Carte de l'indice de polyvalence d'usages spatialisé par pixel sur la commune de Gardanne en 2008.....	70
Figure 27 : Carte de l'indice de polyvalence d'usages spatialisé par pixel sur la commune de Rousset en 2008.....	71
Figure 28 : Histogrammes des fréquences et courbes cumulées du nombre de fonctions satisfaites pour tous usages confondus en 2008 et par pixel pour Gardanne (à gauche) et pour Rousset (à droite).	72
Figure 29 : Une démarche classique d'élaboration d'un PLU (le cas de Marseille).....	73
Figure 30 : Polyvalence d'usage des sols par zones du PLU de Rousset.....	77
Figure 31 : Part de chaque classe de la carte de la Figure III-22 dans la superficie totale de chaque catégorie de zones du PLU à Rousset.....	78
Figure 32 : Polyvalence d'usage des sols par zones du PLU de Gardanne.....	79
Figure 33 : Part de chaque classe de la Figure III-24 dans la superficie totale de chaque catégorie de zones du PLU à Gardanne	80
Figure 34 : Différence calculée en termes de nombre de fonctions satisfaites entre la carte utilisant 11 ou 8 paramètres de caractérisation des sols sur la commune de Gardanne.....	87
Figure 35 : Fragmentation des sols à Gardanne : taille moyenne des patches d'une même classe (ici les surfaces non artificialisées) sur une grille de 50x50m calculée à partir de la carte des états de surface simplifiée en artificialisé et non artificialisé.	90

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Réunions d'échanges du groupe de travail.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 2 : Taux de variation récente de la population totale dans la zone d'étude (en %)</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 3 : Nomenclature des usages pris en compte dans l'élaboration de l'indice d'adéquation d'usage du sol.</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 4 : Superficies des zones à urbaniser dans les PLU des deux communes</i>	<i>58</i>

LISTE DES ANNEXES

Annexe II-1 : Mémoires de Master réalisés dans le cadre du projet	101
Annexe II-2 : Données géographiques utilisées dans le projet et intégrées dans le SIG	102
Annexe II-3 : Classes d'occupation des sols pour la cartographie diachronique 1935-1972-1999	104
Annexe II-4 : Classes de la nomenclature OcsolGeu, extension de CLC à un niveau 4 p our les espaces urbanisés.	105
Annexe II-5 : Liste des revues ayant publié les articles consultés sur les indices de qualité des sols (IQS).....	106
Annexe II-6 : Etat de l'art succinct sur les indices de qualité des sols et justification du choix de l'indice proposé	107
Annexe II-7 : Etablissement du plan d'échantillonnage pour la campagne de terrain	120
Annexe II-8 : Matériel et méthodes utilisés sur les profils échantillonnés	124
Annexe II-9 : Protocoles analytiques (LAS Arras et CEREGE).....	134
Annexe II-10 : Structuration des données de sol et typologie	137
Annexe II-11 : Prédiction des paramètres du sol à Gardanne	149
Annexe II-12 : Analyses microbiologiques	171
Annexe II-13 : Description détaillée de la conception et la construction de l'indice.....	190
Annexe II-14 : Classification et analyse des états de surface des sols (travail effectué par Thomas Ménard dans le cadre du projet Astuce & Tic).	215
Annexe III-1 : Données et statistiques descriptives relatives aux profils de sol échantillonnés sur les communes de Gardanne et Rousset.....	230
Annexe III-2 : Exemples de fiches de restitution aux propriétaires des sols prospectés	242
Annexe IV-1 : Synthèse des travaux présentée aux acteurs publics de Gardanne.....	246
Annexe IV-2 : Synthèse des travaux présentée aux acteurs publics de Rousset.....	260

Annexe II-1 : Mémoires de Master réalisés dans le cadre du projet

Etudes de la prise en compte de la qualité des sols en droit

DEFAUX C. 2010, Biodiversité, énergie, biomasse, protection des sols – quelle prise en compte dans le droit forestier ? Mémoire de Master 2 « Droit de la protection de l'environnement – Territoires méditerranéens » – TEMPRO, Université Paul Cézanne, Dir. I. Doussan

PERRIER S. 2010, La prise en compte de la qualité des sols dans les politiques agricoles, Mémoire de Master 2 « Droit de la protection de l'environnement – Territoires méditerranéens » – TEMPRO, Université Paul Cézanne, Dir. I. Doussan

QUARANTELLI-COLOMBANI M. 2010, La prise en compte de la qualité des sols dans les opérations de construction, Mémoire de Master 2 « Droit de la protection de l'environnement – Territoires méditerranéens » – TEMPRO, Université Paul Cézanne, Dir. M.-L. Lambert-Habib

Etudes sur la caractérisation de la qualité des sols

KIMBANGUI C. 2010. Susceptibilité magnétique et caractéristiques des sols. Mémoire de Master 1 « Sciences de l'Environnement Terrestre », spécialité Géosystèmes, Université Paul-Cézanne, Aix-Marseille III. Dir. C. Keller.

KADAFI S. 2009. Caractérisation physico-chimique des sols de Gardanne (Bouches-du-Rhône). Mémoire de Master 1 « Sciences de l'Environnement Terrestre », spécialité Géosystèmes, Université Paul-Cézanne, Aix-Marseille III. Dir. C. Keller.

RABOT E. 2009. Développement d'une méthode d'étude et d'une typologie des sols artificialisés. Mémoire de Master 2 « Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Environnement », spécialité Ingénierie des Hydrosystèmes et des Bassins Versants, Université François Rabelais, Tours. Dir. C. Keller.

Etudes sur l'évolution de l'occupation des sols et l'usage agricole des sols

CHARPENTIER E., 2010. Evolution spatio-temporelle des espaces agricoles sur la commune de Rousset. Approche géomatique. Mémoire de Master 1 « Sciences de l'Environnement Terrestre », Université Paul Cézanne, Dir. S. Robert, 44 p.

FALCONNIER A., 2010. Evolution spatio-temporelle des espaces agricoles sur la commune de Gardanne. Approche géomatique. Mémoire de Master 1 « Sciences de l'Environnement Terrestre », Université Paul Cézanne, Dir. S. Robert, 35 p.

METAYER M., 2011. Quelle durabilité de l'agriculture dans le bassin minier de Provence et à Gardanne, Bouches du Rhône ?, Mémoire de fin d'étude, Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers, Dir. S. Robert, 100 p.

Annexe II-2 : Données géographiques utilisées dans le projet et intégrées dans le SIG

	Type	Base	Date	Echelle / résolution	Format d'origine	Gardanne	Rousset
Données raster	Photographie aérienne	BD-Ortho / IGN	1998	50 cm	Numérique	1	1
		BD-Ortho / IGN	2003	50 cm	Numérique	1	1
		BD-Ortho / IGN	2008	50 cm	Numérique	1	1
	Image satellite	Quickbird 2002-09-03 P	2002	60 cm	Numérique	1	1
		Quickbird 2002-09-03 XS	2002	60 cm	Numérique	1	1
		Quickbird 2006-06-23 P	2006	60 cm	Numérique	1	1
		Quickbird 2006-06-23 XS	2006	60 cm	Numérique	1	1
	Carte topographique	Scan25 / IGN	1999	1/25000	Numérique	1	1
		Feuille Aix-en-Provence XXXII/44	1972	1/25000	Papier	1	1
		Feuille Aix-en-Provence XXXII/44	1935	1/20000	Papier	1	1
	Carte géologique			1/50000		1	1
	Carte pédologique	Carte des sols - Puylobier Pourrières Pourcieux / SCP	1970	1/20000	Papier		1
		Carte d'aptitude des sols à la mise en valeur et à l'irrigation - Puylobier Pourrières Pourcieux / SCP	1970	1/20000	Papier		1
	Modèle numérique de terrain	BD-Alti / IGN	2004		Numérique	1	1
		BD-Topo / IGN	2004		Numérique	1	1
Autre	Inventaire des terrils du bassin minier	1989	1/25000	Papier	1	1	
Données vecteur	Carte topographique	BD-Carto / IGN	2004		Numérique	1	1
		BD-Topo / IGN	2004		Numérique	1	1
	Occupation des sols	Ocsol PACA	2006		Numérique	1	1
	Parcellaire cadastral	PCI Vecteur / DGI	2010		Numérique	1	1
	Ouvrages miniers	Terrils	2003		Numérique	1	1

Annexe II-3 : Classes d'occupation des sols pour la cartographie diachronique 1935-1972-1999

Code	Nom de classe	Equivalent Corine Land Cover		
		Niv 3	Niv 2	Niv 1
U1	Tissus urbains	111 + 112	11	1
U2	Zones industrielles	121	12	
U3	Réseaux routiers et ferroviaires	122		
U4	Extraction de matériaux	131	13	
U5	Décharges	132		
U6	Espaces verts urbains	141	14	
U7	Equipements sportifs et de loisirs	142		
A1	Autres espaces agricoles		21 + 23 + 24	2
A2	Vignobles	221	22	
A3	Vergers	222 + 223		
N1	Milieus forestiers	311 + 312 + 313	31	3
N2	Broussailles	322	32	
N3	Roches nues	332	33	
E1	Cours d'eau	511	51	5
E2	Plan d'eau	512		

NB : l'interprétation des cartes topographiques utilisées pourraient donner lieu à une nomenclature plus étendue notamment pour les milieux naturels (marais intérieurs, plages, dunes, glaciers, etc.). Seuls sont représentés ici les types d'occupations du sol présentes dans les deux communes étudiées.

Annexe II-4 : Classes de la nomenclature OcsolGeu, extension de CLC à un niveau 4 pour les espaces urbanisés.

CLC (niveau 3)		OcsolGeu	
Code	Intitulé	Code	Intitulé
111	Tissu urbain continu	1111	Tissu urbain compact
		1112	Tissu urbain aéré
112	Tissu urbain discontinu	1121	Bâti individuel
		1122	Bâti collectif
		1123	Bâti mixte
113*	Bâti diffus*	1131	Espace de bâti diffus en zone agricole
		1132	Espace de bâti diffus en zone naturelle
121	Zones industrielles et commerciales	1211	Espaces industriels
		1212	Espaces commerciaux
		1213	Espaces d'activité économique
		1214	Espaces d'équipements collectifs
122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	1221	Réseau routier et espaces associés
		1222	Réseau ferroviaire et espaces associés
		1224	Parkings
123	Zones portuaires	1231	Infrastructures portuaires
		1232	Bassins portuaires
124	Aéroports	1241	Espaces bâtis aéronautiques
		1242	Pistes aéronautiques
131	Extraction de matériaux	1310	Extraction de matériaux
132	Décharges	1320	Décharges
133	Chantiers	1330	Chantiers
141	Espaces verts urbains	1411	Parcs verts urbains
		1412	Places
		1413	Espaces non bâtis en milieu urbanisé
142	Equipements sportifs et de loisirs	1421	Espaces bâtis de sport et de loisir
		1422	Espaces ouverts de sport et de loisir

La classe 113 est une originalité de la déclinaison locale de Corine Land Cover en région Provence - Alpes-Côte d'Azur. La base Ocsol PACA possède quelques postes originaux par rapport à CLC, afin de décrire au mieux les territoires de la région.

Annexe II-5 : Liste des revues ayant publié les articles consultés sur les indices de qualité des sols (IQS)

Les noms en gras correspondent aux revues pour lesquelles on a recensé 3 et plus articles faisant référence aux IQS.

Agriculture, Ecosystems & Environment

Agronomy Journal

Applied Geography

Applied Soil Ecology

Archives of Agronomy and Soil Science

Australian Journal of Crop Science

Biology and Fertility of Soils

CATENA

Ecological Engineering

Ecological Indicators

Environment International

Environmental Geology

Environmental Impact Assessment Review

Environmental Management

Environmental Modelling & Software

Environmental Monitoring and Assessment

Environmental Pollution

Etude et Gestion des Sols

Eurasian Soil Science

European Journal of Soil Biology

European Journal of Soil Science

Forest Ecology and Management

Forestry

Geoderma

Interciencia

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation

International Journal of Environmental Research

Journal of Arid Environments

Journal of Environmental Quality

Journal of Hydrology

Journal of Production Agriculture

Journal of Soil and Water Conservation

Journal of Sustainable Agriculture

Land Use and Soil Resources

Land Use Policy

Landscape and Urban Planning

Les études des Agences de l'Eau

Nature

Pedobiologia

Pedosphere

Pesquisa Agropecuaria Brasileira

Physics and Chemistry of the Earth

Plant and Soil

Progress in Planning

Reviews in Environmental Science and Biotechnology

Revista brasileira de ciencia do solo

Science of the Total Environment

Soil and Tillage Research

Soil Biology and Biochemistry

Soil Research

Soil Science

Soil Science Society of America Journal

The Journal of Applied ecology (Chinese)

Annexe II-6 : Etat de l'art succinct sur les indices de qualité des sols et justification du choix de l'indice proposé

1. Introduction

Depuis une vingtaine d'années, la qualité des sols fait l'objet d'évaluations, motivées par des objectifs de productivité et de durabilité agricoles. Les premiers indices élaborés sont directement issus de cette approche. Plus récemment, la nécessité d'utiliser le sol avec parcimonie, ainsi que la volonté de lui donner sa juste place dans le rendu des services écosystémiques au sens large, a suscité un regain d'intérêt pour une approche synthétique de la qualité des sols, qu'ils soient dévolus ou non à la production agricole. Il apparaît en particulier important d'évaluer les caractéristiques des sols en zone de transition spatiale (par exemple en zone péri-urbaine), dans les zones de forte perturbation et/ou de création de sols (par exemple sur et autour des sites miniers) ou en situation de changement d'usage ou d'occupation du sol). Enfin, dans un contexte d'approche « holistique » de l'environnement, une volonté d'évaluer la qualité du sol d'une manière globale et découplée de toute « fonctionnalisation » du sol est apparue, soutenue par quelques auteurs tels que Bone *et al.*, 2010. Le concept de qualité des sols est confronté à de nombreuses difficultés d'appréciation, dues notamment à la complexité et à l'interdépendance des processus affectant les sols, ainsi qu'à la variabilité des paramètres les caractérisant à l'échelle spatiale et temporelle. A cette complexité, se superpose l'effet de l'Homme et de ses activités, à travers de multiples utilisations du sol et techniques de gestion. Pour ces raisons, l'idée d'un indice « absolu » de la qualité des sols est considérée comme illusoire. La création d'indices dédiés et développés pour une application prédéfinie a donc très souvent la préférence mais est de facto non généralisable.

Par ailleurs, les opposants à l'utilisation d'indices dans le diagnostic ou le suivi de la qualité des sols soulignent que le sol ne possède pas d'état « standard » ou « pur » contrairement à l'eau et à l'air (Sojka et Upchurch, 1999 ; Letey *et al.*, 2003), ce qui constitue une difficulté majeure. L'eau et l'air peuvent être caractérisés par des paramètres physico-chimiques ou biologiques, dont les valeurs sont confrontées à des seuils à ne pas dépasser. Cette démarche s'avère bien plus complexe dans le cas des sols, puisque les paramètres mesurés présentent souvent une très grande variabilité selon le type de sol considéré, mais également au niveau spatial pour un même type de sol. Il existe, en outre, de nombreuses interactions entre ces différents paramètres (Arshad et Martin, 2002). Nortcliff (2002) souligne par ailleurs le temps de réponse pouvant être relativement long avant d'observer un changement de la qualité face à un changement des conditions externes ou d'usage.

En dépit de ces nombreuses réserves, les indices de qualité des sols (IQS) ont été largement utilisés et cela dans de multiples domaines. Il existe à l'heure actuelle une multitude d'IQS, utilisant des méthodes et des données d'entrée différentes. Une telle diversité démontre un intérêt certain de la part de la communauté scientifique et des utilisateurs du sol. C'est également un manque de consensus qui est ainsi illustré.

2. Rappel sur la qualité des sols

Une définition commune de la qualité des sols a émergé au cours du temps. La plus communément utilisée est celle du comité pour la qualité du sol de la Société Américaine de Sciences du Sol (SSSA, S-581). Elle est définie comme « la capacité [d'un sol] à fonctionner ». Elle précise, dans son entière définition, que la qualité d'un sol est « la capacité d'un type de sol à fonctionner, au sein d'un écosystème naturel ou non, en satisfaisant la production animale et végétale, en maintenant ou

améliorant la qualité de l'eau et de l'air et, en supportant la santé humaine et l'habitat humain » (Karlen *et al.*, 1997). Ainsi, Tóth *et al.* (2007), la décrivent comme une mesure de la capacité du sol à fournir des services à un écosystème et à une société, à travers son aptitude à accomplir des fonctions. La qualité du sol doit en particulier être vue comme une image composite des propriétés et processus physiques, chimiques et biologiques des sols (Karlen *et al.*, 1998). La qualité du sol ne peut donc pas être mesurée directement (Karlen *et al.*, 1998) et cette « capacité à fonctionner » fait donc appel au nombre et au type de fonctions qu'un sol est capable de réaliser (Tóth *et al.*, 2007). Le terme antagoniste « dégradation » est parfois utilisé (Diodato et Ceccarelli, 2004 ; Bastida *et al.*, 2006 ; Ferraro, 2009) pour exprimer un déclin de la qualité des sols.

Par ailleurs, Karlen *et al.* (2003) différencient une qualité « intrinsèque » ou « statique » et une qualité « dynamique ». La qualité intrinsèque d'un sol est définie comme la qualité liée aux différents facteurs de la formation des sols. Elle n'est pas influencée par l'usage qui en est fait. Elle est souvent utilisée afin de comparer l'aptitude de sols entre eux ou pour évaluer l'adéquation d'un sol pour un usage spécifique (De la Rosa et Sobral, 2008). A l'inverse, la qualité dynamique reflète une évolution liée à l'usage et à la gestion actuelle du sol (Karlen *et al.*, 2003), souvent à une échelle fine, typiquement celle de la parcelle (Norfleet *et al.*, 2003). Elle permet d'observer la durabilité de l'usage, les processus concernés étant considérés comme réversibles à court terme. Ces deux types de qualité, bien qu'utilisés avec des objectifs et des échelles distincts, sont néanmoins très liés. Comme le soulignent Norfleet *et al.* (2003), la gamme de variation de la qualité dynamique d'un sol est dépendante de sa qualité intrinsèque.

3. Les indices de qualité des sols

Les premiers travaux ayant trait à la productivité agricole argumentaient que maîtriser la qualité des sols permettrait de minimiser l'impact de l'agriculture sur l'environnement et la santé humaine (National Research Council, 1993). Ainsi, les indices disponibles actuellement, directement issus de cette problématique ancienne, s'avèrent souvent orientés vers des thématiques de productivité et de durabilité, et concernent principalement les cultures annuelles (Karlen *et al.*, 1994 ; Andrews *et al.*, 2002a ; Lilburne *et al.*, 2004 ; Shukla *et al.*, 2006 ; Idowu *et al.*, 2008 ; Qi *et al.*, 2009), les prairies (Shepherd, 2000 ; Gardi *et al.*, 2002 ; Rezaei *et al.*, 2006), les forêts (Kelting *et al.*, 1999 ; Schoenholtz *et al.*, 2000 ; Moffat, 2003 ; Zornoza *et al.*, 2007 ; Yan *et al.*, 2012) ou plus rarement les cultures permanentes (Glover *et al.*, 2000). Certaines études prennent en compte une variété de ces utilisations des sols (Quan *et al.*, 2007 ; Velasquez *et al.*, 2007 ; Mandal *et al.*, 2010 ; Marzaioli *et al.*, 2010). On pourra remarquer un rare intérêt pour les milieux urbains (Laroche *et al.*, 2006 ; Rutgers *et al.*, 2008 ; Vrščaj *et al.*, 2008). La conception d'un IQS requiert un fort niveau de connaissance du fonctionnement des sols, en lien avec les pratiques de gestion. On peut ainsi attribuer le caractère inégal des thématiques abordées à l'état des recherches actuelles, tout juste naissantes en ce qui concerne les sols artificialisés.

Certaines études visent à observer l'effet de différentes pratiques culturales, telles que le travail du sol ou l'application de fertilisation d'origine organique (Sharma *et al.*, 2005 ; Shukla *et al.*, 2006 ; Mohanty *et al.*, 2007), l'impact environnemental de différents types de cultures (Diack et Stott, 2001 ; Ferraro, 2009) ou l'efficacité de la restauration de sols (Kaufmann *et al.*, 2009 ; Blecker *et al.*, 2012). C'est l'objectivité que confère l'utilisation d'un IQS qui justifie son utilisation. Il permet notamment de quantifier l'effet des différents paramètres du sol sur la productivité culturale et la préservation de la qualité de l'environnement.

Si les travaux précédemment cités s'attachent à opérer des diagnostics à l'échelle de la parcelle, d'autres sont réalisés dans le cadre du suivi de la qualité des sols au niveau régional voire national,

comme en Suède (Kirchmann et Andersson, 2001), en Grande-Bretagne (Loveland et Thompson, 2002), en Nouvelle-Zélande (Lilburne *et al.*, 2004) et aux Pays-Bas (Rutgers *et al.*, 2008).

Ces indices sont plus ou moins complets selon que l'objectif est un développement méthodologique à l'attention d'agriculteurs ou de planificateurs, nécessitant un outil prêt à l'emploi, ou une étude locale de la qualité de sols permettant d'enrichir la connaissance scientifique. Plusieurs méthodes d'estimation de la qualité des sols sont déjà opérationnelles. Il existe notamment des kits prêts à l'emploi (Seybold *et al.*, 2002), des programmes informatiques (Andrews *et al.*, 2004 ; Liebig *et al.*, 2004), des applications disponibles sur internet (Lilburne *et al.*, 2004), ou des systèmes support de décision (De la Rosa *et al.*, 2004 ; Bohanec *et al.*, 2007).

4. Quels paramètres pour quel indice ?

Les paramètres mesurables du sol sont à la base du calcul des IQS, car les fonctions qu'ils caractérisent, tout comme la qualité du sol, ne sont pas directement quantifiables. Divers paramètres du sol sont ainsi mesurés pour déterminer le degré de réalisation de chaque fonction. Parce qu'il serait irréaliste d'utiliser tous les paramètres du sol et de l'écosystème, un *minimum data set* (MDS), consistant en un nombre réduit de paramètres chimiques, physiques et biologiques, doit être défini (Larson et Pierce, 1991). Il s'agit d'identifier les paramètres qui reflètent le mieux chacune des fonctions considérées. Il n'existe malheureusement pas de relation simple entre paramètres et fonctions (Schoenholtz *et al.*, 2000). Souvent, un paramètre participe à plusieurs fonctions et possède alors des valeurs optimales spécifiques à chacune d'elles (Vrščaj *et al.*, 2008). A l'inverse, une fonction est décrite par plusieurs paramètres.

Les paramètres physiques et chimiques apparaissent relativement stables dans le temps (paramètres intrinsèques). A l'inverse, les paramètres biologiques et certains paramètres physiques sont considérés plus sensibles aux variations du milieu et des pratiques de gestion (paramètres dynamiques) (De la Rosa et Sobral, 2008). Les paramètres choisis doivent être fiables, leur mesure aisée et reproductible, sensibles aux différences de pratiques et faciles à manipuler et à interpréter (Nortcliff, 2002). Ces paramètres doivent par ailleurs être non ambigus et posséder des seuils connus. Si la mesure d'un paramètre n'est pas possible, il peut être estimé à l'aide de fonctions de pédotransfert. La variabilité verticale des sols n'est souvent pas prise en compte dans les méthodes d'estimation de leur qualité, mais cet aspect doit être considéré par l'utilisation de paramètres descriptifs de toute l'épaisseur du sol (Letey *et al.*, 2003).

Plusieurs MDS ont été proposés (Larson et Pierce, 1991 ; Doran et Parkin, 1994 ; Karlen *et al.*, 1997 ; Diack et Stott, 2001 ; Andrews *et al.*, 2004 ; Vrščaj *et al.*, 2008) et le choix des paramètres à intégrer dans un IQS a été discuté dans divers articles de synthèse (Karlen *et al.*, 1998 ; Doran et Zeiss, 2000 ; Schoenholtz *et al.*, 2000 ; Loveland et Thompson, 2002 ; Moffat, 2003 ; Schloter *et al.*, 2003 ; Gil-Sotres *et al.*, 2005).

5. Les difficultés associées aux IQS

La principale difficulté réside dans le fait de vouloir représenter une réalité complexe à l'aide de quelques paramètres du sol. Letey *et al.* (2003) relèvent ainsi qu'un sol « bon » pour une fonction, peut être « mauvais » pour une autre. Un exemple est la fonction relative à l'eau dans le sol, qui demande au sol de jouer un rôle de réservoir et de permettre une bonne infiltration. Ainsi, il est primordial que toutes les fonctions, même antagonistes, soit prises en compte, et que leur importance soit soulignée selon l'usage considéré.

Si l'on raisonne de façon globale, en produisant un résultat sous une forme agrégée, il est difficile d'attribuer une note de qualité à un sol. Pourtant, rares sont les indices dont le résultat en sortie n'est pas une note unique. Une agrégation de plusieurs paramètres a, de plus, tendance à masquer un mauvais score parmi un ensemble de bons scores. Certains auteurs ont d'ailleurs mentionné une volonté de la part d'agriculteurs de pouvoir observer la complexité de leurs sols à travers un indice non agrégé (Ditzler et Tugel, 2002 ; Wander *et al.*, 2002). Une solution alternative à l'agrégation serait de se placer à l'échelle des fonctions. Ainsi, chaque fonction pourrait être évaluée et un résultat global pourrait être fourni sous la forme d'un nombre de fonctions satisfaites. Lilburne *et al.* (2004) ont choisi de regrouper les paramètres en quatre composantes de la qualité, chacune définies par une série de paramètres : ressource organique, état physique, fertilité et acidité. Velasquez *et al.* (2007) utilisent la notion de sous-indicateurs et Halvorson *et al.* (1996) parlent d'un nombre de dépassements de seuil. Dans tous les cas, l'avantage est de pouvoir identifier rapidement le paramètre responsable de la mauvaise qualité, voire de planifier des actions à mettre en œuvre. Vrščaj *et al.* (2008) assurent que l'agrégation permet la prise en compte d'interactions entre paramètres. A titre d'exemple, une concentration trop élevée d'un élément trace métallique pourra être compensée par une forte teneur en matière organique, limitant ainsi son transfert aux autres composantes du milieu. La prise en compte des interactions ne peut en réalité être faite qu'entre paramètres pris deux à deux. De la même façon, certains éléments traces considérés comme des polluants à forte concentration sont aussi essentiels à la croissance des plantes (ex. : Cu, Zn, Mn, B). De trop faibles teneurs pourraient causer une malnutrition des végétaux (Kirchmann et Andersson, 2001). Il faudrait alors considérer deux seuils : un seuil de concentration trop faible et un seuil de concentration trop élevée (Kirchmann et Andersson, 2001). Ceci a rarement été fait car les seuils dépendent fortement de la biodisponibilité des éléments, qui reste difficile à appréhender.

Ainsi, la mise en œuvre des indices de qualité des sols visant à retranscrire et hiérarchiser cette qualité, qui a aussi pour objectif de fournir une information synthétique de l'état des sols, est confrontée à la difficulté de rendre compte de la complexité du sol à travers un seul indice. Certains considèrent cette tâche impossible (Sojka et Upchurch, 1999 ; Letey *et al.*, 2003). Il n'en existe pas moins une multitude d'indices de qualité des sols, utilisant des méthodes et des jeux de données d'entrée différents et plus ou moins exhaustifs selon l'utilisation que l'on veut en faire.

6. La construction des indices

La définition de la qualité des sols impliquant l'utilisation de paramètres physiques, chimiques et biologiques, il apparaît pertinent de s'intéresser aux méthodes multiparamétriques qui peuvent être regroupées en trois grands types. L'indice additif est l'un des tous premiers créés. C'est une somme simple ou pondérée des scores obtenus par les différents paramètres du sol. Le choix des paramètres, de leur pondération et de la façon dont ils sont normalisés est établi par expertise ou à l'aide d'outils statistiques. Les indices « écart à la référence » définissent quant à eux la qualité du sol par rapport à un sol de référence, considéré comme de bonne qualité. Enfin, les méthodes qualitatives s'attachent à observer la présence de facteurs limitant à un usage, ou l'interaction entre les différents paramètres du sol.

6.1. Pertinence des différentes méthodes

Du point de vue méthodologique, des réserves ont été émises à propos de la validité des indices additifs. La pertinence d'une combinaison linéaire n'est pas établie tant que des régressions multiples ne sont pas opérées sur des paramètres d'objectif agronomiques ou environnementaux. La qualité

d'un sol y est alors souvent associée à une bonne productivité agricole et cette méthode n'est pas généralisable en milieu non agricole. Dans le cas des indices additifs fondés sur une base statistique, le point fort réside dans l'objectivité de la démarche. Elle évite ainsi les raccourcis comme le surclassement des cultures biologiques ou le déclassement des sols en milieu urbain. Un autre intérêt réside dans l'étape de présélection des paramètres du MDS (analyses de variance, corrélation avec des paramètres d'objectif), car elle permet de ne retenir que les plus pertinents en fonction des objectifs de l'étude (ex. : existence de différences significatives entre les différents usages des sols). Les méthodes statistiques ont également l'avantage d'éviter l'introduction de paramètres redondants, réduisant d'autant les coûts et les temps d'analyses. Si les résultats ne peuvent pas être comparés à d'autres zones d'étude, la méthode est quant à elle entièrement transférable à d'autres contextes pédologiques, climatiques ou d'usages, puisqu'elle ne contient aucune référence à un milieu spécifique. Cependant, comme la construction des axes en ACP est basée sur l'explication de la plus grande proportion de variance possible, la qualité d'un sol y est associée à une variabilité statistique. Andrews *et al.* (2002b) affirment que les facteurs identifiés sont représentatifs des attributs du système sol, mais cela reste insuffisant pour qualifier la qualité. Cette approche permet en réalité d'identifier les paramètres qui caractérisent le mieux les sols, mais rien n'indique qu'elle apporte de façon sûre une information sur la qualité. Avant toute tentative d'interprétation, les axes définis par l'analyse statistique doivent être interprétés par l'opérateur, et reliés à des fonctions des sols comme l'indiquent Brejda *et al.* (2000). Le résultat est par ailleurs largement dépendant du jeu de données à disposition. Comme il n'est pas toujours aisé de relier le résultat d'une analyse statistique à la qualité du sol, ces méthodes se limitent parfois à la sélection d'un MDS (ex. : Govaerts *et al.*, 2006 ; Rezaei *et al.*, 2006 ; Li *et al.*, 2007).

Les méthodes « écart à la référence » posent assez rapidement le problème de l'identification de la référence. Un sol de référence globale, c'est-à-dire sous une végétation climacique, n'ayant subi aucune perturbation anthropique reste très rare et n'est pas toujours présent pour une zone d'étude donnée. On peut par ailleurs s'interroger sur la pertinence et le réel apport d'information de la comparaison d'un tel sol avec des sols dédiés à d'autres usages. La définition d'une référence stratifiée, pour une combinaison usage/type de sol, demande quant à elle une très bonne connaissance de la zone d'étude, puisqu'il s'agit d'identifier les sols de la meilleure qualité avant de mettre en œuvre le diagnostic.

Enfin, la vision « naturaliste » des méthodes qualitatives, utilisant la notion de contrainte en fonction de l'usage, semble représenter une bonne alternative. Ces méthodes sont particulièrement adaptées lorsqu'il s'agit de définir l'adéquation entre un sol et un usage. Cette démarche, se basant sur les facteurs limitants, se rapproche de celle des études d'aptitude des sols couramment établies en milieux agricoles et souvent associées à des propositions d'aménagements ou d'améliorations. Elle autorise l'identification facile des paramètres défailants, tout comme le permettent les modèles hiérarchiques. Les méthodes qualitatives, entièrement construites par expertise, restent pourtant subjectives et demandent une très bonne connaissance des paramètres du sol et de leurs interactions possibles dans le milieu considéré.

6.2. Indice absolu versus indice relatif

Ces deux approches se distinguent par la finalité de leur utilisation. Si le diagnostic porte sur un ensemble de sols à comparer dans le temps ou l'espace, la question de l'utilisation d'un indice relatif ou absolu est fondamentale. La distinction entre les deux approches a lieu à l'étape de la transformation des paramètres en scores, soit à l'aide de seuils prédéfinis (indice absolu), soit à partir du jeu de données à disposition (indice relatif). Certaines méthodes ne peuvent par ailleurs donner que des résultats relatifs, comme celles basées sur la statistique et les indices « écart à la référence ». L'utilisation d'un indice relatif permet la prise en compte des particularités naturelles locales, telles que de fortes teneurs en éléments traces métalliques. Ce type de paramètre, hors de la

gamme habituelle, est alors considéré comme normal pour la zone considérée (fond pédogéochimique naturel) et ne donne pas lieu à un déclassement. Si une méthode statistique est mise en œuvre, l'échantillonnage doit être réalisé judicieusement. Un indice absolu a quant à lui plus de sens en ce qui concerne l'aptitude réelle des sols à travers leurs facteurs limitants. Il souligne les paramètres responsables d'une non-adéquation avec un usage. La qualité de l'information apportée par un indice relatif peut être améliorée par une stratification par le type de sol (Lilburne *et al.*, 2004 ; Rutgers *et al.*, 2008), afin de ne comparer que des sols comparables. Pour cette raison, certains indices ne se concentrent que sur un type de sol (ex. : Diack et Stott, 2001 ; Mohanty *et al.*, 2007). Il est en effet reconnu que les seuils des paramètres peuvent être différents selon le type de sol et sont alors choisis spécifiquement pour chacun d'entre eux. De plus, Rutgers *et al.* (2008) stratifie par l'occupation du sol et Idowu *et al.* (2008) par la texture du sol. Le choix d'un indice relatif ou absolu doit donc être fait selon les objectifs et les problématiques pédologiques locales. Cela pose donc le problème de l'échelle de travail.

6.3. Echelles d'évaluation

Un certain nombre de critiques liées aux IQS ont pu naître d'une trop faible conscience du rôle de l'échelle d'évaluation dans le calcul d'un tel indice. A titre d'illustration, dans le domaine agricole, un sol peut être de bonne qualité pour une culture, mais de mauvaise qualité pour une autre (Letey *et al.*, 2003). Dans le cadre de l'indice développé par Mohanty *et al.* (2007), il a en effet été démontré que des sols avec un indice de qualité élevé fournissaient des rendements en blé élevés et des rendements en riz faibles. Ce problème est en réalité inhérent aux références utilisées et confirme la nécessité de raisonner en termes d'usages. Comme c'est le cas dans tout diagnostic, la finesse du résultat est dépendante de la finesse de la donnée d'entrée. On peut penser que dans le cas d'une évaluation à l'échelle parcellaire, l'indice devrait pouvoir faire la distinction entre différentes cultures, considérées comme autant d'usages différents, tel que le réalise le module *Almagra* de MicroLEIS DSS (De la Rosa *et al.*, 2004). A l'échelle de la région, un usage « agriculture » pourrait s'avérer suffisant. L'étape du choix des paramètres du MDS est alors d'une importance particulière, ainsi que la liste des usages, plus ou moins précis, sur lesquels porte l'évaluation.

7. Conclusion

Les IQS sont utilisés avec deux objectifs bien distincts : évaluer la capacité d'un sol à remplir des fonctions indépendamment d'un usage (qualité intrinsèque) et estimer l'efficacité et le caractère durable de son fonctionnement au sein de son écosystème sous un certain usage (qualité dynamique). Diverses méthodes ont été développées, une grande majorité traitant de la qualité dynamique, notamment pour des usages agricoles. Peu sont dédiées à l'aménagement du territoire, permettant d'identifier les zones les plus à même de recevoir un futur usage (ex. : Vrščaj *et al.*, 2008). Récemment des indices ont été développés pour l'évaluation des milieux naturels. La déficience relevée en ce qui concerne ces usages non agricoles et les larges échelles d'étude peut être reliée à la complexité croissante de l'évaluation lorsque la variabilité du milieu augmente. Ce domaine a pourtant largement été traité par les urbanistes et les géographes à travers leurs études d'adéquation d'usage à l'échelle du territoire (ex. : Steiner *et al.*, 2000 ; Malczewski, 2006 ; Marull *et al.*, 2007), mais la prise en compte du compartiment sol y est souvent réduite. L'on peut néanmoins s'interroger sur la possible intégration des paramètres géographiques ou socio-économiques utilisés dans ces études au sein d'un indice de qualité des sols, afin d'en améliorer la pertinence en milieux non-agricoles.

Il convient de distinguer les IQS « prêts à l'emploi », pour lesquels un utilisateur n'a qu'à entrer des données de sols pour en avoir un diagnostic en termes de qualité grâce à une interface informatique spécifique (ex. : Andrews *et al.*, 2004 ; De la Rosa *et al.*, 2004 ; Lilburne *et al.*, 2004 ; Bohanec *et al.*,

2007 ; Vrščaj *et al.*, 2008) et ceux pour lesquels l'utilisateur doit réaliser lui-même le calcul de l'indice (ex. : Halvorson *et al.*, 1996 ; Shepherd, 2000 ; Bastida *et al.*, 2006 ; Velasquez *et al.*, 2007 ; Ferraro, 2009). Ces derniers concernent essentiellement les indices statistiques et les cartes de score. Si la plupart d'entre eux ont dépassé le stade de concept et ont été testés sur une zone d'étude, la validation n'est quant à elle pas réalisée de façon systématique. Elle reste en effet difficile hors d'un contexte de production agricole ou forestière. Le transfert à d'autres contextes pédologiques est parfois testé en phase de conception (ex. : Brejda *et al.*, 2000 ; Andrews *et al.*, 2002b ; Andrews *et al.*, 2004 ; Velasquez *et al.*, 2007 ; Zornoza *et al.*, 2008 ; Kaufmann *et al.*, 2009). De plus, les IQS étant par essence voués à être utilisés sur des séries temporelles, notamment afin d'observer l'effet de différentes pratiques, des évolutions sont parfois étudiées (ex. : Sun *et al.*, 2003 ; Rutgers *et al.*, 2008). Enfin, en ce qui concerne l'évaluation des couvertures pédologiques dans leur dimension spatiale, le risque élevé d'erreur liée à l'estimation à partir de points d'échantillonnage limite encore sa mise en œuvre.

Il ressort de la littérature que, pour que sa diffusion soit large et pérenne, un indice doit être valide et applicable aisément. Une grande partie des indices a été développée sur le modèle additif. Il a démontré son caractère opérationnel, puisqu'il est d'ores et déjà adopté par une partie du public visé grâce à la simplicité du concept et à la mise à disposition d'outils par ses concepteurs. La recherche d'une certaine objectivité et d'un fondement scientifique plus robuste ont ensuite mené à l'utilisation de plus en plus courante d'indices calculés sur des bases statistiques plutôt que d'indices basés sur l'expertise. Ils n'échappent pourtant toujours pas à la subjectivité, des choix devant nécessairement être opérés au moment de leur conception. Ils ne semblent par ailleurs pas réellement opérationnels hors d'un contexte de recherche scientifique. On a également vu apparaître des méthodes qualitatives pouvant, pour certaines, utiliser des concepts de logique floue et de géostatistique. Plus marginales, les méthodes qualitatives et les méthodes « écart à la référence » s'avèrent néanmoins faciles d'utilisation et accessibles à n'importe quel public. Elles apparaissent plus proches de la réalité du milieu, bien que s'appuyant presque essentiellement sur la connaissance d'experts. Outre la méthode, l'applicabilité d'un indice est très dépendante des paramètres utilisés, du coût de leur acquisition, de la facilité de leur interprétation et de la disponibilité de valeurs de référence. Leur choix est éminemment lié à notre compréhension du fonctionnement du sol et de nos capacités à le retranscrire sous la forme de paramètres mesurables.

Aussi, avant d'opérer un choix quant à la méthode à utiliser, des objectifs doivent être clairement identifiés. Plusieurs points sont à examiner :

- 1) Il s'agit dans un premier temps de connaître le cadre de l'utilisation de l'indice, c'est-à-dire un suivi ou un diagnostic de sols. Est-ce la qualité dynamique ou la qualité intrinsèque qui doit être évaluée ? En cas de comparaison de sols dans l'espace, il faut également déterminer si l'indice devra être absolu ou relatif.
- 2) Ensuite, il est nécessaire de s'interroger sur l'échelle de l'évaluation. Cette échelle, plus ou moins fine, va permettre d'identifier le degré de précision des usages et des fonctions du sol à prendre en compte, les paramètres, la finesse de l'attribution de scores ou de classes et la taille des unités de sols si l'indice est voué à être spatialisé.
- 3) Enfin, il convient d'identifier à qui est destiné l'indice, afin de définir sous quelle forme le résultat devra être produit.

La construction d'un indice utilisable en tout lieu, quelles que soient la finalité et l'échelle d'application est illusoire dans l'état actuel des connaissances. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'indice universel applicable à tout contexte. Cependant, il reste encore une marge de manœuvre dans l'amélioration de l'adéquation des IQS à leur application. Il apparaît en particulier évident que la prise en compte de la qualité des sols dans les aménagements et la gestion des sols hors contexte agricole implique des

IQS adaptés et probablement plus polyvalents. Ainsi, le caractère générique d'un tel indice devra sans doute passer par un indice méthodologiquement robuste mais modulable en termes d'usages, de types de sols et d'échelles d'étude. Cela permettra d'identifier des objectifs à atteindre, c'est-à-dire quelles sont les fonctions qui devront être réalisées pour avoir adéquation de l'usage avec le sol considéré. Les seuils à ne pas dépasser seront alors spécifiques d'un usage donné. La définition de qualité du sol énoncée très tôt par Pierce et Larson (1993) telle que « *fitness for use* » prend alors tout son sens si l'on veut s'assurer que les caractéristiques du sol sont en adéquation avec un usage particulier (Lilburne *et al.*, 2004).

Références bibliographiques spécifiques de l'annexe

- Andrews S.S., Karlen D.L. et Mitchell J.P., 2002a - A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90, 1, pp. 25-45.
- Andrews S.S., Mitchell J.P., Mancinelli R., Karlen D.L., Hartz T.K., Horwath W.R., Pettygrove G.S., Scow K.M. et Munk D.S., 2002b - On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal*, 94, 1, pp. 12-23.
- Andrews S.S., Flora C.B., Mitchell J.P. et Karlen D.L., 2003 - Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma*, 114, 3-4, pp. 187-213.
- Andrews S.S., Karlen D.L. et Cambardella C.A., 2004 - The Soil Management Assessment Framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 6, pp. 1945-1962.
- Arshad M.A. et Martin S., 2002 - Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 2, pp. 153-160.
- Banai R., 2005 - Land resource sustainability for urban development: Spatial decision support system prototype. *Environmental Management*, 36, 2, pp. 282-296.
- Barrios E., Delve R.J., Bekunda M., Mowo J., Agunda J., Ramisch J., Trejo M.T. et Thomas R.J., 2006 - Indicators of soil quality: A South-South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma*, 135, pp. 248-259.
- Bastida F., Luis Moreno J., Teresa H. et García C., 2006 - Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 12, pp. 3463-3473.
- Bastida F., Zsolnay A., Hernández T. et García C., 2008 - Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147, 3-4, pp. 159-171.
- Bohanec M., Cortet J., Griffiths B., Znidarsic M., Debeljak M., Caul S., Thompson J. et Krogh P.H., 2007 - A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia*, 51, 3, pp. 239-250.
- Bone J., Head M., Barraclough D., Archer M., Scheib C., Flight D. et Voulvoulis N., 2010 - Soil quality assessment under emerging regulatory requirements. *Environment International*, 36, 6, pp. 609-622.
- Brejda J.J., Moorman T.B., Karlen D.L. et Dao T.H., 2000 - Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 6, pp. 2115-2124.

- Bremer E. et Ellert K., 2004 - Soil quality indicators: A review with implication for agriculture ecosystems in Alberta. Alberta environmentally sustainable agriculture soil quality program, Alberta agriculture, food and rural development, Alberta.
- Buol S.W., Sanchez P.A., Cate R.B. et Granger M.A., 1975 - Soil fertility capability classification, pp. 126-141. *In*: Bornemisza E. et Alvarado A. (Eds), Soil Management in Tropical America, North Carolina State University, Raleigh.
- Carter M.B., Gregorich E.G., Anderson D.W., Doran J.W. et Janzen H.H., 1997 - Concepts of soil quality and their significance, pp. 1-17. *In*: Gregorich E.G. et Carter M.R. (Eds), Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier, Developments in Soil Science, Amsterdam.
- Chaer G.M., Myrold D.D. et Bottomley P.J., 2009 - A soil quality index based on the equilibrium between soil organic matter and biochemical properties of undisturbed coniferous forest soils of the Pacific Northwest. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 4, pp. 822-830.
- Collins M.G., Steiner F.R. et Rushman M.J., 2001 - Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements. *Environmental Management*, 28, 5, pp. 611-621.
- Commission des Communautés Européennes, 2006 - Proposition de directive du Parlement Européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE. Bruxelles. COM 2006/232.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., Oneill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P. et vandenBelt M., 1997 - The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 6630, pp. 253-260.
- Dawson J.J.C., Godsiffe E.J., Thompson I.P., Ralebitso-Senior T.K., Killham K.S. et Paton G.I., 2007 - Application of biological indicators to assess recovery of hydrocarbon impacted soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 1, pp. 164-177.
- De la Rosa D., Mayol F., Diaz-Pereira E. et Fernandez M., 2004 - A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection. *Environmental Modelling & Software*, 19, 10, pp. 929-942.
- De la Rosa D. et Sobral R., 2008 - Soil quality and methods for its assessment, pp. 167-200. *In*: Springer Netherlands (Ed.), Land Use and Soil Resources.
- Dexter A.R., 2004 - Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 3-4, pp. 201-214.
- Diack M. et Stott D.E., 2001 - Development of a soil quality index for the Chalmers silty clay loam from the midwest USA, pp. 550-555. *In*: Stott D.E., Mohtar R.H. et Steinhardt G.C. (Eds), Sustaining the global farm. Selected paper from the 10th international soil conservation organisation meeting, West Lafayette, USA.
- Diodato N. et Ceccarelli M., 2004 - Multivariate indicator kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands. *Ecological Indicators*, 4, 3, pp. 177-187.
- Ditzler C.A. et Tugel A.J., 2002 - Soil quality field tools: Experiences of USDA-NRCS Soil Quality Institute. *Agronomy Journal*, 94, 1, pp. 33-38.
- Doran J.W. et Parkin T.B., 1994 - Defining and assessing soil quality. *In*: Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicsek D.F. et Stewart B.A. (Eds), Defining soil quality for a sustainable environment, SSSA Inc., Madison, WI.
- Doran J.W., Sarrantonio M. et Liebig M., 1996 - Soil health and sustainability, pp. 1-54. *In*: Sparks D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, Academic Press, San Diego.

- Doran J.W. et Zeiss M.R., 2000 - Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 1, pp. 3-11.
- Fedoroff N., 1987 - The production potential of soils. Part 1. Sensitivity of principal soil types to the intensive agriculture of north-western Europe, pp. 65-86. *In*: Barth E. et L'Hermite P. (Eds), *Scientific Basis for Soil Protection in the European Community*, Elsevier, London.
- Ferraro D.O., 2009 - Fuzzy knowledge-based model for soil condition assessment in Argentinean cropping systems. *Environmental Modelling & Software*, 24, 3, pp. 359-370.
- Franzluebbers A.J., Zuberer D.A. et Hons F.M., 1995 - Comparison of microbiological methods for evaluating quality and fertility of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 19, 2-3, pp. 135-140.
- Gardi C., Tomaselli M., Parisi V., Petraglia A. et Santini C., 2002 - Soil quality indicators and biodiversity in northern Italian permanent grasslands. *European Journal of Soil Biology*, 38, 1, pp. 103-110.
- Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leirós M.C. et Seoane S., 2005 - Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 5, pp. 877-887.
- Glover J.D., Reganold J.P. et Andrews P.K., 2000 - Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80, 1-2, pp. 29-45.
- Govaerts B., Sayre K.D. et Deckers J., 2006 - A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87, 2, pp. 163-174.
- Halvorson J.J., Smith J.L. et Papendick R.I., 1996 - Integration of multiple soil parameters to evaluate soil quality: A field example. *Biology and Fertility of Soils*, 21, 3, pp. 207-214.
- Haygarth P.M. et Ritz K., 2009 - The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*, 26, pp. 187-197.
- Huerta E., Kampichler C., Geissen V., Ochoa-Gaona S., de Jong B. et Hernandez-Daumas S., 2009 - Towards an ecological index for tropical soil quality based on soil macrofauna. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 44, 8, pp. 1056-1062.
- Hussain I., Olson K.R., Wander M.M. et Karlen D.L., 1999 - Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil and Tillage Research*, 50, 3-4, pp. 237-249.
- Idowu O.J., van Es H.M., Abawi G.S., Wolfe D.W., Ball J.I., Gugino B.K., Moebius B.N., Schindelbeck R.R. et Bilgili A.V., 2008 - Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods. *Plant and Soil*, 307, 1-2, pp. 243-253.
- Karlen D.L., Wollenhaupt N.C., Erbach D.C., Berry E.C., Swan J.B., Eash N.S. et Jordahl J.L., 1994 - Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil and Tillage Research*, 31, pp. 149-167.
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F. et Schuman G.E., 1997 - Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1, pp. 4-10.
- Karlen D.L., Gardner J.C. et Rosek M.J., 1998 - A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture*, 11, 1, pp. 56-60.
- Karlen D.L., Ditzler C.A. et Andrews S.S., 2003 - Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 114, 3-4, pp. 145-156.

- Kaufmann M., Tobias S. et Schulin R., 2009 - Quality evaluation of restored soils with a fuzzy logic expert system. *Geoderma*, 151, 3-4, pp. 290-302.
- Kelting D.L., Burger J.A., Patterson S.C., Aust W.M., Miwa M. et Trettin C.C., 1999 - Soil quality assessment in domesticated forests - a southern pine example. *Forest Ecology and Management*, 122, 1-2, pp. 167-185.
- Kirchmann H. et Andersson R., 2001 - The Swedish system for quality assessment of agricultural soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 72, 2, pp. 129-139.
- Laroche B., Thorette J. et Lacassin J.-C., 2006 - L'artificialisation des sols : pressions urbaines et inventaire des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 223-235.
- Larson W.E. et Pierce F.J., 1991 - Conservation and enhancement of soil quality. Proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Vol 2. Technical papers. International board for soil research and management, IBSRAM Proceedings. Bangkok, Thailand.
- Lenhart T., Eckhardt K., Fohrer N. et Frede H.G., 2002 - Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27, 9-10, pp. 645-654.
- Letey J., Sojka R.E., Upchurch D.R., Cassel D.K., Olson K., Payne B., Petrie S., Price G., Scott H.D., Smethurst, P. et Triplett G., 2003 - Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58, 4, pp. 180-187.
- Li G., Chen J., Sun Z. et Tan M., 2007 - Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land-use changes. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 7, pp. 2715-2724.
- Liebig M.A., Varvel G. et Doran J., 2001 - A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal*, 93, 2, pp. 313-318.
- Liebig M.A., Miller M.E., Varvel G.E., Doran J.W. et Hanson J.D., 2004 - AEPAT: Software for assessing agronomic and environmental performance of management practices in long-term agroecosystem experiments. *Agronomy Journal*, 96, 1, pp. 109-115.
- Lilburne L., Sparling G. et Schipper L., 2004 - Soil quality monitoring in New Zealand: Development of an interpretative framework. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 3, pp. 535-544.
- Loveland P.J. et Thompson T.R.E., 2002 - Identification and development of a set of national indicators for soil quality. National Soil Resource Institute, R&D Technical report P5-053/2/TR, Bristol, UK, 48 p.
- Malczewski J., 2004 - GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62, pp. 3-65.
- Malczewski J., 2006 - Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, 4, pp. 270-277.
- Mandal D., Singh R., Dhyani S.K. et Dhyani B.L., 2010 - Landscape and land use effects on soil resources in a Himalayan watershed. *CATENA*, 81, 3, pp. 203-208.
- Marull J., Pino J., Mallarach J.M. et Cordobilla M.J., 2007 - A land suitability index for strategic environmental assessment in metropolitan areas. *Landscape and Urban Planning*, 81, 3, pp. 200-212.
- Marzaioli R., D'Ascoli R., De Pascale R.A. et Rutigliano F.A., 2010 - Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 44, 3, pp. 205-212.

- Millenium Ecosystem Assessment, 2005 - Ecosystems and human well-being: Opportunities and challenges for business and industry. World Resources Institute, Washington, DC.
- Miller W., Collins M.G., Steiner F.R. et Cook E., 1998 - An approach for greenway suitability analysis. *Landscape and Urban Planning*, 42, 2-4, pp. 91-105.
- Moffat A.J., 2003 - Indicators of soil quality for UK forestry. *Forestry*, 76, 5, pp. 547-568.
- Mohanty M., Painuli D.K., Misra A.K. et Ghosh P.K., 2007 - Soil quality effects of tillage and residue under rice-wheat cropping on a Vertisol in India. *Soil and Tillage Research*, 92, 1-2, pp. 243-250.
- National Research Council, 1993 - Soil and water quality: An agenda for agriculture. National Academy Press, Washington, D.C, 542 p.
- Norfleet M.L., Ditzler C.A., Puckett W.E., Grossman R.B. et Shaw J.N., 2003 - Soil quality and its relationship to pedology. *Soil Science*, 168, 3, pp. 149-155.
- Nortcliff S., 2002 - Standardization of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, pp. 161-168.
- Pierce F.J. et Larson W.E., 1993 - Developing criteria to evaluate sustainable land management, pp. 7-14. *In: Kimble J.M. (Ed.), Proceedings of the 8th International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use, USDA-SCS, National Soil Survey, Lincoln, NE.*
- Qi Y., Darilek J.L., Huang B., Zhao Y., Sun W. et Gu Z., 2009 - Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149, 3-4, pp. 325-334.
- Quan B., Zhu H.J., Chen S.L., Romkens M.J.M. et Li B.C., 2007 - Land suitability assessment and land use change in Fujian Province, China. *Pedosphere*, 17, 4, pp. 493-504.
- Rezaei S.A., Gilkes R.J. et Andrews S.S., 2006 - A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 136, 1-2, pp. 229-234.
- Romig D.E., Garlynd M.J., Harris R.F. et McSweeney K., 1995 - How farmers assess soil health and quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50, 3, pp. 229-236.
- Rutgers M., Mulder C., Schouten A.J., Bloem J., Bogte J.J., Breure A.M., Brussaard L., de Goede R.G.M., Faber J.H., Jagers op Akkerhuis G.A.J.M., Keidel H., Korthals G.W., Smeding F.W., Ter Berg C. et van Eederen N., 2008 - Soil ecosystem profiling in The Netherlands with ten references for biological soil quality. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Report 607604009/2008, 88 p.
- Sanchez P.A., Palm C.A. et Buol S.W., 2003 - Fertility capability soil classification: A tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114, 3-4, pp. 157-185.
- Schlöter M., Dilly O. et Munch J.C., 2003 - Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98, 1-3, pp. 255-262.
- Schoenholtz S.H., Miegroet H.V. et Burger J.A., 2000 - A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138, 1-3, pp. 335-356.
- Seybold C.A., Mausbach M.J., Karlen D.L. et Rogers H.H., 1998 - Quantification of soil quality, pp. 387-404. *In: Lal R., Kimble J.M., Follet R.F. et Stewart B.A. (Eds), Soil processes and the carbon cycle, CRC Press LLC, Boca Raton, FL.*
- Seybold C.A., Hubbs M.D. et Tyler D.D., 2002 - On-farm tests indicate effects of long-term tillage systems on soil quality. *Journal of Sustainable Agriculture*, 19, 4, pp. 61-73.

- Sharma K.L., Mandal U.K., Srinivas K., Vittal K.P.R., Mandal B., Grace J.K. et Ramesh V., 2005 - Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil and Tillage Research*, 83, 2, pp. 246-259.
- Shepherd T.G., 2000 - Visual Soil Assessment. Vol. 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. horizons.mw & Landcare Research, Palmerston North, 84 p.
- Shukla M.K., Lal R. et Ebinger M., 2006 - Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87, 2, pp. 194-204.
- Sojka R.E. et Upchurch D.R., 1999 - Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Science Society of America Journal*, 63, pp. 1039-1054.
- Steiner F., McSherry L. et Cohen J., 2000 - Land suitability analysis for the upper Gila River watershed. *Landscape and Urban Planning*, 50, 4, pp. 199-214.
- Sun B., Zhou S. et Zhao Q., 2003 - Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115, 1-2, pp. 85-99.
- Tóth G., Stolbovoy V. et Montanarella L., 2007 - Soil quality and sustainability evaluation. An integrated approach to support soil-related policies of the European Union. Office for Official Publications of the European Communities, EUR 22721 EN, Luxembourg, 40 p.
- Trasar-Cepeda C., Leirós C., Gil-Sotres F. et Seoane S., 1997 - Towards a biochemical quality index for soils: An expression relating several biological and biochemical properties. *Biology and Fertility of Soils*, 26, 2, pp. 100-106.
- Tzilivakis J., Lewis K.A. et Williamson A.R., 2005 - A prototype framework for assessing risks to soil functions. *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 2, pp. 181-195.
- Velasquez E., Lavelle P. et Andrade M., 2007 - GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 12, pp. 3066-3080.
- Vrščaj B., Poggio L. et Ajmone-Marsan F., 2008 - A method for soil environmental quality evaluation for management and planning in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 88, 2-4, pp. 81-94.
- Wander M.M., Walter G.L., Nissen T.M., Bollero G.A., Andrews S.S. et Cavanaugh-Grant D.A., 2002 - Soil quality: Science and process. *Agronomy Journal*, 94, 1, pp. 23-32.
- Yakovchenko V., Sikora L.J. et Kaufman D.D., 1996 - A biologically based indicator of soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 21, 4, pp. 245-251.
- Zornoza R., Mataix-Solera J., Guerrero C., Arcenegui V., García-Orenes F., Mataix-Beneyto J. et Morugán A., 2007 - Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of the Total Environment*, 378, 1-2, pp. 233-237.
- Zornoza R., Mataix-Solera J., Guerrero C., Arcenegui V., Mataix-Beneyto J. et Gomez I., 2008 - Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 9, pp. 2079-2087.

Annexe II-7 : Etablissement du plan d'échantillonnage pour la campagne de terrain

1. Rappel du principe

Parce que les sols présentent une grande variabilité spatiale, en relation avec la variabilité des facteurs leur ayant donné naissance, un échantillonnage exhaustif des sols à l'échelle d'une commune est un objectif difficile à atteindre. Ainsi, une méthode d'échantillonnage de type stratifié est privilégiée, plutôt qu'une méthode dirigée ou systématique. Elle consiste à subdiviser la zone en secteurs homogènes, appelés strates et d'affecter un même nombre d'échantillon à chaque strate. L'intérêt de cette méthode est que la stratification est faite selon les variables ayant la plus grande incidence sur les éléments étudiés, ce qui oriente l'échantillonnage et permet de réduire le nombre d'échantillons nécessaires. Les strates sont définies à partir de facteurs de la pédogenèse sélectionnés comme ayant un effet significatif à l'échelle de la commune, pour des sols aussi divers que des sols forestiers, agricoles ou urbains. Il s'agit de la lithologie de la roche mère, du relief, par l'intermédiaire de l'intensité de la pente, et de l'occupation du sol.

2. Mise en œuvre

La mise en œuvre du plan d'échantillonnage est effectuée sous SIG (ArcGIS 9.3, ESRI) et débute par l'identification de zones homogènes. Elle est réalisée par croisement géographique des couches d'information sur la lithologie et l'occupation du sol, en format vecteur.

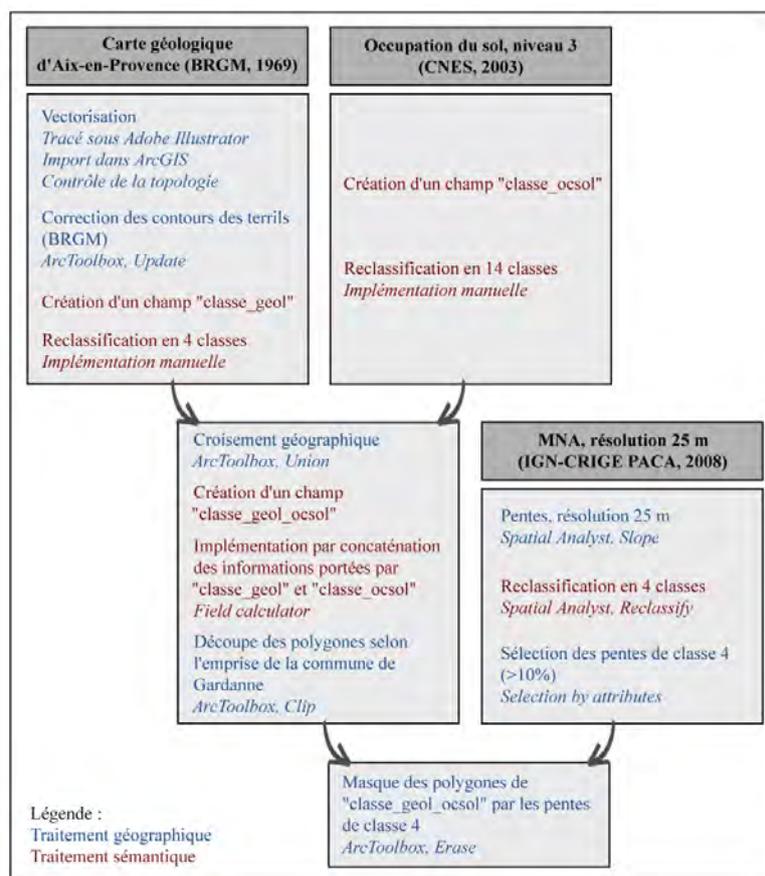


Figure 1 : Etapes ayant permis l'établissement du plan d'échantillonnage sur les 2 communes.

Les données sur la lithologie sont obtenues après vectorisation de la carte géologique d'Aix-en-Provence (BRGM, 1969). Les lithologies dominantes de chaque formation géologique sont utilisées. La carte géologique est corrigée en ce qui concerne les dépôts artificiels correspondant à des terrils, pour lesquels une délimitation plus précise et plus récente est disponible (donnée du BRGM DPSM-UTAM de Gardanne). Enfin, l'information sur l'occupation du sol est extraite d'une cartographie par analyse d'image réalisée à partir d'une image satellitaire (CNES, 2003). Le troisième niveau de cette classification, le plus fin, est utilisé. Certains types d'occupations du sol non significatifs dans le cadre de cette étude sont regroupés (**Figure 1**).

La carte ainsi obtenue correspond aux strates lithologie-occupation du sol du plan d'échantillonnage. Un exemple est donné en **Figure 2** pour les territoires agricoles et les forêts et milieux semi-naturels à Gardanne et Rousset. Elle constitue une première approche permettant de cibler les sites d'étude avant une campagne de terrain et est prise en compte dans la connaissance des combinaisons lithologie-occupation du sol existantes. Néanmoins, un réajustement peut être fait si les informations sur la géologie ou l'occupation du sol s'avèrent erronées après observation sur site. En effet, il est possible d'observer des approximations du fait de l'échelle de la donnée, voire des erreurs liées à sa méthode d'acquisition (*i.e.* l'analyse d'image pour l'occupation du sol).

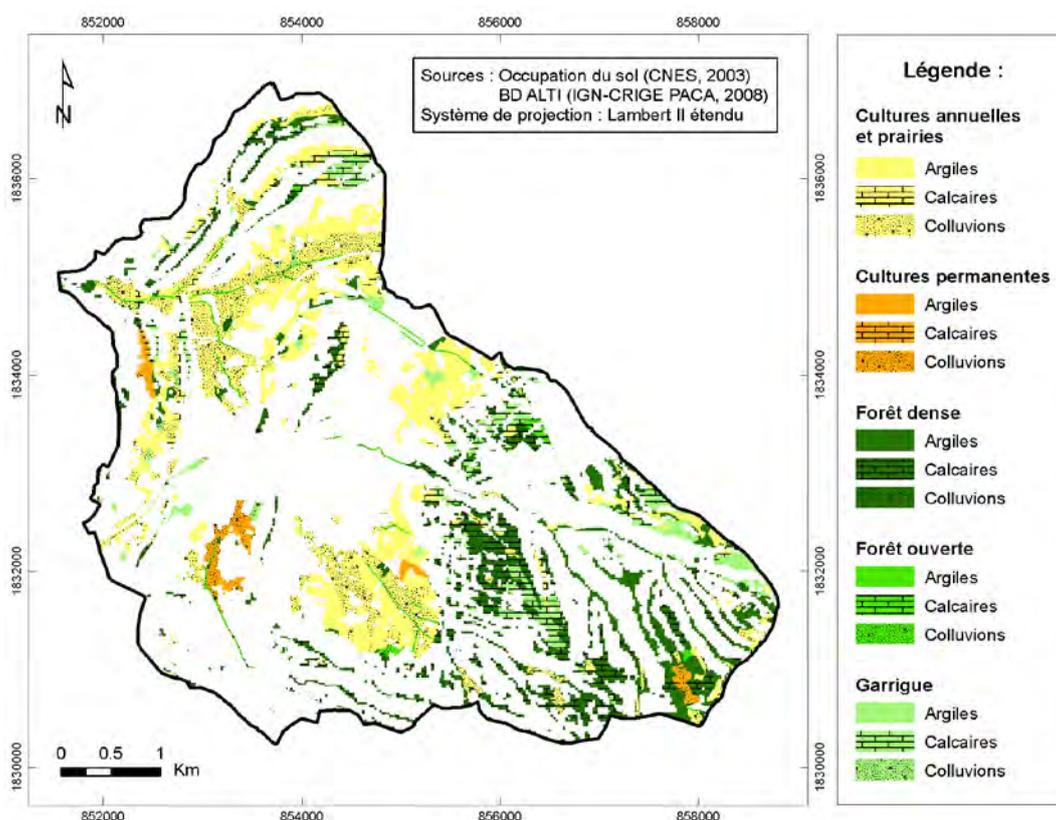


Figure 2a : Carte des zones homogènes lithologie-occupation du sol des zones agricoles et des forêts et milieux semi-naturels à Gardanne.

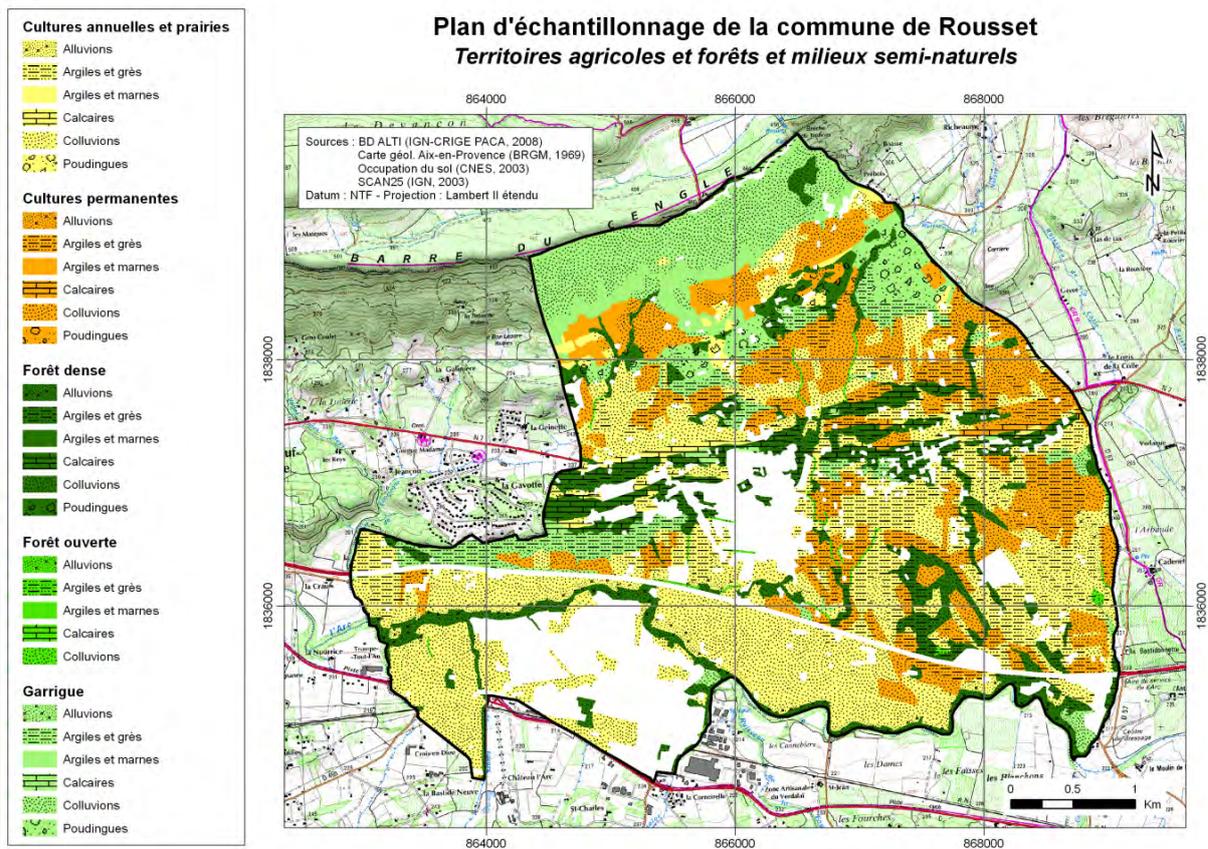


Figure 2b : Carte des zones homogènes lithologie-occupation du sol des zones agricoles et des forêts et milieux semi-naturels à Rousset.

En milieu urbain, cette stratification s'avère pourtant insuffisante dans le cadre d'une étude des sols. En effet, il existe au sein de chaque classe une grande variété d'objets. A titre d'exemple, dans la classe « tissu urbain continu » de l'occupation du sol, on peut trouver des routes, des zones pavées, des plates-bandes, des jardins, etc. Ceci est moins vrai en zones agricoles ou forestières, plus homogènes. C'est donc un autre paramètre qui est croisé avec l'occupation du sol pour les territoires artificialisés. Il s'agit de l'état de surface. Il est divisé en quatre classes. Les surfaces artificialisées imperméables sont des surfaces entièrement construites par l'homme et formant une barrière à l'infiltration de l'eau (ex. : zone pavée, asphalté, béton). Les surfaces artificialisées perméables sont également construites par l'homme, mais possèdent une porosité suffisante pour laisser l'eau s'infiltrer (ex. : graviers ou sable, sans ciment inter-éléments). Les surfaces dites végétalisées doivent présenter une végétation recouvrant la majorité de la surface du sol (ex. : gazon, herbe, friche). Le quatrième type de surface correspond aux sols nus. Au vu de la finesse de cette information, elle ne pourra pas être identifiée au préalable sous SIG.

En résumé, l'information sur la lithologie de la roche mère est utilisée dans la stratification pour les territoires agricoles et forestiers. Elle ne l'est pas pour les territoires artificialisés et est remplacée par l'état de surface observé sur le terrain.

Une grille guidant l'échantillonnage est donc constituée, chaque case formant une strate (**Tableaux 1 et 2**). Les tableaux 1 et 2 sont complétés en y indiquant les identifiants de sites utilisés tout au long de l'étude et du rapport, en particulier dans les **Annexes II- 10 et 12**. Certaines combinaisons ne représentant que de faibles superficies ne sont pas traitées.

Tableau 1 : Plan d'échantillonnage des territoires artificialisés.

Occupation du sol		Etat de surface		
Niveau 2	Niveau 3	Artificialisé perméable	Sol nu	Végétalisé
Zones urbanisées	Tissu urbain	G41, R32	G13, R16	G9, G32, G42
	Bâti diffus	G46	G44, G45	G8, G43, R11, R22, R36, R37
Zones industrielles et commerciales et infrastructures de communication	Zones industrielles et commerciales	G16, (G18, G19), G26, (R26, R27), R33, R34	G25	G10, G17, R33
	Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés	R29		G47
Mines, décharges, chantiers	Extraction de matériaux			(G1, G2), G3, G4
Espaces verts artificialisés, non agricoles	Espaces verts urbains	G50		G48, G52, R31
	Equipements sportifs et de loisir	G27, (G30, G31), G51, R28		(G28, G29), R30

Tableau 2 : Plan d'échantillonnage des territoires agricoles et forêts et milieux semi-naturels.

Occupation du sol		Roche mère ou substrat					
Niveau 2	Niveau 3	Argile	Grès	Calcaire-Marne	Colluvions	Poudingue	Alluvions
Terres arables	Terres arables	G11, G12	R24	G15	G6, R25		R8, R18, R23
Cultures permanentes	Vignobles, vergers	G7, G35, R2, R3	R5		G36, R10		
Prairies	Prairies	G14, R6, R7, R17			G38, R13		
Forêts	Forêts dense	G34		(G20, G21, G22) (G23, G24), R21	R14		R19
	Forêts ouverte	G5	R9	G33, R20, R4	R15		
Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Maquis et garrigues	R12		G37, G39		R1	

Annexe II-8 : Matériel et méthodes utilisés sur les profils échantillonnés

I. Choix et justification des paramètres retenus pour la caractérisation des sols

Description morphologique du profil de sol effectuée à partir d'un sondage à la tarière (profondeur maximale 120 cm). Les profils ont été décrits selon la méthodologie de Baize et Jabiol (1995) et ils ont été identifiés selon le Référentiel Pédologique 2008 (AFES, 2009). L'état de surface du sol a été noté afin d'être utilisé comme contrôle à la carte des états de surface et de paramètre d'entrée dans le traitement des données pour la construction d'une typologie des sols. La description morphologique a également permis de confronter les résultats de la pénétrométrie à l'observation des horizons. L'échantillonnage a été effectué selon les horizons pédologiques identifiés.

Caractérisation physique : essai au pénétromètre dynamique afin de déterminer la résistance du sol. Cet essai permet d'estimer le degré de compaction du sol sur l'ensemble du profil de sol jusqu'à 2 m lorsqu'il n'y avait pas de blocage. Le test au pénétromètre a été fait au même endroit que le sondage. Par manque de méthode standard ou de temps, certains paramètres initialement pressentis tels que la densité et l'infiltration non pas été mesurés.

Caractérisation physico-chimique complète exprimant classiquement la qualité des sols agricoles et forestiers et incluant les teneurs en carbone organique, en azote total, en CaCO_3 , en phosphore Olsen, la capacité d'échange cationique (Metson), le pH_{eau} , la granulométrie 5 fractions, les teneurs en oxyhydroxydes de Fe et Al extraits par citrate bicarbonate dithionite (extractant Mehra-Jackson). Les analyses ont été effectuées sur tous les horizons de surface et certains horizons de profondeur représentatifs. La teneur en eau de l'horizon de surface a été évaluée afin de permettre la normalisation des données microbiologiques. La susceptibilité magnétique a été testée comme traceur potentiel de contaminations métalliques (Lecoanet et al. 2001) et/ou de retombées particulaires métalliques issues de l'usine d'alumine.

Caractérisation de la contamination des sols avec les teneurs totales en éléments traces métalliques. Nous avons fait l'hypothèse que la contamination atteignait le sol par la surface : seuls les horizons de surface ont donc été analysés pour ces paramètres. Les polluants organiques non pas été évalués car il n'y avait a priori pas de source évidente de contamination et le coût analytique était prohibitif pour le nombre d'échantillons concernés.

Caractérisation microbiologique des sols : les micro-organismes du sol ont la particularité de réagir rapidement aux changements de leur environnement. De ce fait, ils peuvent constituer de bons indicateurs de l'altération d'un système (Stefanowicz, 2006), en particulier lors d'un changement d'usage des sols. Le choix des paramètres à mesurer s'est porté sur l'évaluation globale des activités enzymatiques (FDA), la respiration du sol (consommation d'oxygène et dégagement de CO_2 , ce dernier non planifié au départ) et sa diversité fonctionnelle (Biolog). Seuls les horizons de surface ont été analysés. L'automatisation des mesures d'activités enzymatiques n'ayant pas été mise au point au moment des analyses, les activités enzymatiques spécifiques ont été abandonnées.

II- Méthodes appliquées aux échantillons de la campagne de terrain

1. Aspect descriptif : sondage pédologique

Les sondages pédologiques sont réalisés en chaque site d'étude à l'aide d'une tarière manuelle de pédologue de 120 cm. Ils sont menés jusqu'à cette profondeur ou jusqu'à un blocage. La localisation géographique est relevée à l'aide d'un GPS et une description du site est consignée (géomorphologie, végétation, occupation du sol observée, état de surface, conditions météorologiques).

Des horizons sont différenciés et décrits en termes d'épaisseur, texture, humidité, teneur, nature et forme des éléments grossiers, couleur et taches, présence de matière organique et dispersion dans le profil, réactivité à l'acide chlorhydrique (teneur en carbonates). La texture donne une information sur la taille des grains constituant le sol (argile, limon et sable), et est évaluée sous forme qualitative par référence aux classes du triangle de texture GEPPA. En plus des observations de terrain, l'identification de la roche mère ou du substrat peut être complétée à l'aide de la carte géologique d'Aix-en-Provence (BRGM, 1969). Un prélèvement de sol est effectué en vue de réaliser des analyses physico-chimiques. L'échantillonnage est dit « stratifié verticalement », c'est-à-dire qu'un échantillon est prélevé dans chaque horizon. Ce type d'échantillonnage améliore les possibilités d'interprétation des résultats par rapport à la réalisation de prélèvements systématiques d'épaisseur arbitrairement fixée (Leyval, 1999). Les couleurs sont déterminées par la suite sur échantillons secs à l'aide d'une charte Munsell.

L'ensemble de ces observations doit permettre de comprendre les liens génétiques entre les différents horizons et l'histoire de la formation, naturelle ou anthropique, du sol au sein de son paysage. Un nom est alors attribué à chacun des horizons et à chacun des sols dans le Référentiel Pédologique Français (AFES, 2009) et dans la classification internationale WRB (IUSS Working Group WRB, 2006).

2. Aspect physique

a. Essai au pénétromètre dynamique

Principe

La mise en œuvre de l'essai au pénétromètre dynamique est courante dans le domaine de la géotechnique. Il est utilisé pour l'identification des matériaux et la validation du compactage des remblais (AFNOR, 2000). Son utilisation a également été étudiée dans le domaine de l'agriculture afin de détecter les sols compactés, pouvant faire obstacle à la pénétration des racines (Motavalli *et al.*, 2003 ; Domsch *et al.*, 2006). Son intérêt réside dans la possibilité d'une investigation du sol en continu. Il est utilisé dans cette étude afin d'observer la compaction des sols et leur homogénéité.

Cet essai consiste à enfoncer dans le sol, par percussion, un train de tiges muni d'une terminaison en pointe à l'aide d'une masse (Philipponnat et Hubert, 1997) (Figure 1). Après chaque coup, la profondeur d'enfoncement est mesurée. Elle est fonction de la résistance du sol. Le sondage est mené jusqu'à deux mètres de profondeur, jusqu'à un refus, c'est-à-dire un enfoncement nul ou très faible après plusieurs coups, ou lorsque le substrat est atteint.

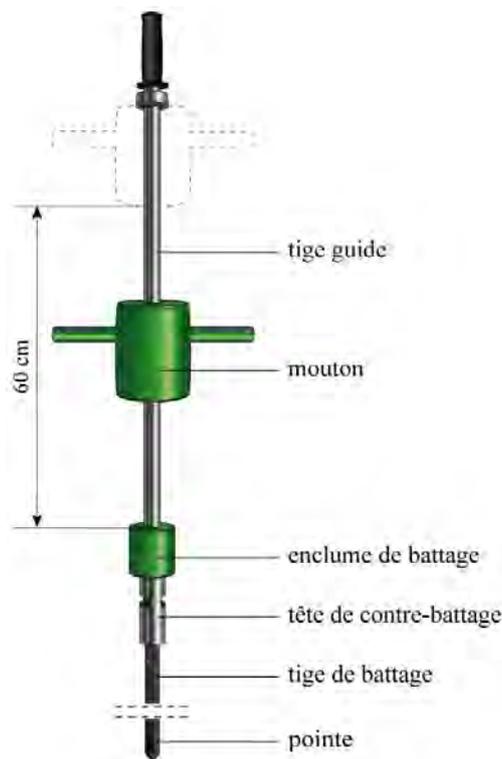


Figure 1 : Schéma d'un pénétromètre dynamique.

La résistance du sol à la pénétration dynamique est calculée conventionnellement à l'aide de la formule des Hollandais (éq. 1) (AFNOR, 2000)

$$Q_d = \frac{Mgh}{A \cdot e} \cdot \frac{M}{M + M'} \tag{éq.1}$$

- Avec :
- Q_d : résistance dynamique de pointe (Pa) ;
 - M : masse du mouton (kg) ;
 - g : accélération de la pesanteur (m.s⁻²) ;
 - h : hauteur de chute (m) ;
 - A : aire de la section droite de la pointe (m²) ;
 - e : enfoncement par coups (m) ;
 - M' : masse frappée (dispositif et tiges) (kg).

Les caractéristiques techniques du matériel utilisé sont une masse du mouton de 10 kg, 6 kg pour la masse du dispositif, 2,1 kg par tige, une hauteur de chute de 60 cm et une aire de la section droite de 5 cm².

Paramètres influençant la résistance à la pénétration des sols

Plusieurs facteurs ont été identifiés comme ayant une influence sur la résistance à la pénétration des sols. Il s'agit de la texture, la porosité, la structure, la teneur en eau, la teneur en matière organique, la présence d'agents de cimentation et la compaction (*in* Grunwald *et al.*, 2001). En effet, les sols à textures grossières ou présentant une faible teneur en eau montrent une plus grande résistance à la pénétration. La résistance à la pénétration augmente avec la cimentation par des agents de cimentation tels que les carbonates, la silice et les oxy-hydroxydes de fer. Enfin, il a été démontré que la résistance à la pénétration et la densité apparente augmentent avec le degré de compaction (Lowery et Schuler, 1994). Afin de s'assurer de la validité de chaque essai au pénétromètre, la teneur



La résistance en eau des échantillons de sol est calculée après passage à l'étuve à 40°C pendant trois jours.
Méthode d'interprétation des résultats

Chaque sondage au pénétromètre permet d'établir un profil vertical de résistance à l'enfoncement, le pénétrogramme. Certains des pénétrogrammes présentent de f aux refus, c'est-à-dire une augmentation brutale de la résistance dynamique, liée à la présence d'un obstacle ponctuel. Afin de conserver des valeurs représentatives, ces pénétrogrammes sont corrigés. Lorsque la résistance dynamique augmente de façon notable en un seul coup, la valeur de résistance est lissée en fonction des valeurs voisines. La nature et l'épaisseur des horizons de sol peuvent alors être définies en analysant l'allure de ces courbes. Il s'agit d'observer la présence de cassures ou de points d'inflexion, de segments de courbe à variation plus ou moins régulière (Maquaire *et al.*, 2002). Les zones homogènes identifiées seront dans la suite du texte appelées « strates ».

Plusieurs paramètres statistiques sont extraits et constituent des descripteurs. Pour chacune des strates définies, des statistiques descriptives sont réalisées sur les valeurs de résistance à l'échelle de la strate de surface et du profil (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Descripteurs des données de sondages au pénétromètre.

Code	Signification	
RESIST_MIN_SURF	Résistance minimale (MPa)	Strate de surface
RESIST_MED_SURF	Résistance médiane (MPa)	
RESIST_MOY_SURF	Résistance moyenne (MPa)	
RESIST_MAX_SURF	Résistance maximale (MPa)	
ECART_SURF	Ecart-type de la résistance (MPa)	
VAR_SURF	Variance de la résistance (MPa ²)	
RESIST_MIN	Résistance minimale (MPa)	
RESIST_MAX	Résistance maximale (MPa)	
STRATE_RESIST_MIN	Résistance médiane de la strate la moins résistante (MPa)	
STRATE_RESIST_MAX	Résistance médiane de la strate la plus résistante (MPa)	
PROF_RESIST_MIN	Profondeur de la résistance minimale (m)	
NB_STRATE	Nombre de strates	
NB_STRATE_NORM	Nombre de strates normalisé à la profondeur du sol (strate.m ⁻¹)	
RATIO_RESIST	Rapport de la résistance de la 1 ^{ère} et de la 2 ^{nde} strate	
QD_15CM	Résistance à la pénétration moyenne, de 0 à 15 cm (MPa)	

b. Granulométrie

Les analyses de granulométrie permettent de connaître la composition des échantillons de sol en termes de taille des constituants de façon plus précise que celle évaluée sur le terrain. Ces analyses sont réalisées par le Laboratoire d'Analyses des Sols de l'INRA d'Arras après broyage des agrégats et tamisage des échantillons à 2 mm. Elles sont établies en cinq fractions (*i.e.* sables grossiers et fins, limons grossiers et fins, argile), selon la norme NF X 31-107 (AFNOR, 2003). Ces analyses ne sont pas réalisées sur tous les échantillons du fait de leur coût élevé. Seuls 21 échantillons ont subi l'analyse granulométrique. Des données quantitatives sont néanmoins nécessaires pour le reste des échantillons, afin de pouvoir introduire cette information dans le traitement statistique. Les textures

sont alors transposées en teneurs, en leur attribuant la valeur du barycentre des classes de texture GEPPA. Les variables utilisées en statistiques sont les teneurs en sable total (SABLE_SURF) et en argile (ARGILE_SURF) de l'horizon de surface.

c. Susceptibilité magnétique

Principe

La mesure de la susceptibilité magnétique est une méthode de caractérisation non destructive, rapide et peu onéreuse, issue du domaine de la géophysique. La susceptibilité magnétique caractérise la facilité pour un matériau à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique (eq. 2). Ainsi, divers minéraux contenant du fer sont susceptibles de s'aimanter.

$$\chi = M/H \quad (\text{eq. 2})$$

Avec χ : susceptibilité magnétique (sans dimension) ;
 M : champ magnétique total par unité de volume ;
 H : champ magnétique induit par unité de volume.

La susceptibilité spécifique correspond à une normalisation massique de la susceptibilité magnétique. Elle s'exprime en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.

La susceptibilité magnétique des sols est principalement liée à la présence d'oxydes de fer tels que la magnétite (Fe_2O_3) et la maghémite ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$). Une faible susceptibilité peut néanmoins être observée si des atomes de fer sont présents de manière diffuse dans le réseau cristallin des argiles. Les résultats obtenus dépendent alors de la composition de la roche mère et du type de pédogénèse qui va concentrer ou au contraire détruire, au sein du profil, les minéraux initialement présents et contenant du fer (Shenggao, 2000). Les dépôts éoliens contribuent aussi aux valeurs de susceptibilité magnétique mesurées. Des corrélations entre la susceptibilité magnétique et la teneur en éléments traces métalliques ont été démontrées et utilisées pour caractériser des pollutions (e.g. Lecoanet *et al.*, 2001). La présence de matière organique peut également être mise en évidence par la mesure de la susceptibilité magnétique car elle favorise la préservation du fer sous sa forme réduite. De plus, les microorganismes sont capables de provoquer la formation de magnétite et de maghémite secondaire par des processus de fermentation. Ainsi, l'occupation du sol joue un rôle significatif dans la teneur en matière organique, la nature et la taille de la biomasse et les interactions microorganismes-minéral induites (Blundell *et al.*, 2009), et de manière indirecte sur la susceptibilité magnétique.

Méthode d'interprétation des résultats

La susceptibilité spécifique a été mesurée au CEREGE à l'aide d'un susceptibilimètre (modèle Kappabridge KLY-2) après pesée des échantillons, sur les profils de sol de chaque site d'étude. Plusieurs descripteurs en ont été extraits :

- La susceptibilité spécifique de l'horizon de surface (SMAG_SURF) ;
- La susceptibilité spécifique normalisée à la teneur en fer, qui permet de s'affranchir de l'effet de la quantité de fer et de ne conserver que l'aspect de la forme minérale responsable (i.e. : atomes de fer diffus ou présents sous forme cristalline) (SMAG_NORM_FE) ;
- La susceptibilité spécifique normalisée à l'épaisseur du sol (SMAG_NORM_PROF).

3. Aspect chimique

L'ensemble des analyses chimiques a été réalisé par le Laboratoire d'Analyses des Sols de l'INRA d'Arras (cf § III pour le descriptif des analyses), sauf la mesure du pH-eau, l'extraction et le dosage du fer et de l'aluminium. Les échantillons ont préalablement été séchés à l'air libre, désagrégés au mortier et tamisés à 2 mm à l'aide d'un tamis en nylon, afin de ne conserver que la fraction de terre fine. Mis à part le pH, les analyses ne sont réalisées que sur les horizons de surface.

b. Dosage des éléments chimiques

La mesure de la quantité de carbone organique est réalisée selon la norme NF ISO 10694 (AFNOR, 1995a). Lorsque l'échantillon contient des quantités non négligeables de carbone minéral sous forme de carbonates, une correction est effectuée ($C_{\text{minéral}} = 0,12 \times \text{CaCO}_3$). La teneur en matière organique est évaluée en multipliant la teneur en carbone organique par 1,72.

La teneur en azote total est déterminée selon la norme NF ISO 13878 (AFNOR, 1995b). Il est ainsi possible de calculer le rapport C/N de chaque échantillon.

La mesure du calcaire total (CaCO_3) est réalisée selon la méthode décrite par la norme NF ISO 10693 (AFNOR, 1995c).

La procédure utilisée pour doser le phosphore assimilable (P_2O_5) selon la méthode Olsen est décrite dans la norme NF ISO 11263 (AFNOR, 1995d). Il existe plusieurs méthodes d'extraction du phosphore assimilable. La méthode Olsen est adaptée à une large gamme de sols (Baize, 2000).

L'extraction sélective des formes du fer et de l'aluminium sous forme d'oxydes et d'amorphes a été réalisée au CEREGE, selon la méthode CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) développée par Mehra et Jackson (1960). Le dosage a été réalisé à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Les éléments traces métalliques (ETM) sont des éléments dont les concentrations dans la croûte terrestre sont inférieures à 0,1 % et possédant des propriétés métalliques. Les éléments dosés dans la présente étude sont le zinc (Zn), le chrome (Cr), le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le cobalt (Co), le molybdène (Mo), le thallium (Tl) et le cadmium (Cd), après extraction à l'acide fluorhydrique. Ainsi, les concentrations mesurées correspondent à la fraction totale. Il n'existe pas de réglementation française quant aux teneurs totales en ETM dans les sols. Les interprétations des valeurs obtenues ont été effectuées par comparaison avec des normes d'autres pays européens (ex. : Conseil Fédéral de Suisse, 1986 ; Conseil Fédéral de Suisse, 1998), aux moyennes des sols français (Baize, 1997), ou aux quelques horizons profonds ayant subi le dosage des ETM, équivalents au fond pédo-géochimique. La fraction biodisponible des ETM n'a pas été dosée, les valeurs totales n'étant pas particulièrement élevées et l'environnement carbonaté, limitant *a priori* la proportion disponible.

c. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) correspond à la quantité maximale de charges positives pouvant être fixées, de façon réversible, sur les sites chargés négativement de certains constituants du sol. La mesure de la CEC est réalisée par la méthode Metson, selon la norme AFNOR NF X 31-130 (AFNOR, 1999a). Cette méthode est particulièrement adaptée pour les sols de pH > 7.

d. Mesure du pH-eau

Le pH-eau a été mesuré au CEREGE sur l'ensemble des horizons selon la norme NF ISO 10390 (AFNOR, 1999b). Le pH de surface (PH_SURF) et le pH moyen du profil (PH_MOY) seront utilisés dans l'étude statistique.

4. Aspect microbiologique

Les microorganismes du sol ont la particularité de réagir rapidement aux changements de leur environnement. De ce fait, ils peuvent constituer de bons indicateurs de l'altération d'un système (Stefanowicz, 2006). Trois types d'analyses microbiologiques sont menées : la mesure de la respiration basale, celle de la diversité fonctionnelle des communautés bactérienne par l'utilisation de la méthode des plaques Biolog et une activité enzymatique globale, celle de l'hydrolyse du diacétate de fluorescéine. Elles sont réalisées sur 85 échantillons.

a. Respiration

Pour la mesure de la respiration basale du sol, 40 g de la fraction de terre fine (< 2 mm), préalablement ré-humidifiés à la capacité au champ, sont introduits dans des bouteilles étanches. Les échantillons sont incubés 4 jours à 20°C. La dépression d'O₂ causée par la respiration microbienne est enregistrée de façon continue à l'aide d'un appareillage OxiTop™. 20 mL de NaOH 0,2 M contenus dans des béchers et introduits dans les bouteilles permettent de capter le CO₂ produit. La concentration en CO₂ est mesurée par dosage colorimétrique du NaOH en excès sur une prise d'essai de 5 mL, par ajout d'HCl 0,2 M en présence de phénolphaléine et d'1 mL de BaCl₂ à 20 %.

b. Diversité fonctionnelle des communautés bactériennes

Principe

Les communautés bactériennes sont examinées à travers leur diversité fonctionnelle. La technique des plaques Biolog™ est choisie pour sa facilité et sa rapidité d'utilisation. Chaque plaque est composée de 32 puits, représentant six types de substrats sources de carbone pour les bactéries (amides/amines, amino-acides, hydrates de carbone, acides carboxyliques, polymères et divers). Le premier puits, ne contenant pas de substrat, constitue un puits témoin. Un indicateur coloré, le tétrazolium, est présent dans chaque puits. Sa réduction est provoquée par la respiration bactérienne et conduit à la formation de formazan, de couleur violette. Ainsi, c'est le changement de couleur des puits qui est suivi au cours de l'expérience par des mesures d'absorbance. L'intensité de la réponse est fonction de l'activité des bactéries dans les échantillons (Garland et Mills, 1991).

Protocole

Le protocole utilisé est inspiré du protocole développé par Floch (2008), adapté à un contexte méditerranéen. Un gramme de la fraction de terre fine, préalablement ré-humidifié à sa capacité au champ, est ajouté à 10 mL de solution stérile de pyrophosphate de sodium à 0,1 % (Na₄P₂O₇), agitée pendant 20 min. La solution résultante est diluée avec une solution stérile de NaCl à 0,85 % et utilisée pour inoculer les puits des plaques Biolog® Eco Afin d'assurer une densité bactérienne semblable pour l'ensemble des échantillons, Chodak et Niklinska (2010) calibrent la dilution des suspensions de sols avant inoculation des plaques, à l'aide des résultats obtenus en respirométrie. Ainsi, dans notre protocole, l'échantillon possédant la valeur médiane du taux de CO₂ produit est dilué 100 fois dans NaCl. Les autres échantillons sont dilués de façon proportionnelle. Les plaques sont incubées à 25°C pendant 100 h. L'intensité de la couleur est mesurée à plusieurs reprises par spectrométrie à l'aide d'un lecteur de microplaques (spectrophotomètre Metertech Elisa Sigma 960), à une longueur d'onde de 595 nm.

Traitement des données

L'absorbance du puits témoin est soustraite de l'absorbance de chaque autre puits, afin de s'affranchir de l'effet de la couleur de la suspension de sol. Le calcul de l'AWCD (*Average Well Color Development*) est un indicateur de l'activité microbiologique. Il s'agit de la moyenne des absorbances des 31 puits, dont l'absorbance du puits témoin a été retranchée (Garland et Mills, 1991). Ce traitement des données est réalisé à chaque temps de mesure.

La mesure de l'absorbance ayant été réalisée à plusieurs reprises sur une période 100 h, une courbe d'évolution de l'AWCD dans le temps peut être tracée. Cette courbe est d'allure sigmoïde. Le modèle ajusté par régression non linéaire est une fonction de Gompertz, dont l'équation a été modifiée par Zweitering *et al.* (1990) afin d'extraire facilement des paramètres ayant une signification biologique (éq. 3) :

$$y = A \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{\mu_m \cdot e}{A} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (\text{eq.3})$$

Avec t : temps ;

y : AWCD à un temps t ;

μ_m : taux maximum de croissance spécifique, soit la pente de la tangente à la courbe au point d'inflexion ;

λ : temps de latence, soit l'interception par l'axe des abscisses de la tangente à la courbe au point d'inflexion ;

A : AWCD maximale.

Il est possible de dériver plusieurs descripteurs des courbes ainsi obtenues, mais aussi à partir des données d'absorbance ponctuelles relevées à chaque lecture de plaque. Ce sont :

- Les paramètres d'ajustement de la courbe μ_m , λ et A.
- Les temps d'incubation nécessaires pour arriver à une AWCD de 0,25 et de 0,5.
- L'aire sous la courbe, jusqu'à un temps maximal de 50, 100, 125 et 200 h.
- Le nombre de puits ayant réagi positivement à t = 50 et t = 100 h, c'est-à-dire présentant la couleur violette du formazan.
- L'indice de diversité de Shannon H' (éq. 4). Cet indice, d'utilisation classique dans le domaine de la biologie, a été utilisé dans de nombreuses études pour l'interprétation des données de plaques Biolog (Stefanowicz, 2006). Il est calculé aux temps t = 50 et t = 100 h.

$$H' = - \sum_{i=1}^N \frac{AWCD_i}{\sum AWCD} \cdot \ln \left(\frac{AWCD_i}{\sum AWCD} \right) \quad (\text{eq. 4})$$

Avec H' : indice de diversité de Shannon ;

AWCD : développement moyen de la couleur ;

i : puits ;

N : nombre total de puits.

c. Hydrolyse du diacétate de fluorescéine (FDA)

L'activité des hydrolases du diacétate de fluorescéine a été déterminée en mesurant l'hydrolyse du diacétate de fluorescéine (FDA) en fluorescéine selon la méthode modifiée de Green et al. (2006). Le milieu réactionnel est constitué de 1 g de sol, de 9 ml de tampon phosphate à 100 mM pH 7 et de 1 ml de FDA à 5 mM. En effet, d'après Alarcon-Gutiérrez et al. (2008) un tel pH empêche l'hydrolyse

abiotique du FDA par certains acides aminés et groupements imidazoles pouvant être présents dans les sols. Après une incubation de 1 h à 37°C, la réaction est stoppée par l'ajout de 2 ml d'acétone. Après centrifugation 2 minutes à 12 000 g et à 4°C, la densité optique est mesurée à 490 nm. L'activité des FDAs est exprimée en μ mole de fluorescéine libérée par minute (U) et par gramme de matière sèche ($U \cdot g^{-1} MS$).

Références bibliographiques spécifiques à l'annexe

AFES, 2009 - Référentiel pédologique 2008. Editions Quae, Savoir faire, Paris.

AFNOR, 1995a - Qualité des sols - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (NF ISO 10694 / NF X31-409). Norme française, 12 p.

AFNOR, 1995b - Qualité des sols - Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche (NF ISO 13878 / X31-418). Norme française, 12 p.

AFNOR, 1995c - Qualité des sols - Détermination de la teneur en carbonates - Méthode volumétrique (NF ISO 10693 / NF X31-105). Norme française, 12 p.

AFNOR, 1995d - Qualité des sols - Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium (NF ISO 11263 / X31-403). Norme française.

AFNOR, 1999a - Qualité des sols - Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles (NF X 31-130). Norme française, 15 p.

AFNOR, 1999b - Qualité des sols - Détermination du pH (NF ISO 10390), vol. 1. Norme française, pp. 339-347.

AFNOR, 2000 - Sols : reconnaissance et essais. Contrôle de la qualité du compactage. Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable, principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre, exploitation des résultats, interprétation (NF XP P 94-105). Norme française, 36 p.

AFNOR, 2003 - Qualité des sols - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette (NF X31-107). Norme française, 20 p.

Baize, D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France), INRA éditions, Paris, 409 p.

Baize, D., 2000 - Guide des analyses en pédologie, 2ème éd. INRA Editions, Paris.

BRGM, 1969 - Carte géologique de la France (1/50000), feuille d'Aix-en-Provence (1021). Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Orléans. Notice explicative par BRGM, 1969.

Chodak, M., Niklinska, M., 2010 - Effect of texture and tree species on microbial properties of mine soils. Applied Soil Ecology 46, 2, pp. 268-275.

CNES, 2003 - Occupation du sol à partir de données Spot 5, Occsol Spot 5, département des Bouches-du-Rhône. CNES, ARPE-PACA, Spot Image.

Ordonnance sur les polluants des sols (Osol) du 9 juin 1986, RS 814.12, Berne.

Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (Osols) du 1er juillet 1998, RS 814.12, Berne.

Domsch, H., Ehlert, D., A., G., Witzke, K., Boess, J., 2006 - Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agriculture*, 7, pp. 309-326.

Floch, C., 2008 - Les enzymes du sol : Etude de leurs potentialités bioindicatrices de contaminations par des métaux et des polluants organiques. Thèse doct. Biologie des populations et Ecologie. Aix-Marseille, Univ. Paul Cézanne.

Garland, J.L., Mills, A.L., 1991 - Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbone-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology* 57, 8, pp. 2351-2359.

Grunwald, S., Lowery, B., Rooney, D.J., McSweeney, K., 2001 - Profile cone penetrometer data used to distinguish between soil materials. *Soil and Tillage Research* 62, 1-2, pp. 27-40.

IUSS Working Group WRB, 2006 - World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication, 2nd edition. FAO, World Soil Resources Reports, No. 103, Rome.

Leyval, C., 1999 - Le point de vue du pédologue : Le sol, une ressource négligée en milieu urbain, pp. 129-142. *In*: Barles, S., Breysse, D., A., G., Leyval, C. (Eds), *Le sol urbain*, Economica, Anthropos, collection Villes, Paris.

Lowery, B., Schuler, R.T., 1994 - Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. *Soil and Tillage Research*, 29, pp. 205-210.

Maquaire, O., Ritzenthaler, A., Fabre, D., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet, J.P., Monnet, J., 2002 - Characterisation of alteration profiles using dynamic penetrometry with variable energy. Application to weathered black marls, Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Comptes Rendus Geoscience* 334, 11, pp. 835-841.

Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1960 - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals*, 7, pp. 317-327.

Motavalli, P.P., Anderson, S.H., Pengthamkeerati, P., Gantzer, C.J., 2003 - Use of soil cone penetrometers to detect the effects of compaction and organic amendments in claypan soils. *Soil and Tillage Research*, 74, 2, pp. 103-114.

Philipponnat, G., Hubert, B., 1997 - Fondations et ouvrages en terre. Eyrolles, Géotechnique, Paris.

Stefanowicz, A., 2006 - The Biolog plates technique as a tool in ecological studies of microbial communities. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15, 5, pp. 669-676.

Zwietering, M.H., Jongenburger, I., Rombouts, F.M., Vantriet, K., 1990 - Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56, 6, pp. 1875-1881.

Annexe II-9 : Protocoles analytiques (LAS Arras et CEREGE).

1. Granulométrie 5 fractions

On détermine, selon la norme NF X 31-107 (AFNOR, 2003), les proportions des classes de particules suivantes :

- Argiles : 0 à 2 μm ;
- Limons fins : 2 à 20 μm ;
- Limons grossiers : 20 à 50 μm ;
- Sables fins : 50 à 200 μm ;
- Sables grossiers : 200 μm à 2000 μm .

La détermination des fractions les plus fines (< 50 μm) s'effectue au moyen de trois prélèvements successifs à la pipette de Robinson dans une suspension de sol en cours de sédimentation. La fraction des sables fins est séparée par passage sur tamis de 50 μm et sous courant d'eau de la suspension après prélèvements des fractions fines.

Prélèvements et tamisage sont réalisés après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (H_2O_2) sur une prise d'essai d'environ 10 g. La dispersion finale est réalisée par un court passage aux ultrasons après addition de dispersant [$(\text{NaPO}_3)_6 + \text{Na}_2\text{CO}_3$] et après avoir au préalable séparé les sables grossiers (> 0,200 mm) par tamisage.

Les pesées après évaporation et séchage des fractions prélevées à la pipette permettent de déterminer les proportions des différentes classes granulométriques.

2. Carbone organique

La mesure de la quantité de carbone organique est réalisée selon la norme NF ISO 10694 (AFNOR, 1995c). La méthode repose sur la transformation en dioxyde de carbone de la totalité du carbone présent. La réaction s'effectue en portant l'échantillon à environ 1000°C en présence d'oxygène. Après séparation chromatographique, la quantité de dioxyde de carbone formée est quantifiée au moyen d'un catharomètre (conductibilité thermique). Lorsque l'échantillon contient des quantités non négligeables de carbone minéral sous forme de carbonates, une correction est effectuée ($C_{\text{minéral}} = 0,12 \times \text{CaCO}_3$).

3. Azote total

La mesure de la quantité d'azote total (organique et minéral) est réalisée selon la norme NF ISO 13878 (AFNOR, 1995d). La teneur en azote total de l'échantillon est déterminée en le chauffant à environ 1000°C en présence d'oxygène. Les produits de combustion ou décomposition sont réduits à l'état d'azote moléculaire (N_2). Les quantités de N_2 formées sont quantifiées, après séparation chromatographique, au moyen d'un catharomètre.

4. Calcaire total

La mesure du calcaire total est réalisée selon la méthode décrite par la norme NF ISO 10693 (AFNOR, 1995b). L'échantillon à analyser est acidifié en milieu fermé par une solution d'acide chlorhydrique (HCl). En présence de carbonates, il y a dégagement de dioxyde de carbone dont le volume est mesuré.

5. Phosphore total

La procédure utilisée pour doser le phosphore total est décrite dans la norme NF ISO 11263 (AFNOR, 1995a). La méthode utilisée est la méthode Olsen. Elle utilise un réactif constitué de NaHCO_3 à $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ tamponnée à pH 8,5 par NaOH dans un rapport d'extraction de 1/20 (m/v). Le dosage du phosphore extrait s'effectue par spectrophotométrie à 825 nm après développement de la coloration d'un complexe phosphomolybdique.

6. Formes du fer

L'extraction sélective des oxydes et oxy-hydroxydes de fer est réalisée sur les horizons de surface selon la méthode CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) développée par Mehra et Jackson (1960). D'après Jeanroy (1983), avec cette méthode la totalité du fer présent sous forme d'oxydes et d'oxy-hydroxydes (hématite, goéthite, lépidocrocite) et moins de 5 % du fer présent dans les minéraux silicatés ferrifères (biotite, penninite, glauconite) sont dissous.

1 g de sol est mélangé à 50 mL d'une solution d'extraction citrate-bicarbonate composée de $78,42 \text{ g.L}^{-1}$ de citrate trisodique, utilisé comme complexant, et $9,34 \text{ g.L}^{-1}$ de bicarbonate de sodium pour tamponner le pH. La solution résultante est chauffée 15 minutes dans un bain-marie à 80°C , puis 1 g de dithionite de sodium est ajouté en tant que réducteur. Après agitation régulière dans un agitateur rotatif pendant 30 minutes, l'ensemble est centrifugé à 2500 tr min^{-1} pendant 10 minutes. Le surnageant est ensuite filtré à la seringue à $0,45 \mu\text{m}$ puis analysé en spectroscopie d'absorption atomique à la flamme.

7. Eléments traces métalliques totaux

La mise en solution totale d'échantillons contenant des matériaux silicatés requiert l'utilisation de l'acide fluorhydrique (HF) de l'acide perchlorique (HClO_4). L'utilisation de ce dernier permet d'éviter la précipitation du calcium sous forme de fluorure (CaF_2). Pour éviter les risques d'une oxydation brutale de la matière organique par HClO_4 , celle-ci est détruite par calcination préalable de l'échantillon à 450°C . Les acides fluorhydrique et perchlorique sont éliminés par évaporation en fin de réaction ce qui a pour conséquence l'élimination de la silice sous forme d'acide fluorosilicique (H_2SiF_6). Le cobalt, Cr, Cu, Ni, Zn sont ensuite dosés en ICP-AES, Pb, Cd, Tl et Mo en ICP-MS.

8. Capacité d'échange cationique

La mesure de la CEC est réalisée selon la norme AFNOR NF X 31-130 (AFNOR, 1999a). La détermination de la CEC selon la méthode de Metson comprend trois étapes. L'échantillon est d'abord saturé en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$) à 1 mol.L^{-1} . Le pouvoir tampon de cette dernière permet de ramener le pH du milieu aux environs de 7, ce qui constitue une des caractéristiques essentielles de la méthode. Après avoir éliminé l'excès d'ions ammonium par percolations d'alcool éthylique, on procède ensuite à leur échange par une solution de chlorure de sodium à 1 mol.L^{-1} . Les ions ammonium déplacés sont dosés par spectrophotométrie sur la solution précédente, une fois filtrée. Les concentrations trouvées sont converties en cmol^+/kg (centimoles de charges positives par kilogramme de terre fine).

9. Mesure du pH-eau

Le pH-eau est mesuré selon la norme NF ISO 10390 (AFNOR, 1999b). Une suspension de sol est préparée en mélangeant 10 g de la fraction de terre fine dans 25 mL d'eau déminéralisée. La solution

est agitée régulièrement et la mesure du pH est réalisée après deux heures à l'aide d'un pH-mètre (WTW, pH 3210).

Références bibliographiques spécifiques à l'annexe

AFNOR, 1995a - Qualité des sols - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (NF ISO 10694 / NF X31-409). Norme française, 12 p.

AFNOR, 1995b - Qualité des sols - Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche (NF ISO 13878 / X31-418). Norme française, 12 p.

AFNOR, 1995c - Qualité des sols - Détermination de la teneur en carbonates - Méthode volumétrique (NF ISO 10693 / NF X31-105). Norme française, 12 p.

AFNOR, 1995d - Qualité des sols - Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium (NF ISO 11263 / X31-403). Norme française.

AFNOR, 1999a - Qualité des sols - Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles (NF X 31-130). Norme française, 15 p.

AFNOR, 1999b - Qualité des sols - Détermination du pH (NF ISO 10390), vol. 1. Norme française, pp. 339-347.

AFNOR, 2003 - Qualité des sols - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette (NF X31-107). Norme française, 20 p.

Jeanroy E., 1983 - Diagnostic des formes du fer dans les pédogénèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectroscopie Mössbauer. Thèse, Nancy, 182 p.

Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals* 7, pp. 317-327.

Annexe II-10 : Structuration des données de sol et typologie

1. Principe de la démarche

Le projet UQUALISOL-ZU étant centré sur des problématiques d'urbanisme, il est nécessaire de mettre en relation les caractéristiques pédologiques avec l'occupation du sol. Le postulat est que le type d'occupation du sol impacte les caractéristiques pédologiques. Afin de valider cette hypothèse, une typologie des sols est réalisée à l'aide d'un traitement statistique. Elle consiste à regrouper les sols, de manière objective, en classes de caractéristiques similaires. L'interprétation est faite par identification des critères de regroupement, dans le but de conclure sur le rôle de l'occupation du sol. La démarche conceptuelle est donnée en **Figure 1**.

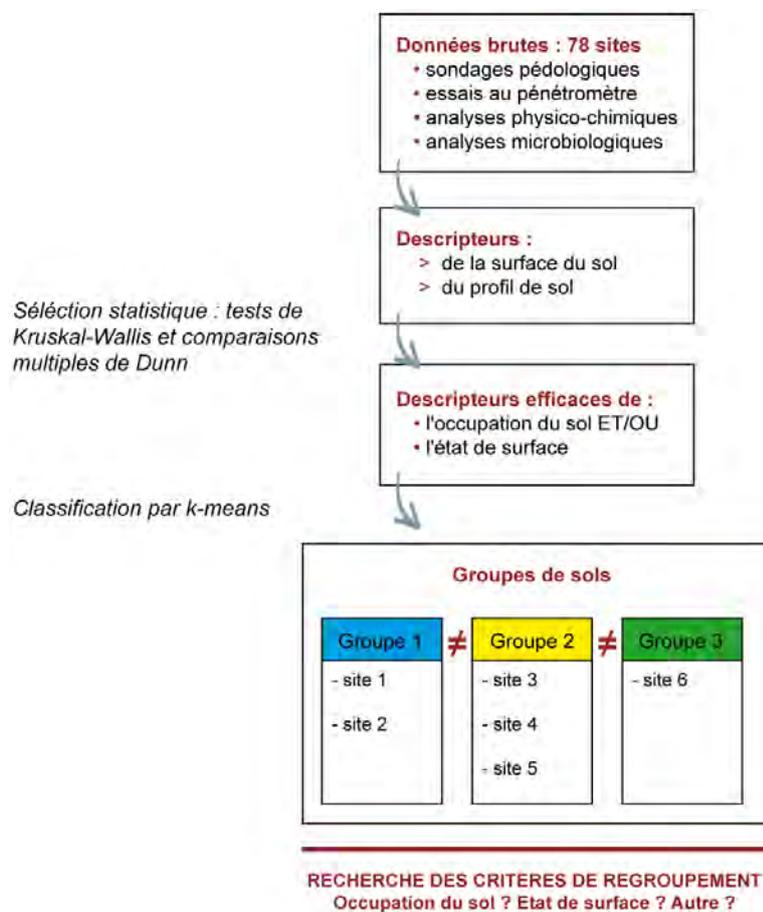


Figure 1 : Traitement statistique employé pour l'élaboration de la typologie des sols.

2. Matériel et méthodes

Un grand nombre de paramètres a pu être collecté. Il est possible d'extraire plusieurs descripteurs de ces données lorsque l'information est continue dans le temps (ex. : étude de la diversité bactérienne) ou dans l'espace (ex. : sondage au pénétromètre dynamique). Il convient donc, avant tout essai de classification, de sélectionner les variables discriminantes parmi les variables candidates.

Il s'agit en premier lieu de s'assurer des différences entre les variables selon leur modalité. Le test utilisé est celui de Kruskal-Wallis. Ce test non paramétrique ne requiert pas de condition sur la distribution des variables. Il vise à comparer les rangs de plusieurs échantillons (dans cette étude, ce sont les sites). L'hypothèse H_0 à vérifier est que les échantillons proviennent de la même population. Un facteur responsable de la variabilité est choisi *a priori*. Il correspond à une variable qualitative présentant plusieurs modalités. L'occupation du sol au niveau 1, possédant trois modalités (*i.e.* territoires artificialisés, territoires agricoles et, forêts et milieux semi-naturels) et l'état de surface, possédant trois modalités (*i.e.* artificialisé, sol nu et végétalisé) sont choisis comme facteurs de variabilité.

Le test de Kruskal-Wallis permet de discuter de l'existence de différences entre les rangs des variables, mais n'indique pas quelle variable en est responsable. Un test de comparaisons multiples est donc mené. Il s'agit du test de Dunn. Il compare toutes les paires de variables afin de mettre en évidence les différences selon les modalités. Les modalités sont alors rassemblées en groupes significativement semblables.

Afin d'éviter l'introduction de variables redondantes, la matrice de corrélation est calculée à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson.

Enfin, la réalisation de la typologie est effectuée à l'aide d'une classification par k-means sur les variables sélectionnées centrées et réduites. Les k-means permettent de constituer des groupes d'individus similaires sur la base de plusieurs variables quantitatives.

Le traitement statistique est mené à l'aide des logiciels XLSTAT 2009 (Addinsoft, France) et R version 2.11.1 (R Development Core Team).

3. Résultats

Sélection des variables discriminantes

Les résultats des tests de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn sont présentés dans les **Tableaux 1 et 2**.

Les variables sélectionnées sont celles qui, pour l'occupation du sol ou l'état de surface :

- En test de Kruskal-Wallis : présentent une *p-value* inférieure à 5 % (probabilité que l'hypothèse nulle soit rejetée), ce qui signifie que le descripteur apporte une quantité d'information significative ;
- En test de Dunn : sont divisées en plusieurs groupes.

Dans une partie de cette analyse (**Tableau 2**), tous les sols sont regroupés selon leur état de surface. Les sols agricoles et forestiers sont donc séparés en surfaces végétalisées ou sols nus, selon l'état de surface observé sur le terrain.

Tableau 3 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn en fonction de l'occupation du sol de niveau 1 (en gras, les variables sélectionnées sur la base de ces tests), n = 78 individus.

Variable	Kruskal-Wallis p-value*	Test de Dunn			
		Artif.**	Agricole**	Forêt**	
BIOLOG_H_T50	0,758	41,12 a	38,57 a	36,27 a	
BIOLOG_H_T100	0,859	39,30 a	38,00 a	42,17 a	
BIOLOG_LAMBDA (h)	0,118	41,71 ab	42,81 a	28,67 b	
BIOLOG_MU (h ⁻¹)	0,834	40,54 a	39,62 a	36,43 a	
BIOLOG_A	0,003	44,98 a	41,07 a	21,97 b	
BIOLOG_AWCD025 (h)	0,715	40,40 a	40,76 a	35,20 a	
BIOLOG_AWCD05 (h)	0,957	40,02 a	39,52 a	38,00 a	
BIOLOG_NBPUITS_T50	0,849	38,38 a	39,79 a	42,23 a	
BIOLOG_NBPUITS_T100	0,443	37,43 a	38,95 a	46,07 a	
BIOLOG_AIRE_T50	0,646	40,23 a	35,83 a	42,60 a	
BIOLOG_AIRE_T100	0,815	39,33 a	37,67 a	42,53 a	
BIOLOG_AIRE_T125	0,930	38,99 a	39,10 a	41,50 a	
BIOLOG_AIRE_T200	0,973	39,00 a	39,76 a	40,53 a	
RESPIRO_mO2 (g/kgMS/j)	0,001	37,43 b	30,60 b	57,77 a	
RESPIRO_mCO2 (g/kgMS/j)	0,001	33,65 b	36,69 b	59,80 a	
FDA (mU/gMS)	0,334	41,00 a	33,48 a	43,73 a	
Microbiologie	RESIST_MIN_SURF (MPa)	0,044	48,07 a	26,69 b	33,43 b
	RESIST_MED_SURF (MPa)	0,128	49,82 a	26,55 b	28,73 b
	RESIST_MOY_SURF (MPa)	0,816	49,49 a	25,31 b	31,40 b
	RESIST_MAX_SURF (MPa)	< 0,0001	48,86 a	27,38 b	30,27 b
	ECART_SURF (MPa)	< 0,0001	45,17 a	29,43 b	37,73 ab
	VAR_SURF (MPa ²)	0,000	37,01 ab	36,71 b	50,37 a
	RESIST_MIN (MPa)	< 0,0001	45,96 a	28,40 b	36,93 ab
	RESIST_MAX (MPa)	< 0,0001	45,13 a	29,71 b	37,43 ab
	STRATE_RESIST_MIN (MPa)	< 0,0001	47,77 a	27,93 b	32,53 b
Pénétrométrie					

	STRATE_RESIST_MAX (MPa)	0,006	47,02 a	25,75 b	34,20 b
	RATIO_RESIST	0,000	39,81 a	35,79 a	33,64 a
	NB_STRATE	0,024	39,00 a	38,50 a	42,30 a
	NB_STRATE_NORM (strate.cm⁻¹)	0,002	40,93 ab	28,50 b	50,90 a
	PROF_RESIST_MIN (m)	0,001	38,68 ab	46,21 a	32,40 b
	QD_15CM (MPa)	0,090	47,68 a	25,62 b	34,00 b
	PH_SURF	0,002	40,96 a	45,52 a	26,97 b
	SABLE_SURF (%)	0,548	42,80 a	40,24 ab	29,23 b
	ARGILE_SURF (%)	< 0,0001	39,50 a	41,52 a	36,67 a
	RU (mm)	0,219	32,42 b	57,88 a	33,60 b
	CORG_SURF (g.kg⁻¹)	0,050	40,29 b	22,50 c	61,10 a
	N_TOT (g.kg⁻¹)	0,000	37,88 b	28,40 b	59,57 a
	C/N	0,009	43,36 b	19,29 c	57,00 a
	MO (g.kg⁻¹)	0,001	40,30 b	22,48 c	61,10 a
	CACO3 (g.kg⁻¹)	< 0,0001	52,00 a	26,52 b	22,67 b
	P_OLSEN (g.kg⁻¹)	0,000	46,00 a	37,24 ab	24,47 b
	CEC (cmol⁺.kg⁻¹)	0,000	36,50 b	33,55 b	60,37 a
	Fe_CBD (g.kg-1)	0,032	20,86 a	12,22 b	21,67 a
	Al_CBD (g.kg-1)	0,118	12,28 b	15,93 b	27,25 a
	Cr_TOT (mg.kg⁻¹)	0,013	30,99 b	44,98 a	55,67 a
	Cu_TOT (mg.kg ⁻¹)	0,033	36,99 ab	48,57 a	33,83 b
	Ni_TOT (mg.kg⁻¹)	0,002	33,54 b	38,29 b	57,90 a
	Zn_TOT (mg.kg ⁻¹)	0,001	39,74 a	35,74 a	44,10 a
Physico-chimie	Co_TOT (mg.kg⁻¹)	0,596	28,92 c	46,71 b	59,03 a
	Pb_TOT (mg.kg ⁻¹)	0,856	39,35 a	34,12 a	47,47 a
	Cd_TOT (mg.kg⁻¹)	0,012	39,63 ab	31,52 b	50,30 a
	Tl_TOT (mg.kg⁻¹)	0,185	30,24 b	47,17 a	54,70 a
	Mo_TOT (mg.kg⁻¹)	0,001	41,42 a	27,83 b	50,47 a

* Probabilité que l'hypothèse nulle H0 soit rejetée.

** Les chiffres représentent les moyennes des rangs pour chaque modalité. Une même lettre dans une ligne signifie qu'il n'y a pas de différence significative avec un intervalle de confiance de 95 %.

Tableau 4 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis et de comparaisons multiples de Dunn en fonction des états de surface (en gras, les variables sélectionnées sur la base de ces tests), n = 78 individus.

Variable	Kruskal-Wallis	Test de Dunn			
	p-value*	Artif.**	Sol nu**	Végétalisé**	
BIOLOG_H_T50	0,592	38,64 a	34,15 a	41,31 a	
BIOLOG_H_T100	0,016	27,89 b	34,92 ab	45,21 a	
BIOLOG_LAMBDA (h)	0,015	47,00 ab	50,69 a	33,53 b	
BIOLOG_MU (h ⁻¹)	0,342	33,33 a	44,92 a	40,36 a	
BIOLOG_A	0,043	44,22 ab	50,85 a	34,55 b	
BIOLOG_AWCD025 (h)	0,134	47,67 a	42,54 a	35,53 a	
BIOLOG_AWCD05 (h)	0,116	49,08 a	38,62 a	36,07 a	
BIOLOG_NBPUITS_T50	0,182	31,28 a	38,96 a	42,80 a	
BIOLOG_NBPUITS_T100	0,023	27,47 b	37,85 ab	44,56 a	
BIOLOG_AIRE_T50	0,460	38,17 a	33,15 a	41,77 a	
BIOLOG_AIRE_T100	0,229	32,22 a	37,62 a	42,81 a	
BIOLOG_AIRE_T125	0,114	30,00 a	39,73 a	43,07 a	
BIOLOG_AIRE_T200	0,089	29,33 a	40,62 a	43,09 a	
RESPIRO_mO2 (g/kgMS/j)	0,000	22,67 b	31,62 b	48,13 a	
RESPIRO_mCO2 (g/kgMS/j)	< 0,0001	18,28 c	34,50 b	49,01 a	
FDA (mU/gMS)	0,241	32,83 a	36,46 a	42,89 a	
Microbiologie	RESIST_MIN_SURF (MPa)	0,001	62,97 a	27,50 b	33,83 b
	RESIST_MED_SURF (MPa)	< 0,0001	62,78 a	30,65 b	33,03 b
	RESIST_MOY_SURF (MPa)	0,005	62,42 a	29,08 b	33,61 b
	RESIST_MAX_SURF (MPa)	0,016	60,33 a	32,81 b	33,37 b
	ECART_SURF (MPa)	0,013	55,28 a	33,88 b	35,01 b
	VAR_SURF (MPa ²)	< 0,0001	38,42 a	38,08 a	40,31 a
	RESIST_MIN (MPa)	0,000	56,78 a	29,08 b	35,77 b
	RESIST_MAX (MPa)	0,013	53,50 a	30,19 b	36,71 b
	STRATE_RESIST_MIN (MPa)	0,000	58,92 a	33,23 b	33,80 b
	STRATE_RESIST_MAX (MPa)	0,419	55,53 a	27,65 b	35,74 b
	Pénétrométrie				

	RATIO_RESIST	0,000	42,53 a	39,00 a	35,36 a
	NB_STRATE	0,014	40,35 a	39,09 a	39,97 a
	NB_STRATE_NORM (strate.cm ⁻¹)	0,163	48,03 a	28,62 b	39,24 ab
	PROF_RESIST_MIN (m)	0,000	37,50 a	50,27 a	37,29 a
	QD_15CM (MPa)	0,002	60,33 a	27,54 b	33,89 b
	PH_SURF	0,002	52,86 a	31,78 b	48,92 a
	SABLE_SURF (%)	0,147	60,00 a	36,69 b	32,43 b
	ARGILE_SURF (%)	< 0,0001	24,56 b	41,73 a	44,61 a
	RU (mm)	0,204	27,39 b	50,19 a	41,18 ab
	CORG_SURF (g.kg⁻¹)	0,335	30,67 b	29,58 b	45,63 a
	N_TOT (g.kg⁻¹)	< 0,0001	19,06 c	34,81 b	48,63 a
	C/N	0,043	57,28 a	25,23 b	36,64 b
	MO (g.kg⁻¹)	< 0,0001	30,69 b	29,54 b	45,63 a
	CACO3 (g.kg⁻¹)	< 0,0001	63,31 a	29,42 b	33,17 b
	P_OLSEN (g.kg⁻¹)	< 0,0001	35,14 a	46,00 a	39,37 a
	CEC (cmol⁺.kg⁻¹)	< 0,0001	17,83 b	40,19 a	47,61 a
	Fe_CBD (g.kg-1)	0,003	8,00 b	20,75 a	18,37 a
	Al_CBD (g.kg-1)	0,927	11,63 a	13,13 a	18,45 a
	Cr_TOT (mg.kg⁻¹)	0,001	18,08 b	38,96 a	47,85 a
	Cu_TOT (mg.kg⁻¹)	0,007	24,42 b	51,73 a	41,89 a
	Ni_TOT (mg.kg⁻¹)	< 0,0001	25,56 b	33,38 ab	46,53 a
	Zn_TOT (mg.kg⁻¹)	0,001	31,25 a	37,23 a	43,29 a
Physico-chimie	Co_TOT (mg.kg⁻¹)	0,499	15,86 b	42,38 a	47,76 a
	Pb_TOT (mg.kg⁻¹)	0,978	31,50 a	39,04 a	42,69 a
	Cd_TOT (mg.kg⁻¹)	0,062	37,11 a	32,50 a	42,35 a
	Tl_TOT (mg.kg⁻¹)	0,172	16,53 b	50,54 a	45,24 a
	Mo_TOT (mg.kg⁻¹)	< 0,0001	35,89 ab	27,31 b	44,26 a

* Probabilité que l'hypothèse nulle H0 soit rejetée.

** Les chiffres représentent les moyennes des rangs pour chaque modalité. Une même lettre dans une ligne signifie qu'il n'y a pas de différence significative avec un intervalle de confiance de 95 %.

La plupart des variables physico-chimiques mesurées classiquement en pédologie est retenue, comme les teneurs en argile, en sable, en carbone organique, en azote total et en carbonates.

Les descripteurs extraits des sondages au pénétromètre constituent une source d'information quant à la discrimination des états de surface et de l'occupation du sol, un grand nombre d'entre eux sont donc retenus. Les descripteurs relatifs à la surface du sol ou à l'ensemble du profil sont utilisables.

En ce qui concerne les paramètres microbiologiques, il est possible d'observer une nette distinction entre les résultats des tests statistiques liés à l'occupation du sol et ceux liés aux états de surface. Les états de surfaces apparaissent en effet plus faciles à décrire que les occupations du sol. Le rôle de l'échelle est ainsi mis en évidence en ce qui concerne ces paramètres microbiologiques.

Au vu de ces tests, il apparaît possible de décrire les sols par leur état de surface et leur occupation du sol, à l'aide des variables utilisées. L'état de surface est une donnée d'échelle plus fine que l'occupation du sol et reflète bien la spécificité de chaque sol. Elle apporte ainsi un complément d'information important. La stratégie d'échantillonnage mise en place semble alors cohérente. Pourtant, aucun des descripteurs ne permet la différenciation univoque de l'ensemble des trois classes d'occupation du sol ou d'états de surface. L'utilisation d'analyses multivariées se montre alors nécessaire.

Classification par k-means

Classes

Une partie des variables sélectionnées grâce aux analyses de variance est injectée dans la classification par k-means. Il s'agit de BIOLOG_H_T100, BIOLOG_LAMBDA, BIOLOG_A, BIOLOG_NBPUITS_T100, RESPIRO_mCO2, SABLE_SURF, ARGILE_SURF, CORG_SURF, N_TOT, CACO3, P_OLSEN, CEC, RESIST_MOY_SURF, RESIST_MAX_SURF, ECART_SURF, STRATE_RESIST_MIN, STRATE_RESIST_MAX, NB_STRATE_NORM. Seuls les sites pour lesquels l'ensemble des analyses a été mené sont utilisés, c'est-à-dire 78 sites, toutes occupations du sol confondues. Le résultat de la classification en cinq classes est donné dans le **Tableau 3**.

Tableau 5 : Classes obtenues à l'aide de la classification par k-means (n=78).

N°	Site	Etat de surface	Végétation	Occupation du sol
1	G37	Sol nu / Végétalisé	Arbustes	Garrigue
	G18	Végétalisé	Herbe	Carreau de mine
	G22	Végétalisé	Pins, sous-bois	Forêt dense
	R21	Végétalisé	Chênes, pins, arbustes, herbe	Forêt dense
	G24	Végétalisé	Pins, chênes, sous-bois	Forêt dense mixte
	G33	Végétalisé	Pins, petits feuillus, houx	Forêt ouverte
	R20	Végétalisé	Pins, herbe	Forêt ouverte
	R33	Végétalisé	Herbe	Zone industrielle
2	G35	Sol nu	Oliviers, herbe	Agricole, oliveraie
	G36	Sol nu	Oliviers, herbe	Agricole, oliveraie
	R2	Végétalisé	Oliviers, herbe	Agricole, oliveraie
	R3	Sol nu	Vigne	Agricole, vigne
	R10	Sol nu	Vigne	Agricole, vigne
	G6	Sol nu / Végétalisé	Chaume	Agricole
	G11	Sol nu / Végétalisé	Chaume, herbe	Agricole

	R8	Sol nu / Végétalisé	Lentilles	Agricole
	R17	Sol nu / Végétalisé	Prairie	Agricole
	G14	Sol nu / Végétalisé	Luzerne	Agricole
	G15	Sol nu / Végétalisé	Jeune pousses	Agricole
	G38	Sol nu / Végétalisé	Prairie	Prairie
	R6	Végétalisé	Herbe	Prairie
	G52	Végétalisé	Prairie	Friche agricole
	G4	Végétalisé	Herbe, mousse	Terril
	G8	Sol nu	Gazon	Habitat diffus, parking
	G45	Sol nu	Aucune	Habitat diffus, sol nu
	G44	Sol nu / Végétalisé	Aucune	Habitat diffus, potager
	R31	Végétalisé	Herbe	Habitat discontinu, aire de jeu
	R30	Végétalisé	Herbe	Habitat discontinu, aire de sport
	G42	Végétalisé	Herbe	Tissu urbain, jardin
	G48	Végétalisé	Herbe	Tissu urbain, square
	R19	Végétalisé	Peupliers, végétation herbacée	Ripisylve
	R1	Végétalisé	Arbustes, thym, romarin	Garrigue
	G34	Végétalisé	Chênes, houx	Forêt dense
	G9	Artificialisé perméable	Gazon	Habitat discontinu, jardin
	G26	Artificialisé perméable	Aucune	Zone industrielle
3	G43	Végétalisé	Herbe	Habitat diffus, jardin
	R22	Végétalisé	Herbe	Habitat diffus, jardin
	R36	Végétalisé	Herbe, thym	Habitat diffus, jardin
	R37	Végétalisé	Herbe	Habitat diffus, jardin
	G53	Végétalisé	Herbe	Habitat discontinu, jardin
	R40	Végétalisé	Herbe	Habitat discontinu, jardin
	G47	Végétalisé	Herbe	Habitat discontinu, plate-bande
	G28	Végétalisé	Gazon	Terrain de sport
	G1	Végétalisé	Prairie, buissons, ronces	Terril
	R7	Végétalisé	Herbe	Prairie
	R11	Végétalisé	Herbe	Prairie
	R13	Végétalisé	Arbustes, jeunes pins, thym	Prairie, ancienne vigne
	G32	Végétalisé	Herbe	Tissu urbain, plate-bande
	G10	Végétalisé	Gazon	Zone industrielle, plate-bande
	R42	Artificialisé perméable	Herbe (peu), arbres	Habitat discontinu, cour
	R39	Sol nu	Aucune	Habitat discontinu, cour
	R38	Sol nu	Herbe (peu), arbres	Habitat discontinu, jardin
	R16	Sol nu / Végétalisé	Potager	Habitat discontinu, potager
	R41	Sol nu / Végétalisé	Aucune	Habitat discontinu, potager
	G25	Sol nu	Herbe	Zone industrielle
	R18	Sol nu / Végétalisé	Blé	Agricole
	R23	Sol nu / Végétalisé	Jeunes pousses, chaume	Agricole
R25	Sol nu / Végétalisé	Jeunes pousses, chaume	Agricole	
	R5	Végétalisé	Herbe, vigne	Agricole, vigne

	R9	Végétalisé	Pins, arbustes	Forêt dense
	R14	Végétalisé	Pins, arbustes	Forêt dense
	R4	Végétalisé	Pins, arbustes, herbe	Forêt ouverte
	R15	Végétalisé	Pins, herbe	Forêt ouverte
	G5	Végétalisé	Pins, chênes, garrigue	Forêt ouverte (terrasse)
	R12	Végétalisé	Garrigue	Garrigue
4	G46	Artificialisé perméable	Aucune	Habitat diffus, cour
	R32	Artificialisé perméable	Aucune	Habitat discontinu, parking
	G27	Artificialisé perméable	Aucune	Terrain de sport
	G30	Artificialisé perméable	Aucune	Terrain de sport
	R29	Artificialisé perméable	Aucune	Tissu urbain, rond-point
	R28	Artificialisé perméable	Aucune	Tissu urbain, terrain de pétanque
	R34	Artificialisé perméable	Aucune	Zone commerciale, parking
	R35	Artificialisé perméable	Aucune	Zone commerciale, parking
	R27	Artificialisé perméable	Herbe (rare)	Zone industrielle
	R24	Sol nu / Végétalisé	Jeunes pousses, chaume	Agricole
	G41	Artificialisé perméable	Aucune	Tissu urbain, cour
	5	G50	Artificialisé imperméable	Aucune
G51		Artificialisé perméable	Aucune	Tissu urbain, terrain de pétanque

Caractérisation des classes

Les gammes de variation et valeurs moyennes de chacun des paramètres utilisés dans la classification sont calculées pour les cinq classes obtenues (**Tableau 4**).

La première classe rassemble des sols sous forêt, développés sur roche mère calcaire, un site d'ancien carreau de mine et un site de zone industrielle. La particularité de ce groupe est une forte teneur en carbone organique de l'horizon de surface, provenant de la matière organique accumulée sur les sols forestiers ou de l'activité d'extraction de charbon pour le carreau de mine. Les teneurs en azote et en phosphore sont elles aussi importantes, les apports par la végétation étant réguliers et importants. Pour le site industriel, ces fortes teneurs sont liées au fait que les surfaces techniques sont utilisées pour le stockage d'engrais et que la faible épaisseur de ce sol concentre les éléments. Les sols forestiers sont peu profonds mais possèdent une différenciation en horizons. Les textures sont limoneuses à argileuses et peu d'éléments grossiers sont présents. Ainsi, la résistance dynamique de l'ensemble des profils est homogène et relativement faible. Elle peut être inférieure en surface à la résistance minimale mesurable avec le dispositif employé, la matière organique et la présence de racines permettant d'aérer la structure du sol. Une activité biologique a été mise en évidence par les

analyses microbiologiques. Les communautés bactériennes y sont néanmoins peu diversifiées à diversifiées, avec une valeur moyenne de 10,8 puits positifs sur 31.

La seconde classe regroupe des sols d'origines variées, mais possédant certaines caractéristiques communes. Ce sont des sols agricoles, d'habitat diffus en milieu agricole possédant des surfaces en sol nu, ou des sols de remblais (sites G4, G26, G42, G48, R30 et R31). Ces sols sont profonds et homogènes. Ainsi, le bruit, marqué par la variable ECART_SURF et le nombre de strates identifiées NB_STRATE_NORM sont faibles. La résistance dynamique de surface est faible par effet du labour et/ou de la présence de racines. Les teneurs en carbone organique et en azote sont peu élevées suite à l'export des cultures pour les sols agricoles et d'apports minimes sur sols nus. Les sols de remblais doivent sans doute leur rattachement à cette classe de l'origine agricole de leurs matériaux, aux caractéristiques de composition chimique et de texture similaires. Comme ils sont jeunes, l'artificialisation n'y est pas encore très prononcée. Le site G34, développé sous forêt est inclus dans ce groupe. Il présente en effet des caractères communs à cette seconde classe. Il est développé sur une roche mère tendre, un calcaire argileux, facilement altérable. Ainsi, ce sol est profond et peu riche en éléments grossiers. De plus, la végétation de feuillus, tout comme la végétation de ripisylve du site R19, forme une litière améliorante, rapidement dégradée par les microorganismes. La matière organique s'accumule donc moins que pour le premier groupe. La diversité microbiologique de ce deuxième groupe est assez faible, avec une valeur médiane de 6,9 puits positifs sur 31.

La troisième classe regroupe des sols de zones artificialisées dont les surfaces sont enherbées ainsi que des sols naturels ou agricoles actifs du point de vue microbiologique. Ces sols présentent des résistances dynamiques plus importantes que les deux précédents groupes, du fait d'une artificialisation plus marquée ou de la nature des matériaux les constituant. Ils contiennent en effet de nombreux artefacts d'origine technique, voire des horizons entièrement fabriqués par l'Homme. La résistance dynamique de surface est néanmoins faible, grâce à la présence d'une végétation qui aère la structure du sol. Une teneur en matière organique non négligeable a pu être mesurée, effet de la végétation herbacée implantée. La diversité microbiologique est la plus forte des classes identifiées, avec une valeur médiane de 19,2 puits positifs sur 31 et un développement rapide des communautés bactériennes marqué par un temps de latence λ court. Ceci est lié à une forte teneur en azote et/ou en phosphore. Ces sols anthropisés à surface végétalisée nécessitent en effet un certain rendement de la végétation, qui est favorisé par l'apport de nutriments.

La quatrième classe rassemble essentiellement des sols à surface artificialisée. En moyenne plus sableux que les sols des autres groupes, ils sont très pauvres en carbone et en azote, les apports en végétaux étant presque nuls. La diversité des communautés bactériennes est très réduite du fait d'un environnement hostile en termes d'humidité, d'apport de nutriments et de température.

Enfin, la cinquième classe est composée de trois sols dont l'artificialisation est extrême. La résistance dynamique y est très prononcée, en particulier en surface, du fait de la nature même des matériaux composant ces sols. Ils sont en effet essentiellement composés d'éléments grossiers d'origine anthropique. Ainsi, le bruit observé sur les pénétrogrammes est lui aussi important. Ils sont plus sableux que les sols naturels. Les teneurs en carbone organique et en azote sont relativement faibles. La diversité des communautés bactériennes est très faible pour les sites G41 et G51. Elle est néanmoins importante pour le site G50.

Tableau 6 : Statistiques descriptives des groupes établis en classification par k-means (Min. : valeur minimale, Max. : valeur maximale, Moy. : valeur moyenne, σ : écart-type).

Descripteurs	1				2				3			
	Min	Max	Moy	σ	Min	Max	Moy	σ	Min	Max	Moy	σ

BIOLOG_H_T100	2,2	2,9	2,6	0,2	1,4	3,0	2,6	0,3	2,8	3,2	3,0	0,1	
BIOLOG_LAMBDA (h)	8,7	41,4	27,6	11,5	23,5	8	61,1	4	8	4	2	7,7	
BIOLOG_A	0,5	1,2	0,9	0,2	0,2	5,5	1,5	1,4	0,5	1,8	1,3	0,3	
BIOLOG_NBPUITS_T100	7,0	17,0	10,8	3,4	1,0	14,0	6,9	3,5	0	0	2	3,8	
RESPIRO_mCO2 (g/kg MS/j)	0,05	0,36	0,20	0,10	0,02	0,20	0,09	4	1	8	8	5	
RESIST_MOY_SURF (MPa)	2,8	13,6	5,4	3,6	0,7	14,6	3,8	3,1	0,6	9	3,7	2,5	
RESIST_MAX_SURF (MPa)	4,1	21,7	8,4	5,7	0,9	32,5	6,5	6,9	0,8	3	5,6	3,7	
ECART_SURF (MPa)	0,5	11,5	3,3	3,4	0,2	7,8	1,7	1,8	0,1	4,0	1,4	1,0	
STRATE_RESIST_MIN (MPa)	2,2	13,6	5,3	3,6	0,7	11,9	3,3	2,5	0,6	7,2	3,2	1,8	
STRATE_RESIST_MAX (MPa)	3,2	19,0	11,8	6,3	2,5	32,5	8,6	7,3	2,5	0	9	6	
NB_STRATE_NORM (strate.cm ⁻¹)	0,04	0,43	0,14	0,13	0,01	0,08	0,03	2	1	2	4	3	
SABLE_SURF (%)	7,5	37,5	19,4	13,6	7,5	80,0	25,5	8	7,5	0	3	6	
ARGILE_SURF (%)	5,0	47,5	24,1	17,2	5,0	47,5	21,9	3	5,0	5	6	8	
CORG_SURF (g.kg ⁻¹)	45,5	0	0	52,3	4,3	48,3	20,5	7	2,0	6	2	5	
N_TOT (g.kg ⁻¹)	2,6	10,5	5,6	2,4	0,5	4,2	1,7	1,0	0,4	4,3	1,7	0,9	
CACO3 (g.kg ⁻¹)	30	531	239	162	113	686	354	126	1	522	310	126	
P_OLSEN (g.kg ⁻¹)	0,01	5,61	0,72	1,98	0,01	0,18	0,05	5	0	1	5	8	
CEC (cmol ⁺ .kg ⁻¹)	19,9	52,6	34,3	10,9	5,8	20,7	11,0	4,1	3,6	0	8	4,3	
Descripteurs	4				5								
	Min,	Max,	Moy,	σ	Min,	Max,	Moy,	σ					
BIOLOG_H_T100	2,0	2,9	2,4	0,3	1,3	3,0	2,3	0,9					
BIOLOG_LAMBDA (h)	11,4	4	9	80,7	6,2	9	43,2	6					
BIOLOG_A	0,4	18,5	4,0	5,6	0,6	1,3	1,0	0,4					
BIOLOG_NBPUITS_T100	0,0	13,0	4,2	4,1	1,0	20,0	10,0	9,5					
RESPIRO_mCO2 (g/kg MS/j)	0,00	0,12	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	1					
RESIST_MOY_SURF (MPa)	4,4	26,6	12,3	6,5	42,4	0	72,7	8					
RESIST_MAX_SURF (MPa)	4,7	65,0	21,8	17,9	4	4	4	0,0					
ECART_SURF (MPa)	0,3	24,1	7,0	8,8	123,	255,	189,	66,					
STRATE_RESIST_MIN (MPa)	4,1	16,4	10,5	4,3	3,6	7,2	5,1	1,9					
STRATE_RESIST_MAX (MPa)	8,1	65,0	30,9	24,6	16,3	65,0	37,9	8					
NB_STRATE_NORM (strate.cm ⁻¹)	0,02	0,23	0,09	0,08	0,02	0,05	0,03	1					

SABLE_SURF (%)	62,5	80,0	75,8	7,0	70,0	70,0	70,0	0,0
ARGILE_SURF (%)	7,5	25,0	10,7	6,0	17,5	17,5	17,5	0,0
CORG_SURF (g.kg ⁻¹)	1,9	82,8	19,1	25,8	6,1	17,8	11,3	6,0
N_TOT (g.kg ⁻¹)	0,1	0,9	0,4	0,3	0,4	1,0	0,6	0,4
CACO3 (g.kg ⁻¹)	275	886	627	206	516	831	641	167
P_OLSEN (g.kg ⁻¹)	0,00	0,03	0,01	0,01	0,05	0,06	0,06	1
CEC (cmol ⁺ .kg ⁻¹)	1,4	7,3	3,7	2,0	1,8	5,7	3,3	2,1

4. Discussion

Les tests de Kruskal-Wallis ont pu mettre en évidence que l'occupation du sol n'est pas une donnée assez fine pour pouvoir caractériser les sols artificialisés de façon univoque. En effet, les zones artificialisées montrent une telle hétérogénéité que la seule donnée sur l'occupation du sol s'avère insuffisante. Ainsi, une information sur l'état de surface a été intégrée, divisée en trois classes (*i.e.* surfaces artificialisées, sols nus et surfaces végétalisées). L'état de surface influence en effet le fonctionnement pédoclimatique et l'activité biologique du sol. Zhao *et al.* (2007) ont démontré dans leur étude, à l'aide d'un grand nombre d'échantillons, que l'occupation du sol locale et régionale n'était pas un bon indicateur des caractéristiques des sols. Ils lui ont préféré le type de végétation, divisé en huit classes.

La typologie des sols établie sur les deux communes, divisée en cinq classes, permet d'extraire deux types d'information. La première concerne les similarités des sols artificialisés avec certains sols non artificialisés en fonction des facteurs de la pédogénèse prépondérants, la seconde concerne les caractéristiques des groupes formés. Des similarités ont en effet été mises en évidence entre les sols agricoles et certains sols d'habitat diffus dont la surface est en sol nu, ou des sols de remblais. Les sols d'habitat diffus sont peu affectés par l'artificialisation dans leur composition et sont peu sujets à une dégradation par action mécanique anthropique. Leurs caractéristiques sont plutôt liées à la nature du matériau parental. Ainsi, les sols sur roche mère argileuse en habitat diffus sont classés avec les sols agricoles, eux aussi souvent implantés sur roche mère argileuse sur la commune de Gardanne. De même, des sols d'habitat diffus sur calcaire sont classés comme des sols forestiers sur calcaire. Les sols de remblais, quant à eux, peuvent provenir de zones agricoles, induisant des similarités dans la composition chimique ou la texture. L'impact anthropique y est néanmoins plus marqué, par la présence d'artéfacts d'origine technique et d'une compaction de surface.

Une certaine relation entre les groupes issus de la classification et l'état de surface peut être établie (**Tableau 3**). Il est néanmoins important de noter que les zones agricoles n'ont pas d'état de surface stable dans le temps. Il peut alterner entre un sol nu et une surface végétalisée à un rythme saisonnier à pluriannuel, en fonction de la culture implantée.

Références bibliographiques spécifiques à l'annexe

Zhao, Y.G., Zhang, G.L., Zepp, H., Yang, J.L., 2007. Establishing a spatial grouping base for surface soil properties along urban-rural gradient - A case study in Nanjing, China. CATENA 69 (1), 74-81.

Annexe II-11 : Prédiction des paramètres du sol à Gardanne

1. Introduction

Les données d'entrée d'un indice d'adéquation sol/usage du sol sont des paramètres physiques, chimiques et microbiologiques devant posséder une emprise surfacique, afin de fournir un résultat sous forme cartographique. Une carte des sols n'étant disponible que sur la commune de Rousset, il est nécessaire de concevoir une démarche permettant de spatialiser des données de sols à Gardanne à partir des informations à disposition.

Dans le cas de la commune de Rousset, la carte des sols est utilisée directement pour le calcul de l'indice d'adéquation sol/usage du sol. En ce qui concerne la commune de Gardanne, les paramètres du sol sont prédits à l'aide de méthodes de cartographie numérique. Les contextes naturels pouvant être considérés comme relativement similaires à Gardanne et à Rousset, l'idée est de trouver quels sont les facteurs responsables des valeurs de paramètres du sol relevées à Rousset. Ensuite, en fonction de l'existence et de l'intensité de ces facteurs à Gardanne, les valeurs de paramètres du sol mesurées à Rousset lui sont transférées. Rousset constitue ainsi une zone de référence, permettant la cartographie numérique des sols de Gardanne, à l'aide de variables auxiliaires.

2. Matériel et méthodes

a. Préparation des paramètres d'entrée

Paramètres pédologiques

Les paramètres pédologiques sont repris de la carte pédologique de Rousset (Société du Canal de Provence, 1970), au titre qu'une telle carte des sols constitue à la fois une synthèse de la connaissance d'experts et d'un ensemble de points d'échantillonnage (Scull *et al.*, 2005). Les unités de sols présentes sur la carte pédologique sont dans un premier temps vectorisées à l'aide d'un logiciel de SIG (ArcGIS 9.2, ESRI). Les paramètres du sol caractérisant chacune de ces unités sont quant à eux extraits de la notice de la carte. Il s'agit de la réserve utile, l'hydromorphie, la teneur en matière organique, la capacité d'échange cationique, l'épaisseur, le pH, la texture et le taux d'éléments grossiers. Dans cette notice, les paramètres du sol se présentent la plupart du temps sous la forme d'une gamme de valeurs. L'érodibilité est estimée à partir de la texture du sol, des teneurs en éléments grossiers, en matière organique et en fer, à l'aide de la méthode développée par Antoni *et al.* (2006), particulièrement adaptée aux climats méditerranéens. Il convient de noter que, lors de la conception de cette carte pédologique en 1970, les analyses physico-chimiques ont été réalisées sur des échantillons de sols agricoles. Certaines zones, notamment urbaines et forestières, n'ayant pas fait l'objet d'un levé cartographique en 1970 ont été prospectées de façon à ce que l'intégralité de la commune de Rousset possède une information sur les sols.

Pour la suite du traitement, les unités de sols de la carte pédologique de Rousset doivent être converties du format vecteur au format raster. La maille choisie est de 25 m.

Paramètres géomorphologiques (variables auxiliaires)

La géomorphologie est reconnue comme étant l'un des facteurs de la formation et de la différenciation des sols (Jenny, 1941), notamment grâce à son rôle dans la partition des écoulements d'eau et le

déplacement des composés et particules associés (Moore *et al.*, 1993). Cette information est aisément reconstituée à l'aide de modèles numériques de terrain (MNT). Un MNT est une donnée facile d'accès et souvent exhaustive pour une zone d'étude donnée (Grinand *et al.*, 2008). Le MNT utilisé (IGN et CRIGE-PACA, 2008) possède une résolution de 25 m.

Plusieurs paramètres géomorphologiques sont dérivés du MNT pour les deux communes. Behrens *et al.* (2010) insistent sur le rôle de l'échelle dans ce type d'étude, la formation des sols et les facteurs de la pédogénèse variant à différentes échelles. Ainsi, les paramètres dérivés du MNT s'attachent à observer des variations locales, par des paramètres calculés sur une fenêtre glissante de même dimension pour chacun des pixels (Behrens *et al.*, 2010), et régionales, prenant en compte des relations (de flux hydriques, d'altitudes relatives) avec des pixels éloignés.

b. Calcul des paramètres

Paramètres locaux

- Altitude (elevation) : L'altitude est issue directement du MNT.
- Pente (slope) : La pente est une dérivée première de l'altitude. Elle est calculée à l'aide du module « pente » de Spatial Analyst.
- Courbures horizontale (plan) et verticale (prof) : la courbure est une dérivée seconde de l'altitude. Elle est calculée à l'aide de la commande « courbure » de la calculatrice raster et permet d'estimer le caractère concave ou convexe d'une surface dans un plan donné. Deux types de courbure sont calculés, dans le plan horizontal pour la courbure horizontale, et le long de la ligne de plus grande pente pour la courbure verticale. Ces paramètres permettent de mettre en évidence les convergences ou divergences de flux hydriques.
- *Waxing and waning slopes (ww)* : le paramètre *waxing and waning slopes*, introduit par Hubert (1994), est une comparaison de la différence d'altitude entre un pixel central et l'altitude minimale dans son voisinage, et du pixel central et l'altitude maximale dans le même voisinage (éq. 1). Si la différence d'altitude d'un pixel central avec le pixel le plus haut du voisinage est plus petite qu'avec le pixel le plus bas, la géomorphologie peut être qualifiée de haut de pente (*waxing slope*). Si c'est l'inverse, on est en position de pied de pente (*waning slope*) (Behrens *et al.*, 2010). Ce paramètre permet ainsi d'introduire une notion de forme de relief sous un format numérique. Le voisinage choisi pour calculer le paramètre *waxing and waning slopes* est de 6 x 6 pixels, soit 150 x 150 m. Behrens *et al.* (2010) ont utilisé un voisinage de 120 x 120 m.

$$ww = (Z_i - Z_{max}) - (Z_i - Z_{min}) \quad (\text{éq. 1})$$

Avec, Z_i : altitude du pixel central ;
 Z_{max} : altitude maximale du voisinage du pixel central ;
 Z_{min} : altitude minimale du voisinage du pixel central.

- Rugosité topographique (roughness) : l'expression de la rugosité topographique est basée sur la variation de la pente et de la direction de la pente (exposition) au sein d'un voisinage donné (Behrens *et al.*, 2010). La méthodologie suivie est celle de Behrens *et al.* (2010). La variété, c'est-à-dire le nombre de valeurs différentes d'un paramètre au sein de son voisinage, est d'abord calculée pour la pente et pour l'exposition (Spatial Analyst, Statistiques de voisinage). Le voisinage choisi est de 6 x 6 pixels. Le calcul de la rugosité topographique est ensuite réalisé à l'aide de la calculatrice raster, comme le produit de la variété de la pente et de l'exposition.

Paramètres régionaux et paramètres combinés

Ces paramètres sont calculés à partir d'un MNT corrigé hydrologiquement.

- Indice de Beven ou *compound topographic index* (cti) : L'indice de Beven (Beven et Kirkby, 1979) permet d'identifier les zones de saturation potentielle en eau des sols, pour des conditions de pluviosité et des propriétés des sols identiques (Wilson et Gallant, 2000). Il est calculé à l'aide de la calculatrice raster par la formule donnée dans l'équation 2.

$$cti = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan(\beta)}\right) \quad (\text{éq. 2})$$

Avec, cti : indice de Beven ;

α : surface drainée (Spatial Analyst, Hydrologie, Accumulation de flux) ;

β : pente.

- Distance euclidienne au cours d'eau (dstr2000 et dstr3000) : Elle correspond à la distance d'un pixel donné au plus proche pixel du réseau hydrographique (Behrens et al., 2010). Ce réseau est préalablement dérivé du MNT à l'aide des outils « Hydrologie » de Spatial Analyst, pour des seuils d'accumulation de flux de 2000 et de 3000 ha.
- Longueurs de flux (flowlenup et flowlendown) : La longueur de flux est calculée à l'aide de l'outil « Longueur de flux » de Spatial Analyst, à partir d'un raster de direction de flux hydrologiques, lui-même dérivé du MNT. L'option de direction de mesure « upstream » permet de calculer la plus grande distance le long du chemin de flux, depuis chaque cellule jusqu'à la ligne de partage des eaux (vers l'amont). L'option « downstream » permet ce même calcul depuis chaque cellule jusqu'à une cuvette ou un orifice sur le bord du raster (vers l'aval) (ESRI, 2006). Ces deux paramètres ont notamment été utilisés pour la cartographie des sols par Debella-Gilo et Etzelmuller (2009).

c. Filtrage des paramètres

Comme souligné précédemment, le rôle de l'échelle d'observation des facteurs de la pédogénèse influe sur les résultats d'une cartographie numérique des sols. Il n'est pas certain que la résolution du MNT utilisé soit l'échelle appropriée (Smith *et al.*, 2006). Ainsi, en plus de l'utilisation de paramètres locaux et régionaux, un filtrage est appliqué sur chacun des paramètres géomorphologiques, afin d'opérer une approche multi-échelle. Il s'agit d'appliquer un filtre de moyenne sur une fenêtre glissante de taille connue. Ainsi, les variations trop locales d'un paramètre, pouvant être assimilées à du bruit, sont atténuées par l'intégration des valeurs de ses voisins. De plus, le filtrage des paramètres permet d'une certaine façon la prise en compte des relations spatiales entre les pixels (Moran et Bui, 2002). Trois filtres sont calculés, selon la taille de la fenêtre glissante : 3 x 3, 15 x 15 et 31 x 31 pixels. L'approche multi-échelles a été testée par quelques auteurs (Moran et Bui, 2002 ; Smith *et al.*, 2006 ; Dragut *et al.*, 2009 ; Behrens *et al.*, 2010) pour un plus grand nombre de fenêtres mobiles, permettant de mieux identifier le filtre produisant les meilleures prédictions. Néanmoins, le nombre important de traitements à réaliser nous a conduit à utiliser un jeu plus restreint de trois filtres.

d. Echantillonnage des pixels

Des données spatiales telles que des données dérivées d'un MNT présentent inévitablement une autocorrélation spatiale, les variables considérées possédant une structure spatiale. La mise en œuvre de méthodes statistiques nécessite pourtant une indépendance des données. Il est ainsi nécessaire de n'utiliser qu'une partie de ce jeu de données. L'objectif est d'extraire un sous-jeu de

données représentatif, suffisamment large pour ne pas perdre d'information, mais suffisamment petit pour éviter l'autocorrélation et pour que les temps de calculs liés aux traitements statistiques soient raisonnables (Grinand *et al.*, 2008 ; Schmidt *et al.*, 2008). Cette étape est un échantillonnage.

Le choix du mode d'échantillonnage est essentiel. Moran et Bui (2002) ont trouvé qu'un échantillonnage aléatoire pondéré par la surface (plus d'échantillons pour les grandes unités de sols) fournissait de meilleurs résultats qu'un échantillonnage stratifié par unités de sol (même quantité d'échantillons pour toutes les unités de sols). Schmidt *et al.* (2008) recommandent quant à eux un échantillonnage aléatoire simple, plutôt qu'aléatoire pondéré par les surfaces des unités de sol lorsque le jeu de données est équilibré en termes de surfaces des unités de sols et non-bruité. Dans le cas contraire, ils lui préfèrent l'échantillonnage pondéré par les surfaces. Dans notre étude, des paramètres du sol sont prédits, et non pas des unités de sol. Un échantillonnage proportionnel aux surfaces des unités de sol ne paraît dans ce cas pas pertinent. Ainsi, nous avons choisi de réaliser un échantillonnage aléatoire simple, sur les pixels de la commune de Rousset. Il peut en effet être assimilé à un échantillonnage aléatoire pondéré par la surface des unités de sols, excepté que certaines petites surfaces pourraient ne pas être échantillonnées (Moran et Bui, 2002). Il permet par ailleurs un temps de traitement rapide.

Concernant l'intensité d'échantillonnage, Moran et Bui (2002) ont montré qu'une faible intensité est suffisante pour mettre en évidence la variabilité des sols, et ont ainsi choisi une intensité de 25 %. Dans leur étude, Grinand *et al.* (2008) n'ont trouvé qu'une faible influence de l'intensité d'échantillonnage sur la qualité de leurs prédictions et réalisent leurs traitements avec 30 % des pixels. Nous avons ainsi retenu une intensité de 25 %.

3. Prédiction des paramètres du sol à Gardanne

A cette étape, chaque pixel de 25 x 25 m de la commune de Rousset est caractérisé par un ensemble de paramètres pédologiques et géomorphologiques. A Gardanne, chaque pixel possède un ensemble de paramètres géomorphologiques. Il s'agit alors de prédire les paramètres pédologiques à Gardanne, à l'aide de ces trois sources d'information.

Dans le domaine de la cartographie numérique des sols, l'on s'attache à produire soit des cartes d'unités de sol, soit des cartes de paramètres du sol. Dans cette étude, l'indice d'adéquation sols/usage des sols requiert des données d'entrée sous la forme de quelques paramètres du sol. Ainsi, il est apparu plus pertinent et plus aisé de prédire des paramètres, plutôt que de reconstituer des unités de sols.

Deux méthodes de prédiction des paramètres du sol à Gardanne sont testées et comparées dans cette étude. La comparaison concerne d'une part la justesse des prédictions et d'autre part, la facilité de la mise en œuvre. La première méthode est classée parmi les « méthodes linaires de classification », la seconde parmi les « méthodes par arbres de classification » (McBratney *et al.*, 2003).

a. Première méthode : analyse factorielle discriminante

Présélection des paramètres géomorphologiques

Un surapprentissage ou *overfitting* peut apparaître si le modèle s'adapte bien aux données d'apprentissage, mais ne parvient pas à prédire de nouvelles données. Le modèle décrit alors sans doute une erreur aléatoire ou du bruit. Afin d'éviter des effets de surapprentissage par l'intégration de l'ensemble des paramètres géomorphologiques, une présélection de ces paramètres est tout d'abord

opérée. Elle permet de réduire la dimensionnalité du jeu de données en éliminant les paramètres redondants ou responsables d'un bruit de fond (*in* Behrens *et al.*, 2010). Cette présélection est d'autant plus importante que l'approche multi-échelles utilisée produit des données très corrélées entre elles (Behrens *et al.*, 2010). La sélection est réalisée sous R à l'aide d'ANOVA à un facteur en suivant la méthode de Behrens *et al.* (2010). Les paramètres présentant une forte F-value, possédant une forte variance intergroupe et une faible variance intragroupe, sont les plus discriminants. Les paramètres possédant une F-value > 1000 sont retenus. Si pour un même paramètre, plusieurs filtres sont susceptibles d'être retenus, seul celui possédant la F-value la plus élevée est conservé.

Prédiction des paramètres pédologiques

Pour la suite du traitement, la démarche suivie est inspirée de celle de Thomas *et al.* (1999). Une analyse factorielle discriminante est menée à l'aide du logiciel R. Le choix de cette méthode est en particulier basé sur le fait que les données pédologiques à estimer sont des données classées et que l'analyse factorielle discriminante permet effectivement l'utilisation de variables qualitatives. Les variables dépendantes correspondent à chacun des paramètres pédologiques que l'on souhaite estimer. Les variables explicatives sont les paramètres géomorphologiques. La première étape consiste à utiliser le premier quart du jeu de données de pixels de la commune de Rousset pour la définition des axes factoriels. Les paramètres géomorphologiques de Gardanne et les axes factoriels précédemment établis sont ensuite utilisés pour prédire la valeur des paramètres pédologiques à Gardanne.

Une gamme de valeurs ayant été extraite de la carte pédologique de Rousset, ce traitement est testé pour une valeur basse, une valeur haute et une valeur moyenne de chaque paramètre du sol. De plus, afin d'améliorer la performance des résultats, le traitement est réalisé indépendamment pour chaque lithologie de la roche mère.

b. Deuxième méthode : arbres de classification Random Forests

Les arbres de classification permettent la prédiction de variables qualitatives (paramètres pédologiques), à partir d'un ensemble de variables prédictives (paramètres géomorphologiques). La construction des arbres de classification est basée sur un ensemble de partitions récursives du jeu de données en deux sous-groupes. Chaque division (nœud de l'arbre) est effectuée de façon à maximiser la différence entre ces sous-groupes ; ils s'en trouvent alors de plus en plus homogènes du point de vue de la variable à prédire. A chaque division, des règles (du type si-alors-sinon) sont établies à l'aide des valeurs des variables prédictives. Une fois que l'arbre est construit, ces règles permettent la mise en œuvre d'une prédiction sur d'autres jeux de données.

Ce type de méthode présente plusieurs avantages. Les arbres de classification sont des méthodes non-paramétriques. Ainsi, ils ne sont pas sensibles à la distribution des variables. Un autre intérêt est qu'ils ne sont pas sensibles à la présence de variables peu porteuses d'information (Grinand *et al.*, 2008), économisant ainsi à l'opérateur une étape de présélection des variables. Les arbres de classification ont ainsi été utilisés avec succès dans diverses études pour la cartographie numérique de sols (McKenzie et Ryan, 1999 ; Scull *et al.*, 2005 ; Grinand *et al.*, 2008 ; Schmidt *et al.*, 2008).

Il existe plusieurs algorithmes permettant construire des arbres de classification (ex. : CART, CHAID, MART, Random Forests, *etc.*). L'algorithme choisi pour cette étude est l'algorithme *Random Forests* (Breiman, 2001), dans sa version pour R (Liaw et Wiener, 2010). Afin d'optimiser les résultats, il utilise le *bootstrap aggregating* ou *bagging*, c'est-à-dire que plusieurs arbres sont construits de façon indépendante sur une partie du jeu de données, les variables étant choisies aléatoirement. De plus, la particularité de cet algorithme est que les partitions à chaque nœud de l'arbre ne concernent pas

l'ensemble des variables, mais une partie des variables choisies aléatoirement. Plusieurs arbres sont alors construits, conduisant à plusieurs prédictions. La plus représentée est celle qui est retenue.

c. Validation

Validation interne

L'application des règles construites à partir de l'AFD ou des arbres de classification sur un second quart des pixels de Rousset permet de vérifier que le modèle s'adapte bien aux données. La zone d'apprentissage et la zone de validation est la même : la commune de Rousset, mais les pixels utilisés sont différents. Cette étape est nommée « validation interne » (Grinand *et al.*, 2008).

Il s'agit de comparer les valeurs prédites et les valeurs réelles (issues de la carte pédologique). Par observation de la matrice de confusion résultant de cette validation interne, il est possible d'identifier les pixels mal classés. Deux types d'indices sont calculés :

- La précision totale est donnée par le pourcentage de pixels bien classés (diagonale de la matrice de confusion).
- L'indice Kappa est régulièrement utilisé dans le domaine de la télédétection. Il permet de décrire la probabilité qu'un pixel soit bien classé par chance (*in* Grinand *et al.*, 2008), du fait que la distribution spatiale et la surface de certaines classes les rendent plus faciles à prédire que d'autres. Plus l'indice Kappa est proche de 1, plus la qualité de la prédiction est bonne. Elle est considérée comme juste au-dessus de 0,4 (Fleiss, 1981).

Validation externe, à l'aide des données de terrain

Les valeurs de paramètres prédites à Gardanne sont confrontées aux données recueillies sur le terrain. Cette étape est nécessaire afin de savoir si les méthodes utilisées sont capables de donner des prédictions valides en dehors de leur zone d'apprentissage. C'est une validation dite externe, la zone d'apprentissage et la zone de validation étant différentes (Grinand *et al.*, 2008). Deux indices sont utilisés pour définir l'erreur de prédiction, l'erreur moyenne (éq. 3) et l'erreur absolue moyenne (éq. 4). Ils sont choisis pour leur interprétation facile et parce que les résultats sont donnés dans la même unité que les paramètres d'entrée.

- Erreur moyenne (ME) :

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \tag{éq. 3}$$

Avec, n : nombre d'observations ;
 P : valeurs estimées ;
 O : valeurs observées.

- Erreur absolue moyenne (MAE) :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{abs}(P_i - O_i) \tag{éq. 4}$$

4. Résultats

a. Evaluation des hypothèses de départ

Avant toute tentative de prédiction des paramètres du sol à Gardanne, il est nécessaire de vérifier les hypothèses de départ, c'est-à-dire que les contextes naturels sont suffisamment proches pour que Rousset constitue la zone d'apprentissage de la prédiction des paramètres du sol à Gardanne.

Pour ce faire, les fonctions de répartition des variables géomorphologiques non-filtrées, utilisées comme variables auxiliaires, sont présentées en **Figure 1**.

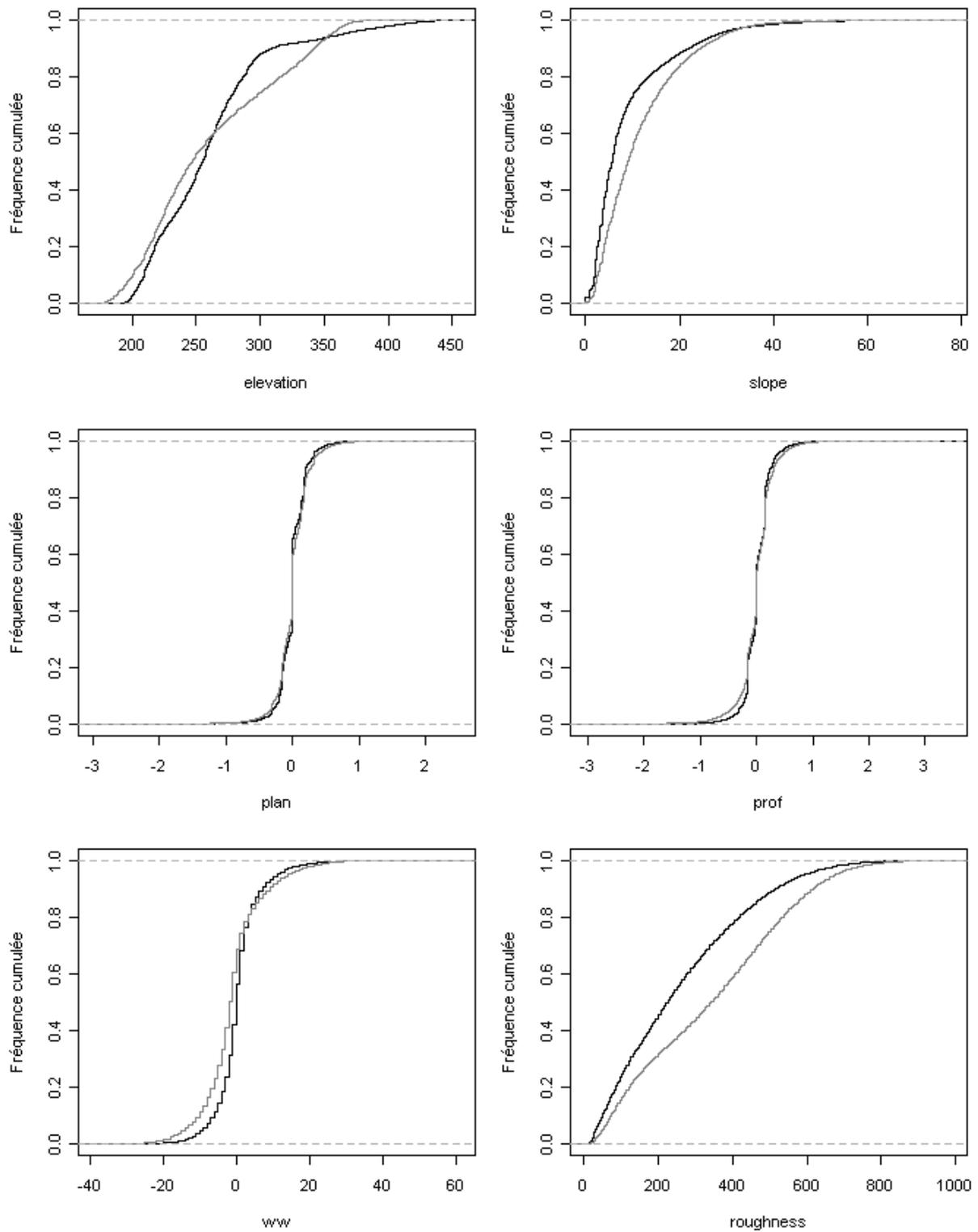


Figure 2 : Fonctions de répartition empiriques des variables géomorphologiques non-filtrées (noir : Rousset, gris : Gardanne).

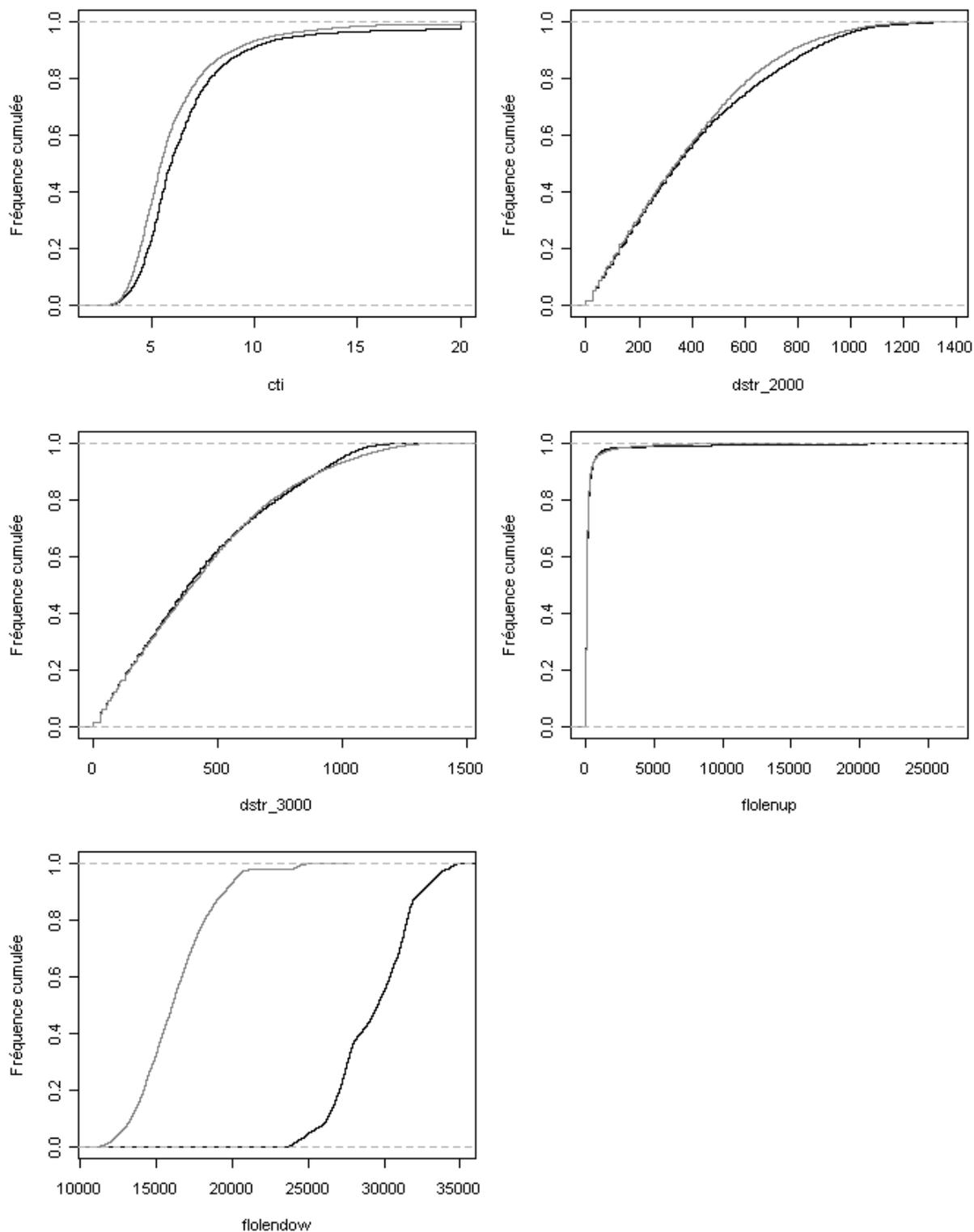


Figure 1 (suite)

Les variables géomorphologiques dérivées à Gardanne et à Rousset présentent les mêmes ordres de grandeur et leurs distributions apparaissent assez semblables. La longueur de flux calculée vers l'aval (paramètre « floleadow ») présente néanmoins de grandes différences entre les deux communes. Ce paramètre est en effet cumulatif et dépend de la localisation des exutoires (cuvettes ou intersections

du réseau hydrographique avec le bord de carte), et donc de la surface prise en compte lors de son calcul. Dans notre cas, l'emprise a été choisie comme les bassins versants drainant chacune des deux communes (IGN *et al.*, 2010). Le paramètre « flolendown » semble ainsi d'échelle trop globale, trop dépendant du mode de calcul employé et souffre de son caractère cumulatif. Il est ainsi retiré pour les traitements suivants.

b. Pré-sélection des variables

Dans le cas de l'analyse factorielle discriminante, une présélection des variables a été réalisée. Les ANOVA sont réalisées pour plusieurs paramètres pédologiques : l'épaisseur, le pH, le taux de matière organique, l'érodibilité, la CEC, la réserve utile et l'hydromorphie, pour un cas favorable, un cas défavorable et un cas intermédiaire. Les cas favorables et défavorables représentent les valeurs hautes et basses extraites de la carte pédologique de Rousset. Les paramètres géomorphologiques retenus à l'issu des ANOVA sont présentés dans le **Tableau 1**.

Tableau 7 : Paramètres géomorphologiques retenus lors de la présélection des variables.

Paramètres pédologiques		Paramètres géomorphologiques
Epaisseur	Fav.	elevation, slope_f31, roughness_f31, cti_f31, flolenu_f31
	Défav.	elevation, slope_f31, prof_f15, roughness_f31, cti_f31, tpi_f15, flolenu_f31
	Moy.	elevation, slope_f31, ww_f15, roughness_f15, cti_f31, flolenu_f31
pH	Fav.	elevation_f31, slope_f31, prof_f31, roughness_f31, cti_f31, dstr3000_f31
	Défav.	elevation, plan_f31, roughness_f31, cti_f31, flolenu_f15, dstr3000_f31
	Moy.	elevation_slope_f15, plan_f31, roughness_f15, cti_f31
Teneur en matière organique	Moy.	elevation, slope_f31, prof_f31, ww_f31, roughness_f3, cti_f3, dstr2000, dstr3000, flolenu_f3
Erodibilité	Fav.	elevation_f31, slope_f31, prof_f31, plan_f31, ww_f31, roughness_f15, cti_f15, dstr2000_f15, dstr3000, flolenu_f31
	Défav.	elevation, slope_f3, plan_f31, prof_f31, ww_f31, roughness_f3, cti_f31, dstr2000, dstr3000_f31, flolenu_f31
	Moy.	elevation_f31, prof_f31
Capacité d'échange cationique	Fav.	elevation_f15, slope_f31, roughness_f31, cti_f31, dstr2000_f31, flolenu_f31
	Défav.	elevation, slope_f31, prof_f15, plan_f31, ww_f15, roughness_f31, cti_f31, dstr2000_f31, dstr3000_f31, flolenu_f31
	Moy.	elevation_f15, slope_f31, ww_f31, cti_f31, dstr2000_f31, flolenu_f31
Réserve utile	Fav.	elevation, slope_f3, roughness_f31, cti_f31, flolenu_f31

	Défav.	elevation_f31, slope_f3, roughness_f15, cti_f31
	Moy.	elevation, slope_f15, plan_f31, ww_f31, roughness_f31, cti_f31, flolenu_f31
Hydromorphie	Moy.	elevation, slope_f15, plan_f31, prof_f31, ww_f15, roughness_f3, cti_f3, dstr2000_f31, dstr3000_f31, flolenu_f31

Pour certains paramètres du sol (CEC défav., érodibilité fav. et défav., MO, hydromorphie), la F-value des paramètres géomorphologiques était systématiquement inférieure au seuil fixé à 1000. Dans ce type de cas, le paramètre possédant la plus forte F-value dans chaque catégorie de paramètres géomorphologiques a été retenu.

c. Cartes des paramètres

Les cartes des paramètres estimés par l'AFD sont données en **Figure 2** et celles issues des arbres de classification en **Figure 3**.

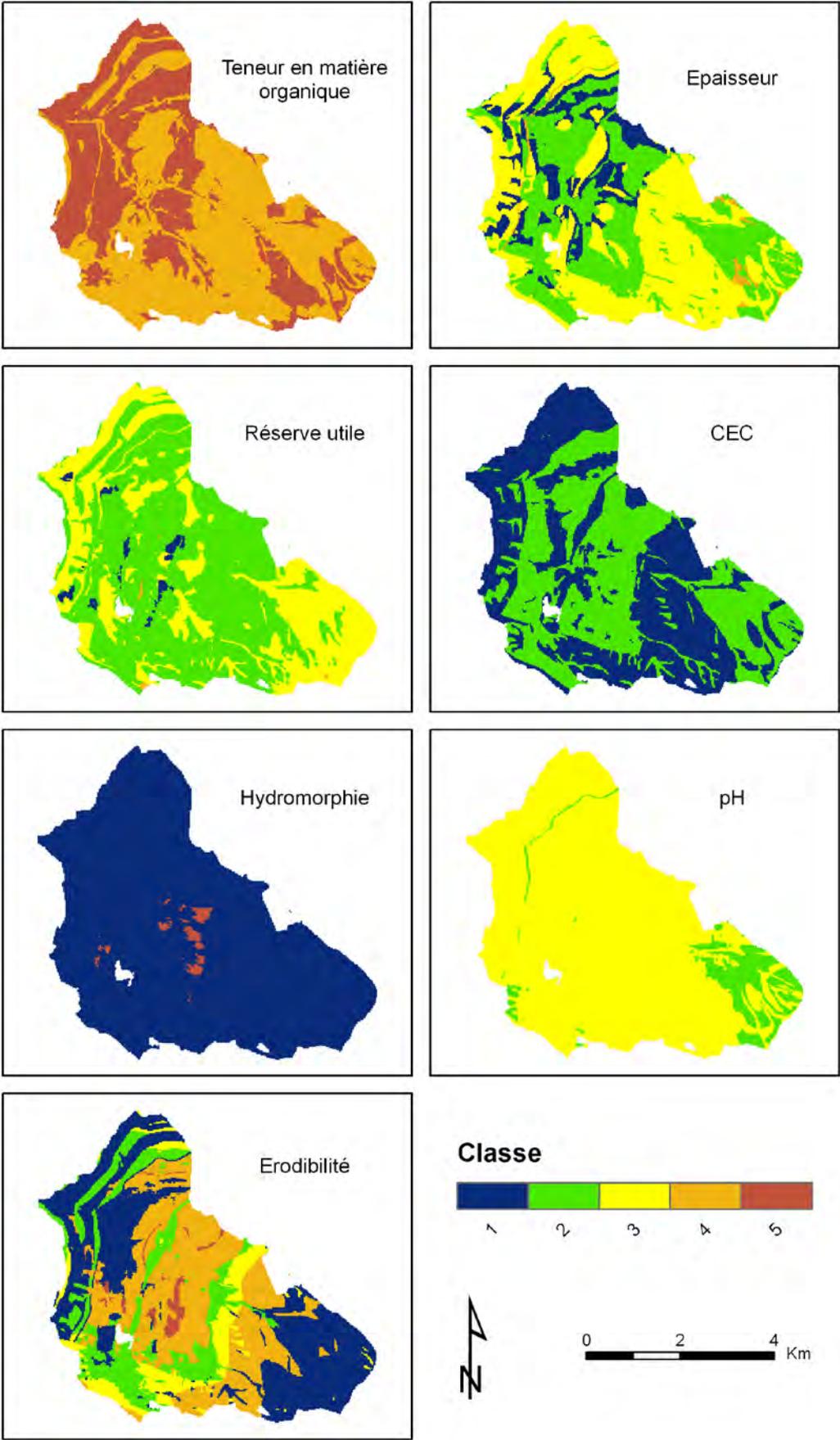


Figure 3 : Cartes des paramètres pédologiques prédits à l'aide de la méthode de l'AFD.

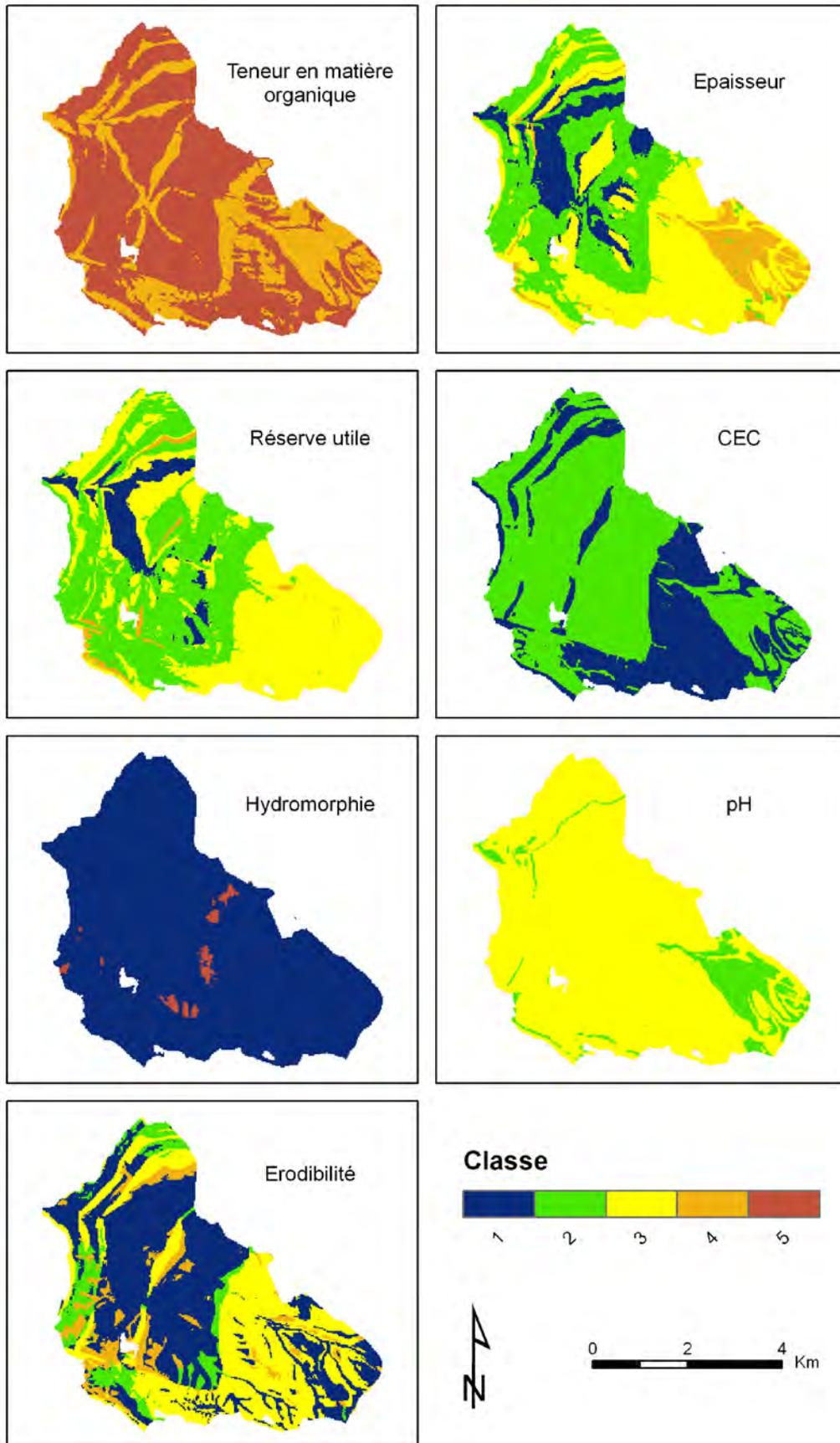


Figure 4 : Cartes des paramètres pédologiques prédits à l'aide de la méthode des arbres de classification.

Visuellement, des tendances assez similaires peuvent être observées pour les deux méthodes à l'échelle de la commune. Les cartes sont en particulier très proches pour le pH. Des différences importantes apparaissent néanmoins pour le paramètre érodibilité.

La taille des unités produites par les arbres de classification *Random Forests* est plus grande que celles prédites par l'AFD. Les règles de décision issues des arbres de classification pourraient ainsi être plus robustes que celles issues de l'AFD.

d. Validation

Validation interne

Dans le cas de l'analyse factorielle discriminante, la précision totale est moyenne à bonne, allant de 43 à 100 % (**Figure 4**). Elle est globalement plus faible pour les formations lithologiques représentant de larges surfaces (*i.e.* argiles et grès, colluvions) et donc hétérogènes des points de vue géomorphologique et pédologique. L'indice Kappa est globalement moyen pour l'ensemble des paramètres prédits (**Figure 5**). Il est en particulier faible pour l'érodibilité et la réserve utile pour laquelle il atteint parfois 0. Ces résultats sont à mitiger, l'indice kappa étant connu comme sensible à la symétrie de la distribution des observations dans la matrice de confusion (Lantz et Nebenzahl, 1996). Il peut alors atteindre des valeurs faibles pour une précision totale élevée si les classes à prédire ne sont pas distribuées de façon homogène (une classe plus représentée qu'une autre). C'est le cas pour le paramètre réserve utile des calcaires et des poudingues, où seuls quelques pixels ont en réalité été mal classés. Enfin, l'utilisation des cas favorables, défavorables ou moyens dans la zone d'apprentissage influe de manière importante sur la qualité de la prédiction des paramètres érodibilité et, dans une moindre mesure, la CEC (**Figure 5**).

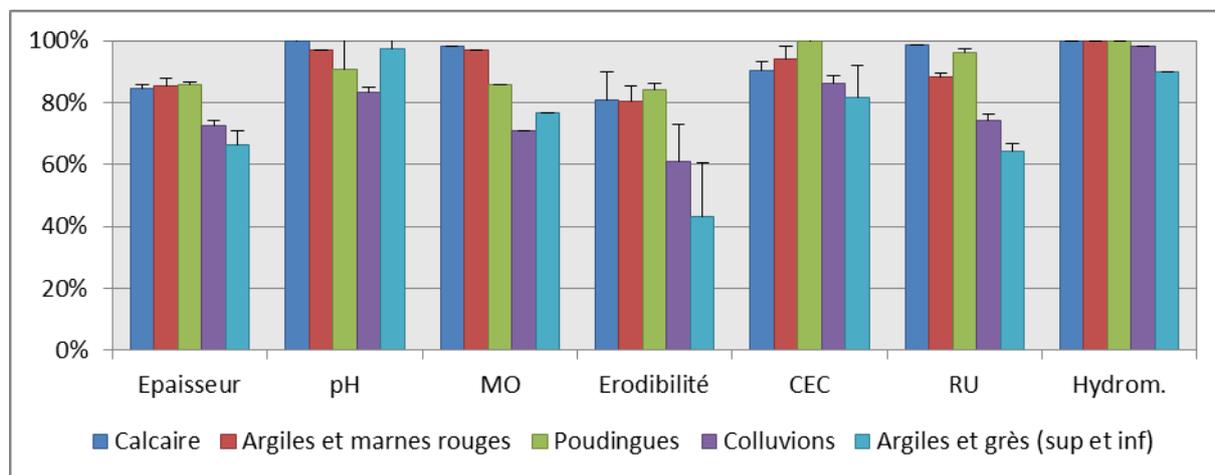


Figure 5 : Précision totale dérivée de la matrice de confusion de la validation interne (méthode de l'analyse factorielle discriminante, cas moyen et écart-type de la précision totale des cas favorable, défavorable et moyen).

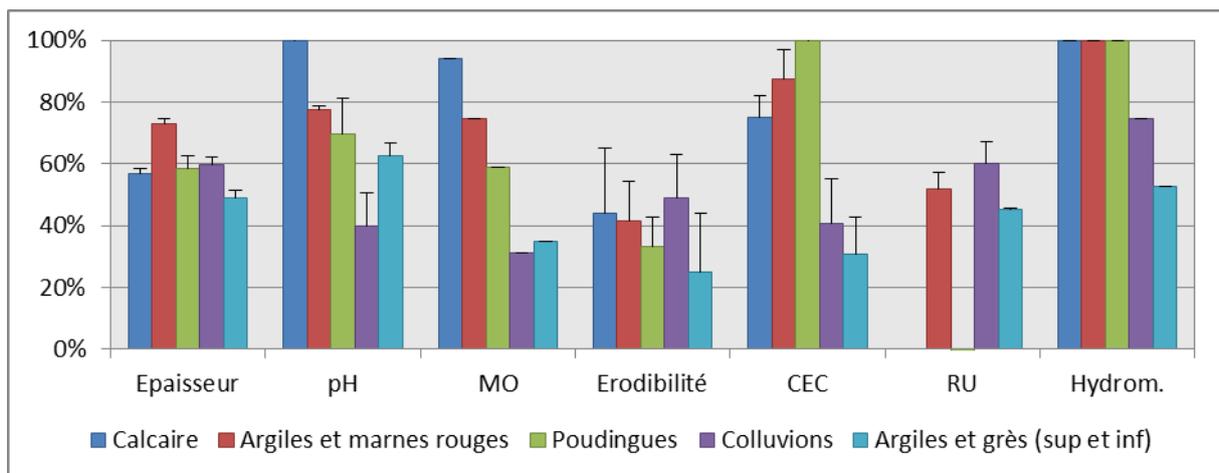


Figure 6 : Indice Kappa dérivé de la matrice de confusion de la validation interne (méthode de l'analyse factorielle discriminante, cas moyen et écart-type de l'indice Kappa des cas favorable, défavorable et moyen).

Dans le cas de la prédiction par arbres de classification, le modèle semble mieux s'adapter aux données de la zone d'apprentissage que l'AFD (**Figure 6**). La précision totale est très bonne, allant de 91,7 à 100 %. La méthode semble tout aussi bien capable de prédire les cas favorables, défavorables ou moyens de chacun des paramètres et pour toutes les lithologies. L'indice Kappa montre lui aussi de fortes valeurs, allant de 0,7 à 1, indiquant que les pixels bien classés ne le sont pas majoritairement par chance (**Figure 7**). De faibles valeurs de l'indice Kappa pour la réserve utile semblent, comme pour l'AFD, liées à la distribution des données dans la matrice de confusion. Les très bons résultats obtenus, notamment pour la précision totale, peuvent néanmoins refléter un possible surapprentissage, c'est-à-dire que le modèle ne s'adapte pas seulement aux tendances présentes dans le jeu de données, mais aussi au bruit de fond.

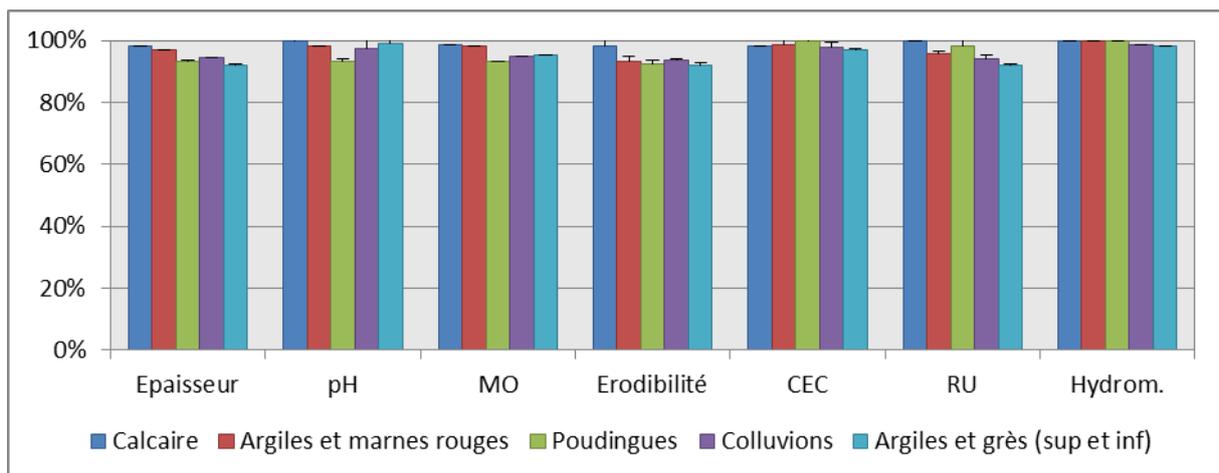


Figure 7 : Précision totale dérivée de la matrice de confusion de la validation interne (méthode des arbres de classification, cas moyen et écart-type de la précision totale des cas favorable, défavorable et moyen).

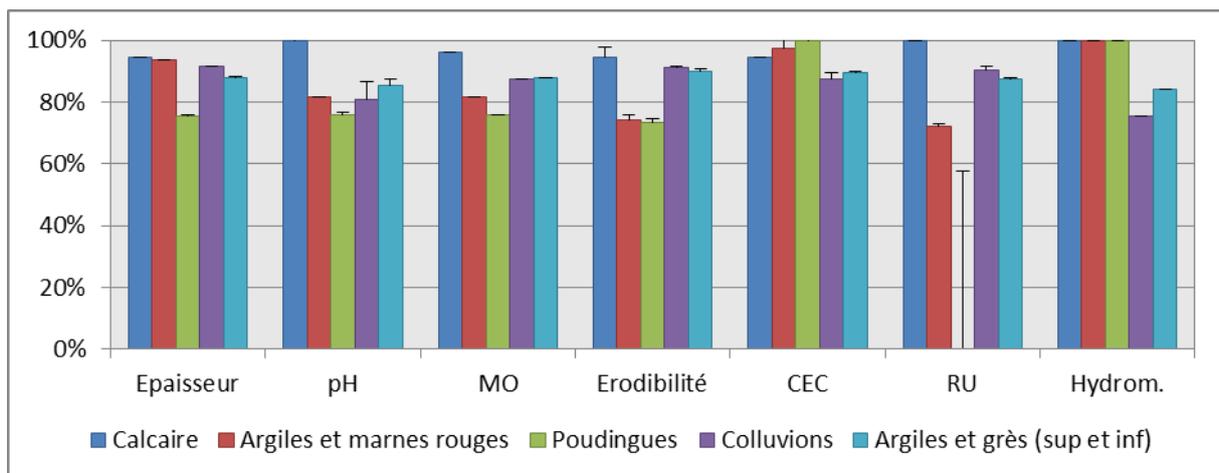


Figure 8 : Indice Kappa dérivé de la matrice de confusion de la validation interne (méthode des arbres de classification, cas moyen et écart-type de l'indice Kappa des cas favorable, défavorable et moyen).

Validation externe, à l'aide des données de terrain

Les valeurs prédites sont comparées aux valeurs réelles issues de campagnes de terrain à l'aide de deux indices, l'erreur moyenne (éq. 3) et l'erreur absolue moyenne (éq. 4). Il est ainsi possible de vérifier que les paramètres du sol peuvent effectivement être prédits dans ce contexte par des méthodes de cartographie numérique à l'aide des données à disposition, et d'identifier laquelle des méthodes testées, de l'analyse factorielle et des arbres de classification, est la plus efficace. Enfin, afin d'examiner la qualité des données d'entrée, les paramètres extraits de la carte pédologique de Rousset (Société du Canal de Provence, 1970) sont également soumis à comparaison avec les données de sites échantillonnés dans le cadre de notre étude.

La comparaison des erreurs moyennes est donnée en **Figure 8**. La réserve utile, la CEC et l'érodibilité, l'épaisseur et la présence d'hydromorphie ont tendance à être sous-estimées par les deux méthodes de prédiction mises en œuvre, tandis que la teneur en matière organique a tendance à être surestimée.

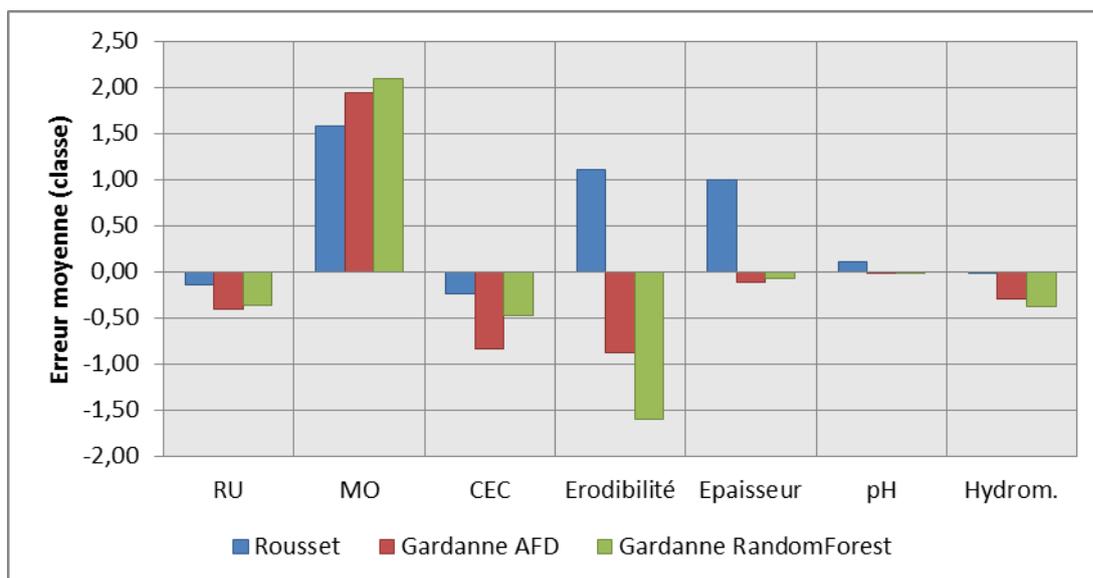


Figure 9 : Erreurs moyennes (cas moyen).

Les erreurs absolues moyennes peuvent être observées en figure 9. Les meilleures prédictions sont obtenues pour le pH. Ce paramètre est en effet facile à prédire sur la zone d'étude, car il ne présente que peu de variabilité. La réserve utile, l'érodibilité et l'épaisseur sont quant à eux prédits avec une erreur absolue moyenne de plus d'une classe, et la teneur en matière organique avec plus de deux classes. Les arbres de classification produisent des résultats légèrement meilleurs que l'AFD pour l'estimation de la réserve utile, de la CEC, de l'épaisseur et de l'hydromorphie, et équivalents pour le pH.

Les différences absolues moyennes entre les valeurs extraites de la carte pédologique de Rousset et les sites échantillonnés à Rousset ne sont pas négligeables, supérieures à une classe pour la réserve utile, la teneur en matière organique, l'érodibilité et l'épaisseur (**Figure 9**, « Rousset »). Les erreurs absolues moyennes apparaissent aussi élevées que les prédictions issues de l'AFD et des arbres de classification à Gardanne (**Figure 9**). Les erreurs de prédiction observées sont alors sans doute fortement dépendantes des données d'entrée utilisées. Ceci est tout d'abord attribué à l'hétérogénéité des unités de sols décrites sur la carte pédologique. Les sites échantillonnés peuvent ainsi ne pas être bien représentatifs de l'unité considérée. Les méthodes d'acquisition des différents paramètres peuvent également être la cause de ces différences. Par exemple, en ce qui concerne la profondeur du sol, la carte pédologique de Rousset l'estime « à partir de l'épaisseur du ou des horizons meubles facilement accessibles aux racines des végétaux cultivés » (Société du Canal de Provence, 1970), alors que les profondeurs sont relevées jusqu'au substrat ou la roche mère pour les sites échantillonnés dans le cadre de cette étude. Des méthodes d'estimation différentes sont sans doute également en cause en ce qui concerne la réserve utile. Les erreurs absolues moyennes importantes obtenues pour l'érodibilité et la réserve utile cumulent par ailleurs les erreurs issues des données d'apprentissage (carte pédologique de Rousset), car ce sont des paramètres composites. Il convient également d'ajouter que la carte pédologique de 1970 (Société du Canal de Provence) a été établie sur la base de sondages dans des sols agricoles uniquement. Les sites échantillonnés dans le cadre de notre étude concernent quant à eux plusieurs types d'occupations du sol. Ainsi, les teneurs en matière organique des sols agricoles de Rousset étant de façon générale assez faibles, les teneurs prédites à Gardanne le sont aussi, même pour les sols forestiers.

Certains paramètres, comme le taux de matière organique, semblent difficiles à prédire à l'aide des méthodes mises en œuvre. Ainsi, partant du postulat que les valeurs de paramètres observées peuvent être majoritairement dépendantes de l'usage du sol, on a tenté de prédire les valeurs de paramètres à Gardanne à l'aide de la moyenne des sites échantillonnés à Gardanne et à Rousset en fonction de leur usage. L'utilisation de la moyenne en fonction de l'usage du sol donne de bons résultats, bien meilleurs que ceux issus de l'AFD et des arbres de classification en ce qui concerne le taux de matière organique, et légèrement meilleurs en ce qui concerne la réserve utile, la CEC et l'épaisseur (**Figure 9**, « Gardanne Usages »). En effet, il est possible d'observer qu'à Gardanne la localisation géographique des différentes occupations du sol est très liée aux types de sols et aux lithologies en présence (*i.e.* agriculture sur sols développés sur argile, forêts et milieux semi-naturels sur sols développés sur calcaire, zones urbanisées denses sur les zones planes principalement). Cette méthode n'est par ailleurs pas affectée par des données d'entrée de la carte pédologique de Rousset comme c'est le cas pour l'AFD et les arbres de classification, ce qui permet une meilleure prédiction.

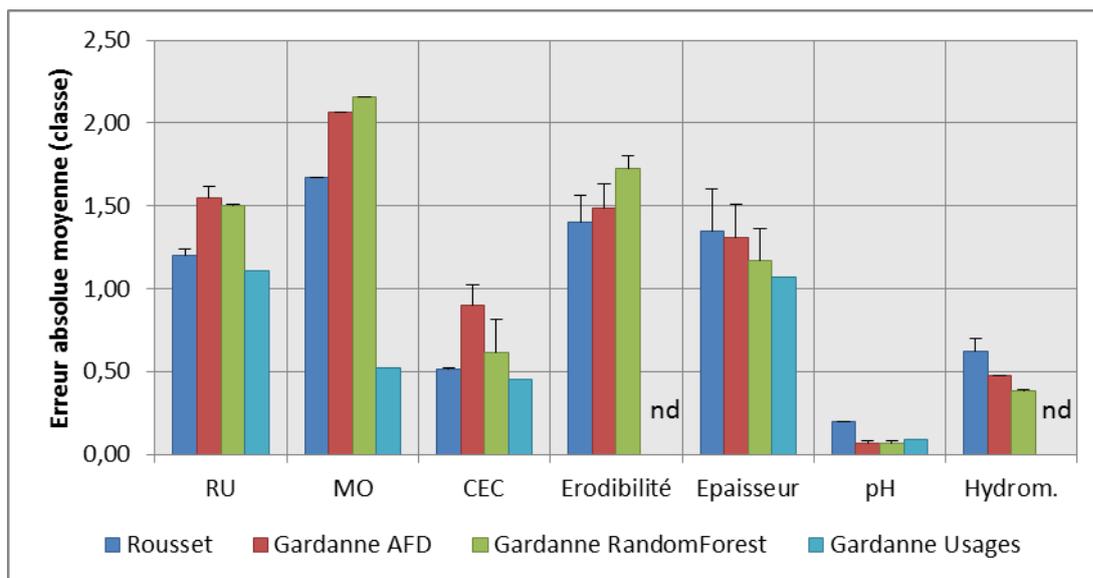


Figure 10 : Erreurs absolues moyennes tous usages pris en compte (cas moyen et écart-type de l'erreur absolue moyenne des cas favorable, défavorable et moyen).

La **Figure 9** présentant les résultats tous usages pris en compte, l'on s'est ensuite intéressé à la part d'erreur liée aux usages agricoles et naturels d'une part et liée aux usages urbains d'autre part pour les prédictions issues de l'AFD (**Figure 10**), des arbres de classification (**Figure 11**) et des moyennes par usages (**Figure 12**).

Les erreurs apparaissent ainsi essentiellement occasionnées par les usages urbains pour la CEC et la présence d'hydromorphie pour les prédictions issues de l'AFD (**Figure 10**). Ce sont au contraire les usages non urbains qui sont mis en cause dans le cas de l'érodibilité. Les mêmes tendances apparaissent dans le cas de la prédiction par les arbres de classification, mais de façon légèrement plus équilibrée (**Figure 11**). En ce qui concerne les moyennes par usages, la part d'erreur est pour l'essentiel liée aux usages urbains (**Figure 12**). La complexité et l'hétérogénéité des paramètres du sol en milieu urbain sont ainsi mis en évidence.

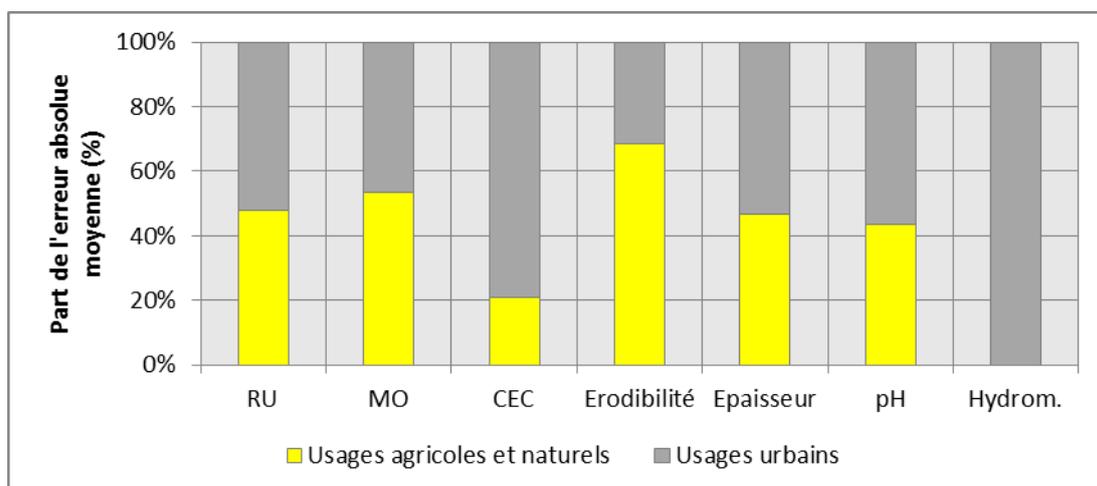


Figure 11 : Part de l'erreur absolue moyenne des usages agricoles et naturels par rapport aux usages urbains pour les prédictions issues de l'analyse factorielle discriminante.

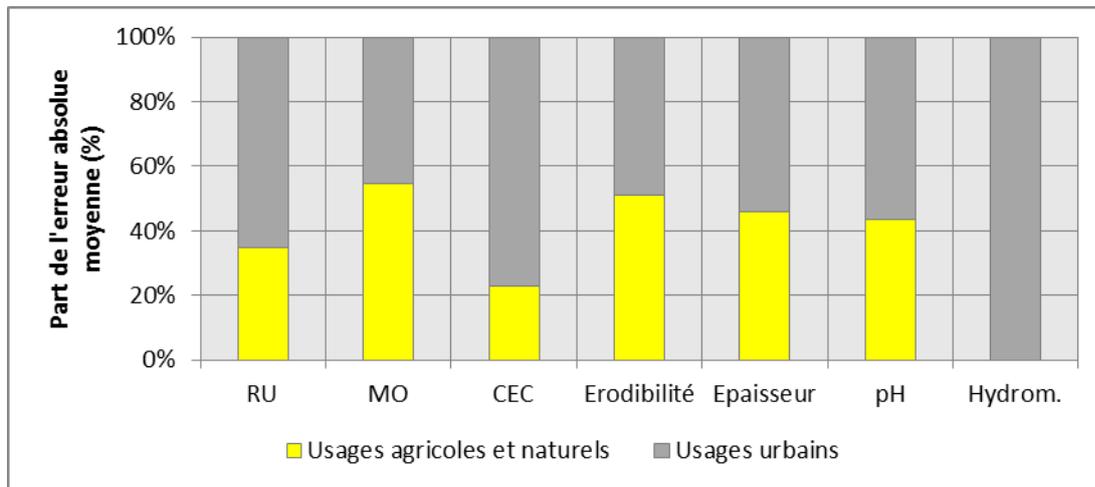


Figure 12 : Part de l'erreur absolue moyenne des usages agricoles et naturels par rapport aux usages urbains pour les prédictions issues des arbres de classification.

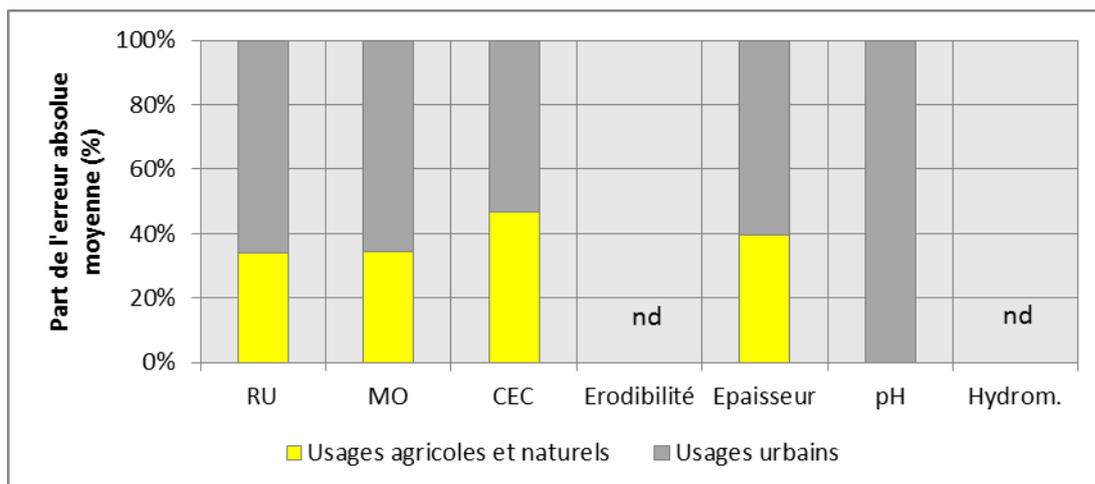


Figure 13 : Part de l'erreur absolue moyenne des usages agricoles et naturels par rapport aux usages urbains pour les prédictions issues de moyennes par usages.

Synthèse

L'observation des cartes de paramètres produites par les deux méthodes de prédiction (**Figure 2 ; Figure 3**) donnent des tendances similaires à l'échelle de la commune, sauf pour le paramètre érodibilité. Du point de vue spatial, les arbres de classification génèrent globalement des unités de plus grande taille que l'AFD, indiquant une meilleure généralisation des règles de construction établies. En ce qui concerne l'étape de validation interne, les arbres de classification *Random Forests* produisent de meilleurs résultats que l'AFD, par des valeurs de précision totale et d'indice Kappa bien plus élevés. Ceci peu néanmoins traduire un problème de surapprentissage. En validation externe, la qualité des prédictions apparaît sensiblement équivalente pour les deux méthodes. Leur qualité est largement influencée par la qualité des données d'entrée issues de la carte pédologique de Rousset.

Principalement sur la base de la validation interne, la méthode de prédiction utilisée dans le reste du travail est celle des arbres de classification pour le cas moyen. La teneur en matière organique semble néanmoins difficile à prédire par ces méthodes. On préfère alors l'estimer à partir d'informations sur l'occupation du sol.

Références bibliographiques spécifiques à l'annexe

- Antoni, V., Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Zaidi, N., Laroche, B., Barthès, S., Daroussin, J., Arrouays, D., 2006. Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un référentiel régional pédologique au 1/25000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et Gestion des Sols* 13 (3), 201-222.
- Behrens, T., Zhu, A.X., Schmidt, K., Scholten, T., 2010. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma* 155 (3-4), 175-185.
- Beven, K., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Bulletin of Hydrologic Sciences* 24 (1), 43-69.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning* 45 (1), 5-32.
- Debella-Gilo, M., Etzelmuller, B., 2009. Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway. *CATENA* 77 (1), 8-18.
- Dragut, L., Schauppenlehner, T., Muhar, A., Strobl, J., Blaschke, T., 2009. Optimization of scale and parametrization for terrain segmentation: An application to soil-landscape modeling. *Computers & Geosciences* 35 (9), 1875-1883.
- ESRI, 2006. ArcGIS Desktop Help 9.2.
- Fleiss, J., 1981. *Statistical methods for rates and proportions*, 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Grinand, C., Arrouays, D., Laroche, B., Martin, M.P., 2008. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma* 143 (1-2), 180-190.
- Hubert, M., 1994. *The digital geo-ecological map - Concepts, GIS-methods and case studies: Physiogeographica*, Basel, 144 p.
- IGN, CRIGE-PACA, 2008. Base de données altimétriques, BD ALTI, MNT 25 m, v. beta. Institut National Géographique.
- IGN, MEEDDM, Agences de l'Eau, 2010. Base de données sur la CARTographie THématique des Agences de l'eau et du ministère de l'Environnement, BD CARTHAGE, v. 3.0. Institut National Géographique.
- Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, New York, 281 p.
- Lantz, C.A., Nebenzahl, E., 1996. Behavior and interpretation of the kappa statistic: Resolution of the two paradoxes. *Journal of Clinical Epidemiology* 49 (4), 431-434.
- Liaw, A., Wiener, M., 2010. randomForest v. 4.6-2, package pour R.
- McBratney, A.B., Santos, M.L.M., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117 (1-2), 3-52.
- McKenzie, N.J., Ryan, P.J., 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89 (1-2), 67-94.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A., Petersen, G.A., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal* 57 (443-452).

- Moran, C.J., Bui, E.N., 2002. Spatial data mining for enhanced soil map modelling. *International Journal of Geographical Information Science* 16 (6), 533-549.
- Schmidt, K., Behrens, T., Scholten, T., 2008. Instance selection and classification tree analysis for large spatial datasets in digital soil mapping. *Geoderma* 146 (1-2), 138-146.
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O.A., 2005. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Ecological Modelling* 181 (1), 1-15.
- Smith, M.P., Zhu, A.X., Burt, J.E., Stiles, C., 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma* 137 (1-2), 58-69.
- Société du Canal de Provence, 1970. Etude pédologique moyennement détaillée des secteurs de Puyloubier, Pourrières, Pourcieux.
- Thomas, A.L., King, D., Dambrine, E., Couturier, A., Rogue, J., 1999. Predicting soil classes with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma* 90 (3-4), 291-305.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000. Chap. 1: Digital terrain analysis, pp. 87-132. *In: Wilson, J. P., Gallant, J. C. (Eds), Terrain Analysis: Principles and applications, Wiley, New York.*

Annexe II-12 : Analyses microbiologiques

1. Préambule et introduction

Ce travail méthodologique a fait l'objet d'un financement par l'OHM-BMP. Nous avons cherché à améliorer l'exhaustivité de la description des sols de la zone urbaine et péri-urbaine et, éventuellement, permettre la mise en évidence de caractéristiques particulières à ces sols. C'est pourquoi nous avons inclus dans les paramètres descriptifs de l'indice, un panel de paramètres microbiologiques (voir **Annexe II-8**). Cependant, dans le cadre d'échantillonnage de grande ampleur il n'est pas toujours possible de procéder selon les standards habituels et il faut s'attendre à une très grande hétérogénéité des échantillons d'un point de vue microbiologique. En effet, le jeu de sols échantillonné est très hétérogène et nécessite d'adapter les protocoles afin de caractériser de la même manière des sols agricoles, forestiers et des sols collectés dans des plates-bandes, des cours ou des jardins potagers.

Afin d'illustrer ces difficultés et d'optimiser la méthode, nous avons en premier lieu choisi la technique des plaques Biolog qui permettent d'étudier la diversité fonctionnelle des communautés bactériennes des sols. Cette technique est souvent choisie pour sa facilité et sa rapidité d'utilisation mais des difficultés d'interprétation sont connues et largement discutées dans la littérature (Preston-Mafham *et al.*, 2002 ; Stefanowicz, 2006). Une question essentielle est la quantité de bactéries inoculées. En effet, à masse de sol égale, la quantité de bactéries peut varier fortement d'un sol à l'autre. La respiration bactérienne (mesurée par absorbance et liée au changement de couleur d'un indicateur) étant fortement corrélée à la biomasse bactérienne, les résultats peuvent s'en trouver faussés. D'autres problèmes quant à l'extraction des biofilms bactériens dans les milieux argileux sont également connus. Il est donc important de procéder à des tests pour identifier un protocole donnant des résultats fiables et reproductibles.

D'autre part, les échantillons sont prélevés à des degrés d'humidité variable et/ou stockés frais ou secs. Il est intéressant de vérifier la variabilité introduite par le paramètre humidité et la validité de la mesure de la respiration en conditions d'humidité standardisée des échantillons.

Les objectifs d'ordre méthodologique sont donc :

- d'établir un protocole de traitement des échantillons afin de limiter le biais associé au stockage plus ou moins long des échantillons ;
- d'évaluer l'intérêt – et la possibilité – de mesurer la respiration du sol en routine et d'en utiliser les résultats pour l'optimisation du protocole suivi pour l'approche Biolog.

Sachant que Biolog est basé sur la mesure de l'absorbance réalisée à plusieurs reprises sur une période d'incubation minimale d'une semaine, il est possible de dériver des courbes ainsi obtenues plusieurs indicateurs représentant la densité et/ou l'activité des communautés bactériennes et leur diversité : il s'agit donc d'identifier quels sont les indicateurs les plus porteurs d'information, à l'aide notamment d'outils statistiques.

2. Matériel et méthodes

Bien que les méthodes utilisées aient été présentées dans l'annexe dédiée à la méthodologie, pour plus de clarté, nous reprenons ici les méthodes utilisées dans le cadre de ce travail et le principe de traitement des données.

a. *Respiration*

Pour la mesure de la respiration basale du sol, 40 g de la fraction de terre fine (< 2 mm), préalablement ré-humidifiés à la capacité au champ, sont introduits dans des bouteilles étanches. Les échantillons sont incubés 4 jours à 20°C. La dépression d'O₂ causée par la respiration microbienne est enregistrée de façon continue à l'aide d'un appareillage OxiTop™. 20 mL de NaOH 0,2 M contenus dans des béchers et introduits dans les bouteilles permettent de capter le CO₂ produit. La concentration en CO₂ est mesurée par dosage colorimétrique du NaOH en excès sur une prise d'essai de 5 mL, par ajout d'HCl 0,2 M en présence de phénolphaléine et d'1 mL de BaCl₂ à 20 %.

b. *Diversité fonctionnelle des communautés bactériennes*

Principe

Les communautés bactériennes sont examinées à travers leur diversité fonctionnelle. La technique des plaques Biolog™ est choisie pour sa facilité et sa rapidité d'utilisation. Chaque plaque est composée de 32 puits, représentant six types de substrats sources de carbone pour les bactéries (amides/amines, amino-acides, hydrates de carbone, acides carboxyliques, polymères et divers). Le premier puits, ne contenant pas de substrat, constitue un puits témoin. Un indicateur coloré, le tétrazolium, est présent dans chaque puits. Sa réduction est provoquée par la respiration bactérienne et conduit à la formation de formazan, de couleur violette. Ainsi, c'est le changement de couleur des puits qui est suivi au cours de l'expérience par des mesures d'absorbance. L'intensité de la réponse est fonction de l'activité des bactéries dans les échantillons (Garland et Mills, 1991).

Protocole

Le protocole utilisé est inspiré du protocole développé par Floch (2008), adapté à un contexte méditerranéen. Un gramme de la fraction de terre fine, préalablement ré-humidifié à sa capacité au champ, est ajouté à 10 mL de solution stérile de pyrophosphate de sodium à 0,1 % (Na₄P₂O₇), agitée pendant 20 min. La solution résultante est diluée avec une solution stérile de NaCl à 0,85 % et utilisée pour inoculer les puits des plaques Biolog. Afin d'assurer une densité bactérienne semblable pour l'ensemble des échantillons, Chodak et Niklinska (2010) calibrent la dilution des suspensions de sols avant inoculation des plaques, à l'aide des résultats obtenus en respirométrie. Ainsi, dans notre protocole, l'échantillon possédant la valeur médiane du taux de CO₂ produit est dilué 100 fois dans NaCl. Les autres échantillons sont dilués de façon proportionnelle. Les plaques sont incubées à 25°C pendant 100 h. L'intensité de la couleur est mesurée à plusieurs reprises par spectrométrie à l'aide d'un lecteur de microplaques (spectrophotomètre Metertech Elisa Sigma 960), à une longueur d'onde de 595 nm.

Traitement des données

L'absorbance du puits témoin est soustraite de l'absorbance de chaque autre puits, afin de s'affranchir de l'effet de la couleur de la suspension de sol. Le calcul de l'AWCD (*Average Well Color Development*) est un indicateur de l'activité microbiologique. Il s'agit de la moyenne des absorbances des 31 puits, dont l'absorbance du puits témoin a été retranchée (Garland et Mills, 1991). Ce traitement des données est réalisé à chaque temps de mesure.

La mesure de l'absorbance ayant été réalisée à plusieurs reprises sur une période 100 h, une courbe d'évolution de l'AWCD dans le temps peut être tracée. Cette courbe est d'allure sigmoïde. Le modèle ajusté par régression non linéaire est une fonction de Gompertz, dont l'équation a été modifiée par

Zweitering *et al.* (1990) afin d'extraire facilement des paramètres ayant une signification biologique (éq. 1) :

$$y = A \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{\mu_m \cdot e}{A} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (\text{éq. 1})$$

Avec t : temps ;

y : AWCD à un temps t ;

μ_m : taux maximum de croissance spécifique, soit la pente de la tangente à la courbe au point d'inflexion ;

λ : temps de latence, soit l'interception par l'axe des abscisses de la tangente à la courbe au point d'inflexion ;

A : AWCD maximale.

Il est possible de dériver plusieurs descripteurs des courbes ainsi obtenues, mais aussi à partir des données d'absorbance ponctuelles relevées à chaque lecture de plaque. Ce sont :

- Les paramètres d'ajustement de la courbe μ_m , λ et A.
- Les temps d'incubation nécessaires pour arriver à une AWCD de 0,25 et de 0,5.
- L'aire sous la courbe, jusqu'à un temps maximal de 50, 100, 125 et 200 h.
- Le nombre de puits ayant réagi positivement à t = 50 et t = 100 h, c'est-à-dire présentant la couleur violette du formazan.
- L'indice de diversité de Shannon H' (éq. 2). Cet indice, d'utilisation classique dans le domaine de la biologie, a été utilisé dans de nombreuses études pour l'interprétation des données de plaques Biolog (Stefanowicz, 2006). Il est calculé aux temps t = 50 et t = 100 h.

$$H' = - \sum_{i=1}^N \frac{AWCD_i}{\sum AWCD} \cdot \ln \left(\frac{AWCD_i}{\sum AWCD} \right) \quad (\text{éq. 2})$$

Avec H' : indice de diversité de Shannon ;

AWCD : développement moyen de la couleur ;

i : puits ;

N : nombre total de puits.

c. Hydrolyse du diacétate de fluorescéine (FDA)

L'activité des hydrolases du diacétate de fluorescéine a été déterminée en mesurant l'hydrolyse du diacétate de fluorescéine (FDA) en fluorescéine selon la méthode modifiée de Green *et al.* (2006). Le milieu réactionnel est constitué de 1 g de sol, de 9 ml de tampon phosphate à 100 mM pH 7 et de 1 ml de FDA à 5 mM. En effet, d'après Alarcon-Gutiérrez *et al.* (2008) un tel pH empêche l'hydrolyse abiotique du FDA par certains acides aminés et groupements imidazoles pouvant être présents dans les sols. Après une incubation de 1 h à 37°C, la réaction est stoppée par l'ajout de 2 ml d'acétone. Après centrifugation 2 minutes à 12 000 g et à 4°C, la densité optique est mesurée à 490 nm. L'activité des FDAse est exprimée en μ mole de fluorescéine libérée par minute (U) et par gramme de matière sèche (U.g⁻¹ MS).

d. Traitements statistiques

Dans le but d'identifier lesquels des descripteurs sont les plus porteurs d'information, des outils statistiques sont utilisés. On s'intéresse notamment à l'importance de facteurs tels que l'occupation du sol et l'état de surface, à l'aide d'analyses de variance et de comparaisons multiples.

3. Résultats

a. Respiration

La droite de régression entre le taux de CO₂ produit et le taux d'O₂ consommé est présentée en **Figure 1**. Le coefficient de détermination R² est de 0,8.

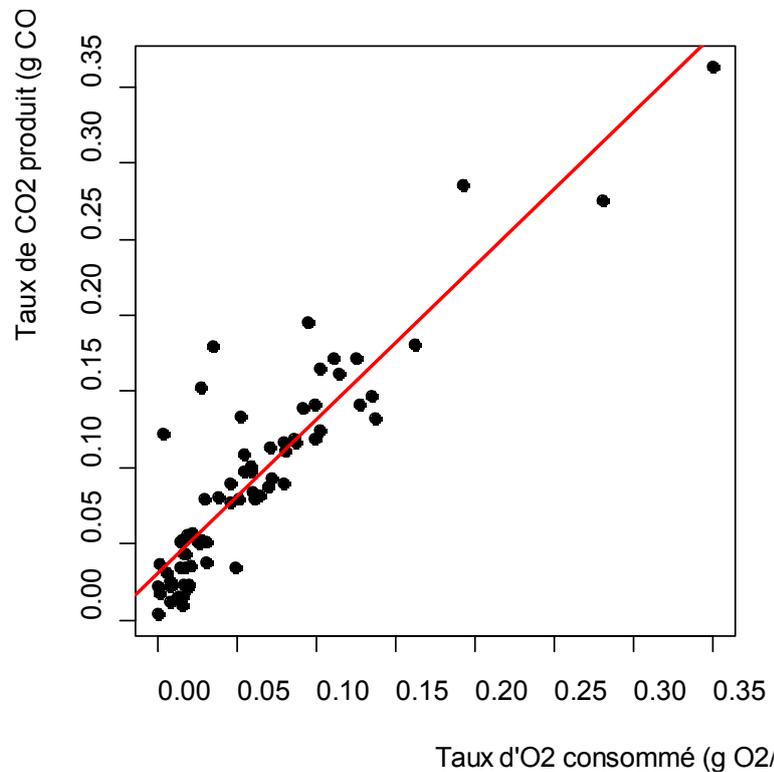


Figure 14 : Régression linéaire du taux de CO₂ produit et du taux d'O₂ consommé (n=85).

La distribution des valeurs des taux d'O₂ consommé et de CO₂ produit est présentée en fonction de l'état de surface (**Figure 2**) et de l'occupation du sol de niveau 1 (**Figure 3**). Il est possible d'observer un fort taux de respiration pour les surfaces végétalisées par rapport aux sols nus et artificialisés (**Figure 2**). La variabilité des réponses peut néanmoins être forte. En ce qui concerne l'occupation du sol (**Figure 3**), les plus forts taux de respiration sont rencontrés pour les forêts et milieux semi-naturels. Les territoires agricoles et les territoires artificialisés montrent des réponses semblables – des taux de respiration faibles – avec une plus grande variabilité pour les territoires artificialisés. Le paramètre état de surface semble ainsi mieux discriminer les valeurs de respiration observées que l'occupation du sol. En effet, l'occupation du sol mêle différents types de surface et est donc d'échelle plus grossière.

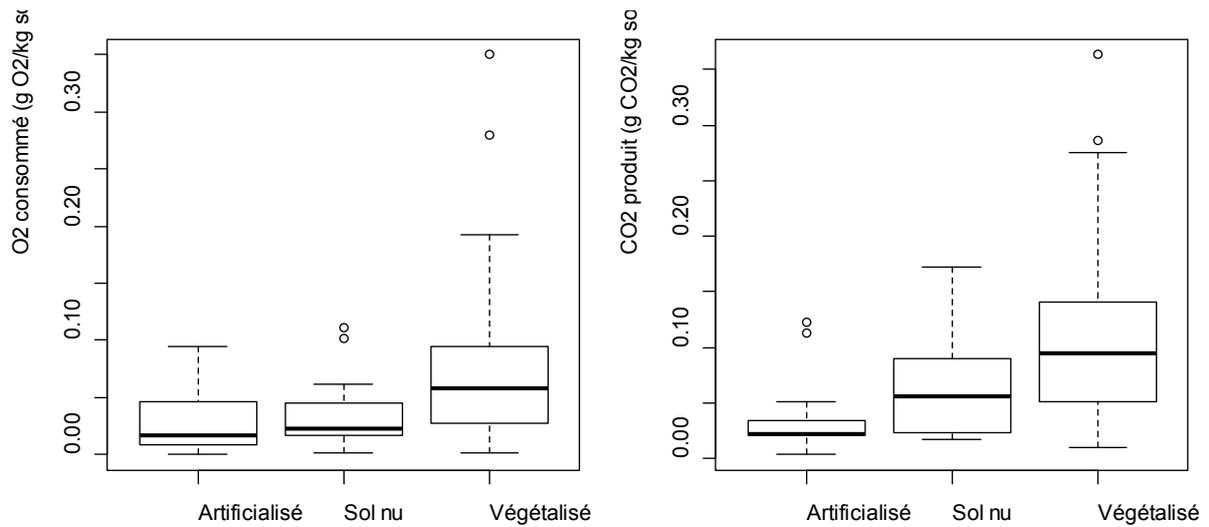


Figure 15 : Taux de respiration en fonction de l'état de surface (n=85).

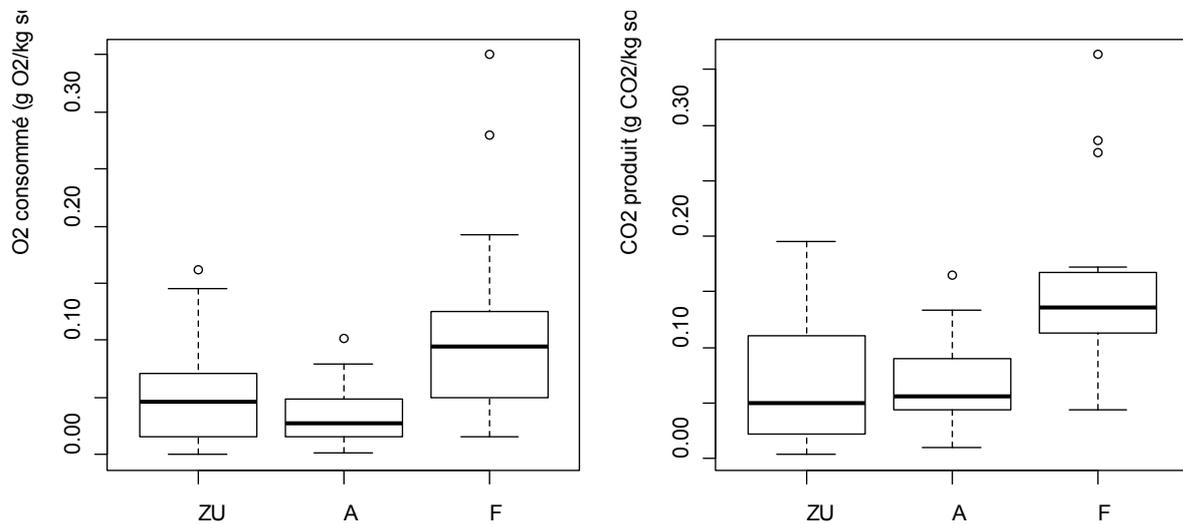


Figure 16 : Taux de respiration en fonction de l'occupation du sol de niveau 1 (ZU : territoires artificialisés, A : territoires agricoles, F : forêts et milieux semi-naturels) (n=85).

b. Diversité fonctionnelle des communautés bactériennes

Distribution des paramètres

La distribution des variables d'ajustement des courbes d'AWCD (μ_m , λ et A) est donnée en **Figure 4**. Celle des variables de dénombrement (indice de diversité de Shannon et nombre de puits ayant réagi positivement aux temps $t = 50$ et $t = 100$ h) sont représentées en **Figure 5**. Celles des temps d'arrivée à une certaine AWCD et les aires sous la courbe sont respectivement données en **Figures 6 et 7**.

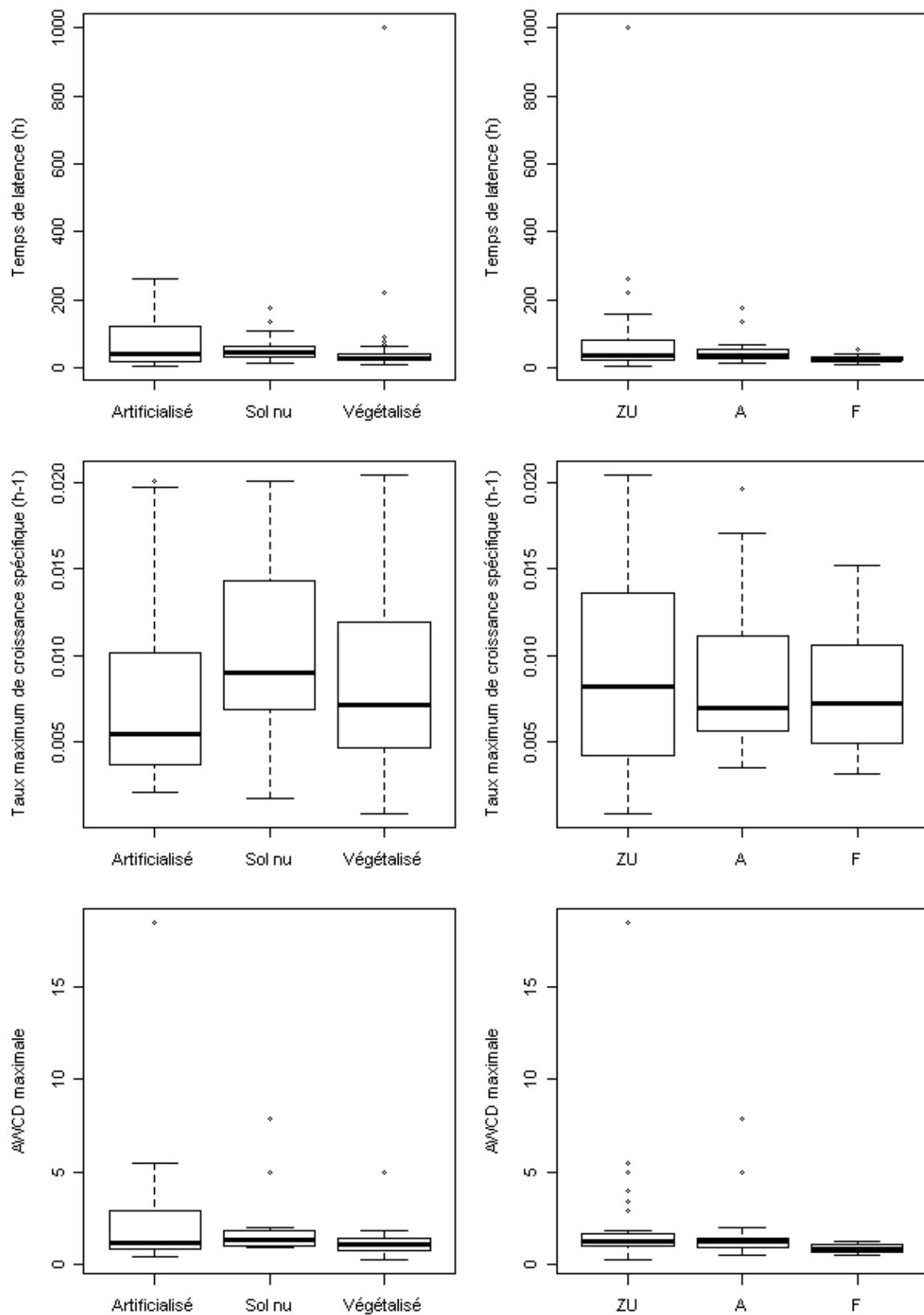


Figure 17 : Distribution des variables d'ajustement des courbes d'AWCD en fonction de l'état de surface et de l'occupation du sol de niveau 1 (ZU : territoires artificialisés, A : territoires agricoles, F : forêts et milieux semi-naturels) (n=85).

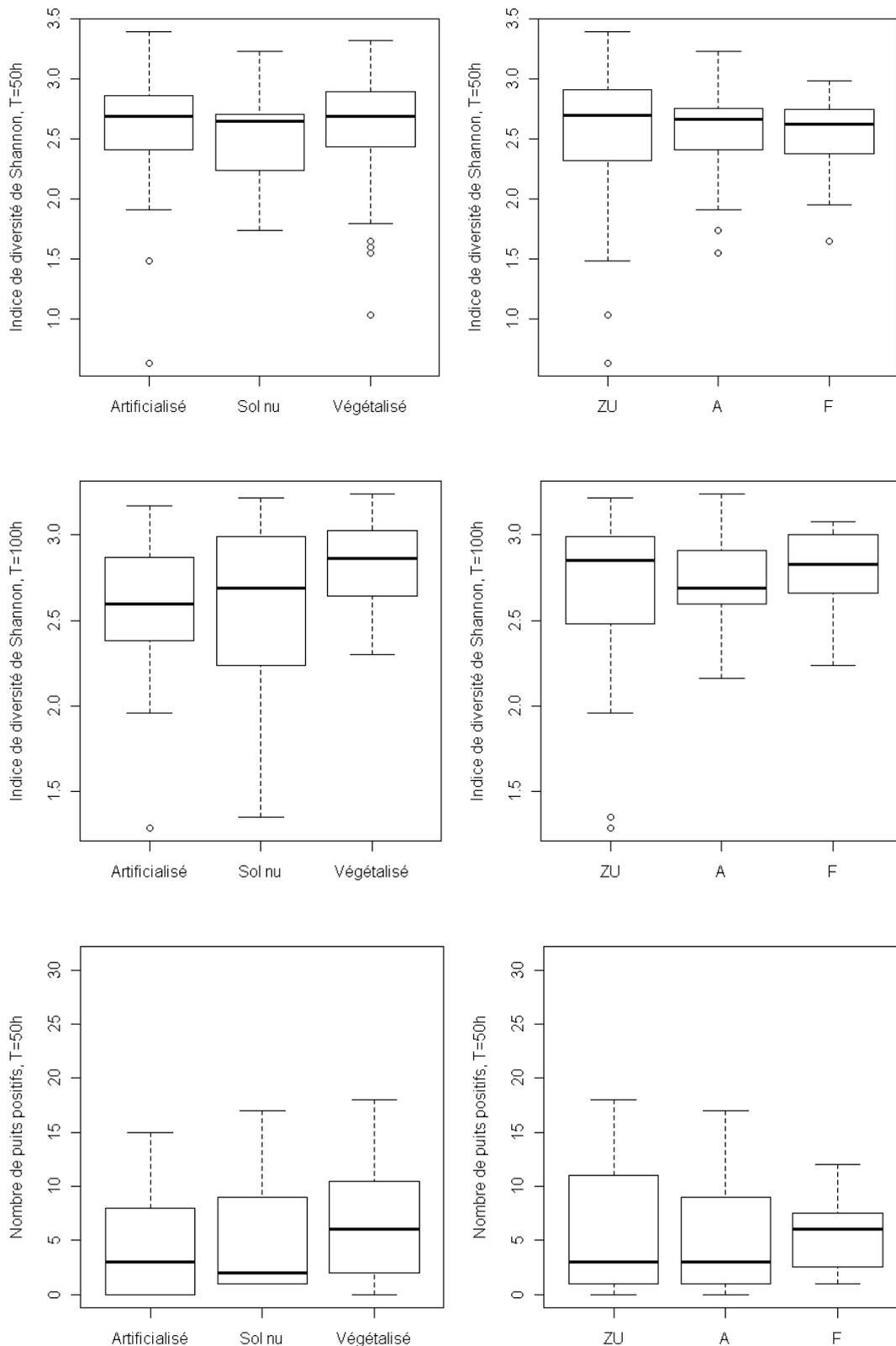


Figure 18: Distribution des variables de dénombrement en fonction de l'état de surface et de l'occupation du sol de niveau 1 (ZU : territoires artificialisés, A : territoires agricoles, F : forêts et milieux semi-naturels) (n=85).

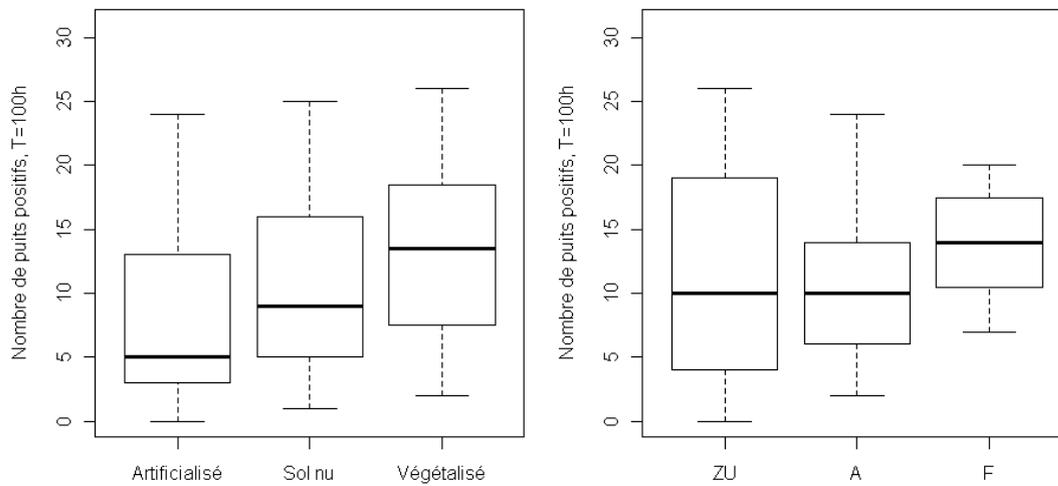


Figure 19 (suite): Distribution des variables de dénombrement en fonction de l'état de surface et de l'occupation du sol de niveau 1 (ZU : territoires artificialisés, A : territoires agricoles, F : forêts et milieux semi-naturels) (n=85).

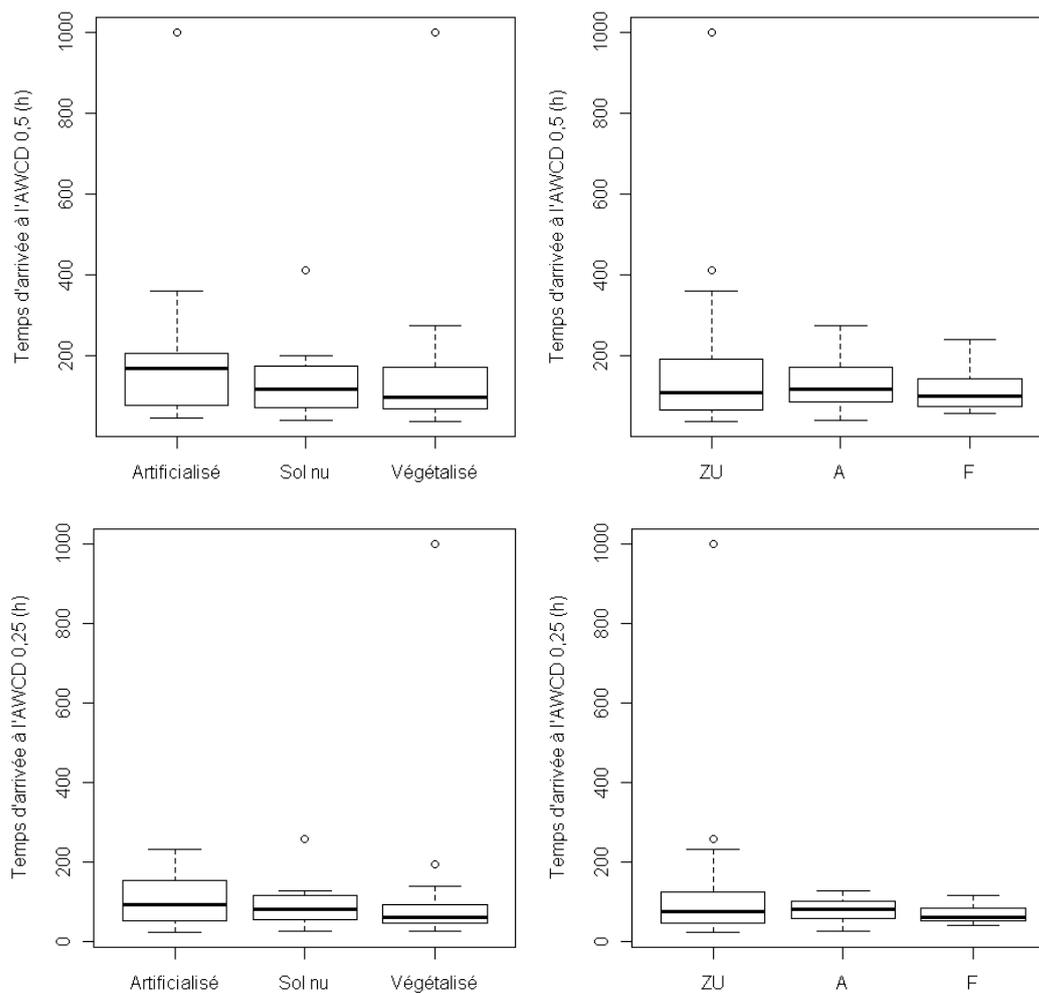


Figure 20 : Distribution des variables temps d'arrivée à l'AWCD 0,25 et 0,5 en fonction de l'état de surface et de l'occupation du sol de niveau 1 (ZU : territoires artificialisés, A : territoires agricoles, F : forêts et milieux semi-naturels) (n=85).

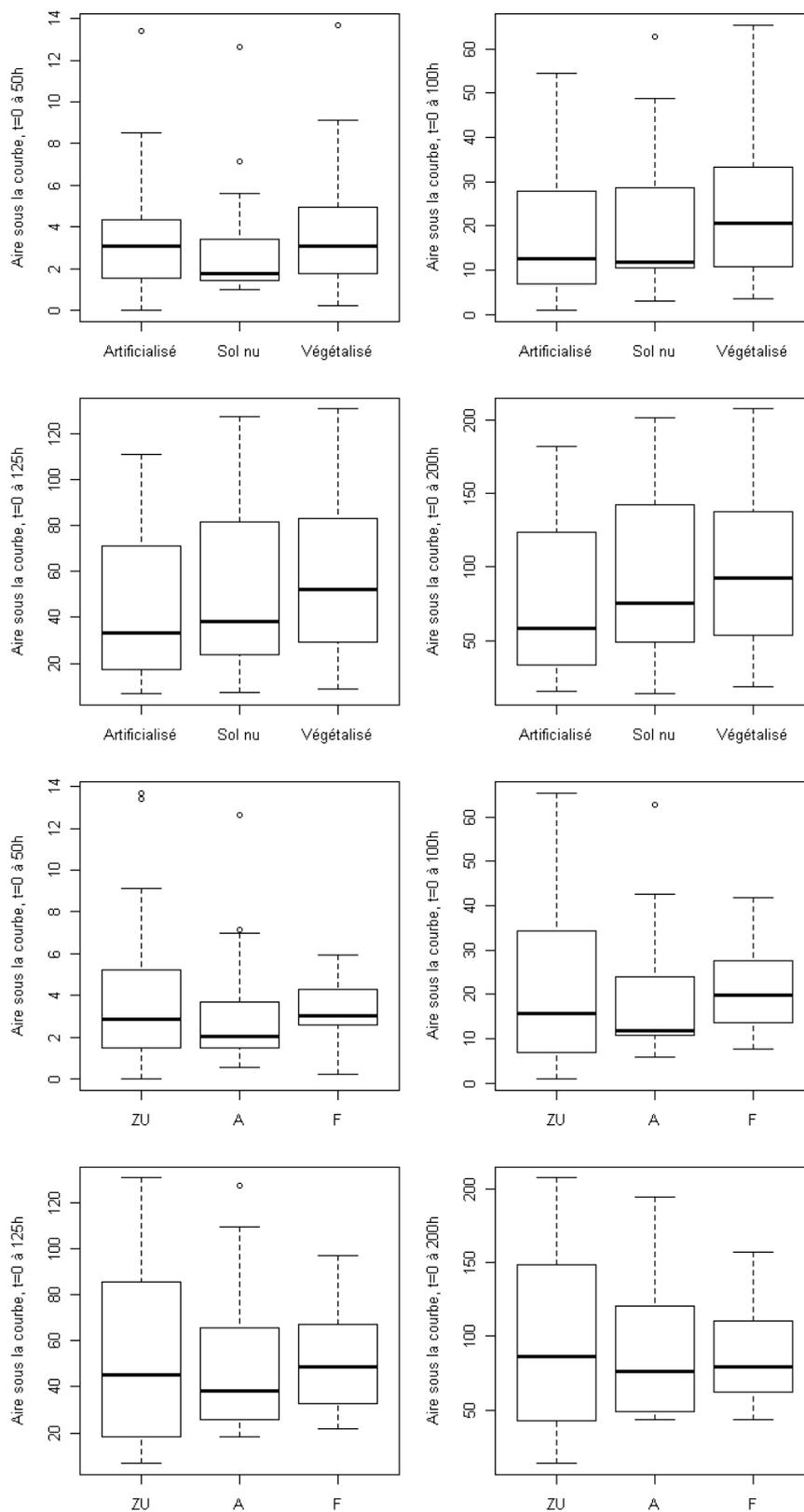


Figure 21 : Distribution des variables aire sous la courbe en fonction de l'état de surface et de l'occupation du sol de niveau 1 (ZU : territoires artificialisés, A : territoires agricoles, F : forêts et milieux semi-naturels) (n=85).

Evolution de l'AWCD au cours du temps

Les courbes de l'évolution de l'AWCD au cours du temps sont regroupées par occupation du sol (**Figure 8**) et par état de surface (**Figure 9**), afin d'identifier d'éventuelles tendances.

Les cinétiques d'évolution de l'AWCD en termes d'occupation du sol affichent des réponses différentes pour les trois occupations comparées (**Figure 8**). Les échantillons recueillis en territoires artificialisés montrent une grande variabilité des réponses. Certains échantillons n'ont qu'un faible développement de la couleur avec un temps de latence long et des taux maximum de croissance spécifique faibles. Les cas inverses peuvent également y être observés. Les réponses des territoires agricoles et des milieux forestiers présentent moins de variabilité, mais portent sur moins d'échantillons. Contrairement aux territoires artificialisés, le développement de la couleur y est systématique.

La comparaison des cinétiques de l'AWCD en termes d'états de surface est présentée en **Figure 9**. Les surfaces végétalisées et nues présentent des profils assez similaires, extrêmement variables, allant de développements de la couleur faibles à forts. Les surfaces artificialisées donnent surtout des réponses faibles, avec un temps de latence long et un taux maximum de croissance spécifique faible.

Si l'on s'attarde sur le cas des sols urbains, il est possible d'observer que les surfaces artificialisées sont celles qui produisent les réponses les plus faibles (**Figure 10**). Certains échantillons présentent néanmoins une forte diversité des communautés bactériennes (sites G19, R34, R39, R42), à la faveur d'un apport de matière organique par des plantes « pionnières » ou de la végétation arbustive environnante. En ce qui concerne les surfaces végétalisées, elles possèdent globalement une forte diversité, mais ceci n'est pas systématique (ex. : sites G8, G9, G17, G42, G48, G52, R30, R31). Les sols nus présentent quant à eux des réponses qui se superposent à celles des surfaces végétalisées et artificialisées. Cet état de sol nu n'est qu'un état transitoire, rarement stable dans le temps. Son évolution progressive vers un état végétalisé lui confère des caractéristiques microbiologiques parfois similaires aux surfaces végétalisées. A l'inverse, un sol nu subissant de fortes contraintes anthropiques, telles que la compaction ou la contamination limitant sa recolonisation par la végétation, se rapprochera du point de vue microbiologique d'un sol artificialisé.

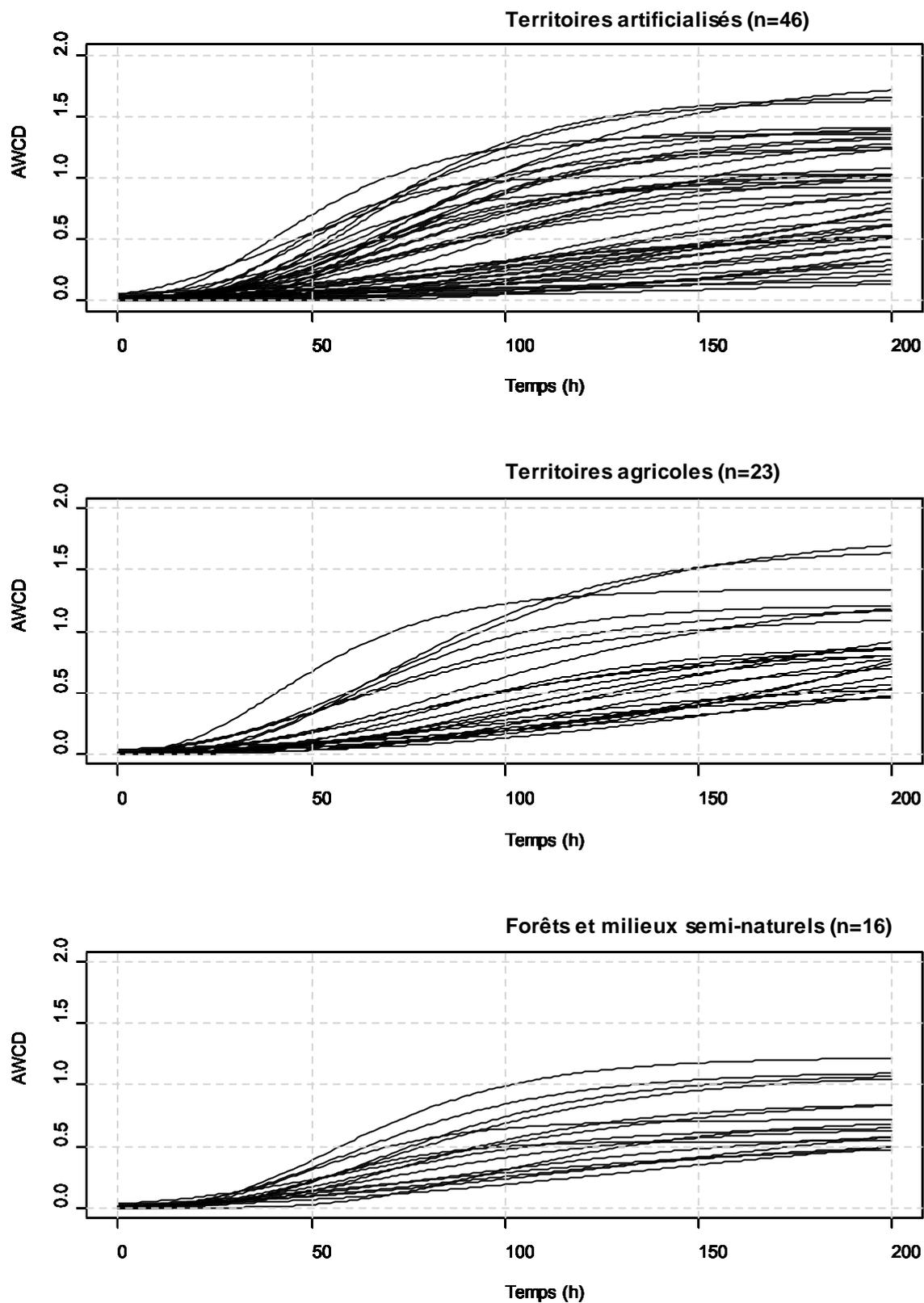


Figure 22 : Cinétique de l'AWCD en fonction de l'occupation du sol de niveau 1 (1 : territoires artificialisés, 2 : territoires agricoles, 3 : forêts et milieux semi-naturels).

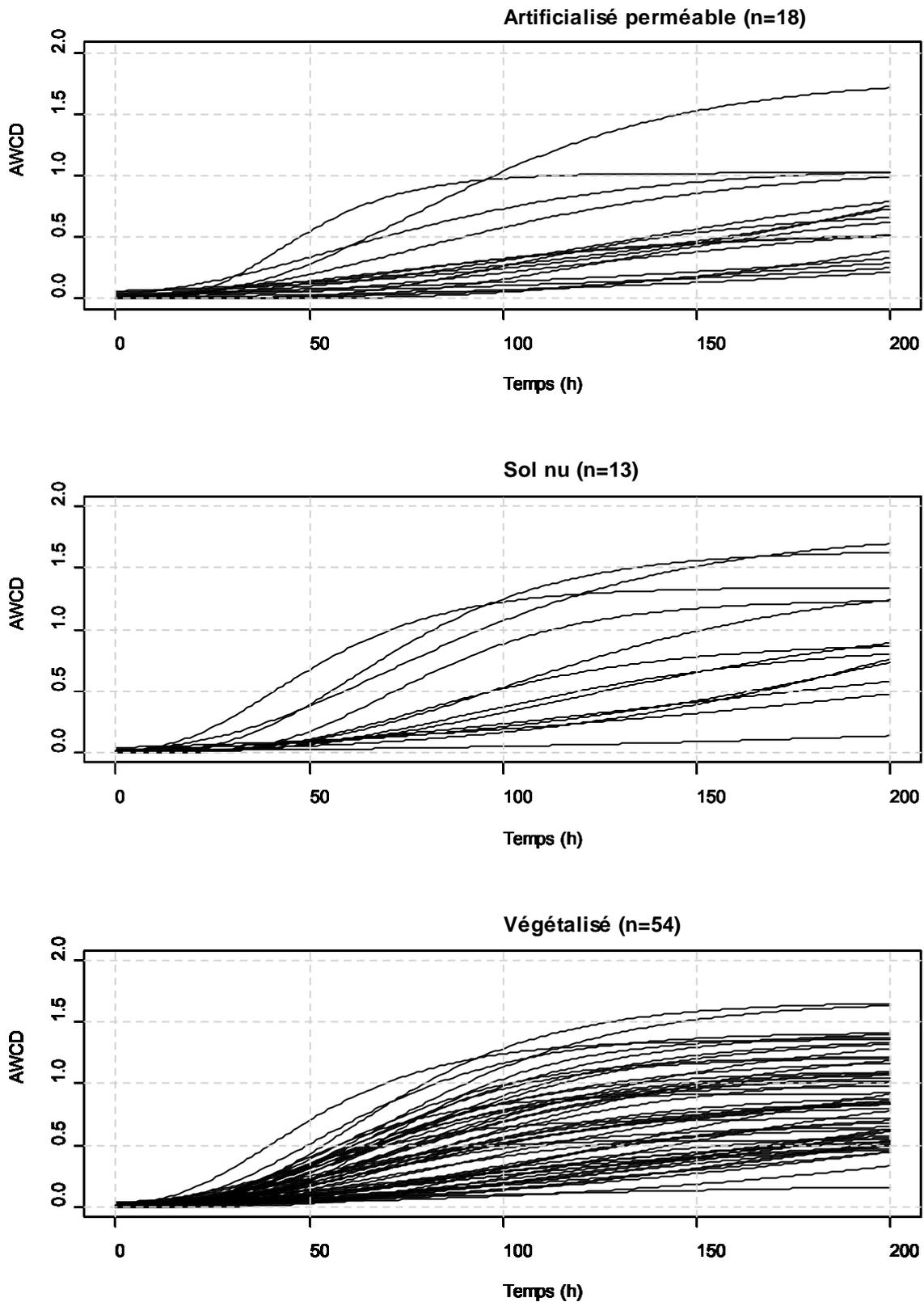


Figure 23 : Cinétique de l'AWCD en fonction de l'état de surface.

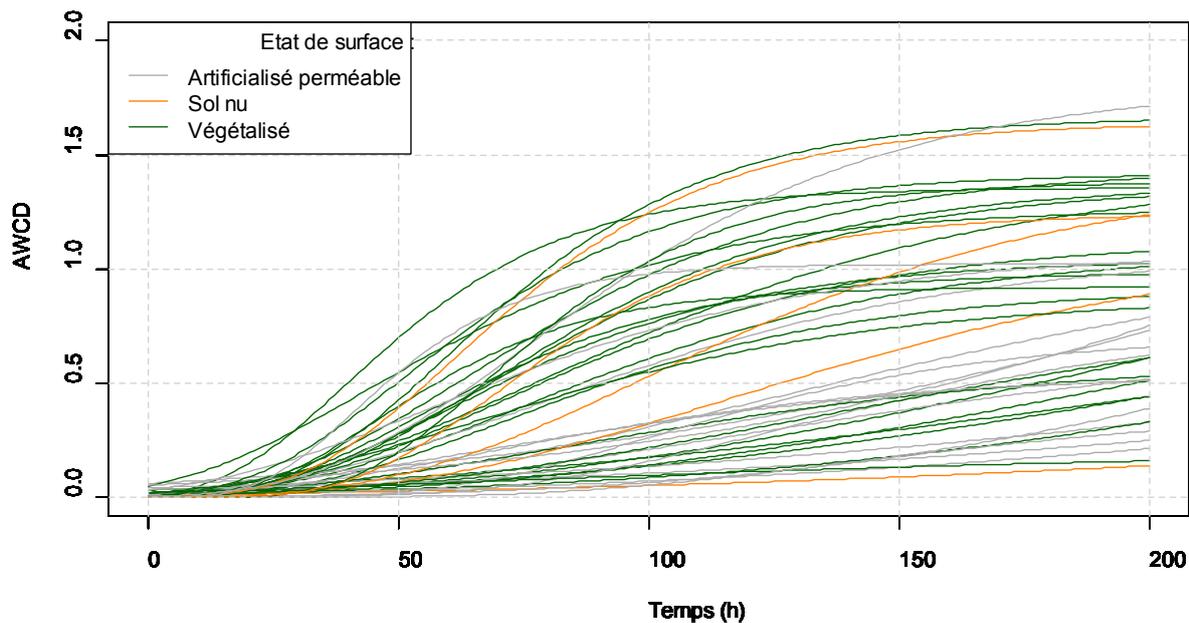


Figure 24 : Cinétique de l'AWCD de sols en milieu urbain, en fonction de l'état de surface (n=46).

c. Hydrolyse du diacétate de fluorescéine (FDA)

La distribution des résultats de l'hydrolyse du FDA en fonction de l'état de surface d'une part, et de l'occupation du sol d'autre part, sont présentés en Figure 11.

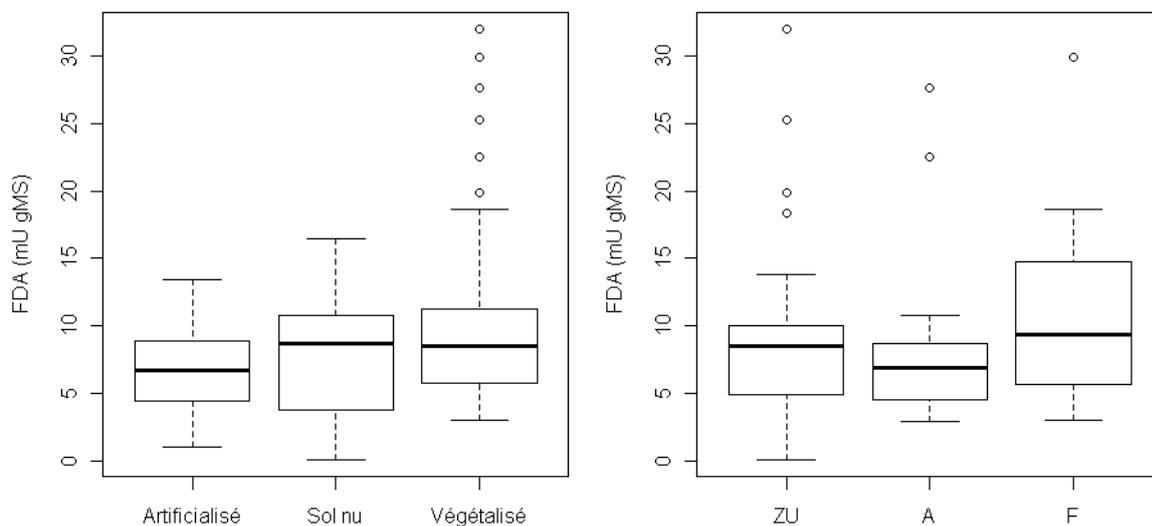


Figure 25 : Distribution des résultats de l'hydrolyse de la fluorescéine diacétate en fonction l'état de surface et de l'occupation du sol de niveau 1 (ZU : territoires artificialisés, A : territoires agricoles, F : forêts et milieux semi-naturels) (n=85).

d. Identification des variables les plus discriminantes

Les descripteurs calculés ne présentent que rarement une distribution normale intra-groupe (test de Shapiro-Wilk). L'homogénéité des variances intra-groupes est démontrée sur la plupart d'entre eux

(test de Lévène). Un test d'analyse de variance non paramétrique est ainsi mené : le test de Kruskal-Wallis associé à des comparaisons multiples de Dunn.

Lorsque les modalités testées concernent l'occupation du sol (**Tableau 1**), cinq descripteurs peuvent être retenus sur la base d'une probabilité < 5 % que l'hypothèse d'égalité des moyennes soit rejetée : le temps de latence, l'AWCD maximale, le nombre de puits positifs à t = 100 h et les deux variables de respirométrie.

Dans le cas de l'état de surface (**Tableau 2**), 12 descripteurs peuvent être retenus : l'indice de Shannon à t = 100 h, le temps de latence, l'AWCD maximale, le temps nécessaire pour arriver à une AWCD de 0,2 et de 0,5, le nombre de puits positifs à t = 50 et à t = 100 h, l'aire sous la courbe jusqu'à t = 100, t = 125 et t = 200 h, et les deux variables de respirométrie.

Au vu de ces tests, les données microbiologiques semblent plus dépendantes de l'état de surface que de l'occupation du sol, un plus grand nombre de paramètres permettant de décrire des différences entre les états de surface qu'entre des occupations du sol. Pourtant, aucun descripteur ne permet la différenciation univoque de l'ensemble des trois classes d'occupation du sol ou des états de surface. Les sols nus présentent par exemple des réponses intermédiaires entre les surfaces artificialisées et les surfaces végétalisées (**Tableau 2**, tests de Dunn).

Tableau 8 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis et de Dunn sur les descripteurs en fonction de l'occupation du sol de niveau 1 (n = 85 individus).

Variable	Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	p-value*	Artif.	Agricole	Forêt
BIOLOG_H_T50	0.883	36.01 a**	38.27 a	35.09 a
BIOLOG_H_T100	0.253	32.43 a	38.55 a	42.32 a
BIOLOG_LAMBDA	0.022	41.97 b	36.82 ab	24.43 a
BIOLOG_MU	0.508	34.13 a	40.73 a	35.72 a
BIOLOG_A	0.003	39.5 b	41.80 b	21.09 a
BIOLOG_AWCD025	0.097	32.96 a	42.00 a	29.69 a
BIOLOG_AWCD05	0.256	32.36 a	40.79 a	33.06 a
BIOLOG_NBPUITS_T50	0.131	40.77 a	31.29 a	41.69 a
BIOLOG_NBPUITS_T100	0.033	40.05 ab	30.00 a	45.44 b
BIOLOG_AIRE_T50	0.551	36.75 a	34.18 a	41.09 a
BIOLOG_AIRE_T100	0.176	39.36 a	31.79 a	42.56 a
BIOLOG_AIRE_T125	0.145	40.55 a	31.40 a	41.78 a
BIOLOG_AIRE_T200	0.155	41.18 a	31.47 a	40.75 a
RESPIRO_mO2	0.001	27.57 a	34.28 a	53.5 b
RESPIRO_mCO2	0.001	31.55 a	31.54 a	53.84 b
FDA	0.223	43.96 a	36.30 a	49.88 a

* Probabilité que l'hypothèse nulle H0 soit rejetée (H0 : les échantillons proviennent de la même population).

** Les chiffres représentent les moyennes des rangs pour chaque modalité. Une même lettre dans une ligne signifie qu'il n'y a pas de différence significative avec un intervalle de confiance de 95 %.

Tableau 9 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis et de Dunn sur les descripteurs en fonction de l'état de surface (n = 85 individus).

Variable	Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	p-value*	Artif.	Sol nu	Végétalisé
BIOLOG_H_T50	0.530	34.59 a**	31.05 a	38.48 a
BIOLOG_H_T100	0.001	22.00 a	28.5 ab	43.611 b
BIOLOG_LAMBDA	0.000	50.63 b	46.18 b	29.11 a
BIOLOG_MU	0.151	38.73 a	40.32 a	27.60 a
BIOLOG_A	0.029	42.84 a	47.54 a	31.54 b
BIOLOG_AWCD025	0.005	50.31 b	40.00 ab	30.73 a
BIOLOG_AWCD05	0.014	49.56 b	36.55 ab	31.81 a
BIOLOG_NBPUITS_T50	0.010	23.25 a	35.32 ab	41.50 b
BIOLOG_NBPUITS_T100	0.001	20.03 a	33.27 ab	43.14 b
BIOLOG_AIRE_T50	0.162	30.28 a	30.64 a	40.14 a
BIOLOG_AIRE_T100	0.015	24.19 a	33.55 ab	41.6 b
BIOLOG_AIRE_T125	0.006	22.50 a	34.86 ab	41.88 b
BIOLOG_AIRE_T200	0.006	22.31 a	35.82 ab	41.71 b
RESPIRO_mO2	0.002	22.88 a	29.64 ab	43.02 b
RESPIRO_mCO2	0.000	18.94 a	34.23 ab	43.30 b
FDA	0.163	34.58 a	40.00 a	46.75 a

* Probabilité que l'hypothèse nulle H0 soit rejetée (H0 : les échantillons proviennent de la même population).

** Les chiffres représentent les moyennes des rangs pour chaque modalité. Une même lettre dans une ligne signifie qu'il n'y a pas de différence significative avec un intervalle de confiance de 95 %.

e. Relations paramètres microbiologiques-paramètres physico-chimiques

Une analyse en composantes principales (ACP) est menée sur les descripteurs microbiologiques retenus et des paramètres physico-chimiques. Leurs projections sur les deux premiers plans factoriels sont données respectivement en figure 8 et en figure 9. Les 79 sites sur lesquels la totalité des paramètres a été recueillie sont utilisés et projetés sur le premier plan factoriel en figure 10 et sur le deuxième plan factoriel en **Figure 11**.

Sur le premier plan factoriel, la teneur en azote, en carbone organique et la CEC apparaissent très corrélées. Ces trois paramètres sont liés à la teneur en matière organique des sols. Le taux de respiration est ainsi corrélé avec ces trois paramètres. Les descripteurs microbiologiques retenus semblent relativement décorrélés entre eux, sauf BIOLOG_LAMBDA et BIOLOG_A sur le deuxième plan factoriel, autorisant la mise en évidence de caractéristiques des sols différentes.

L'observation du nuage des individus sur le premier plan factoriel permet d'identifier des individus aux caractéristiques marquées, participant fortement à la construction des axes (**Figure 10**). Cette distribution semble se faire en trois pôles. On interprète ainsi un gradient d'artificialisation sur l'axe F1, séparant des sites à surface artificialisées d'une part, et des sites sous forêt ou à fortes teneurs en matière organique d'autre part. Des sites en sol nu ou faiblement végétalisés (jardins, prairies) sont quant à eux regroupés autour de l'axe F2.

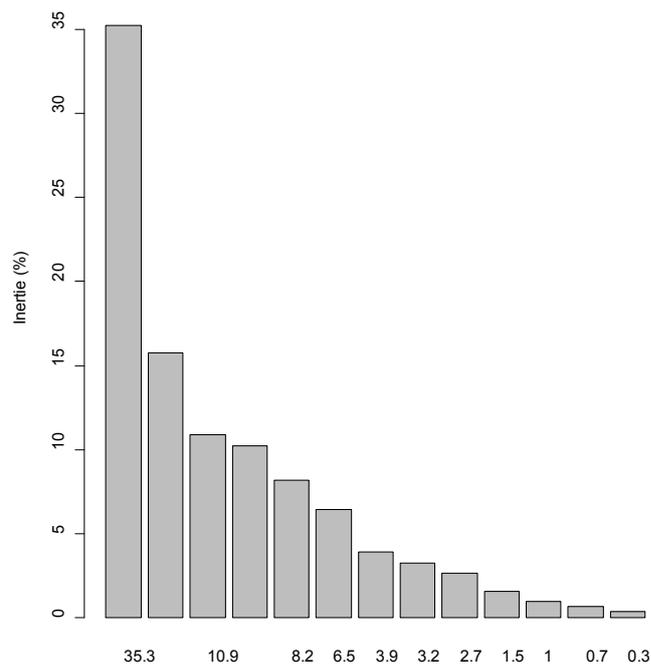


Figure 26 : Histogramme des valeurs propres.

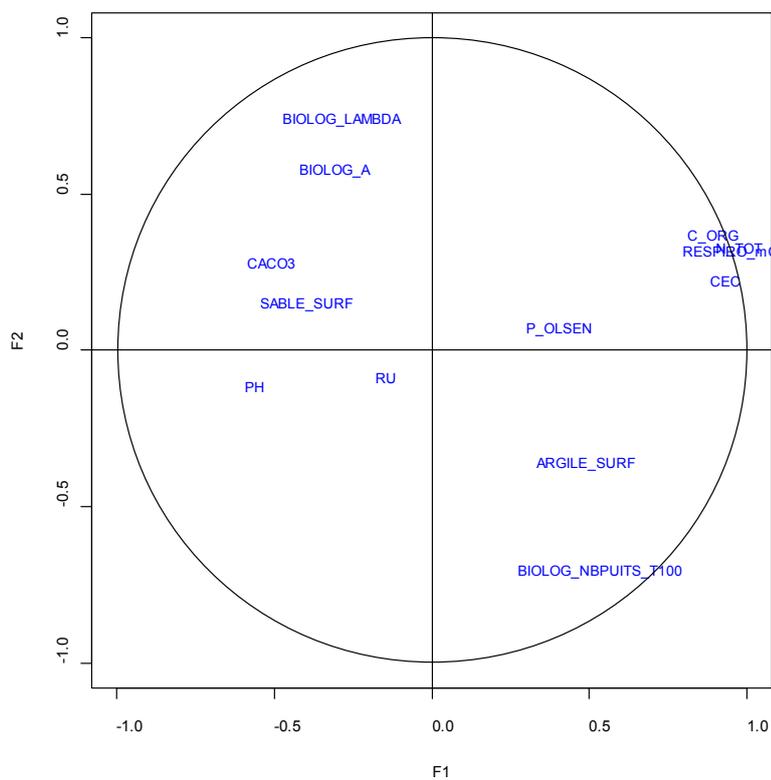


Figure 27 : Projection des variables sur le premier plan factoriel de l'ACP (51 % de la var., n = 79).

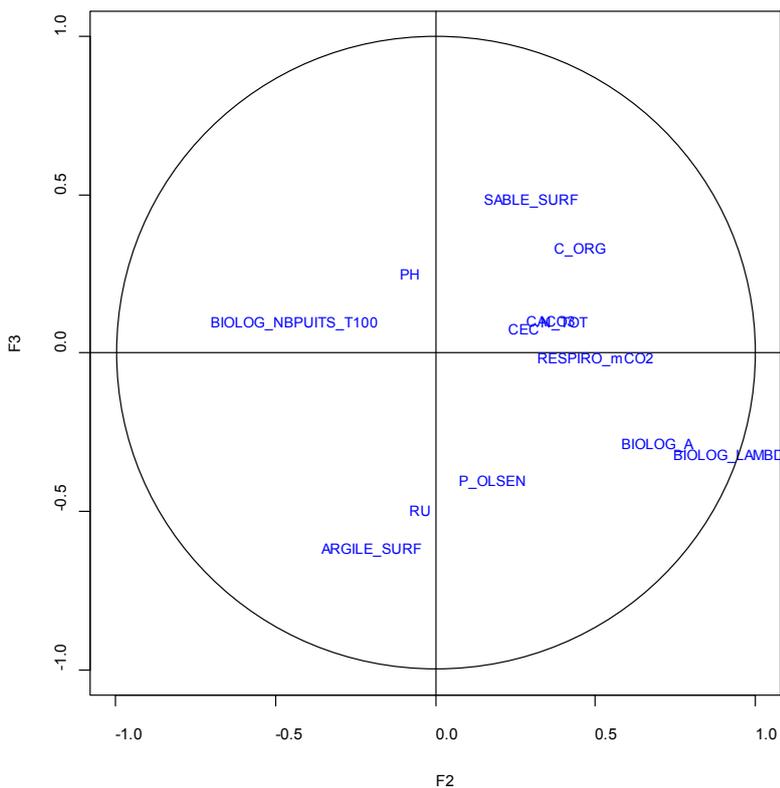


Figure 28 : Projection des variables sur le deuxième plan factoriel de l'ACP (27 % de la var., n = 79).

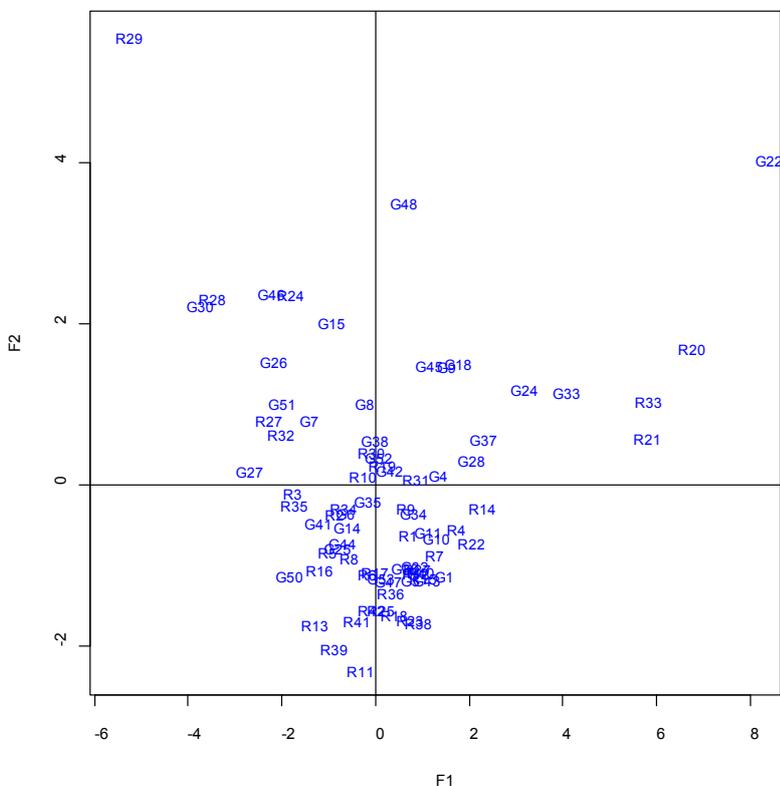


Figure 29 : Projection des individus sur le premier plan factoriel de l'ACP (n = 79).

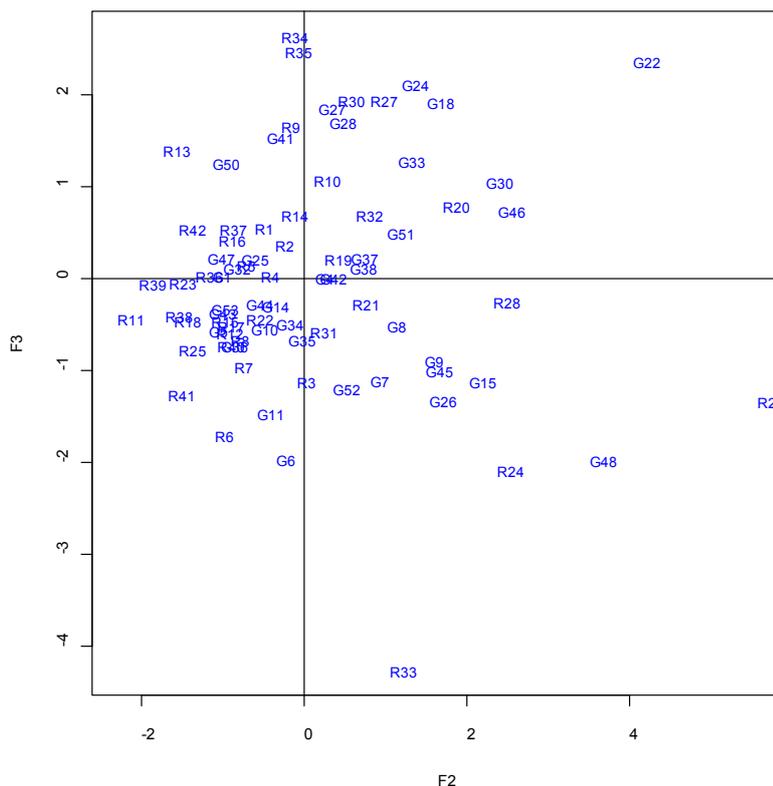


Figure 30 : Projection des individus sur le deuxième plan factoriel de l'ACP (n = 79).

4. Conclusion

Les résultats permettent de tirer les premières conclusions suivantes en ce qui concerne :

La respiration basale :

- Les résultats varient énormément d'un site à l'autre, essentiellement en fonction du pH et des teneurs en azote et phosphore et non de l'occupation du sol.
- Cette variabilité importante justifie la calibration des plaques Biolog par la respiration.

Les plaques Biolog :

- L'état d'humidité semble influencer le développement de la couleur : on peut considérer que l'AWCD et le temps de latence (avant réponse) sont respectivement plus élevé et moins long pour les traitements F et RH par rapport au traitement S. Statistiquement 3 descripteurs sur 10 présentent des résultats significativement différents en fonction du traitement. La modalité RH peut donc représenter une alternative si les analyses sur F sont impossibles (comparaison d'échantillons prélevés dans le temps) ou si les sols présentent des taux d'humidité très variables, voire très faibles lors des prélèvements (courant dans la région).
- La calibration des plaques par les résultats de respirométrie : elle a permis d'avoir des résultats pour des échantillons qui respiraient peu et ne donnaient pas de résultat sans calibration. Cependant les résultats avec (AC) et sans (SC) calibration ne sont pas systématiquement proportionnels et la calibration semble introduire un biais, en particulier pour les échantillons très dilués.

- L'occupation du sol n'explique pas les résultats obtenus. En particulier, des sols artificialisés peuvent présenter une biomasse et une diversité bactérienne plus grandes que des sols agricoles par ex. Ceci parle en faveur d'une étude plus approfondie de ces sols et de leur préservation.

Références bibliographiques spécifiques à l'annexe

- Chodak, M., Niklinska, M., 2010. Effect of texture and tree species on microbial properties of mine soils. *Applied Soil Ecology* 46 (2), 268-275.
- Floch, C., 2008. Les enzymes du sol : Etude de leurs potentialités bioindicateuses de contaminations par des métaux et des polluants organiques. Thèse doct. Biologie des populations et Ecologie. Aix-Marseille, Univ. Paul Cézanne.
- Garland, J.L., Mills, A.L., 1991. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbone-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology* 57 (8), 2351-2359.
- Stefanowicz, A., 2006. The Biolog plates technique as a tool in ecological studies of microbial communities. *Polish Journal of Environmental Studies* 15 (5), 669-676.
- Zwietering, M.H., Jongenburger, I., Rombouts, F.M., Vantriet, K., 1990. Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology* 56 (6), 1875-1881.

Annexe II-13 : Description détaillée de la conception et la construction de l'indice

Cette annexe a pour objectif de présenter la démarche opérée lors de la conception de l'indice d'adéquation sols/usage des sols, son fonctionnement, ainsi que les diverses alternatives qui s'offriraient à un utilisateur voulant réaliser lui-même le calcul d'un tel indice. Cette méthode se veut avant tout une méthode flexible. Chaque niveau de la conception de l'indice pourra être adapté selon le contexte géographique, les moyens humains et financiers pouvant être mis en œuvre et les objectifs de l'évaluation.

1. Démarche conceptuelle

1.1 Particularités de l'indice

A la lumière d'une analyse bibliographique portant sur les méthodes de conception d'indices de qualité des sols, des orientations sur la forme de l'indice ont été prises. Aussi, par comparaison avec les indices existant à l'heure actuelle, trois particularités peuvent être dégagées de l'indice développé dans cette étude :

- 1) Intégration de la notion d'usage du sol ;
- 2) Raisonnement « naturaliste », par la notion de facteur limitant ;
- 3) Signification de l'indice améliorée par la notion de nombre de fonctions satisfaites et de polyvalence d'usages.

L'indice construit dans cette étude est un indice d'adéquation du sol pour un usage donné, puisque la mise en œuvre d'un indice de qualité des sols ne semble pas pouvoir être dissociée de la notion d'usage du sol. Les objectifs de l'étude conduisent à manipuler les différents usages des sols pouvant coexister à une échelle communale, et pas seulement les usages agricoles. Ces usages sont décrits en fonction de leur pertinence au niveau pédologique et de leur possible utilisation par des planificateurs. De plus, un *optimum data set*, listant les paramètres du sol à utiliser est établi par expertise. Il n'est pas utilisé pour caractériser la qualité globale du sol comme cela est fait dans de nombreuses études, mais pour caractériser un certain nombre de fonctions remplies par le sol. Ainsi, afin de pouvoir représenter la multifonctionnalité requise pour un bon fonctionnement du sol, le résultat est donné sous la forme d'un nombre de fonctions satisfaites et d'une polyvalence d'usages. Enfin, l'indice est fondé sur la notion de facteur limitant, afin de mettre en avant les potentialités d'un sol à accueillir ou non un usage. Identifier un ou plusieurs facteurs limitants permet par ailleurs de réfléchir à d'éventuelles stratégies d'amélioration.

La démarche s'inspire pour partie de l'indice SEQ-Eau pour l'évaluation de la qualité des cours d'eau en France.

1.2 Calcul de l'indice

a. Présentation des « grilles » utilisées

L'indice se compose de trois grilles : la *grille sol*, la *grille seuils* et la *grille adéquation*. Les *grilles seuils* et *adéquation* permettent à l'utilisateur de remplir la *grille sol*.

Afin de permettre la manipulation de paramètres possédant des gammes de valeurs et des unités différentes, les valeurs de chaque paramètre du sol sont converties en classes de paramètres à l'aide de la *grille seuils*. L'utilisation de classes permet en effet de rassembler les valeurs de paramètres qui ont un impact semblable sur l'écosystème. La *grille seuils* (les seuils sont présentés ci-dessous pour chaque paramètre) donne les seuils permettant la définition de cinq classes de qualité pour chacun des paramètres. Elles vont de 1, codé en bleu (très bon) à 5, codé en rouge (mauvais).

La *grille adéquation* renseigne sur la classe de qualité requise pour chaque paramètre, en fonction d'un usage, afin d'avoir adéquation du sol et de son usage. Elle est présentée en fin d'annexe en **Tableau 22**.

b. Indice d'adéquation sol/usage du sol

Exemple

Pour une unité de sol donnée, les classes obtenues à l'aide de la *grille seuils* sont reportées sur la *grille sol* (**Figure 1**). La *grille sol* constitue le « tableau de bord » de l'évaluation d'une unité de sol. Il s'agit alors d'observer, pour chaque paramètre, si la classe est en accord avec la classe indiquée par la *grille adéquation* en fonction de l'usage (**Figure 2**). Le résultat est reporté de manière binaire (adéquation ou inadéquation) ou différentielle (distance à la classe de qualité optimale) pour chacun des paramètres dans la *grille sol*.

Site 1 Forêt			
Indicateur	Classe de qualité	Adéquation avec l'usage	Fonction satisfaite
Fonction 1			
Paramètre 1	1	0	✓
Paramètre 2	2	0	
Fonction 2			
Paramètre 1	1	0	✓
Paramètre 2	3	1	
Fonction 3			
Paramètre 1	3	0	X
Paramètre 2	3	0	
Paramètre 3	3	0	
Paramètre 4	2	0	
Paramètre 5	5	-2	
Fonction 4			
Paramètre 1	4	0	✓
Paramètre 2	3	1	
Fonction 5			
Paramètre 1	1	0	✓
Paramètre 2	1	0	
Paramètre 3	1	0	
Paramètre 4	1	0	
Paramètre 5	1	0	
Total fonctions satisfaites			4/5

Figure 31 : Exemple de *grille sol* (classes de paramètres observés).

Paramètre 1	1
Paramètre 2	2
Paramètre 1	1
Paramètre 2	4
Paramètre 1	3
Paramètre 2	3
Paramètre 3	3
Paramètre 4	2
Paramètre 5	3
Paramètre 1	4
Paramètre 2	4
Paramètre 1	1
Paramètre 2	1
Paramètre 3	1
Paramètre 4	1
Paramètre 5	1

Figure 32 : Exemple de *grille adéquation* (classes requises).

Une règle permet ensuite de passer des paramètres aux fonctions : une fonction n'est pas satisfaite s'il existe au moins un paramètre en non-adéquation, c'est-à-dire constituant un facteur limitant de l'usage. Il peut compromettre la réalisation de l'usage. Le nombre de fonctions satisfaites est ensuite calculé. Plus le nombre de fonctions satisfaites est important et meilleure est l'adéquation du sol avec l'usage considéré. Une *grille sol* est remplie pour chaque unité de sol du territoire communal.

L'indice est conçu de façon à ce que si l'un des paramètres ne constitue jamais un facteur limitant pour un usage donné (paramètre non pertinent pour l'usage considéré), il n'affecte pas le résultat de l'adéquation entre le sol et l'usage, même lorsque sa classe après transformation à l'aide de la *grille seuil* est mauvaise. Pour ce faire, une classe élevée (5) a été attribuée à ce type de combinaison usage/paramètre dans la *grille adéquation*.

Utilisations

Afin de pouvoir servir de support aux décisions en matière d'urbanisme, le résultat de l'indice d'adéquation sols/usage des sols doit être présenté sous forme de cartes. Plusieurs types de cartes peuvent être établis :

- *Diagnostic de la commune* : des cartes du nombre de fonctions satisfaites sont réalisées pour l'usage actuel du sol, ainsi que des cartes pour chaque fonction prise séparément. Ce type de carte est néanmoins peu adapté à l'évaluation des usages construits, car ces usages peu exigeants obtiennent toujours une bonne adéquation.
- *Prospective* : un même usage est testé sur toute la superficie de la commune. Des cartes par nombre de fonctions satisfaites permettent d'observer les sols possédant la plus grande multifonctionnalité, c'est-à-dire la meilleure adéquation avec l'usage testé. Elles peuvent également être présentées sous une forme binaire (adéquation ou non-adéquation du sol pour un usage donné) afin d'identifier les sols capables d'accueillir un usage particulier. La production de ce type de carte n'est pertinente que pour tester les usages les plus exigeants.
- *Evolution* : des cartes différentielles peuvent être établies afin d'observer une éventuelle évolution entre l'usage actuel et l'usage envisagé. Il est à noter que ce type de carte ne met pas en valeur des gains/pertes de qualité, mais une évolution de l'adéquation du sol pour un usage donné.

Ces cartes sont établies à partir des unités de sol. Afin d'en faciliter l'utilisation par les planificateurs, les résultats peuvent être agrégés par unité de gestion (section cadastrale, zonage PLU).

c. Indice de polyvalence d'usages du sol

Les résultats issus de la démarche « prospective » de l'indice d'adéquation sol/usage du sol peuvent être produits sous la forme d'une carte pour chacun des usages. Il est possible de synthétiser l'ensemble de ces résultats en un seul indice afin d'en faciliter la lecture et d'approfondir la signification de ces cartes. Si l'on additionne le nombre de fonctions satisfaites pour chacun des usages du sol, une note faible indiquera que le sol ne peut supporter qu'un faible nombre d'usages, les usages les moins exigeants (ex. : bâti). Une note élevée signifie que le sol est capable de supporter beaucoup d'usages différents, c'est-à-dire les usages non-exigeants et exigeants (ex. : bâti + usage agricole). On a ainsi un indice de polyvalence d'usages des sols, proche d'un « indice environnemental ». En effet, ce type d'indice synthétique peut être utilisé à des fins de préservation des sols de bonne qualité par l'identification des sols à préserver, les plus multifonctionnels.

1.3 Acquisition des données

L'utilisateur voulant réaliser le calcul de l'indice sur une commune se trouve confronté au problème de l'acquisition des données d'entrée.

Autant que possible, les informations sont extraites de cartes des sols ou de bases de données géographiques déjà existantes. Afin de correspondre au degré de précision requis pour un diagnostic communal, l'échelle devra être de 1/25 000 ou plus fine.

Un certain nombre de paramètres n'y seront sans doute pas renseignés, et pourront être mesurés sur site. Si l'utilisateur souhaite compléter le jeu de données à sa disposition, les paramètres non renseignés devront être mesurés sur un site représentatif pour chacune des unités de sol cartographiées. La valeur mesurée sera affectée à l'ensemble de l'unité. Etant donné la grande variabilité spatiale des paramètres du sol, il est recommandé de réaliser des répliquats au sein d'une même unité de sol.

Si aucune carte n'est disponible ou si des zones n'ont pas été levées (notamment en zones urbaines et forestières) et si aucune cartographie classique des sols n'est envisageable, il faudra alors prévoir des solutions alternatives. A titre d'exemple, il sera possible de fonder l'étude sur l'identification de zones potentiellement homogènes de sol, sur la base de facteurs de la pédogénèse communs. Pour les territoires agricoles et les territoires naturels et semi-naturels, la lithologie de la roche mère et l'occupation du sol seront principalement pris en compte. En ce qui concerne les territoires artificialisés, l'état de surface (artificialisé, végétalisé ou sol nu) et l'occupation du sol seront utilisés. Les paramètres du sol seront mesurés sur un site bien représentatif de chaque zone homogène et lui seront affectés. Il est également possible de procéder à une cartographie à l'aide d'outils informatiques et de données externes (*digital soil mapping*). Cette étape doit aboutir à la constitution d'une carte des paramètres du sol. C'est ce qui a été effectué pour Gardanne (**Annexe II-11**).

L'évaluation à travers le calcul de l'indice d'adéquation sol/usage du sol porte par la suite sur chacune des unités de sol ou zones homogènes.

2. Les fonctions du sol

Les fonctions du sol sont sélectionnées sur des critères d'échelle du diagnostic et d'objectifs. Elles doivent en effet permettre de considérer les problématiques liées à tous les usages pouvant exister au sein d'une commune, aussi bien en milieu agricole, forestier et urbain. Par ailleurs, il est préférable que les notions qu'elles impliquent soient facilement manipulables pour un utilisateur non scientifique, puisqu'elles constituent l'information de sortie de l'indice d'adéquation sols/usage des sols. Ainsi, six grands thèmes sont choisis (eau, nutriments, support physique, biodiversité, pollution, rareté), correspondant chacun à une fonction :

- Circulation et rétention de l'eau ;
- Rétention et cycle des nutriments ;
- Stabilité physique et support ;
- Biodiversité et habitat ;
- Filtration et pouvoir tampon ;
- Patrimoine pédologique.

La fonction relative à la circulation et à la rétention de l'eau consiste pour le sol, à recevoir, stocker, puis libérer l'eau nécessaire au développement des plantes. Cette rétention doit permettre de limiter l'effet de la sécheresse mais aussi les ruissellements excessifs par une capacité d'infiltration adéquate (Carter *et al.*, 1997).

Le sol joue un rôle essentiel dans la rétention et le cycle des nutriments, notamment l'azote, le phosphore et le carbone. Il est à la fois considéré comme source et puits pour ces trois éléments (Haygarth et Ritz, 2009), c'est-à-dire que les constituants du sol permettent un stockage, mais aussi une production de nutriments potentiellement transférables hors du compartiment sol.

La fonction de stabilité physique et de support concerne en particulier l'enracinement des végétaux (Carter *et al.*, 1997). La résistance à la pénétration du sol doit être assez faible pour permettre un développement racinaire. Elle doit néanmoins être suffisante pour assurer son rôle de support. Cette fonction implique, de plus, une notion de sensibilité du sol à l'érosion hydrique et éolienne.

Le sol assure une fonction d'habitat pour une grande diversité d'organismes vivants, en fournissant les conditions nécessaires pour accueillir plantes et animaux (Andrews *et al.*, 2004). La définition de la biodiversité indique qu'elle constitue la variabilité naturelle des organismes vivants. Cela comprend la diversité au sein des espèces, entre espèces, mais aussi entre écosystèmes (ONU, 1992).

La fonction de filtre et de pouvoir tampon suppose que le sol soit capable de capter et de libérer certains éléments chimiques nécessaires à la faune et la flore, et d'éliminer les substances potentiellement nocives (Carter *et al.*, 1997), souvent par dégradation des composés ou fixation sur les constituants du sol (Andrews *et al.*, 2004). Son rôle est ainsi de limiter les transferts de certaines substances dans l'environnement et l'impact sur la santé humaine. Le terme de « pouvoir tampon » évoque en particulier la capacité du sol à résister aux variations de son pH.

Enfin, la fonction de patrimoine pédologique fait référence à la notion de rareté d'un sol et à la volonté de préserver ces sols rares par des utilisations non destructrices de leurs caractéristiques.

3. Les paramètres

3.1. Choix des paramètres

Dans une démarche de diagnostic de l'adéquation des sols avec leur usage, seuls des paramètres intrinsèques, c'est-à-dire indépendants de l'usage devraient être utilisés afin de pouvoir faire des préconisations pour des usages futurs. Les paramètres dynamiques, définis quant à eux comme étant liés à l'usage, perdurent néanmoins quelques temps après un changement d'occupation du sol (si ce changement ne provoque pas de perturbation trop importante au moment des travaux de terrassement). Certains paramètres dynamiques sont donc intégrés à l'indice du fait de leur rôle important dans le fonctionnement ou dans l'utilisation des sols (il s'agit de la teneur en matière organique, de paramètres microbiologiques et des teneurs en éléments potentiellement contaminants).

Remarque : Il convient de souligner l'origine diverse des données d'entrée de l'indice d'adéquation sols/usage des sols (**Figure 3**). Elles peuvent être des données brutes. Lorsque les données brutes ne sont pas utilisables en l'état, des descripteurs peuvent alors être dérivés par simple interprétation. Lorsque plusieurs descripteurs sont combinés, l'on parle alors d'indicateur, le passage de l'un à l'autre étant réalisé à l'aide de fonctions de pédotransfert ou de modèles. Divers termes peuvent ainsi être utilisés selon le niveau d'agrégation et le degré de complexité de l'information. Par souci de simplification, les données d'entrée de l'indice seront par la suite nommées « paramètres », quel que soit leur niveau d'agrégation.

Dans la conception de l'indice, plusieurs paramètres sont choisis pour décrire chacune des fonctions retenues. Ils constituent l'*optimum data set*. Pour certains paramètres une seule méthode de mesure ou d'estimation est suggérée. D'autres peuvent être évalués à partir de diverses méthodes. Les différents paramètres ainsi que le seuillage en classe proposés seront exposés ci-après fonction par fonction. L'indice proposé étant une méthode flexible, un jeu de données plus restreint, peut néanmoins

constituer un *preliminary/screening/minimum data set* permettant de donner une première image des sols communaux à partir de données faciles d'accès, et donc à faible coût. Cet aspect est discuté dans corps du rapport dans le cadre des ouvertures proposées.

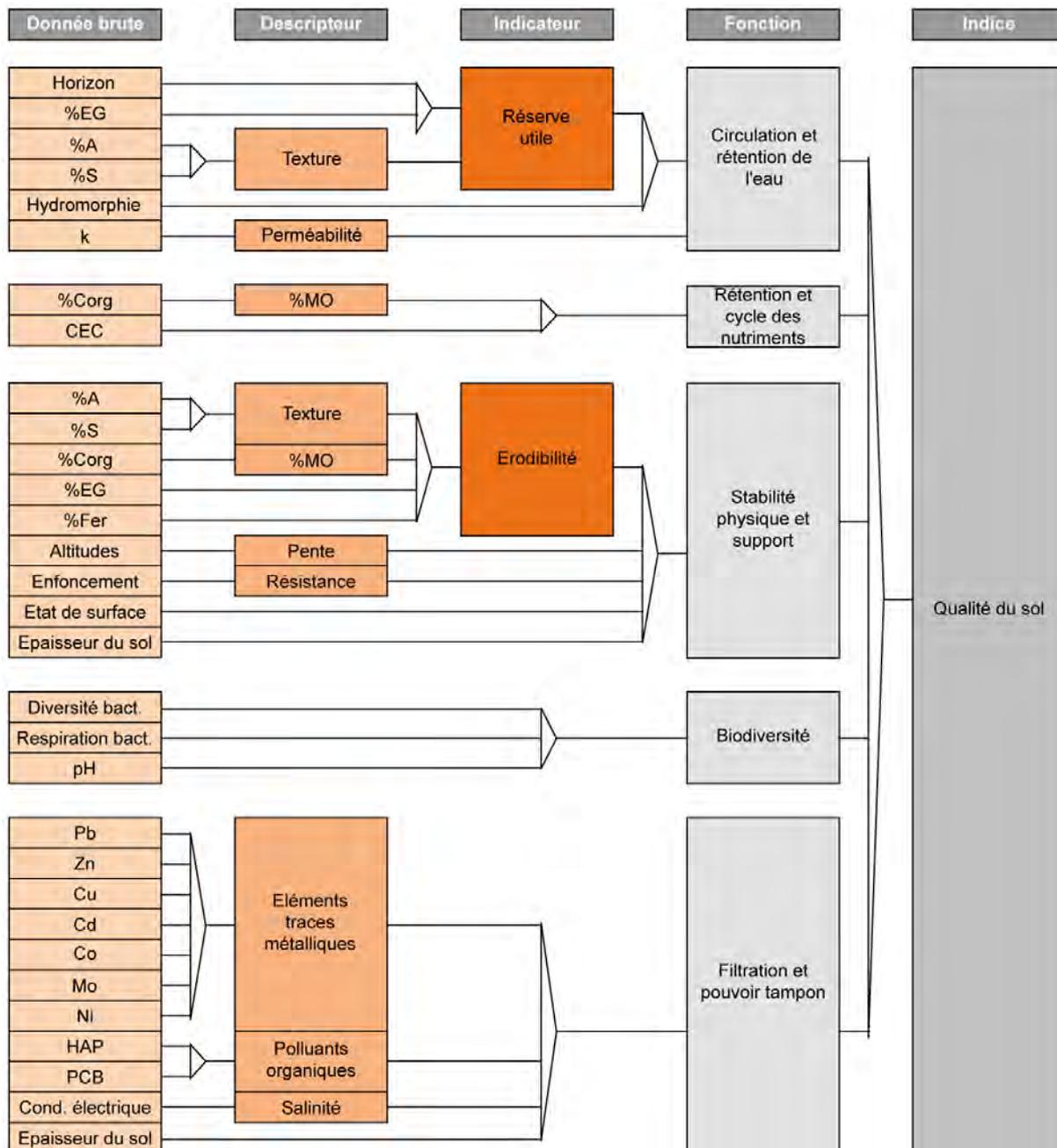


Figure 33 : Origines des données d'entrée de l'indice d'adéquation sol/usage des sols (%EG : teneur en éléments grossiers, %A : teneur en argile, %S : teneur en sable, k : coefficient de perméabilité, %Corg : teneur en carbone organique, %MO : teneur en matière organique, CEC : capacité d'échange cationique, %Fer : teneur en fer, Enfoncement : enfoncement mesuré à l'aide d'un essai au pénétromètre, Diversité bact. : diversité fonctionnelle des communautés bactériennes, Respiration bact. : respiration bactérienne, Pb : teneur en plomb, Zn : teneur en zinc, Cu : teneur en cuivre, Cd : teneur en cadmium, Co : teneur en cobalt, Mo : teneur en molybdène, Ni : teneur en nickel, HAP :

teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques, PCB : teneur en polychlorobiphényles, Cond. électrique : conductivité électrique).

3.2. Choix des seuils

Le seuillage des paramètres permet la définition de classes de qualité, allant de 1 (bonne qualité) à 5 (mauvaise qualité) et permet l'établissement de la *grille seuils*. L'utilisation de cinq classes semble être un bon compromis entre la précision souhaitée et un nombre de classes facile à manipuler pour l'utilisateur. A titre indicatif, c'est aussi le nombre de classes utilisé dans l'indice français SEQ-Eau pour la qualité des cours d'eau. Afin de rendre compte de la variabilité des paramètres du sol tout en tenant compte de la résolution des données d'entrée, Vrščaj *et al.* (2008) ont également opté pour 5 classes, plutôt que 3 ou 10.

Le choix des seuils est basé sur des données publiées (réserve utile, coefficient de perméabilité, hydromorphie, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique, érodibilité, pente, épaisseur du sol, pH, conductivité électrique, teneurs en éléments traces métalliques et en polluants organiques) ou est établi par expertise à partir des données collectées à Gardanne et Rousset pour les paramètres les moins courants (résistance à la pénétration, paramètres microbiologiques, états de surface, surface des unités de sol). Ce dernier type de seuils est ainsi adapté au contexte local, et permet de donner une image relative des sols communaux. Cette adaptation des seuils au contexte local se justifie par l'échelle d'action des décisions d'urbanisme, elle-même locale.

Les gammes de valeurs doivent être assez larges pour représenter les différences, naturelles ou non, entre les divers types de sols et leurs usages. La relation entre la variation du paramètre et la réalisation de la fonction permet de définir le sens (croissant, décroissant ou présence d'un optimum) de l'attribution des classes.

De plus, les interactions entre paramètres du sol ne sont pas prises en compte : les seuils choisis pour un paramètre donné ne sont jamais différenciés selon d'autres paramètres du sol (ex. : texture, pH), tel que le réalisent Kirchmann et Andersson (2001) ou Idowu *et al.* (2008). Il est certain que la valeur d'un premier paramètre du sol peut potentiellement influencer sur la gamme de valeurs atteinte par un second paramètre (ex. : la teneur en matière organique à tendance à être plus faible dans un sol sableux que dans un sol argileux). Mais ici, l'objectif de l'indice d'adéquation sol/usage du sol est de donner au planificateur une image de ses sols communaux dans leur ensemble. Il ne s'agit pas de pondérer, et donc d'expliquer, le déclassement d'un paramètre du fait de la valeur d'un second.

3.3. Fonction circulation et rétention de l'eau

a. Réserve utile

La capacité de stockage de l'eau par le sol est prise en compte à travers la réserve utile. Si sa valeur est issue d'échantillons prélevés sur le terrain, elle est mesurée au laboratoire ou estimée à partir de fonctions de pédotransfert. A cet égard, les fonctions établies par Bruand *et al.* (2004) peuvent être utilisées. Les paramètres d'entrée concernent chacun des horizons d'un profil de sol et sont la texture, le type d'horizon, et éventuellement la densité apparente pour une meilleure efficacité de la prédiction. L'information sur la réserve utile peut également être extraite d'une carte des sols ou d'une base de données géographiques d'échelle adéquate.

Les classes de réserve utile choisies sont une adaptation des quatre classes de l'étude pédologique menée à Rousset en 1970 (Société du Canal de Provence), et sont donc adaptées au contexte local (**Tableau 1**).

Tableau 10 : Classes de qualité et seuils du paramètre réserve utile.

Classe	Légende	RU (mm)
1	Très forte réserve utile	> 80
2	Forte réserve utile	60-80
3	Réserve utile modérée	40-60
4	Faible réserve utile	20-40
5	Très faible réserve utile	≤ 20

b. Hydromorphie

L'existence de manifestations d'hydromorphie est observée sur le terrain ou reprise d'une carte des sols ou d'une base de données géographiques.

Le choix des seuils relatifs à l'hydromorphie est basé sur les classes établies par le GEPPA (1981). Ces classes délimitent différents degrés d'hydromorphie dans les sols, en fonction de la présence d'horizons rédoxiques et réductiques, de leur profondeur d'apparition et de leur intensification avec la profondeur (**Figure 4**). Ces classes ont par ailleurs été reprises dans la méthodologie à mettre en œuvre dans la définition et la délimitation des zones humides (MEEDDM, 2009). L'identification d'horizons histiques a été ajoutée. Les regroupements établis dans cette étude s'appuient en partie sur ces définitions (**Tableau 2**).

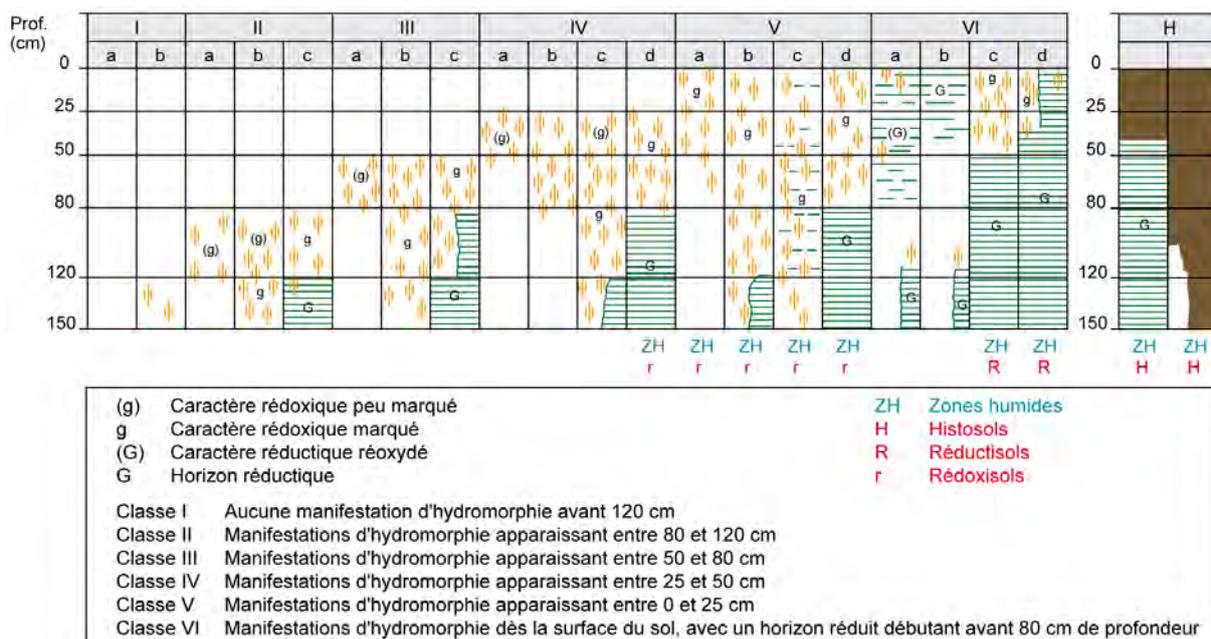


Figure 34 : Classes d'hydromorphie (d'après GEPPA, 1981 ; MEEDDM, 2009).

La classe 5 regroupe les sols de zones humides, tels qu'ils sont définis dans l'arrêté relatif à la définition et à la délimitation des zones humides (MEEDDM, 2009). Il s'agit de :

- Tous les Histosols car ils connaissent un engorgement permanent en eau qui provoque l'accumulation de matières organiques peu ou pas décomposées (classes d'hydromorphie H du GEPPA modifié) ;
- Tous les Réductisols, car ils connaissent un engorgement permanent en eau à faible profondeur se marquant par des traits réductiques débutant à moins de 50 cm de profondeur (classes VIc et d du GEPPA) ;

- Les autres sols caractérisés par :
 - Des traits rédoxiques débutant à moins de 25 cm de profondeur et se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur (classes Va, b, c et d du GEPPA) ;
 - Ou des traits rédoxiques débutant à moins de 50 cm de profondeur, se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur, et des traits réductiques apparaissant entre 80 et 120 cm de profondeur (classe IVc et d du GEPPA).
- Les sols dont un engorgement prolongé et peu profond (≤ 50 cm) est identifié. Certains sols ne présentent en effet jamais de caractère d'hydromorphie comme c'est le cas des Fluvisols pour lesquels la nappe est circulante et oxygénée ou des Podzosols humiques et humoduriques contenant des horizons appauvris en fer.

L'arrêté relatif à la définition et à la délimitation des zones humides (MEEDDM, 2009) laisse à l'appréciation du Préfet de région le classement en zone humide des sols dont la morphologie correspond aux classes IVd et Va du GEPPA. Ils sont ici rassemblés dans la classe 4.

La classe 3 correspond à des sols présentant des traces d'oxydo-réduction ou de réduction indiquant la présence d'une nappe de façon temporaire ou permanente profonde (classes IIIa, b, c et IVa du GEPPA).

Au sein de la classe 2, les traces d'hydromorphie apparaissent entre 80 et 120 cm.

La classe 1 regroupe les sols ne possédant pas de manifestation d'hydromorphie avant 120 cm.

Tableau 11 : Classes de qualité et seuils du paramètre hydromorphie.

Classe	Légende	Classes d'hydromorphie
1	Peu ou pas de manifestations d'hydromorphie	Ia, b
2	-	IIa, b, c
3	-	IIIa, b, c ; IVa
4	-	IVd ; Va
5	Manifestations d'hydromorphie marquées	IVb, c ; Vb, c, d ; VIc, d ; H ; engorgement prolongé ≤ 50 cm

c. Coefficient de perméabilité

Un paramètre permettant d'évaluer la bonne infiltration des eaux est nécessaire avant la mise en place d'une installation d'assainissement non collectif (ANC). Un assainissement non collectif (ou autonome) est défini par l'arrêté du 6 mai 1996 fixant les prescriptions techniques applicables aux systèmes d'assainissement non collectif, comme tout système d'assainissement effectuant la collecte, le prétraitement, l'épuration, l'infiltration ou le rejet des eaux usées domestiques des immeubles non raccordés au réseau public d'assainissement. Dans ce type d'installation, le sol joue un rôle d'épuration des eaux usées, c'est pourquoi cette information est intégrée dans l'indice d'adéquation sol/usage du sol.

L'installation d'un dispositif d'ANC nécessite des caractéristiques du sol particulières et requiert une mesure sur site du coefficient de perméabilité k. La norme XP P 16-603 relative à la mise en œuvre des dispositifs d'assainissement autonome (AFNOR, 1998), définit la relation entre les coefficients de perméabilité k, la texture des sols et leur caractère perméable (**Figure 5**).

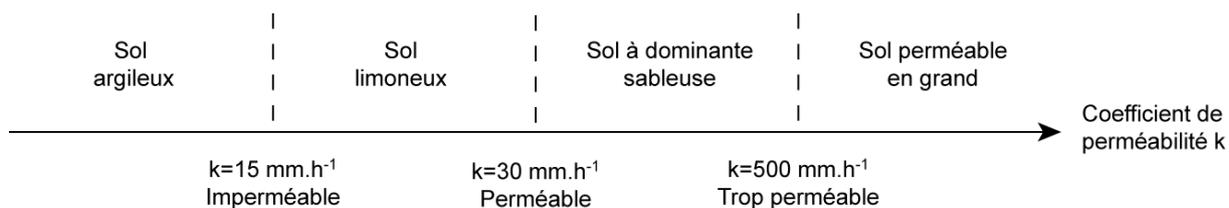


Figure 35 : Définition du coefficient de perméabilité (AFNOR, 1998).

Ces seuils ont une signification pour le dimensionnement des ANC, et notamment la filière présentée comme prioritaire, car efficace et légère à mettre en place, c'est-à-dire les tranchées d'infiltration à faible profondeur (AFNOR, 1998). Ce type de dispositif peut être mis en œuvre pour des coefficients de perméabilité allant de 15 à 500 mm h⁻¹. Cependant, des coefficients de perméabilité entre 15 et 30 mm h⁻¹ nécessitent des ouvrages de plus grandes dimensions que pour des coefficients entre 30 et 500 mm h⁻¹. Ainsi, une distinction entre ces deux classes a été réalisée dans le cadre de l'indice d'adéquation sol/usage du sol (**Tableau 3**). Des coefficients de perméabilité <15 mm h⁻¹ ou >500 mm h⁻¹ n'autorisent pas la réalisation d'épandages souterrains (AFNOR, 1998). Se référer aux cartes d'aptitude des sols à l'assainissement non collectif réalisées par la commune peut fournir des informations quant aux coefficients de perméabilité des sols.

Tableau 12 : Classes de qualité et seuils du paramètre coefficient de perméabilité.

Classe	Légende	Coefficient de perméabilité k (mm h ⁻¹)
1	Très bonne perméabilité	30-500
2	Bonne perméabilité	15-30
3	-	-
4	-	-
5	Sol imperméable ou perméable en grand	≤ 15 et > 500

d. Remarque

Il existe une relation entre le refus d'infiltration et les manifestations d'hydromorphie, mais ceci n'est pas un cas général. L'hydromorphie peut en effet provenir d'un refus d'infiltration ou de la présence d'une nappe. L'utilisation de l'un ou l'autre de ces paramètres dans le calcul de l'indice d'adéquation sol/usage du sol dépendra de l'usage considéré. On emploiera ainsi le paramètre hydromorphie pour la plupart des usages et le paramètre infiltration en ce qui concerne les usages devant porter des ANC.

3.4 Fonction rétention et cycle des nutriments

Les paramètres de la fonction rétention et cycle des nutriments sont choisis pour représenter à la fois l'aspect puits et source du sol pour les nutriments.

a. Teneur en matière organique

La teneur en matière organique permet de rendre compte des apports potentiels en éléments minéraux. Elle est estimée à partir de la mesure du carbone organique sur des échantillons de sols, à laquelle on attribue un coefficient multiplicateur de 2 pour les sols sous forêt et de 1,72 pour les

horizons labourés (Baize, 2000). La teneur en matière organique peut également être extraite d'une carte des sols ou d'une base de données géographiques.

Il est reconnu que les coefficients multiplicateurs 1,72 et 2 ne sont pas parfaitement adaptés à toutes les matières organiques. Ainsi, il vaudrait mieux raisonner directement à partir de la teneur en carbone organique (Baize, 2000). Néanmoins, c'est le paramètre teneur en matière organique qui est retenu dans cette étude car il est plus couramment utilisé dans les études pédologiques.

Les seuils sont repris de Vrščaj *et al.* (2008) (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Classes de qualité et seuils du paramètre teneur en matière organique.

Classe	Légende	Teneur en matière organique (%)
1	Très forte teneur en MO	> 6
2	Forte teneur en MO	4-6
3	Teneur modérée en MO	2-4
4	Faible teneur en MO	1-2
5	Très faible teneur en MO	≤ 1

Il convient de noter que le taux de matière organique intervient dans nombre de fonctions des sols. Une teneur en matière organique élevée obtient ici une classe de qualité élevée puisque la matière organique y est considérée pour son apport dans la fonction « rétention et cycle des nutriments » uniquement.

L'épaisseur prise en compte pour la mesure de la teneur en matière organique est une question essentielle s'il s'agit de comparer des sols aussi différents que des sols agricoles et des sols forestiers. Il peut ainsi être envisagé de normaliser cette teneur par l'épaisseur de l'horizon concerné. Baize (2000) retranscrit ainsi les propositions de Boulaine afin d'évaluer plus objectivement la richesse en matière organique des sols, avec l'utilisation de l'indice cumulohumique (ICH). C'est la somme, de 0 à 60 cm, des produits de la teneur en matière organique (MO) et de l'épaisseur Z (en dm) des horizons (éq. 1). La profondeur prise en compte pourrait être débattue (Baize, 2000). Seuls les 20 ou 30 premiers centimètres, limite des horizons de surface pour les sols labourés, pourraient être considérés.

$$ICH = \sum_{i=1}^n MO_i \times Z_i \tag{éq. 1}$$

b. Capacité d'échange cationique

La mesure de la capacité d'échange cationique traduit le potentiel du sol vis-à-vis de la rétention des nutriments. Elle est réalisée au laboratoire sur des échantillons de sol. Ce paramètre est souvent mesuré lors de la réalisation de cartes des sols ou de bases de données géographiques et peut ainsi en être extrait.

Les seuils de la capacité d'échange cationique sont adaptés des seuils délimitant les quatre classes de CEC de la FAO (1993), sur une profondeur de 0 à 20 cm (**Tableau 5**). Contrairement aux seuillages en classes issus d'autres travaux (ex. : Société du Canal de Provence, 1970 ; Sililo *et al.*, 2001), celui-ci permet de balayer une large gamme de valeurs de CEC. L'idéal serait d'avoir une donnée sur une profondeur équivalente à celle de la réserve utile, afin d'appréhender les possibilités de prélèvement de nutriments par les racines des végétaux.

Tableau 5 : Classes de qualité et seuils du paramètre capacité d'échange cationique.

Classe	Légende	CEC (cmol ⁺ .kg ⁻¹)
1	Très forte CEC	> 15
2	Forte CEC	6-15
3	CEC modérée	4-6
4	Faible CEC	2-4
5	Très faible CEC	≤ 2

c. pH

La mesure du pH-eau est choisie pour représenter le pH optimum du développement de la faune et de la flore. Ils sont repris de Vrščaj *et al.* (2008) (**Tableau 6**). Quelques valeurs remarquables peuvent être soulignées. L'optimum agronomique, concernant l'assimilabilité des principaux éléments fertilisants, est souvent situé entre 6,5 et 7,5 en sols non calcaires (Baize et Jabiol, 1995). En dessous de 5, il y a risque de toxicité aluminique pour certaines cultures (Baize et Jabiol, 1995).

Tableau 6 : Classes de qualité et seuils du paramètre pH.

Classe	Légende	pH
1	pH légèrement acide	6<pH≤7
2	pH acide ou neutre	5,5<pH≤6 ou 7<pH≤7,5
3	pH modérément acide ou modérément basique	5<pH≤5,5 ou 7,5<pH≤8,5
4	pH acide ou basique	4,5<pH≤5 ou 8,5<pH≤9,5
5	pH très acide ou très basique	pH≤4,5 ou pH>9,5

3.5 Fonction stabilité physique et support

a. Erodibilité

L'érodibilité est estimée à l'aide de la méthode établie par Antoni *et al.* (2006). Elle est particulièrement adaptée aux climats méditerranéens, comme c'est le cas à Gardanne et Rousset. Cet arbre de décision prend en compte la texture, la teneur en matière organique, en éléments grossiers et en fer. Il existe d'autres méthodes d'estimation de l'érodibilité.

Les classes d'érodibilité sont issues des classes finales de la méthode établie par Antoni *et al.* (2006) (**Tableau 7**).

Tableau 7 : Classes de qualité et seuils du paramètre érodibilité.

Classe	Légende	Erodibilité
1	Très faible érodibilité	E0
2	Faible érodibilité	E1
3	Erodibilité modérée	E2
4	Forte érodibilité	E3
5	Très forte érodibilité	E4 ; E5

b. Pente

La pente est estimée à partir d'un MNT (IGN et CRIGE-PACA, 2008) sous SIG.

Les seuils de pente sont définis à partir des travaux du GEPPA (1981), qui divisent les pentes en dix classes, en fonction des contraintes associées (caractère cultivable, travail du sol, irrigation, drainage agricole, érosion, adéquation avec des terrains de loisirs). Ces classes sont ramenées à cinq classes (**Tableau 8**) :

- Classe 1 : pente très faible, pas de contrainte d'aménagement, risque d'érosion par ruissellement quasi nul.
- Classe 2 : pente faible, pas de contrainte d'aménagement, risque d'érosion par ruissellement très faible.
- Classe 3 : pente modérée, contraintes au travail du sol, contraintes à l'irrigation, risque d'érosion par ruissellement modéré, contraintes notables pour l'utilisation en terrains de loisirs.
- Classe 4 : pente forte, terres difficilement cultivables, nécessité d'un matériel adapté pour travail du sol, irrigation impossible, risques important d'érosion par ruissellement, contraintes sévères pour l'utilisation en terrains de loisirs.
- Classe 5 : pente très forte, terres non cultivables, travail du sol, irrigation et drainage impossibles, risques très important d'érosion par ruissellement, contraintes très sévères pour l'utilisation en terrains de loisirs.

Tableau 8 : Classes de qualité et seuils du paramètre pente.

Classe	Légende	Pente (%)
1	Pente très faible	< 2
2	Pente faible	2-5
3	Pente modérée	5-15
4	Pente forte	15-30
5	Pente très forte	≥ 30

c. Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration est mesurée à l'aide d'un essai au pénétromètre dynamique. La valeur retenue est la résistance moyenne des quinze premiers centimètres. Ce paramètre a été préféré à une résistance calculée par horizon, et donc sur des épaisseurs variables pour les différents sols considérés, afin de pouvoir être représentatif de l'ensemble des usages du sol, dont les impacts se déploient sur des profondeurs plus ou moins importantes. A l'étape du calcul de l'indice d'adéquation sol/usage du sol, il devient ainsi possible de tester d'autres usages que l'usage actuel. Cette profondeur permet de prendre en compte la résistance du sol vis-à-vis de l'implantation de végétaux et de ne pas trop déclasser certains sols uniquement du fait de leur faible profondeur (roche mère ou substrat atteint rapidement).

Gugino *et al.* (2007) intègrent également le paramètre résistance à la pénétration sur les quinze premiers centimètres, et lui ajoutent la résistance de 15 à 50 cm afin d'identifier d'éventuels obstacles à l'enracinement en profondeur. Ce second paramètre, bien que d'une importance majeure, apparaît d'échelle trop locale pour être intégré dans l'indice d'adéquation sol/usage du sol.

Les classes de résistance à la pénétration sont en partie établies en fonction des possibilités d'enracinement pour les végétaux et d'observations de terrain (**Tableau 9**). Un seuil est en effet reconnu à 2 MPa comme étant limitant pour l'enracinement des cultures annuelles (Materechera *et al.*, 1991). Carter (2006) indique que les valeurs optimales se trouvent entre 0,5 et 2 MPa et que la résistance du sol devient un facteur limitant pour l'enracinement à partir de 2,5 MPa. Fernandes *et al.* (2011) placent ainsi un seuil limite à 4 MPa, pour un sol agricole. Il apparaît difficile de trouver d'autres

seuils ayant une signification pour le milieu dans la littérature. Il a néanmoins été observé au cours de l'étude menée à Gardanne et Rousset, que le caractère artificialisé d'un sol devenait marqué autour de 10 MPa. Il ne semble pas nécessaire de distinguer les valeurs de résistance à la pénétration au-delà de 10 MPa, puisqu'elles traduisent la présence de revêtements artificialisés ou de la roche à faible profondeur.

Tableau 9 : Classes de qualité et seuils du paramètre résistance à la pénétration.

Classe	Légende	Résistance dynamique (MPa)
1	Très faible résistance	≤ 2
2	Faible résistance	2-4
3	Résistance modérée	4-6
4	Forte	6-10
5	Très forte résistance	> 10

d. Etat de surface

L'état de surface est évalué visuellement sur le terrain ou par analyse d'images. Il permet de qualifier la contrainte au réaménagement d'un site nécessitant un changement d'état de surface.

Les états de surface sont divisés en trois classes (**Tableau 10**). Les surfaces artificialisées sont définies comme des surfaces entièrement construites par l'Homme, plus ou moins perméables (ex. : zone pavée, asphalte, béton, graviers, sable). Elles peuvent parfois former une barrière à l'infiltration de l'eau. Les surfaces dites végétalisées doivent présenter une végétation recouvrant une majorité de la surface du sol (ex. : gazon, herbe, friche), et ne présentent pas d'artificialisation. Le troisième type de surface correspond aux sols nus, ne présentant pas d'artificialisation. En ce qui concerne les sols subissant des alternances régulières d'états de surface, tels que les sols agricoles, l'indice est construit de telle façon que l'état de surface à prendre en considération est celui rencontré au moment du diagnostic.

Tableau 10 : Classes de qualité et seuils du paramètre état de surface.

Classe	Etat de surface
1	Végétalisée
2	-
3	Sol nu
4	-
5	Artificialisée

e. Epaisseur du sol

L'épaisseur du sol est mesurée après sondage à la tarière manuelle, creusement de fosse ou reprise d'une carte des sols ou de bases de données géographiques. Elle est mesurée de la surface à la profondeur d'apparition d'un horizon C, M, D ou R (AFES, 2009) ou d'un plancher.

L'épaisseur du sol est divisée en cinq classes (Tableau 11). Elles sont adaptées des quatre classes de l'étude pédologique menée à Rousset en 1970 (Société du Canal de Provence). Elles sont ainsi représentatives du contexte local.

Tableau 11 : Classes de qualité et seuils du paramètre épaisseur du sol.

Classe	Légende	Epaisseur du sol (cm)
1	Sol très profond	> 80
2	Sol profond	60-80
3	Sol moyennement profond	30-60
4	Sol superficiel	15-30
5	Sol très superficiel	≤ 15

3.6 Fonction biodiversité et habitat

Les paramètres choisis s'attachent à observer la biodiversité effective et les conditions du milieu.

a. Diversité bactérienne

La diversité fonctionnelle des communautés bactériennes est étudiée par la méthode des plaques Biolog™. Plusieurs paramètres peuvent en être dérivés. Le paramètre choisi correspond au nombre de puits ayant réagi positivement lorsque l'expérience atteint 50 h car il permet de bien différencier les différents échantillons de sols prélevés à Gardanne et Rousset. Avec le matériel utilisé dans cette étude, le nombre maximum de puits positifs pouvant être atteint est de 31. Un incrément régulier est donc utilisé afin de définir les cinq classes (**Tableau 12**).

Remarque : Si on utilise la distribution statistique du jeu de données, on a les seuils 8-12-18-28.

Tableau 13 : Classes de qualité et seuils du paramètre diversité bactérienne.

Classe	Légende	Nombre de puits positifs
1	Très forte diversité	> 24
2	Forte diversité	18-24
3	Diversité modérée	12-18
4	Faible diversité	6-12
5	Très faible diversité	≤ 6

b. Respiration bactérienne

La respiration bactérienne est étudiée par la méthode des têtes OxiTop™, en mode basal. Elle permet la mesure continue de la dépression d'O₂ consommé par les bactéries du sol. La production totale de CO₂ est mesurée en parallèle. Les seuils sont établis à l'aide de la statistique sur le jeu de données observées à Gardanne et Rousset. Les seuils retenus correspondent ainsi aux premier quartile, médiane, troisième quartile et valeur maximale observée (**Tableau 13**).

Tableau 14 : Classes de qualité et seuils du paramètre respiration bactérienne.

Classe	Légende	mO ₂ (g.kg sol ⁻¹ .j ⁻¹)	mCO ₂ (g.kg sol ⁻¹ .j ⁻¹)
1	Très respiration	> 0,350	> 0,387
2	Forte respiration	0,080-0,350	0,122-0,387
3	Respiration modérée	0,038-0,080	0,080-0,122
4	Faible respiration	0,016-0,038	0,036-0,080
5	Très faible respiration	≤ 0,016	≤ 0,036

c. pH

cf. fonction « rétention et cycle des nutriments »

3.7 Fonction filtration et pouvoir tampon

La fonction de filtration et de pouvoir tampon est représentée par les teneurs effectives en certains contaminants. L'épaisseur du sol y est ajoutée afin de prendre en compte le rôle de filtre du sol.

a. *Eléments traces métalliques*

Si un usage sensible est envisagé, il existe deux possibilités pour avoir adéquation : soit des éléments traces métalliques (ETM) sont absents ou seulement présents en faible quantité, soit ils sont présents en excès et immobilisés. Il n'existe pas de valeurs seuils relatives aux ETM dans la législation française, à part celles fournies dans l'annexe 1 de l'arrêté du 8 janvier 1998, concernant les valeurs limites de concentration en ETM dans les sols, dans le cadre d'épandages de boues de traitement des eaux usées (**Tableau 14**). Le législateur ne souhaite donc pas que ces teneurs soient dépassées pour des sols agricoles. Il pourrait également être envisagé d'utiliser les valeurs issues d'autres législations, telles que les valeurs indicatives, seuils d'investigation et valeurs d'assainissement de la législation suisse (Conseil Fédéral de Suisse, 1998) (**Tableau 15**). Il faut noter que la méthode de mise en solution utilise les acides fluorhydrique et perchlorique dans l'arrêté sur l'épandage des boues et l'eau régale dans la législation suisse, ce qui influe sur les quantités extraites. Une comparaison avec les gammes de valeurs ordinaires françaises peut également être effectuée. Avec ces approches, on ne cherche pas à connaître l'origine, anthropique ou naturelle, des teneurs observées. La meilleure approche reste la comparaison des teneurs en ETM avec le fond pédogéochimique local. Si de fortes concentrations sont relevées, il convient de vérifier par ailleurs la disponibilité des éléments et la nécessité d'entamer une procédure de réhabilitation.

Une valeur indicative est le seuil au-delà duquel la fertilité du sol n'est plus garantie à long terme (seuil de la classe 1, **Tableau 15**). Un seuil d'investigation représente le seuil au-delà duquel une étude approfondie des dangers est obligatoire (seuil haut de la classe 2, **Tableau 15**). Dans la directive suisse, elles concernent les cultures alimentaires, les cultures fourragères et les risques par ingestion. Une valeur d'assainissement correspond au seuil au-delà duquel une intervention ou un assainissement est obligatoire (seuil haut de la classe 3, **Tableau 15**). Elles concernent les usages agricoles et horticoles, les jardins privés et familiaux ainsi que les places de jeu.

Tableau 15 : Classes de qualité et seuils du paramètre teneur en éléments traces métalliques (mg kg⁻¹), adaptées de l'arrêté du 8 janvier 1998.

Classes	Pb	Zn	Cu	Cd	Ni	Cr	Hg
1	≤ 100	≤ 300	≤ 100	≤ 2	≤ 50	≤ 150	≤ 1
2	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	> 100	> 300	> 100	> 2	> 50	> 150	> 1

Tableau 16 : Classes de qualité et seuils du paramètre teneur en éléments traces métalliques (mg kg⁻¹), adaptées de la réglementation suisse (Conseil Fédéral de Suisse, 1998).

Classe	Pb	Zn	Cu	Cd	Ni	Mo	Co
1	≤ 50	≤ 150	≤ 40	≤ 0,8	≤ 50	≤ 25	≤ 25
2	50-200	-	40-150	0,8-2	-	-	-
3	200-1000	150-2000	150-1000	2-20	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	> 1000	> 2000	> 1000	> 20	> 50	> 25	> 25

La recherche d'éléments contaminants dans les sols nécessite de s'interroger sur la profondeur d'échantillonnage. Celle-ci doit tenir compte de l'usage actuel ou futur du sol et des voies de transfert prépondérantes (MEDAD, 2007). Ainsi, les usages induisant un risque de transfert par inhalation, ingestion directe ou contact dermique, nécessitent une profondeur d'investigation faible, de l'ordre de 2 à 10 cm, afin d'éviter la dilution des concentrations présentes en surface par mélange avec des concentrations plus faibles en profondeur (MEDAD, 2007). Les profondeurs concernées sont plus importantes en ce qui concerne les usages agricoles, pouvant entraîner un risque à travers la consommation de plantes, afin de prendre en considération l'homogénéisation du sol par le labour. Les préconisations issues de la méthode du « diagnostic du site », inspirées de l'ordonnance allemande sur la protection des sols et sur les sites contaminés (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1999), sont fournies dans le tableau 16. Cette approche est essentiellement d'ordre sanitaire. Afin de prendre en compte les possibles transferts verticaux, pouvant occasionner des contaminations de nappes d'eau souterraines, ainsi que le prélèvement par les racines des plantes, l'échantillonnage des horizons profonds doit être également réalisé, horizon par horizon.

Tableau 17 : Préconisation pour l'échantillonnage des sols (MEDAD, 2007).

Voie de transfert	Usage	Profondeur d'investigation
Inhalation	Aires de jeu, habitations, zone d'activités, industries	0-2 cm
Ingestion directe / contact dermique	Aires de jeu, habitations	0-10 cm 10-35 cm (1)
	Parc et aires de loisirs	0-10 cm
	Industrie et zone d'activités	0-10 cm
Consommation de plantes cultivées	Zones cultivées, jardins potagers	0-30 cm (2) 30-60 cm
Consommation de viande ou de lait de bétail	Prairies	0-10 cm (3) 10-30 cm

(1) 0-35 cm : profondeur moyenne pouvant être atteinte par un enfant

(2) 0-30 cm : zone cultivée

(3) 0-10 cm : zone racinaire

b. Polluants organiques

La mesure des polluants organiques concerne plus particulièrement les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les polychlorobiphényles (PCB).

Seize HAP font partie de la liste des polluants prioritaires de l'U.S. *Environmental Protection Agency*. Il s'agit du naphthalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène,

fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, indéno(1,2,3-c,d)pyrène, dibenzo(a,h)anthracène et benzo(g,h,i)perylène

Sept isomères des PCB sont retenus, selon la liste de l'*Institute for Reference Materials and Measurements* : IUPAC n° 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180.

Les seuils sont repris de la législation suisse (Conseil Fédéral de Suisse, 1998) et correspondent aux valeurs indicatives, seuils d'investigation et valeurs d'assainissement relatifs à la somme des 16 congénères HAP et des 7 isomères PCB (**Tableau 17**).

Tableau 18 : Classes de qualité et seuils du paramètre teneur en polluants organiques.

Classe	Total 16 HAP (mg kg ⁻¹)	Total 7 PCB (mg kg ⁻¹)
1	≤ 1	≤ 0,1
2	1-10	0,1-0,2
3	10-20	0,2-1
4	20-100	1-3
5	> 100	>3

c. Conductivité électrique

Les valeurs seuils de conductivité électrique sont reprises du guide pour la description des sols de l'*U.S. Department of Agriculture* (Schoeneberger *et al.*, 2002) et concernent la méthode de mesure dite des extraits de pâte saturée (**Tableau 18**). Cette méthode permet des analyses standardisées (Baize, 2000). Le seuil de 4 mS.cm⁻¹ est la limite classique de la conductivité électrique caractérisant les sols salés. Au-delà de 8 mS.cm⁻¹, la plupart des plantes cultivées voient leurs rendements affectés par la salinité et seuls des végétaux spécialisés peuvent prospérer pour des conductivités électriques supérieures à 16 mS.cm⁻¹ (Baize, 2000).

Tableau 19 : Classes de qualité et seuils du paramètre conductivité électrique.

Classe	Légende	Conductivité électrique (mS.cm ⁻¹)
1	Non salé	< 2
2	Très légèrement salé	2-4
3	Légèrement salé	4-8
4	Modérément salé	8-16
5	Très salé	≥ 16

d. Epaisseur du sol

L'épaisseur du sol permet de caractériser le transit plus ou moins rapide de l'eau et des éléments en solution dans le sol. Plus elle est importante et plus il est probable que des transformations et fixations de substances potentiellement polluantes aient lieu avant d'atteindre la nappe d'eau souterraine. La profondeur du sol est mesurée après sondage à la tarière manuelle, creusement de fosse ou reprise d'une carte des sols ou de bases de données géographiques, depuis la surface jusqu'à la profondeur d'apparition d'un horizon C, M, D ou R (AFES, 2009) ou d'un plancher.

Elle est divisée en cinq classes (**Tableau 19**), adaptées des quatre classes de l'étude pédologique menée à Rousset en 1970 (Société du Canal de Provence).

Tableau 120 : Classes de qualité et seuils du paramètre épaisseur du sol.

Classe	Légende	Epaisseur du sol (cm)
1	Sol très profond	> 80
2	Sol profond	60-80
3	Sol moyennement profond	30-60
4	Sol superficiel	15-30
5	Sol très superficiel	≤ 15

3.8 Fonction patrimoine pédologique naturel

La fonction de patrimoine pédologique est représentée par un unique paramètre. Il s'agit du pourcentage de surface cumulée de l'unité de sol considérée (éq. 2). Cet aspect étant encore peu traité dans les articles de la littérature sur la qualité de sols, seuls les sols dits naturels sont concernés par cette fonction. Il serait néanmoins possible d'ajouter des sols anthropisés, tels que des sols de terrasses, pouvant être assimilés à un patrimoine archéologique, ou des sols de cimetières assimilés à un patrimoine sociétal.

$$S_{\text{unité}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_{\text{com}}} \times 100 \quad (\text{éq. 2})$$

Avec, $S_{\text{unité}}$: surface cumulée de l'unité de sol (%);
 S_i : surface unitaire ;
 S_{com} : surface communale.

Les pourcentages seuils de surface cumulée des unités de sol sont déterminés par expertise, à partir des surfaces couvertes par les différentes unités de sols à Gardanne et Rousset (**Tableau 20**).

Tableau 20 : Classes de qualité et seuils du paramètre surface cumulée de l'unité de sol.

Classe	Légende	Surface cumulée (%)
1	Sol bien représenté	> 10
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	Sol peu représenté	≤ 10

4. Les usages

Le choix des classes d'usage des sols pris en compte doit être un compromis entre une échelle permettant la finesse du diagnostic et une utilisation par un planificateur à l'échelle communale. Afin de faciliter le traitement spatial de l'indice d'adéquation sols/usage des sols, ces classes et leurs limites géographiques doivent être disponibles sous forme de bases de données géographiques ou extractibles par analyse d'image. Enfin, il est nécessaire qu'elles soient en accord avec les conclusions établies à l'aide de la typologie des sols (**Annexe II-10**), c'est-à-dire que l'état de surface (artificialisé, végétalisé ou sol nu) et l'occupation du sol permettent de caractériser le sol.

Une liste hiérarchique des usages à prendre en compte a été établie (**Tableau 21**). Ainsi, les deux premiers niveaux s'inspirent des termes de la nomenclature européenne de l'occupation du sol Corine Land Cover. Ces classes ont dues être adaptées pour qu'elles soient pertinentes avec un impact sur

l'évolution des sols. Ainsi, certaines classes ont été regroupées, d'autres supprimées. Le dernier niveau correspond à différentes utilisations du sol rassemblées d'après leur état de surface. Ce type d'énumération permet au planificateur une bonne image des potentialités du sol en fonction de son utilisation.

Tableau 21 : Usages pris en compte dans l'indice.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Code
Territoires agricoles	Cultures annuelles, prairies temporaires		TA1
	Cultures permanentes		TA2
Forêts et milieux naturels semi-naturels	Forêts		F1
	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée		F2
Zones humides	Zones humides intérieures et maritimes		ZH
Territoires artificialisés	Zones urbanisées	Places, cours, parkings, voies de com., équipements sportifs et de loisirs artificialisés	ZU1
		Jardins d'agrément, équipements sportifs et de loisirs non artificialisés, plates-bandes	ZU2
		Jardins potagers et familiaux	ZU3
		Jardins + assainissement non collectif	ZU4
	Zones industrielles et commerciales	Places, cours, parkings, voies de com., surfaces techniques	ZIC1
		Jardins d'agrément, plates-bandes	ZIC2

5. Adéquation usages et paramètres

Avant d'établir l'adéquation entre l'usage et le sol, l'adéquation entre l'usage et chaque paramètre doit être établie. Ceci est réalisé dans la *grille adéquation*. Pour chacun des paramètres, une gamme de classes de qualité appropriée selon l'usage est indiquée. Si l'utilisation d'un paramètre n'est pas pertinente pour un usage donné, la classe 5 lui est attribuée par défaut.

5.1. Usages exigeants

Les surfaces végétalisées non naturelles (*i.e.* hors forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacées et zones humides) sont sans doute les plus exigeantes en termes de paramètres du sol. En ce qui concerne les cultures annuelles et prairies temporaires (TA1) et les jardins potagers et familiaux (ZU3) :

- La réserve utile est donnée comme une caractéristique défavorable en-dessous de 60 mm dans l'étude associée à la carte pédologique de Rousset (Société du Canal de Provence, 1970).
- Du point de vue de l'hydromorphie, des excès d'eau temporaires en profondeur sont considérés comme une caractéristique défavorable mineure, des excès d'eau en surface temporaires ou permanents de profondeur sont une caractéristique défavorable majeure (Société du Canal de Provence, 1970).
- En ce qui concerne le taux de matière organique, Vrščaj *et al.* (2008) recommandent un taux de 4 à 6 %.
- Fernandes *et al.* (2011) considèrent qu'en-dessous de 4 cmol⁺ kg⁻¹, la CEC est un facteur limitant en sol agricole.

- Le pH optimum du point de vue agronomique est situé entre 6,5 et 7,5 en sol non calcaire (Baize, 2000). Le contexte de Gardanne et Rousset est calcaire, une classe 3 a donc été donnée.
- Dans une optique de lutte contre l'érosion, l'érodibilité doit être faible, étant donné que les surfaces peuvent ne pas être couvertes une partie de l'année.
- Le travail du sol et l'irrigation deviennent difficiles au-dessus d'une pente de 5 % et le risque d'érosion par ruissellement devient non négligeable.
- La limite maximale à la pénétration racinaire des cultures commerciales est de 2,7 MPa (Velasquez *et al.*, 2007).
- L'épaisseur du sol constitue une caractéristique défavorable en-dessous de 50 cm (Société du Canal de Provence, 1970).
- Les concentrations en éléments traces métalliques doivent être sous les seuils conduisant à une concentration inacceptable dans les cultures destinées à la consommation humaine et animale (Kirchmann et Andersson, 2001).
- Les cultures sont plus ou moins tolérantes à la salinité du sol. Elles sont dites très sensibles ou sensibles jusqu'à une conductivité électrique de 4 mS.cm^{-1} . Le choix du type de culture devra donc être effectué judicieusement à partir de ce seuil.

Les seuils choisis pour les cultures permanentes (TA2) sont calqués sur les considérations précédentes, à la différence que :

- La résistance à la pénétration ne devient une contrainte au développement racinaire que si elle excède 2 à 3 MPa (Sinnott *et al.*, 2008).
- Le taux de matière organique peut avoisiner les 2 %.

Un troisième groupe de surfaces végétalisées est représenté par les jardins d'agrément, plates-bandes et autres surfaces enherbées en milieu urbain ou industriel (ZU2 et ZIC2). Les classes choisies sont calquées sur les usages agricoles (TA1) à la différence que :

- L'érodibilité n'est pas un facteur limitant, les surfaces étant couvertes toute l'année.
- La pente n'est pas un facteur limitant.
- L'épaisseur du sol peut être plus faible.

5.2. Usages sensibles

Certains usages sont considérés comme sensibles, car ils exposent les populations humaines aux substances toxiques éventuellement présentes dans les sols. Les voies d'exposition possibles sont l'inhalation, l'ingestion directe ou indirecte (consommation de plantes cultivées, de viande ou de lait de bétail) et le contact cutané (MEDAD, 2007). La problématique est alors essentiellement d'ordre sanitaire.

Les usages dits sensibles sont :

- Les parcs et jardins, les terrains de sport et les zones récréatives ;
- Les cours d'école et d'habitation ;
- Les jardins potagers et familiaux ;
- Les cultures annuelles ou permanentes.

Les teneurs en ETM et en polluants organiques devront obligatoirement être en accord avec les seuils réglementaires retenus.

5.3. Usages particuliers

a. Zones humides intérieures et maritimes

Les zones humides sont caractérisées au niveau pédologique par des manifestations d'hydromorphie importantes ou la présence d'un horizon histique, et souvent la présence d'eau libre. C'est le paramètre perméabilité qui permet la définition des zones humides. Celle-ci doit être faible à très faible. De fortes conductivités électriques peuvent être mesurées en zones humides maritimes. Le reste des paramètres n'est pas disqualifiant.

b. Assainissement non collectif

Si un zonage de l'aptitude des sols à l'assainissement non collectif a été établi sur le territoire communal, tel que le demande la Loi sur l'Eau du 30 décembre 2006, il convient de s'y référer.

L'installation ne doit pas permettre le contact entre les eaux usées et la nappe. Aucune manifestation d'hydromorphie ne doit donc être observée. La perméabilité doit être suffisante pour éviter la formation de flaques superficielles ($> 15 \text{ mm h}^{-1}$), mais elle ne doit pas être trop importante afin que l'épuration par les micro-organismes du sol puisse avoir lieu avant que la nappe sous-jacente ne soit atteinte ($< 500 \text{ mm h}^{-1}$). La pente du terrain doit être suffisamment faible, inférieure à 20 %, pour permettre une bonne infiltration de l'eau dans le sol.

Les seuils choisis permettent l'utilisation optimale des installations d'assainissement non collectif les plus légères à mettre en place, c'est-à-dire les tranchées d'infiltration à faible profondeur. Il existe néanmoins divers dispositifs permettant d'assurer le traitement des effluents, adaptés et dimensionnés selon les caractéristiques du sol.

Tableau 22 : Grille d'adéquation des caractéristiques des sols aux différentes fonctions selon l'usage des sols.

Fonctions et Indicateurs	Territoires agricoles		Forêts et milieux semi-naturels		Zones humides	Territoires artificialisés					
	Cultures annuelles, prairies temporaires	Cultures permanentes	Forêts	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Zones humides intérieures et maritimes	Zones urbanisées				Zones industrielles et commerciales	
						Places, cours, parkings, voies de com., équipements sportifs et de loisirs artificialisés	Jardins d'agrément, espaces verts, équipements sportifs et de loisirs non artificialisés, plates-bandes	Jardins potagers et familiaux	Jardins + Assainissement non collectif	Places, cours, parkings, voies de com., surfaces techniques	Jardins d'agrément, plates-bandes
	TA1	TA2	F1	F2	ZH	ZU1	ZU2	ZU3	ZU4	ZIC1	ZIC2
Circulation et rétention de l'eau											
Réserve utile	≤ 2	≤ 2	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 2	≤ 2		≤ 5	≤ 2
Coeff. de perméabilité k	1	2	3	4	5	5	2	2	2	5	2
Hydromorphie	≤ 2	≤ 2	≤ 3	≤ 3	4:5	≤ 5	≤ 2	≤ 2	1	≤ 5	≤ 2
Rétention et cycle des nutriments											
MO	≤ 3	≤ 4	≤ 4	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 3
CEC	≤ 2	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 2	≤ 2	≤ 5	≤ 5	≤ 2
pH											
Stabilité physique et support											
Erodibilité	≤ 2	≤ 2	≤ 5	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 4	≤ 2	1	≤ 5	≤ 4
Pente	≤ 2	≤ 2	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 5
Résistance à la pénétration	1	≤ 2	≤ 4	≤ 4	≤ 5	≤ 5	1	1	≤ 5	≤ 5	1
État de surface	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 3
Épaisseur du sol	≤ 2	≤ 2	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 3	≤ 2	1	≤ 5	≤ 3
Biodiversité											
Diversité bactérienne	≤ 3	≤ 3	≤ 2	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 3
Respiration	≤ 3	≤ 3	≤ 2	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 3
pH	≤ 3	≤ 3	≤ 4	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 3	≤ 3		≤ 5	≤ 3
Milieu remarquable ^a	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	1	1	1	1	1	1
Filtration et pouvoir tampon											
Pb	1	1	1	1	1	≤ 2	1	1	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Zn	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cu	1	1	1	1	1	≤ 2	1	1	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Cd	1	1	1	1	1	≤ 2	1	1	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Co	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ni	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HAP	≤ 3	≤ 3					≤ 3	≤ 3			
PCB	≤ 2	≤ 2					≤ 2	≤ 2			
Conductivité électrique	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 5	≤ 5	≤ 2	≤ 2		≤ 5	≤ 2
Épaisseur du sol	≤ 2	≤ 2	≤ 4	≤ 3	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Patrimoine pédologique											
Surface	1	1	≤ 5	≤ 5	≤ 5	1	1	1	1	1	1

^a Parcs nationaux, ZICO (ZPS), Natura 2000 (ZSC, ZPS), ZNIEFF (types I et II), RAMSAR, APB, ENS, réserves naturelles nationales, réserves naturelles régionales.

Règles de construction de la grille adéquation :

- Si l'indicateur est représentatif d'une contrainte majeure pour un usage donné, une classe faible (1, 2) est attribuée au couple indicateur-usage ;
- Si l'indicateur est représentatif d'une contrainte mineure pour un usage donné, une classe médiane à forte (3, 4, 5) est attribuée au couple indicateur-usage
- Une contrainte majeure est un facteur limitant de l'usage. Elle peut compromettre sa réalisation.
- Une contrainte mineure est une caractéristique du sol défavorable à l'usage. L'usage peut être réalisé, mais son potentiel ne sera jamais maximum.

Références bibliographiques spécifiques à l'annexe

AFES, 2009 - Référentiel pédologique 2009. Editions Quae, Savoir faire, Paris.

AFNOR, 1998 - Mise en oeuvre des dispositifs d'assainissement autonome - Maisons d'habitation individuelle (NF XP P 16-603, référence DTU 64.1). Norme française, 37 p.

Andrews, S.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2004 - The Soil Management Assessment Framework: A quantitative soil quality evaluation method. Soil Science Society of America Journal, 68,6, pp. 1945-1962.

- Arrêté du 6 mai 1996 fixant les prescriptions techniques applicables aux systèmes d'assainissement non collectif. J.O. n°132 du 8 juin 1996, NOR : ENVE9650184A.
- Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles, pris en application du décret n° 97-1133 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. J.O. du 31 janvier 1998, NOR : ATEE9760538A.
- Antoni, V., Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Zaidi, N., Laroche, B., Barthès, S., Daroussin, J., Arrouays, D., 2006 - Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un référentiel régional pédologique au 1/25000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 201-222.
- Baize, D., Jabiol, B., 1995. Guide pour la description des sols. INRA Editions, Techniques et Pratiques, Paris.
- Baize, D., 2000. Guide des analyses en pédologie, 2ème éd. INRA Editions, Paris.
- Bruand, A., Duval, O., Cousin, I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité. *Etude et Gestion des Sols*, 11, 3, pp. 323-332.
- Bundes - Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12 Juli 1999.
- Carter, M.B., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H., 1997. Concepts of soil quality and their significance, pp. 1-17. *In*: Gregorich, E. G., Carter, M. R. (Eds), *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Elsevier, Developments in Soil Science, Amsterdam.
- Carter, M.R., 2006. Quality: critical limits and standardization. *Encyclopedia of Soil Science*, Taylor & Francis, pp. 1412-1415.
- Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (Osols) du 1er juillet 1998, RS 814.12, Berne.
- FAO, 1993. FESLM: An international framework for evaluating sustainable land management. Land and water development division. Rome, Italy.
- Fernandes, J.C., Gamero, C.A., Rodrigues, J.G.L., Mirás-Avalos, J.M., 2011. Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. *Soil and Tillage Research*, 112, 2, pp. 167-174.
- GEPPA, 1981. Synthèse des travaux de la commission de cartographie 1971–1981. Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée.
- Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., van Es, H.M., Wolfe, D.W., Thies, J.E., Abawi, G.S., 2007. *Cornell Soil Health Assessment training manual*, Edition 1.2. Cornell University, Geneva, NY.
- Haygarth, P.M., Ritz, K., 2009. The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*, 26, pp. 187-197.
- Idowu, O.J., van Es, H.M., Abawi, G.S., Wolfe, D.W., Ball, J.I., Gugino, B.K., Moebius, B.N., Schindelbeck, R.R., Bilgili, A.V., 2008. Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods. *Plant and Soil*, 307, 1-2, pp. 243-253.
- IGN, CRIGE-PACA, 2008. Base de données altimétriques, BD ALTI, MNT 25 m, v. beta. Institut National Géographique.
- Kirchmann, H., Andersson, R., 2001. The Swedish system for quality assessment of agricultural soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 72, 2, pp. 129-139.

- Materechera, S.A., Dexter, A.R., Alston, A.M., 1991. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant-species. *Plant and Soil*, 13, 1, pp. 31-41.
- MEDAD, 2007. Diagnostics du site. 274 p.
- Arrêté du 1er octobre 2009 modifiant l'arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement. JORF du 24 novembre 2009, NOR : DEVO0922936A.
- Convention sur la diversité biologique lors de la conférence des nations unies sur l'environnement et le développement, Rio de Janeiro.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., Broderson, W.D., 2002. Field book for describing and sampling soils, v. 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, U.S. Department of Agriculture, Lincoln, NE.
- Sililo, O.T.N., Conrad, J.E., Dohse, T.E., Tredoux, G., du Plessis, M.H., 2001. A procedure for deriving qualitative contaminant attenuation maps from land type data. *Journal of Hydrology*, 241, 1-2, pp. 104-109.
- Sinnett, D., Morgan, G., Williams, M., Hutchings, T.R., 2008. Soil penetration resistance and tree root development. *Soil Use and Management*, 24, 3, pp. 273-280.
- Société du Canal de Provence, 1970. Etude pédologique moyennement détaillée des secteurs de Puylobier, Pourrières, Pourcieux.
- Velasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 12, pp. 3066-3080.
- Vrščaj, B., Poggio, L., Ajmone-Marsan, F., 2008. A method for soil environmental quality evaluation for management and planning in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 88, 2-4, pp. 81-94.

Annexe II-14 : Classification et analyse des états de surface des sols (travail effectué par Thomas Ménard dans le cadre du projet Astuce & Tic).

1. Introduction

L'objectif de notre travail est d'extraire une information sur l'état de surface du sol dans le milieu urbain qui apporte indirectement des informations sur le fonctionnement du sol. Ce travail est réalisé par télédétection à partir d'une image à très haute résolution. Cette information est ensuite confrontée à une donnée de référence d'occupation/utilisation du sol. Le croisement d'informations permet de développer des statistiques sur l'état de surface du sol en fonction du mode d'occupation/utilisation du sol. Ces statistiques permettent de comprendre la manière dont l'urbanisation affecte les sols à travers la diversité et la superficie des états de surface. L'abondance de végétation, de revêtements ou d'érosion rend compte de l'existence de sols affectés et moins affectés par l'urbanisation.

Ce travail a servi de référence pour la caractérisation des états de surface du sol dans le cadre d'un autre projet soutenu par le Fonds Unique Interministériel de soutien aux programmes de recherche et développement des pôles de compétitivité, Astuce & Tic (« Anticipation Sécurisée des Territoires Urbanisés, des Campagnes et de leur Environnement fondée sur les nouvelles Technologies de l'Information et des Communications») dont la zone d'étude était la région de la Crau, également dans les Bouches-du-Rhône. Les détails pratiques de la mise en œuvre de ce travail sont donc disponibles dans le rapport final du projet (de Mordant de Massiac *et al.* coord., 2011).

2. Matériel et méthode

La donnée produite est par définition, une donnée d'occupation du sol. Nous avons comme objectif initial d'extraire les informations correspondantes à la typologie suivante (**Tableau 1**) :

Tableau 1 : Etats de surface initialement identifiés comme discriminants.

no classe	état de surface
1	sol nu
2	sable, graviers
3	revêtement routier (asphalte, bitume)
4	bâti
5	végétation arbustive
6	végétation sèche ou enherbée
7	eau

Cette typologie a été mise à jour pendant la phase de traitement. Les caractéristiques urbaines du territoire étudié, la qualité de la donnée et les technologies employées ont finalement abouti à développer une autre typologie (**Tableau 2**) :

Tableau 2 : Etats de surface identifiés au terme de l'étude.

Classe (niveau 1)	Classe (niveau 2)	Libellé (niveau 1)	Libellé (niveau 2)	Description complète
10	11	surface altérée, érodée	sol nu	sol en majorité nu détecté sans grande probabilité de confusion avec les surfaces artificialisées
10	12	surface altérée, érodée	surface non-déterminée	sol nu, surface naturelle érodée, graviers, sable, revêtement ou surfaçage très altéré avec probabilité de confusion avec surfaces artificialisées
20	21	sol agricole	sol en culture	sol recouvert de végétation agricole
20	22	sol agricole	sol en jachère	sol nu des parcelles agricole (jachère, bordure...)
30	31	revêtement urbain	revêtement routier	revêtement ou surfaçage des routes (asphalte, enrobé bitumineux)
30	32	revêtement urbain	revêtement de place	revêtement ou surfaçage en bordure de ou associé aux routes (asphalte, enrobé bitumineux)
40	41	bâti	bâti individuel	construction de faible superficie (<400 m2) correspondant essentiellement à des bâtis individuels des quartiers résidentiels
40	42	bâti	bâti administratif, collectif ou industriel	construction de grande superficie (>400 m2) correspondant à des bâtis administratifs, collectifs ou industriels
60	61	sol aménagé pour le sport	sol enherbé de sport	sol en végétation (synthétique ou non) aménagé pour des activités sportives
60	62	sol aménagé pour le sport	sol nu de sport	sol nu (terre battue) aménagé pour des activités sportives
70	71	végétation	végétation arbustive fermée	végétation arbustive sous forme de grands ensembles fermés (forêts, bois, sous-bois...)
70	72	végétation	végétation arbustive linéaire urbaine	végétation arbustive urbaine recouvrant potentiellement des surfaces non-végétalisées linéaires (routes, trottoirs)
70	73	végétation	végétation sèche ou raze	surface enherbée basse ou végétation sèche
70	74	végétation	végétation arbustive urbaine	végétation arbustive urbaine recouvrant potentiellement des surfaces non-végétalisées
80	81	eau	eau libre	étendue d'eau
80	82	eau	eau en bassin ou canaux	eau contenue dans une enceinte étanche

a . Les données d'origine

La donnée d'origine est une image satellite à très haute résolution, Quickbird (DIGITALGLOBE, Etats-Unis). Les produits Quickbird sont des images panchromatiques à résolution spatiale de 0.6 mètre et des images multispectrales à 4 bandes (Bleu-Vert-Rouge-Infrarouge) à résolution spatiale de 2.5 mètres.

DigitalGlobe propose également les produits issus des capteurs des satellites WorldView 1 et WorldView 2 qui possèdent une gamme plus étendue dans le spectre infrarouge. Il propose notamment des photographies aériennes de campagnes aéroportées. Leurs produits sont optimaux pour l'analyse de végétation, de bathymétrie et d'extraction d'objets.

Initialement nous avons à disposition les images d'archive suivantes dont les caractéristiques sont résumées dans le **Tableau 3** :

Tableau 3 : caractéristiques des images satellite à disposition pour la commune de Gardanne.

ID	Date d'acquisition	Angle Nadir	BANDS	Angle azimut h solaire	Angle élévation solaire	couverture nuageuse
10100100011E0B00	03/09/2002	14,86	MS; PAN	151	51	0 % nuages
10100100050B1800	23/06/2006	17,41	MS; PAN	154	68	0 % nuages

Le travail a finalement été réalisé sur l'image de 2002, sur le territoire de la commune de Gardanne car la donnée de 2002 est plus appropriée pour l'expérimentation envisagée de par son nadir plus faible, l'élévation solaire et la saison plus propice.

b. Outils et méthodes de traitement

L'outil d'analyse d'images est un logiciel spécialisé reconnu dans le domaine. Il s'agit d'ENVI 4.6 (développé par ITT) et son extension récente ENVI-Feature extraction (ENVI Fx) basés sur le traitement objet (ITTVIS). Cette application a été conçue pour proposer un panel complet d'algorithmes pour analyser, étudier et comprendre la dynamique du territoire et de l'environnement. Il est capable de traiter différents types de données (Multi-spectrale, hyperspectrale, photographie aérienne, MNT, LIDAR) et d'en déduire des corrections, des classifications, de nouvelles données (MNT, MNE), de la vectorisation. A présent, seule la composante « radar » n'est pas traitée par le logiciel.

Des corrections spectrales et spatiales standards ayant été demandées directement à DigitalGlobe, nous n'avons pas eu besoin de faire de corrections supplémentaires. Cependant, il existe quelques imprécisions dans le géoréférencement de l'image qui sont éliminées par l'utilisation de MNT à haute résolution pour une orthorectification rigoureuse. La donnée est ensuite re-projetée dans un système de référence Lambert II étendu.

La donnée panchromatique et la donnée multi-spectrale sont fusionnées pour obtenir une donnée multispectrale à résolution de 0,6 mètre. Cette opération est réalisée avec un algorithme spécifique d'ENVI re-échantillonnant la radiométrie de l'image multispectrale à une résolution supérieure (panchromatique).

Des données supplémentaires ont été générées pour optimiser la classification. Ces données simplifient l'extraction des informations. Il s'agit de l'indice de végétation (NDVI) et de ratio entre les bandes multi-

spectrales (B1/B4, B3-B2). Elles sont obtenues par la combinaison des valeurs radiométriques de la donnée d'origine, selon des équations ou calculs connus.

ENVI Feature extraction permettant d'extraire des entités ou objets ayant des caractéristiques spectrales, spatiales et texturales homogènes, les étapes suivantes ont été réalisées avec ENVI Fx :

- Lancement du processus de segmentation avec chargement de la donnée de base (multispectrale fusionnée), de la donnée auxiliaire (NDVI) ;
- Choix des coefficients de Segmentation/Merging optimaux pour la séparation des classes ;
- Exportation de la donnée vectorisée non classée avec les attributs.

Afin de compléter, corriger et parfaire la classification, une compilation de données statistiques sur les objets vectorisés a ensuite été effectuée à l'aide d'un logiciel SIG ArcGIS 9.3 (ESRI). Ce travail est similaire à un algorithme de traitement par sélection d'exemples, cependant le travail est beaucoup plus souple avec extraction des données du logiciel SIG vers un tableur (MS Excel 2007) et analyse statistique. Ce travail permet d'affiner les étapes précédentes de classification et de mieux connaître les propriétés des objets restants à classer.

La segmentation est une étape supervisée et automatisée et permet de définir avec le plus de vraisemblance possible les limites de zones urbaines homogènes. L'étape de classification est celle qui demande le plus de temps. Elle consiste à travailler sur les entités ou objets, de procéder à un affinage des règles ou en dernier lieu à une photo-interprétation. La photo-interprétation se fait par simple analyse visuelle du paysage et affectation au polygone (entité/objet) de la classe appropriée.

Brièvement, l'arbre de classification est présenté en **Figure 1** et le protocole de classification des surfaces en **Figure 2**.

Les différentes classes identifiées sont présentées ci-dessous avec des exemples (**Figures 3 à 18**). Les flèches indiquent les unités de couleur concernées.

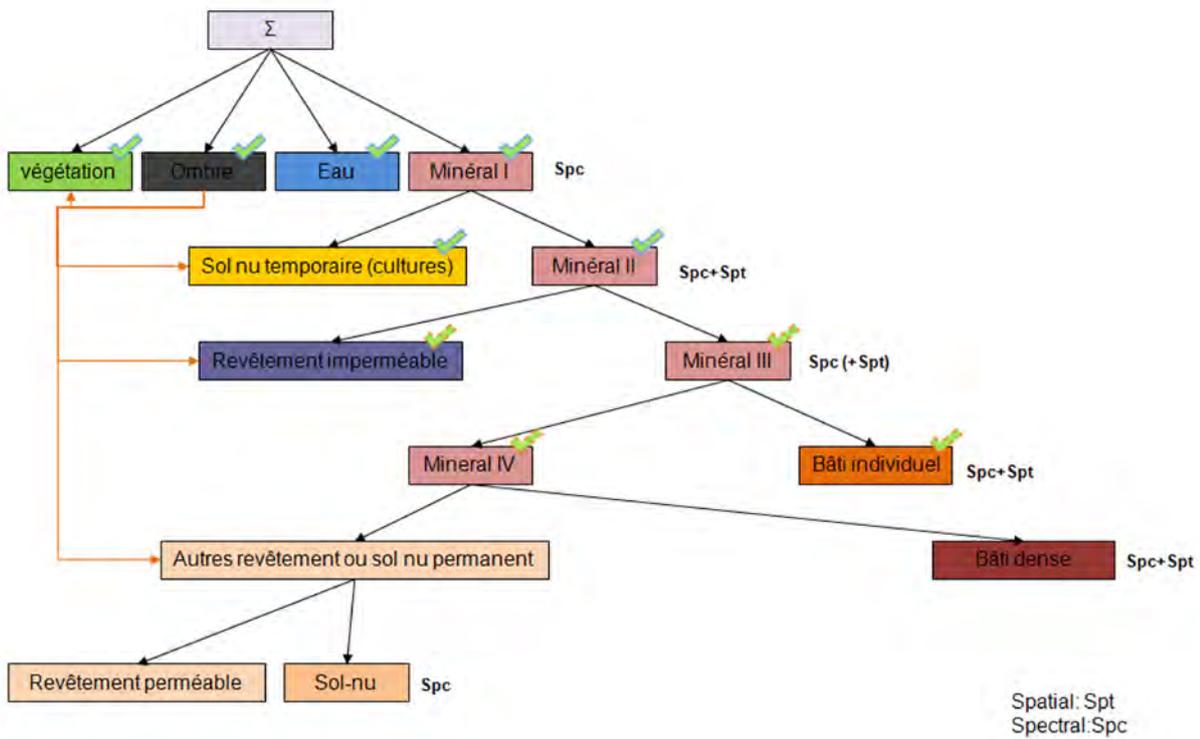


Figure 1 : procédure d'extraction des différentes classes d'état de surface.

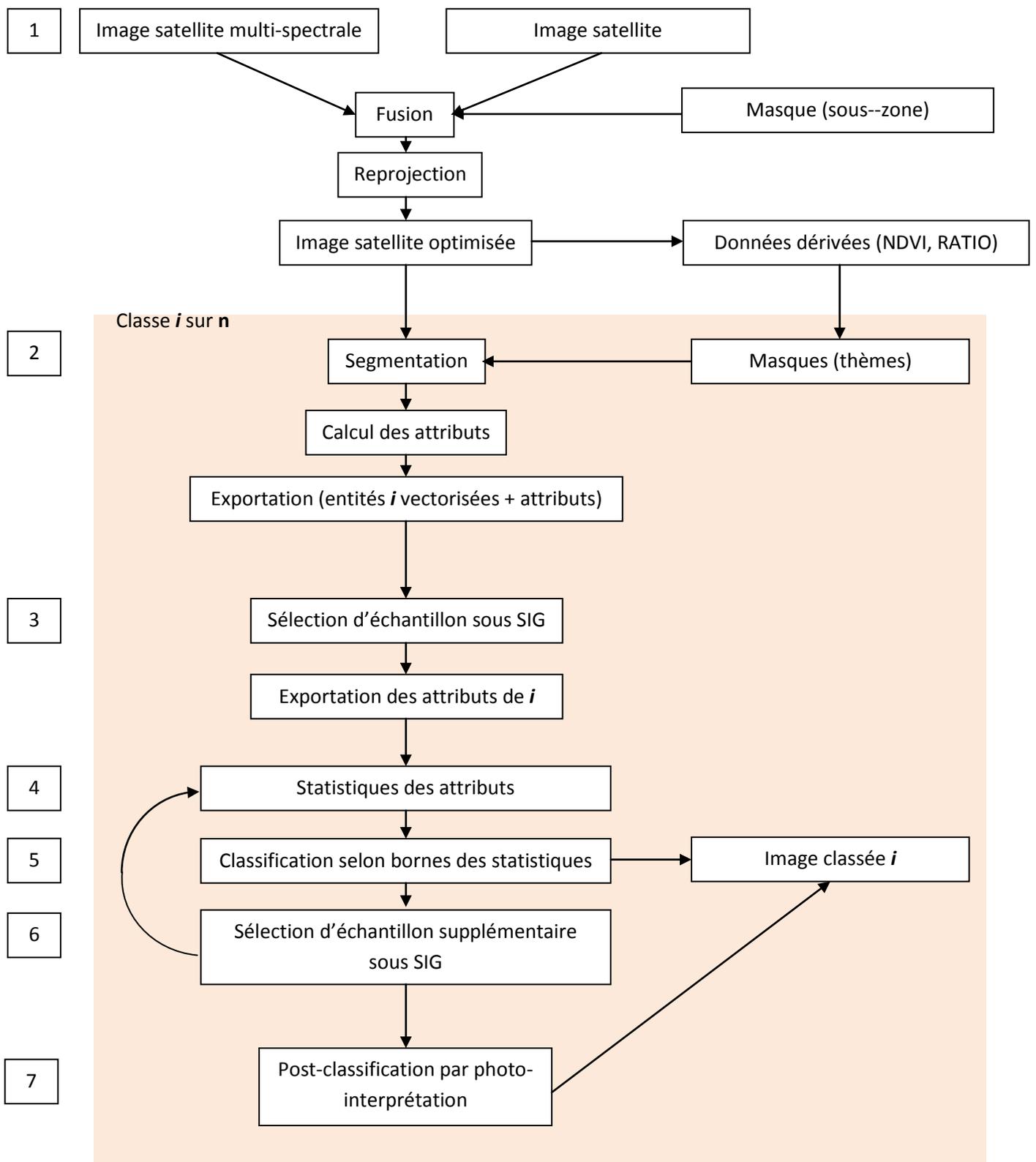


Figure 36 : Protocole appliqué pour la classification des états de surface

3. Description des classes

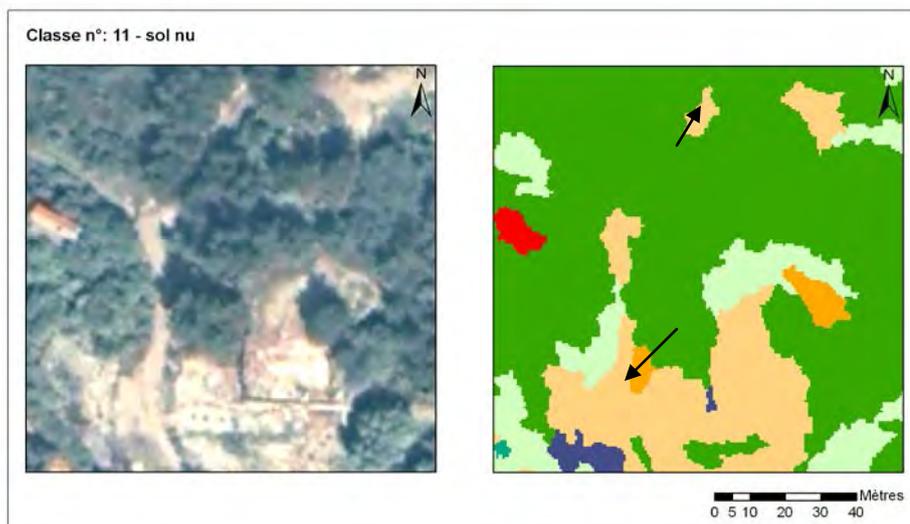


Figure 3 : sol nu = sol en majorité nu détecté sans grande probabilité de confusion avec les surfaces artificielles. Le sol nu peut être dû à une érosion naturelle ou une anthropisation d'un lieu.

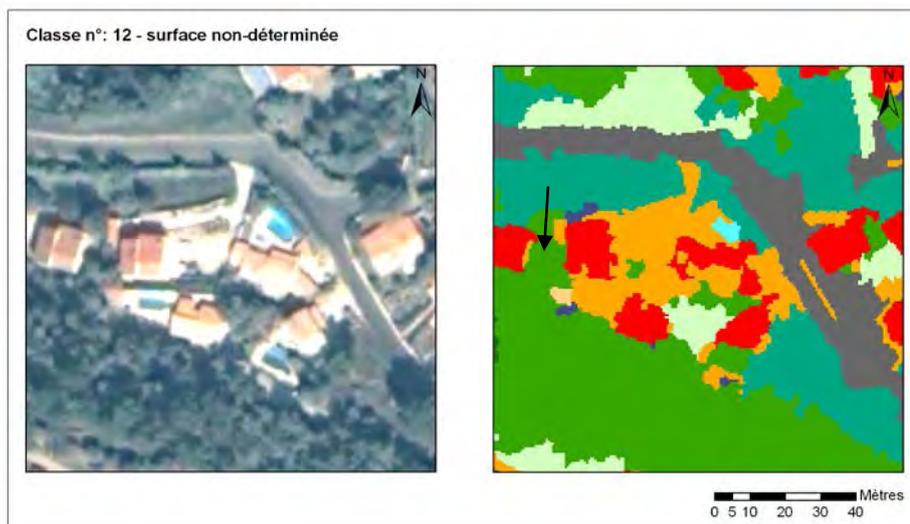


Figure 4 : surface non déterminée = sol nu, de surface naturelle érodée, de graviers, de sable, de revêtement ou de surfacage très altéré, avec une plus grande probabilité de confusion entre ces différentes surfaces.

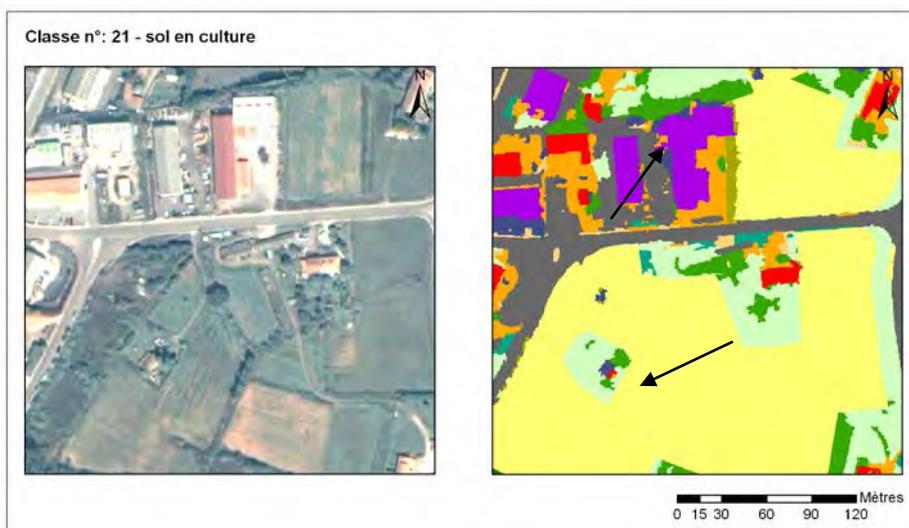


Figure 5 : sol en culture = sol recouvert de végétation issue de l'agriculture

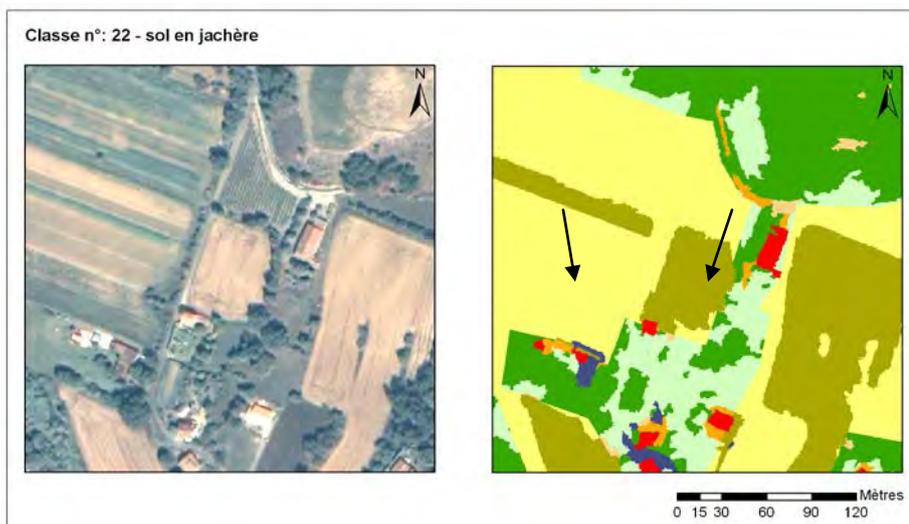


Figure 6 : sol en jachère = sol nu des parcelles agricoles (jachère).

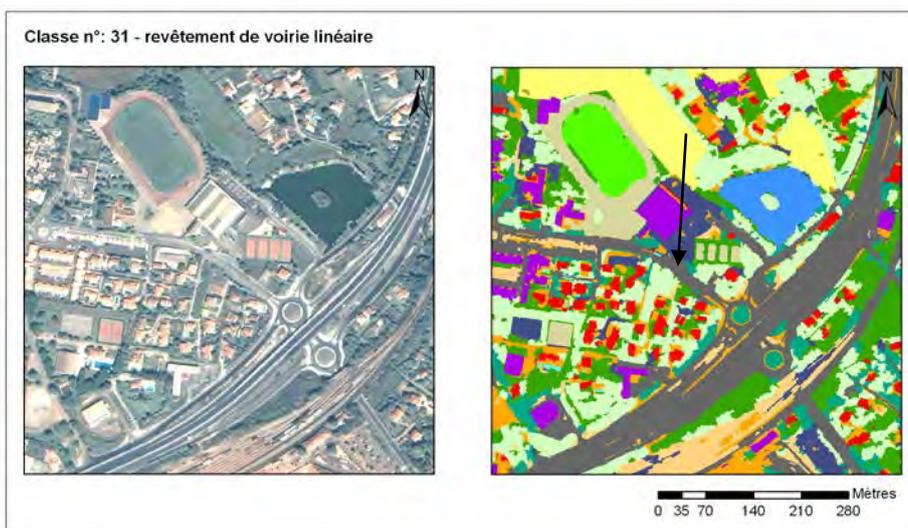


Figure 7 : revêtement de voirie linéaire = revêtement ou surfacage des routes (asphalte, enrobé bitumineux).

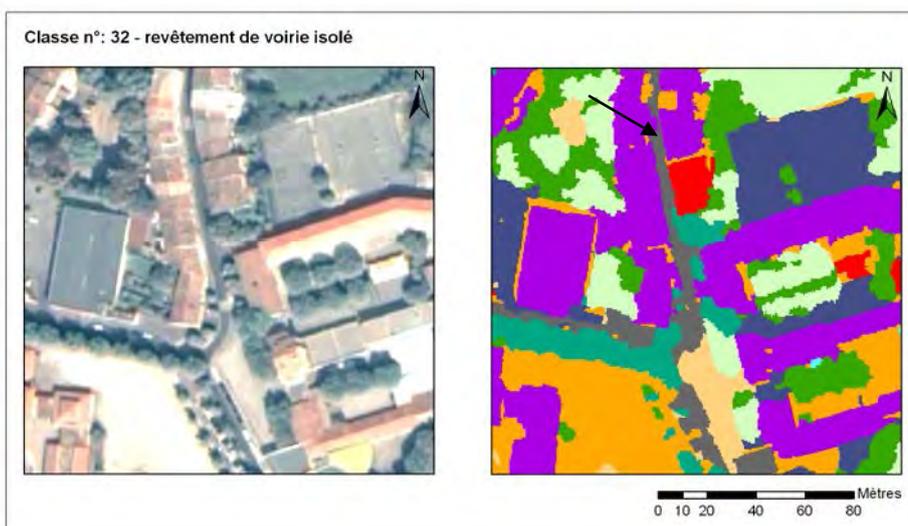


Figure 8 : revêtement de voirie isolé = revêtement ou surfacage en bordure ou associé aux routes (asphalte, enrobé bitumineux).

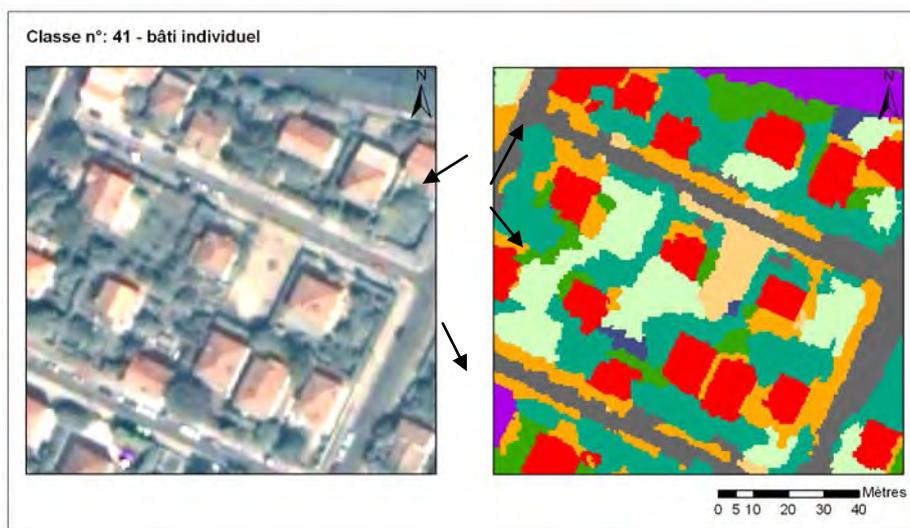


Figure 9 : bâti individuel = construction de faible superficie (<400 m²) correspondant essentiellement à des bâtis individuels des quartiers résidentiels.

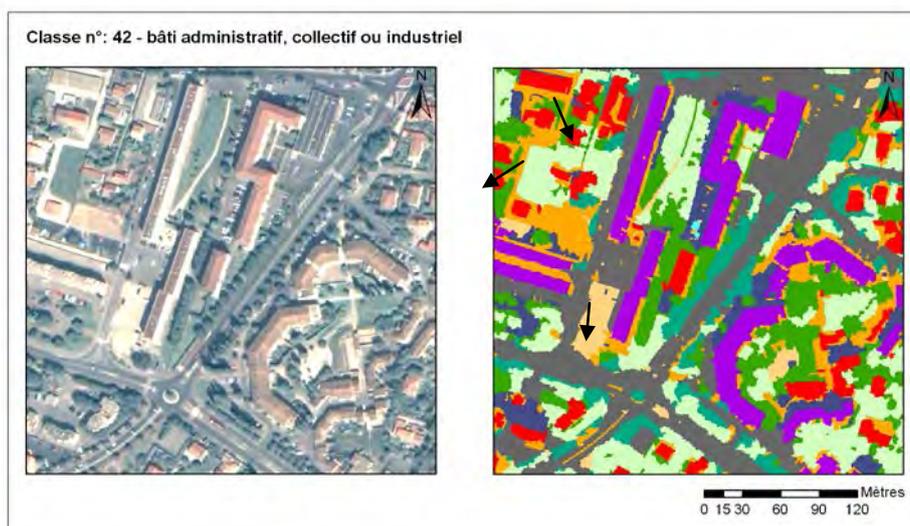


Figure 10 : bâti administratif, collectif ou industriel = construction de grande superficie (>400 m²) correspondant à des bâtis administratifs, collectifs ou industriels.

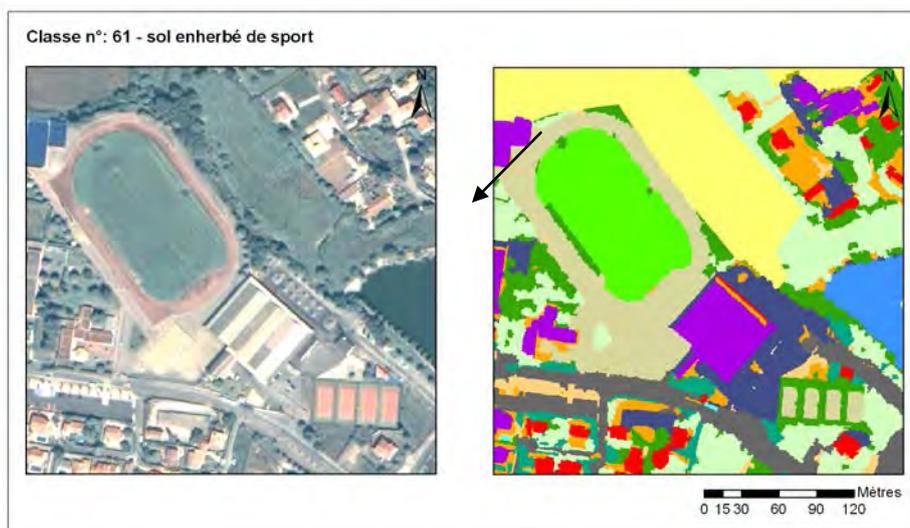


Figure 11 : sol enherbé de sport = sol végétalisé (synthétique ou non) aménagé pour des activités sportives.

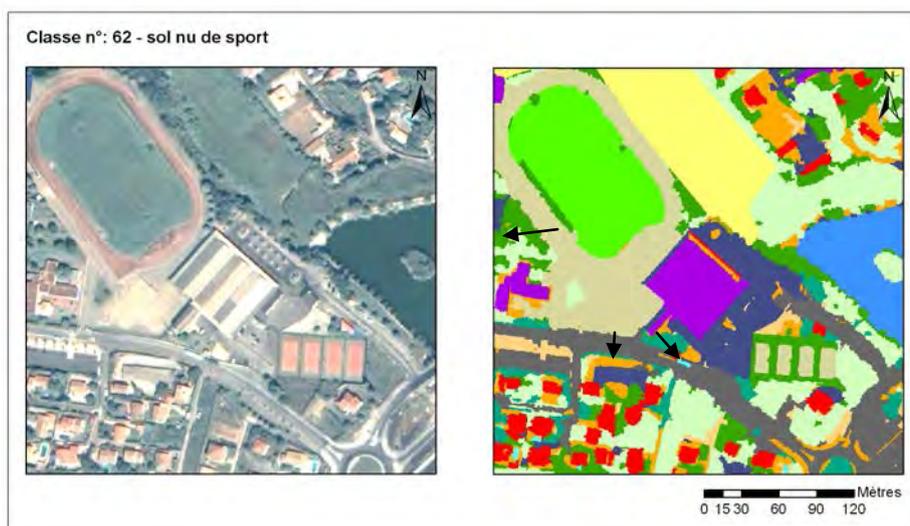


Figure 12 : sol nu de sport = sol nu (terre battue) aménagé pour des activités sportives.

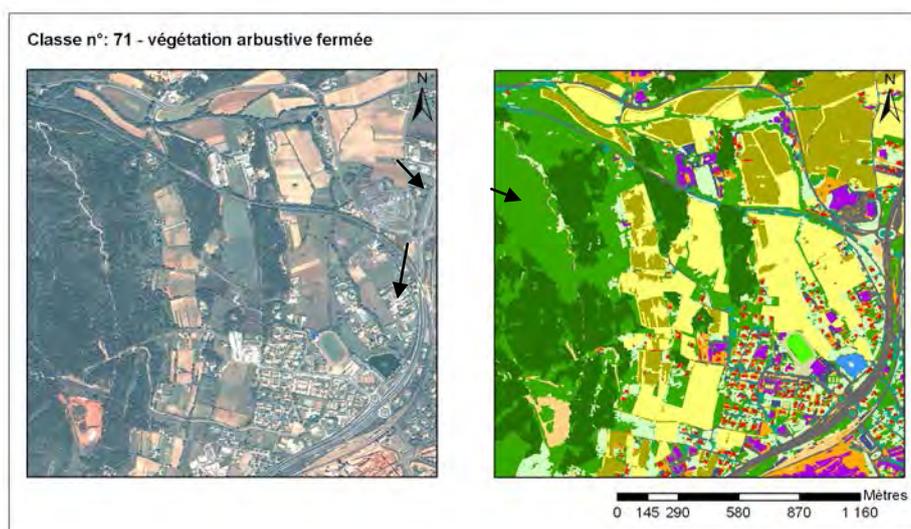


Figure 13 : végétation arbustive fermée = végétation arbustive sous forme de grands ensembles fermés (forêts, bois,...).

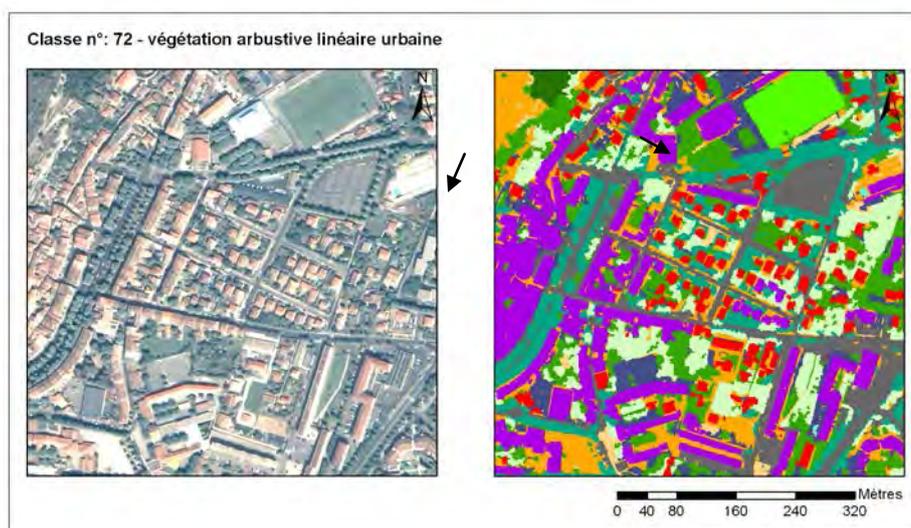


Figure 14 : végétation arbustive linéaire urbaine = végétation arbustive urbaine recouvrant potentiellement des surfaces non-végétalisées linéaires (revêtement routier, revêtement de place et voirie).

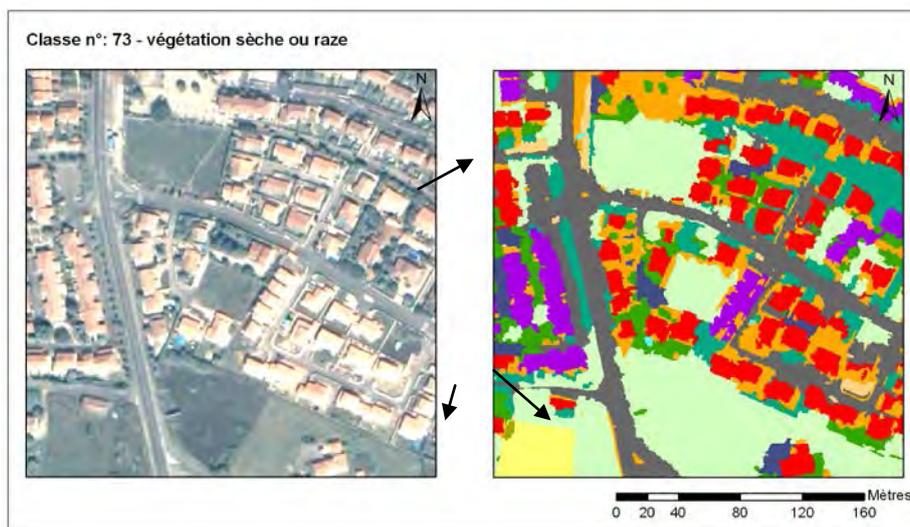


Figure 15 : végétation sèche ou raze = surface enherbée basse ou végétation sèche.

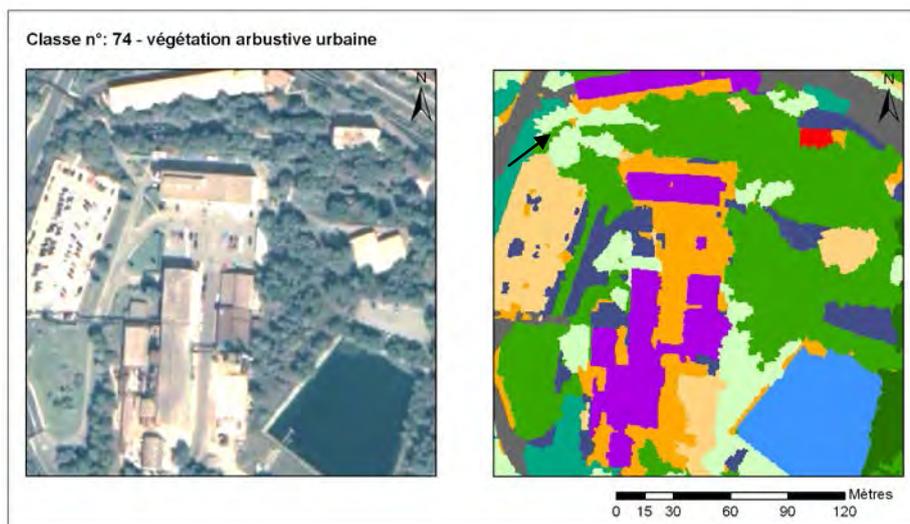


Figure 16 : végétation arbustive urbaine = végétation arbustive urbaine recouvrant potentiellement des surfaces non-végétalisées.

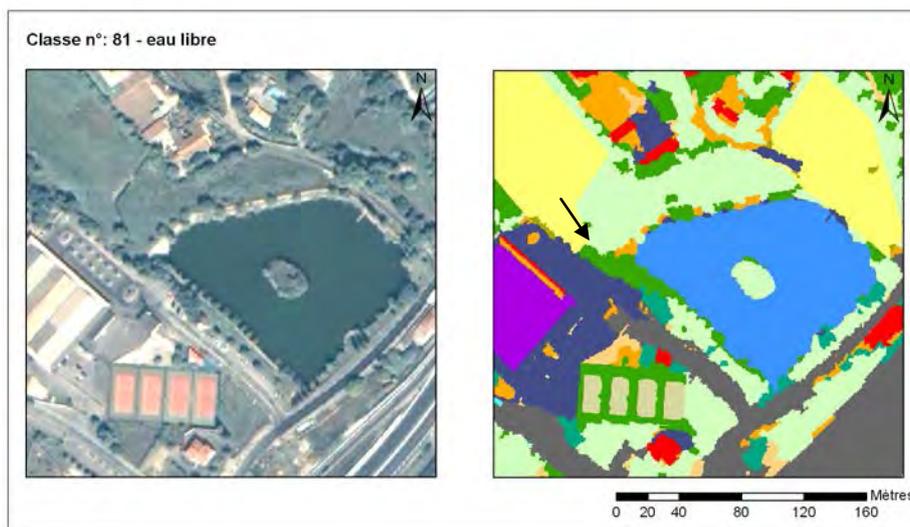


Figure 17 : eau libre = étendue d'eau naturelle.

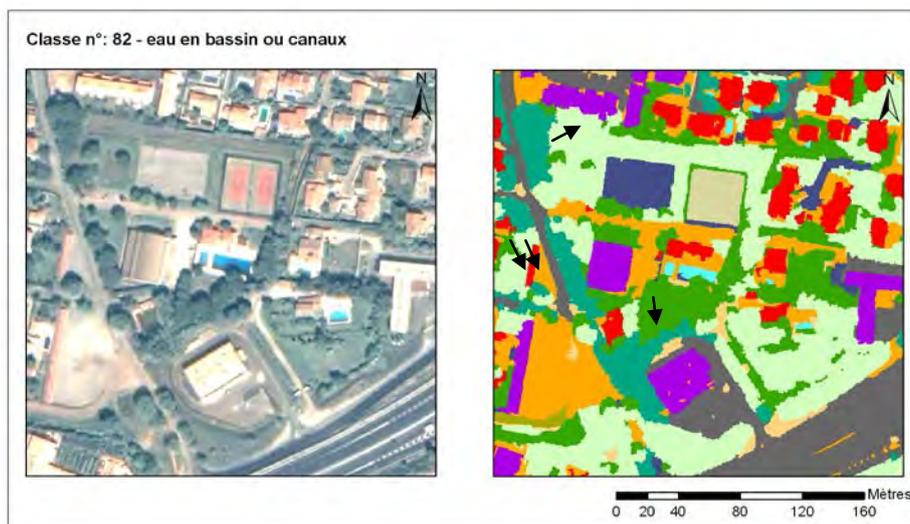


Figure 18 : eau en bassin ou canaux = eau contenue dans une enceinte, un édifice étanche.

Références bibliographiques spécifiques de l'annexe

de Mordant de Massiac J.-C., Trolard F., Bourrié G. (coordinateurs), (2011) - Anticipation Sécurisée des Territoires Urbanisés, des Campagnes et de leur Environnement fondée sur les nouvelles Technologies de l'Information et des Communications (Astuce & Tic). Rapport final, Rédaction : Consortium Astuce & Tic, décembre 2011, 1450p.

Annexe III-1 : Données et statistiques descriptives relatives aux profils de sol échantillonnés sur les communes de Gardanne et Rousset

Tableau 1 : Données descriptives des sites échantillonnés : A. Gardanne et B. Rousset.

Tableau 2 : Paramètres microbiologiques, physico-chimiques et de pénétrométrie mesurés ou calculés pour les profils de sol de : A. Gardanne et B. Rousset.

Tableau 3 : Légende des tableaux 1 et 2.

Tableau 4 : Statistiques descriptives obtenues sous sur les jeux complets de données de Gardanne et Rousset, soit sans les sites G41 et R33.

Tableau 5 : matrice de corrélation (r de Pearson) pour l'ensemble du jeu de données Gardanne + Rousset sans le site R33.

Tableau 6 : matrices de corrélation (r de Pearson), pour : A. Gardanne sans le site G41 et B. Rousset sans le site R33.

Tableau 7 : Résultats de tests de comparaison de variance (test paramétrique) et de moyenne (test non paramétrique) entre le jeu de données de Gardanne et celui de Rousset.

Tableau 1A : Données descriptives des sites échantillonnés à Gardanne

A. GARDANNE																
PROFIL DE SOL										SITE						
ID_SITE_T	EP_SOL	NB_HZ	RP_REF_1	RP_QUAL_1	RP_REF_2	RP_QUAL_2	RP_PREP_2	RP_SUBSTRAT	CL_HYDROM	X	Y	OCSOL_T	OCSOL_NIV1	TYPE_SURF	VEG	Dans typologie
G1	38	4	ANTHROPOSOL RECONSTITUE				sur	terril	Va	853405,917	1832076,626	terril	1	végétalisé	prairie, buissons, ronces, églantine, joncs	X
G3	105	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE				sur	terril	IIb	853355,153	1831992,94	terril	1	végétalisé	prairie	
G3	115	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE				sur	terril	la							
G4	16	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE				sur	terril	la	853253,344	1832070,557	terril	1	végétalisé	herbe, mousse	X
G5	113	7	CALCOSOL				issu d'	argile	la	855417,825	1831363,149	forêt ouverte (3	végétalisé	pins, thym, chenes, garrigue	X
G6	120	2	CALCOSOL				issu d'	argile	la	855107,165	1831435,524	agricole	2	végétalisé	chaume	X
G7	120	2	CALCOSOL						la	854852,294	1831518,124	anciennes vig	2	végétalisé	vignes abandonnées, herbe, mousses, fruitiers	
G8	120	3	CALCOSOL	anthropisé					la	855013,754	1831572,844	habitat isolé,	1	végétalisé	gazon	X
G9	120	7	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	leptique	REDUCTISOL				IVc	854051,035	1832330,165	habitat isolé,	1	végétalisé	gazon	X
G10	90	3	LITHOSOL		ANTHROPOSOL RECONSTITUE				la	854020,117	1832240,296	parking	1	végétalisé	gazon	X
G11	120	2	CALCOSOL				issu d'	argile	la	853191,85	1831882,508	agricole	2	végétalisé	chaume, herbe	X
G12	120	5	ANTHROPOSOL RECONSTITUE		ANTHROPOSOL	leptique, à charge grossière			la	853137,57	1831921,183	agricole	2	végétalisé	luzerne	
G14	120	3	ANTHROPOSOL TRANSFORME		BRUNISOL	de terrasse			la	852418,471	1833481,4	agricole, terra	2	végétalisé	luzerne	X
G15	120	3	CALCOSOL	à colluvions en surface					la	852739,112	1833544,231	agricole, terra	2	nu	jeune pousses	X
G17	60	3	CALCOSOL	anthropique, compacté, nivelé					IVa	852397,084	1832768,103	carreau de mi	1	artificialisé perméable	herbe	
G18	6	1	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	lithique, nivelé					la	852249,686	1832895,635	carreau de mi	1	artificialisé perméable	herbe rase (peu)	X
G19	6	2	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	lithique, nivelé					la	852240,558	1832921,257	carreau de mi	1	artificialisé perméable	herbe rase	
G20	45	6	CALCISOL				issu de	calcaire	la							
G22	55	7	CALCOSOL	leptique			issu de	calcaire	la	852196,621	1833599,924	forêt dense na	3	végétalisé	pins, sous-bois	X
G24	39	4	CALCOSOL				issu de	calcaire	la	853701,996	1832689,77	forêt mixte na	3	végétalisé	pins, chenes, sous-bois	X
G25	90	6	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, à matériaux terreux et technologiques					la	852761,033	1832038,008	zone industrie	1	artificialisé perméable	herbe	X
G26	80	3	CALCOSOL	anthropique, nivelé					la	852862,454	1832242,486	zone industrie	1	artificialisé perméable	aucune	X
G27	46	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, à horizon caillouteux					IVa	853976,588	1831869,227	terrain de spo	1	artificialisé perméable	aucune	X
G28	38	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, sablé, à horizon caillouteux					la	853202,978	1833658,243	terrain de spo	1	végétalisé	gazon	X
G29	44	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, sablé, à horizon caillouteux					la							
G30	22	2	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé			sur	matériaux de terri	la	853532,665	1831955,644	terrain de spo	1	artificialisé perméable	aucune	X
G31	8	2	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé			sur	matériaux de terri	la							
G32	120	6	REDOXSOL	anthropique, à horizon réductrice en profondeur					IVd	853916,461	1831895,793	tissu urbain, p	1	végétalisé	herbe	X
G33	34	3	CALCOSOL				issu de	calcaire tendre	la	855541,259	1831643,904	forêt ouverte	3	végétalisé	pins, petits feuillus	X
G34	110	3	CALCOSOL				issu de	marne	la	857910,356	1830463,556	forêt dense	3	végétalisé	chenes	X
G35	70	2	CALCOSOL				issu d'	argile	la	857983,819	1830471,126	oliveraie	2	végétalisé	oliviers, herbe	X
G36	66	2	COLLUVIOSOL				sur	calcaire	la	858015,406	1830526,232	oliveraie	2	végétalisé	oliviers, herbe	X
G37	7	1	RENDOSOL				issu de	calcaire	la	857465,53	1832498,66	garrigue	3	nu	arbustes	X
G38	2	2	COLLUVIOSOL						la	854166,982	1835385,859	prairie	2	végétalisé	prairie	X
G39	10	2	RENDOSOL				issu de	calcaire	la	854026,286	1836117,776	garrigue	3	végétalisé	herbe	
G40	96	4	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	scellé					la							
G41	15	1	-SOL	épianthropique, nivelé					la	854300,292	1832759,375	cour	1	artificialisé perméable	aucune	X
G42	80	4	ANTHROPOSOL RECONSTITUE						IVb	854300,292	1832787,128	jardin	1	végétalisé	herbe	X
G43	39	2	PELOSOL				issu des	argiles rouges du Montien	la	853118,967	1835813,488	habitat diffus,	1	végétalisé	herbe	X
G44	120	3	PELOSOL	labouré			issu des	argiles rouges du Montien	la	853717,482	1836060,738	habitat diffus,	1	nu	aucune	X
G45	40	2	PELOSOL	anthropique			issu des	argiles rouges du Montien	la	853710,747	1836051,806	habitat diffus,	1	nu	aucune	X
G46	3	2	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL		RENDOSOL		issu de	calcaire	la	854353,05	1836026,132	habitat diffus,	1	artificialisé perméable	aucune	X
G47	35	2	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, à matériaux terreux et technologiques					la	854260,807	1832796,322	habitat discor	1	végétalisé	herbe	X
G48	78	4	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, à horizon sableux					la	854222,17	1832910,596	square	1	végétalisé	herbe	X
G49	70	4	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé, scellé					IVa							
G50	52	4	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé, compacté					la	854016,038	1832932,438	terrain vague	1	artificialisé perméable	aucune	X
G51	30	4	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé, compacté					la	854105,011	1833345,801	terrain de péta	1	artificialisé perméable	aucune	X
G52	50	2	CALCOSOL	recouvert par des matériaux anthropiques terreux			issu d'	argile	la	854674,58	1832776,106	esp. libre urba	1	végétalisé	prairie	X
G53	70	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, à matériaux technologiques					la	854679,181	1834026,055	habitat discor	1	végétalisé	herbe	X

Tableau 1B : Données descriptives des sites échantillonnés à Rousset

B. ROUSSET										PROFIL DE SOL										SITE			
ID_SITE_T	EP_SOL	NB_HZ	RP_REF_1	RP_QUAL_1	RP_REF_2	RP_QUAL_2	RP_PREP_2	RP_SUBSTRAT	CL_HYDROM	X	Y	OCSOL_T	OCSOL_NIV1	TYPE_SURF	VEG	Dans typologie							
R1	30	2	COLLUVIOSOL				issu de	poudingues et argiles rouges	la	865477,004	1838072,963	garrigue	3	végétalisé	arbustes, thym, romarin	X							
R2	120	2	PELOSOL				issu des	argiles rouges du Montien	IIla	865479,775	1838298,04	oliveraie	2	végétalisé	oliviers, herbe	X							
R3	120	2	PELOSOL	colluvonné en surface			issu des	argiles rouges du Montien	IIlb	866838,196	1838945,111	vigne	2	nu	vigne	X							
R4	55	3	CALCOSOL				issu de	marne	la	866276,601	1837332,365	forêt ouverte	3	végétalisé	pins, arbustes, herbe	X							
R5	110	4	CALCOSOL	sableux			issu de	grès	la	866038,53	1838433,217	vigne	2	végétalisé	herbe, vigne	X							
R6	100	4	PELOSOL	assaini			issu d'	argiles	IVc	867141,617	1836657,527	prairie	2	végétalisé	herbe	X							
R7	110	3	PELOSOL	assaini			issu d'	argiles	la	867510,143	1836610,533	prairie	2	végétalisé	herbe	X							
R8	110	3	FLUVIOSOL BRUNIFIE				issu d'	alluvions de l'Arc	la	867839,913	1835347,915	agricole	2	nu	lentilles	X							
R9	50	3	CALCOSOL				issu des	calcaires de Rognac	la	867903,447	1836858,564	forêt dense	3	végétalisé	pins, buissons	X							
R10	50	3	CALCOSOL				issu des	colluvions du Riss	la	868975,179	1836388,469	vigne	2	nu	vigne	X							
R11	85	3	ANTHROPOSOL TRANSFORME	à matériau technologique					la	867358,36	1836951,779	prairie	2	végétalisé	herbe	X							
R12	110	3	COLLUVIOSOL				issu d'	éboulis d'argile et calcaires	la	866409,627	1839199,064	garrigue	3	végétalisé	garrigue	X							
R13	75	3	REDUCTISOL	colluvonné en surface			issu des	grès rouges du Montien	IIlc	866709,122	1838675,672	prairie, ancien	2	végétalisé	arbustes, jeunes pins, thym	X							
R14	60	3	COLLUVIOSOL				issu des	grès rouges du Montien	la	866734,489	1838692,885	forêt dense	3	végétalisé	pins, arbustes	X							
R15	20	2	CALCOSOL				issu des	colluvions du Riss	la	868037,259	1836768,128	forêt ouverte	3	végétalisé	pins, herbe	X							
R16	110	3	CALCOSOL				issu des	grès et argiles à Reptiles	IIla	865934,056	1836584,125	habitat discor	1	nu	potager	X							
R17	50	2	CALCOSOL				issu des	grès et argiles à Reptiles	la	865927,699	1836561,585	prairie dans m	2	végétalisé	prairie	X							
R18	100	3	FLUVIOSOL				issu des	alluvions de l'Arc	la	863753,969	1836003,393	agricole	2	végétalisé	blé	X							
R19	100	4	FLUVIOSOL				issu des	alluvions de l'Arc	la	863770,8	1835949,52	ripisylve	3	végétalisé	peupliers, arbustes, végétation herbacée	X							
R20	17	3	CALCOSOL	leptique			issu des	calcaires de Rognac	la	864855,9	1836632,717	forêt ouverte	3	végétalisé	pins, herbe	X							
R21	17	2	CALCOSOL				issu des	calcaires de Rognac	la	864918,88	1836814,64	forêt dense	3	végétalisé	chênes, pins, arbustes, herbe	X							
R22	17	2	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	à matériau technique en surface					la	868503,168	1837392,507	habitat diffus,	1	végétalisé	herbe	X							
R23	35	1	CALCOSOL				issu des	alluvions anciennes	la	868011,469	1836860,593	agricole	2	nu	jeunes pousses, chaume	X							
R24	80	2	CALCOSOL	sableux			issu des	grès	la	868150,812	1835670,343	agricole	2	nu	jeunes pousses, chaume	X							
R25	115	3	COLLUVIOSOL		REDUCTISOL			des vellons secondaires	IIb	868487,624	1835530,847	agricole	2	nu	jeunes pousses, chaume	X							
R26	8	1	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé					la	865564,542	1835177,699	zone industrie	1	artificialisé perméable	herbe (rare)								
R26	8	1	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé					la														
R27	30	3	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé					la	865597,766	1835159,039	zone industrie	1	artificialisé perméable	herbe (rare)	X							
R28	120	4	CALCOSOL	épianthropique, nivelé, urbain, compacté en surface					la	866101,198	1836446,331	terrain de péti	1	artificialisé perméable	aucune	X							
R29	90	3	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé		BRUNISOL	issu d'	argiles	la	866003,115	1836367,614	rond-point	1	artificialisé perméable	aucune	X							
R30	50	4	CALCOSOL	épianthropique, nivelé, sableux			issu de	grès	la	865794,1	1836711,921	aire de sport	1	végétalisé	herbe	X							
R31	70	2	CALCOSOL	urbain, nivelé					la	866364,23	1836575,385	aire de jeu	1	végétalisé	herbe	X							
R32	70	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé, sableux		BRUNISOL	issu de	grès	la	865946,802	1836706,049	parking	1	artificialisé perméable	aucune	X							
R33	5	1	~ ANTHROPOSOL CONSTRUIT						la	866349,945	1836101,257	zone industrie	1	végétalisé	herbe	X							
R34	10	1	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé, compacté, à charge grossière					la	866283,132	1837389,436	parking	1	artificialisé perméable	aucune	X							
R35	9	1	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL	nivelé, compacté, à charge grossière					la	867383,329	1837585,915	parking	1	artificialisé perméable	aucune	X							
R36	30	2	RENDOSOL				issu des	calcaires de Rognac	la	867822,191	1837176,711	habitat diffus,	1	végétalisé	herbe, thym	X							
R37	200	4					issu des	argiles à Reptiles	la	866918,488	1836605,287	habitat diffus,	1	végétalisé	herbe	X							
R38	100	2	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé			issu des	colluvions des grès et argiles	la	866501,206	1836723,037	habitat discor	1	nu	1 arbre	X							
R39	75	2		épianthropique, nivelé					IVa	1836709,783	866493,647	habitat discor	1	artificialisé perméable	aucune	X							
R40	140	3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE	nivelé					la	1836703,376	866521,874	habitat discor	1	végétalisé	herbe	X							
R41	90	3	CALCOSOL				issu des	calcaires de Rognac	IIa	1836783,107	866005,213	habitat discor	1	nu	aucune entre les rangs	X							
R42	45	1		épianthropique, nivelé, compacté, à charge grossière			issu de	grès	la	1836746,929	865977,203	habitat discor	1	artificialisé perméable	herbe (peu), arbres	X							

Tableau 2A : Paramètres microbiologiques, physico-chimiques et de pénétrométrie mesurés ou calculés pour les profils de sol de Gardanne.

Table with columns: ID SITE, ANALYSES MICROBIOLOGIQUES, ANALYSES PHYSICO-CHEMIQUES, PENETROMETRIE. Rows include site IDs (e.g., 01, 02, 03) and various analytical parameters like BIODIV, HUM, LAB, AMB, etc.

Tableau 2B : Paramètres microbiologiques, physico-chimiques et de pénétrométrie mesurés ou calculés pour les profils de sol de Rousset.

Table with columns: ID SITE, ANALYSES MICROBIOLOGIQUES, ANALYSES PHYSICO-CHEMIQUES, PENETROMETRIE. Rows include site IDs (e.g., R1, R2, R3) and various analytical parameters like BIODIV, HUM, LAB, AMB, etc.

Tableau 3 : Légende des tableaux 1 et 2.

LEGENDE DES EN-TETES DU TABLEAU 1	
SITE	
ID_SITE_T	Numéro du site
X	Coordonnées X en Lambert 2 étendu (longitude)
Y	Coordonnées Y en Lambert 2 étendu (latitude)
OCSOL_T	Occupation du sol observée (terrain)
OCSOL_NIV1	Classe d'occupation du sol de niveau 1 (1 : territoires artificialisés, 2 : territoires agricoles, 3 : forêts et milieux semi-naturels)
TYPE_SURF	Etat de surface
VEG	Type de végétation
Dans typologie	Echantillon utilisé pour la recherche d'une typologie des sols
PROFIL DE SOL	
EP_SOL	Epaisseur du sol jusqu'à blocage ou matériau parental (en cm)
NB_HZ	Nombre d'horizons
RP_REF_1	Nom selon le Référentiel Pédologique français (RP)
RP_QUAL_1	Qualificatif selon le RP
RP_REF_2	Deuxième rattachement éventuel
RP_QUAL_2	Qualificatif selon le RP pour ce deuxième rattachement
RP_PREP_2	Qualificatif du lien entre le sol et le matériau sous-jacent
RP_SUBSTRAT	Nature du matériau parental ou matériau sous-jacent
CL_HYDROM	Classe d'hydromorphie selon GEPPA (1981) et MEEDDM (2009).
LEGENDE DES EN-TETES DU TABLEAU 2	
ANALYSES MICROBIOLOGIQUES	
BIOLOG_H_T50	Plaques Biolog, indice de diversité de Shannon au temps T=50h
BIOLOG_H_T100	Plaques Biolog, indice de diversité de Shannon au temps T=100h
BIOLOG_LAMBDA	Plaques Biolog, temps de latence (h)
BIOLOG_MU	Plaques Biolog, taux maximum de développement de la couleur (h-1)
BIOLOG_A	Plaques Biolog, valeur seuil
BIOLOG_AWCD025	Plaques Biolog, temps d'arrivée au développement moyen de la couleur 0,25 (h)
BIOLOG_AWCD05	Plaques Biolog, temps d'arrivée au développement moyen de la couleur 0,5 (h)
BIOLOG_NBPUIITS_T50	Plaques Biolog, nombre de puits positifs au temps T=50h
BIOLOG_NBPUIITS_T100	Plaques Biolog, nombre de puits positifs au temps T=100h
BIOLOG_AIRE_T50	Plaques Biolog, aire sous la courbe, intervalle de 0 à 50h
BIOLOG_AIRE_T100	Plaques Biolog, aire sous la courbe, intervalle de 0 à 100h
BIOLOG_AIRE_T125	Plaques Biolog, aire sous la courbe, intervalle de 0 à 125h
BIOLOG_AIRE_T200	Plaques Biolog, aire sous la courbe, intervalle de 0 à 200h
RESPIRO_mO2	Respiration OxiTop, masse de O2 consommé (g O2/kg sol sec/jour)
RESPIRO_mCO2	Respiration OxiTop, masse de CO2 produit (g CO2/kg sol sec/jour)
FDA	Analyse microbiologique : Hydrolyse de la fluorescéine diacétate (mU gMS)
ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES	
SABLE_SURF	Teneur en sable (%)
ARGILE_SURF	Teneur en argile (%)
PH_SURF	pH eau (1:2.5) de l'horizon de surface
CORG_SURF	Teneur en carbone organique (g/kg de terre fine)
N_TOT	Teneur en azote total (g/kg de terre fine)
C/N	Rapport C/N
MO	Teneur en matière organique (g/kg de terre fine)
CACO3	Teneur en calcaire (g/kg de terre fine)
P_OLSEN	Teneur en phosphore total (P205) (g/kg de terre fine), méthode Olsen
CEC	Capacité d'échange cationique (cmol+/kg de terre fine), méthode Metson
Fe_CBD	Teneur en oxydes et hydroxydes de fer après extraction CBD (g/kg de terre fine)
Al_CBD	Teneur en oxydes et hydroxydes d'aluminium après extraction CBD (g/kg de terre fine)
Cr_TOT	Teneur en chrome total (mg/kg de terre fine)
Cu_TOT	Teneur en cuivre total (mg/kg de terre fine)
Ni_TOT	Teneur en nickel total (mg/kg de terre fine)
Zn_TOT	Teneur en zinc total (mg/kg de terre fine)
Co_TOT	Teneur en cobalt total (mg/kg de terre fine)
Pb_TOT	Teneur en plomb total (mg/kg de terre fine)
Cd_TOT	Teneur en cadmium total (mg/kg de terre fine)
Tl_TOT	Teneur en thallium total (mg/kg de terre fine)
Mo_TOT	Teneur en molybdène total (mg/kg de terre fine)
RU	Réserve utile en mm, estimée à l'aide des FTP de Bruand et al. (2004)
ESSAI AU PENETROMETRE	
RESIST_MIN_SURF	Résistance minimale de la strate de surface (MPa)
RESIST_MOY_SURF	Résistance moyenne de la strate de surface (MPa)
RESIST_MED_SURF	Résistance médiane de la strate de surface (MPa)
RESIST_MAX_SURF	Résistance maximale de la strate de surface (MPa)
ECART_SURF	Ecart-type de la résistance de la strate de surface (MPa)
VAR_SURF	Variance de la résistance de la strate de surface (MPa ²)
RESIST_MIN	Résistance minimale du profil (MPa)
RESIST_MAX	Résistance maximale du profil (MPa)
STRATE_RESIST_MIN	Résistance médiane de la strate la moins résistante (MPa)
STRATE_RESIST_MAX	Résistance médiane de la strate la plus résistante (MPa)
RATIO_RESIST	Rapport de la résistance de la 1ère et de la 2ème strate
NB_STRATE	Nombre de strates identifiées
NB_STRATE_NORM	Nombre de strates identifiées normalisé à la profondeur du sol (strate.m-1)
PROF_RESIST_MIN	Profondeur de la résistance minimale du profil (cm)
QD_15CM	Résistance à la pénétration moyenne, de 0 à 15 cm (MPa)

Tableau 7 : Résultats de tests de comparaison de variance (test paramétrique) et de moyenne (test non paramétrique) entre le jeu de données de Gardanne et celui de Rousset.

COMPARAISON DE GARDANNE ET ROUSSET

Test d'égalité des variances entre Gardanne et Rousset : test F de Fisher bilatéral à 5%

Test d'égalité des moyennes entre Gardanne et Rousset : test de Mann-Whitney bilatéral à 5%

Test de Fisher

H0 : Le rapport entre les variances est égal à 1.

Ha : Le rapport entre les variances est différent de 1.

Test de Mann-Whitney

H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Variable	Hypothèse retenue	
	test F de Fisher	Test de Mann-Whitney
BIOLOG_H_T50	H0	H0
BIOLOG_H_T100	Ha	H0
BIOLOG_LAMBDA	Ha	H0
BIOLOG_MU	H0	Ha
BIOLOG_A	Ha	H0
BIOLOG_AWCD025	Ha	Ha
BIOLOG_AWCD05	Ha	Ha
BIOLOG_NBPUITS_T50	H0	Ha
BIOLOG_NBPUITS_T100	H0	Ha
BIOLOG_AIRE_T50	H0	H0
BIOLOG_AIRE_T100	H0	Ha
BIOLOG_AIRE_T125	H0	Ha
BIOLOG_AIRE_T200	H0	Ha
RESPIRO_mO2	H0	H0
RESPIRO_mCO2	H0	H0
FDA	H0	H0
SABLE_SURF	H0	Ha
ARGILE_SURF	Ha	H0
PH_SURF	H0	Ha
CORG_SURF	Ha	H0
N_TOT	Ha	H0
C/N	Ha	H0
MO	Ha	H0
CACO3	H0	Ha
P_OLSEN	Ha	H0
CÉC	H0	H0
Fe_CBD	Ha	H0
Al_CBD	Ha	H0
Cr_TOT	H0	H0
Cu_TOT	H0	H0
Ni_TOT	H0	H0
Zn_TOT	Ha	H0
Co_TOT	H0	H0
Pb_TOT	Ha	Ha
Cd_TOT	Ha	H0
Tl_TOT	Ha	Ha
Mo_TOT	Ha	Ha
RU	H0	H0
RESIST_MIN_SURF	Ha	H0
RESIST_MOY_SURF	Ha	H0
RESIST_MED_SURF	Ha	H0
RESIST_MAX_SURF	Ha	H0
ECART_SURF	Ha	H0
VAR_SURF	Ha	Ha
RESIST_MIN	Ha	H0
RESIST_MAX	H0	H0
STRATE_RESIST_MIN	H0	H0
STRATE_RESIST_MAX	H0	H0
RATIO_RESIST	Ha	H0
NB_STRATE	H0	H0
NB_STRATE_NORM	H0	H0
PROF_RESIST_MIN	Ha	H0
QD_15CM	H0	H0

Annexe III-2 : Exemples de fiches de restitution aux propriétaires des sols prospectés

1. Fiche initialement proposée aux propriétaires de Gardanne



FICHE SITE : site 42

Essai réalisé le : 17-06-2009
Coordonnées (projection Lambert II étendu) : X = 854300,292 m
 Y = 1832759,375 m
Occupation du sol : tissu urbain discontinu, jardin
Depuis : 1957 (ancienne zone agricole)
Type de surface : enherbée
Végétation : herbe
Topographie : pente nulle

Analyses chimiques de l'horizon de surface (Ztr1)

pH : 8,0
 Carbone organique : 28,3 g.kg⁻¹
 Azote total : 2,32 g.kg⁻¹
 C/N = 12,2
 Phosphore assimilable : 0,183 g.kg⁻¹
 CEC : 10,6 cmol⁺.kg⁻¹
 Fer (oxydes et amorphes) : 3,45 g.kg⁻¹
 Aluminium (oxydes et amorphes) : 0,33 g.kg⁻¹
 Chrome total : 31,3 mg.kg⁻¹
 Cuivre total : 277 mg.kg⁻¹
 Nickel total : 20,4 mg.kg⁻¹
 Zinc total : 144 mg.kg⁻¹
 Cobalt total : 5,8 mg.kg⁻¹
 Plomb total : 63,1 mg.kg⁻¹
 Cadmium total : 0,51 mg.kg⁻¹
 Thallium total : 0,29 mg.kg⁻¹
 Molybdène total : 1,15 mg.kg⁻¹

Les analyses chimiques révèlent de fortes concentrations en trois éléments traces métalliques : le plomb, le zinc et le cuivre. La teneur en phosphore est également élevée.

Description pédologique

La description pédologique est réalisée à partir d'un sondage pédologique à la tarière manuelle (Figure 1). Le sondage a été mené qu'à 80 cm de profondeur. Quatre horizons sont décrits :

- Horizon 1** (0-21 cm) : Ztr1
Texture limono-sableuse, état sec, couleur brun clair homogène (2.5Y5/3), rares éléments grossiers, racines, effervescence à l'HCl.
- Horizon 2** (21-33 cm) : Ztr2
Texture limono-sableuse, état sec, couleur brun clair hétérogène (2.5Y5/3), quelques éléments millimétriques subarrondis, effervescence à l'HCl.
- Horizon 3** (33-55 cm) : IIA
Texture limono-sablo-argileuse, état frais, couleur brun clair hétérogène (2.5Y5/3), quelques éléments grossiers millimétriques subarrondis altérés, morceaux de charbon, taches d'oxydo-réduction, racines, effervescence à l'HCl.
- Horizon 4** (55-80 cm) : IISg
Texture limono-sablo-argileuse, état frais, couleur brun clair hétérogène (2.5Y5/2), éléments grossiers arrondis de quartz, morceaux de charbon, racines, effervescence à l'HCl.

→ Anthroposol reconstitué leptique, urbain, nivelé [RP 2008]
 → Technic Cambisol (Ruptic, Siltic) [WRB 2006]

Analyse microbiologique

L'horizon de surface (Ztr1) est soumis à une analyse de la diversité des communautés bactériennes par la méthode des plaques Biolog™. Avec un résultat de 31 puits positifs sur 31, la diversité des communautés bactériennes est très élevée.

Les deux premiers horizons de sol correspondent à des apports de matériaux terreux de curage. Ils ne dépassent pas 50 cm d'épaisseur. Ce sol est donc qualifié d'Anthroposol reconstitué leptique, dans la classification des sols française (RP 2008).

Dans la classification internationale (WRB 2006), ce sol est rattaché à la classe des Cambisols car il ne possède pas de caractéristiques suffisantes pour être rattaché aux sols anthropisés. La présence de matériaux d'origine anthropique permet d'ajouter le préfixe *Technic*. Le changement brutal de texture le long du profil est transcrit par le suffixe *Ruptic*. Enfin, sa richesse en limons permet de le qualifier de *Siltic*.

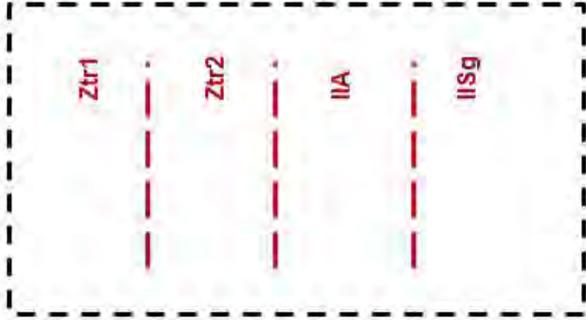


Figure 1 : Profil pédologique.

Essai au pénétromètre dynamique

L'essai au pénétromètre dynamique permet d'appréhender la résistance du sol dans sa dimension verticale. Le sondage a été mené jusqu'à 152 cm de profondeur. Quatre strates sont définies, en distinguant des segments de courbe à variation plus ou moins régulière (Figure 2) :

- **Strate 1** (0-56 cm) : La première strate est peu résistante et homogène, sa valeur médiane étant de 3,4 MPa. La présence d'une végétation a induit la mise en place d'un horizon organo-minéral dans les premiers centimètres de sol. La matière organique et la structure plus aérée de cet horizon donnent ainsi un signal de très faible valeur. La résistance croît avec la profondeur. Le bruit, c'est-à-dire la variation de la résistance dynamique autour d'une valeur médiane, est faible, ce qui indique une faible teneur en éléments grossiers.
- **Strate 2** (56-113 cm) : Le passage à la seconde strate est marqué par une augmentation du bruit, ce qui indique une plus forte teneur en éléments grossiers. Cette teneur semble décroître avec la profondeur. La résistance dynamique modale est de 5,2 MPa. Cette strate pourrait correspondre au sol agricole original.
- **Strate 3** (113-118 cm) : La troisième strate correspond à une strate de transition entre le sol et la roche.
- **Strate 4** (118-152 cm) : Enfin, la dernière strate prospectée présente une très forte résistance dynamique. Elle correspond à la roche saine.

Susceptibilité magnétique

Le profil obtenu présente des valeurs de susceptibilité relativement faibles (Figure 3). Il ne contient sans doute pas de phases minérales de type magnétite, mais des atomes de fer présents de manière diffuse dans le réseau cristallin des argiles. La plus forte valeur de l'horizon de surface marque la présence de matière organique, qui permet la conservation du fer sous sa forme réduite. La même observation peut être faite pour le 3^{ème} horizon, qui a sans doute été entouffé lors du nivellement de la zone. Ainsi, les différenciations soulignent des origines différentes des deux premiers horizons et des deux derniers, possédant des proportions en fer différentes.

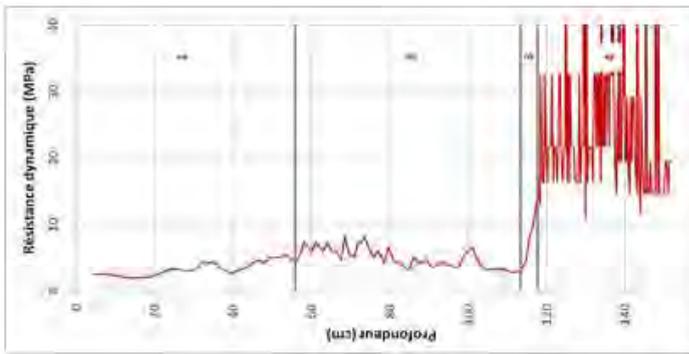


Figure 2 : Pénérogramme.

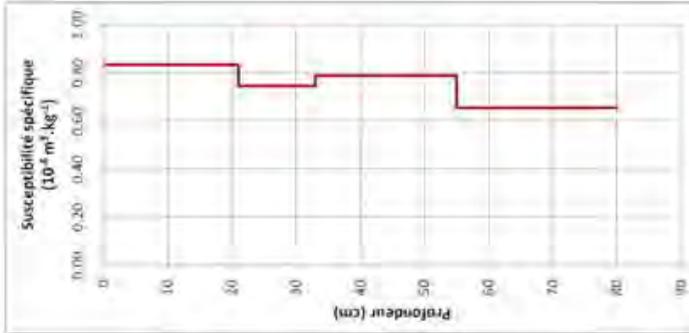


Figure 3 : Profil de susceptibilité magnétique.

Synthèse

Ce sol de jardin présente de fortes quantités de phosphore liées à des apports anthropiques visant à améliorer le rendement de la végétation. Néanmoins, cette végétation se résument à une pelouse, les horizons de sol de surface ne s'en trouvent pas beaucoup transformés. De très fortes teneurs en plomb, zinc et cuivre ont pu être observées. Elles sont d'origine anthropiques. Ce sol a été formé par apport de matériaux ferreux de curage (Zr) sur un sol agricole. Ainsi, le sol original a pu être identifié en sondage pédologique par des variations de texture et grâce à la différenciation du profil de susceptibilité magnétique. Les horizons les plus humifères, ayant supporté la végétation, y présentent une plus forte valeur de susceptibilité magnétique. Le matériau parental sain est atteint à 118 cm. Enfin, l'analyse microbiologique a révélé une très forte diversité des communautés bactériennes dans l'horizon de surface. Leur développement a été favorisé par la présence de nutriments (azote et phosphore) en très fortes quantités. Le milieu leur est par ailleurs favorable de part la présence d'une végétation et une bonne alimentation en eau (apport et rétention de l'eau).

2. Lettre type envoyée au propriétaire des sols échantillonnés



M. et Mme XXX
 YYYYY
 13120 GARDANNE

Madame, Monsieur,

A la suite de notre venue, le 17 juin 2009, dans le cadre du projet de recherche UQUALISOL-ZU, conduit par le CEREGE et l'Observatoire Hommes-Milieus du bassin minier de Provence, des analyses physico-chimiques ont été menées sur deux échantillons de surface prélevés dans votre cour et dans votre jardin. Les résultats bruts vous sont présentés ci-après :

Cour :

pH : 8,2
 Carbone organique : 17,8 g/kg
 Azote total : 1,03 g/kg
 Rapport carbone/azote = 17,4
 Phosphore assimilable : 0,06 g/kg
 Capacité d'échange cationique : 5,7 cmol⁺/kg
 Fer (oxydes et amorphes) : 2,95 g/kg
 Aluminium (oxydes et amorphes) : 0,42 g/kg
 Chrome total : 30,5 mg/kg
 Cuivre total : **207 mg/kg**
 Nickel total : 32,1 mg/kg
 Zinc total : **808 mg/kg**
 Cobalt total : 4,2 mg/kg
 Plomb total : **170 mg/kg**
 Cadmium total : **1,46 mg/kg**
 Thallium total : 0,18 mg/kg
 Molybdène total : 1,66 mg/kg

Jardin :

pH : 8,0
 Carbone organique : 28,3 g/kg
 Azote total : 2,32 g/kg
 Rapport carbone/azote = 12,2
 Phosphore assimilable : 0,18 g/kg
 Capacité d'échange cationique : 10,6 cmol⁺/kg
 Fer (oxydes et amorphes) : 3,45 g/kg
 Aluminium (oxydes et amorphes) : 0,33 g/kg
 Chrome total : 31,3 mg/kg
 Cuivre total : **277 mg/kg**
 Nickel total : 20,4 mg/kg
 Zinc total : **144 mg/kg**
 Cobalt total : 5,8 mg/kg
 Plomb total : **63,1 mg/kg**
 Cadmium total : 0,51 mg/kg
 Thallium total : 0,29 mg/kg
 Molybdène total : 1,15 mg/kg

Des teneurs anormalement élevées en certains éléments traces métalliques ont été décelées et sont indiquées en gras.

Les horizons de surface ont par ailleurs été soumis à une analyse microbiologique, concernant la diversité des communautés bactériennes, par la méthode des plaques Biolog™. Avec un résultat de 17 puits positifs sur 31, la diversité des communautés bactériennes y est faible au niveau de la cour. Elle est élevée sur le sol de jardin avec 31 puits positifs sur 31.

Un essai au pénétromètre dynamique a également été réalisé, permettant d'appréhender la résistance du sol dans sa dimension verticale. La résistance à la pénétration moyenne des quinze premiers centimètres s'élevait à 51 MPa dans la cour et à 1,9 MPa au niveau du jardin. Ces valeurs ne présentent pas de contrainte particulière par rapport aux usages actuels de ces sols.

Quelques numéros utiles :

Samuel ROBERT, ingénieur de recherche, chargé de projet OHM : 04 42 97 16 68 - srobert@cerege.fr

Catherine KELLER, professeur en sciences du sol : 04 42 97 15 17 - keller@cerege.fr

Eva RABOT, ingénieur d'études en sciences du sol : 04 42 97 15 60 - rabot@cerege.fr

> Site internet de l'OHM du bassin minier de Provence : <http://www.ohm-provence.org>

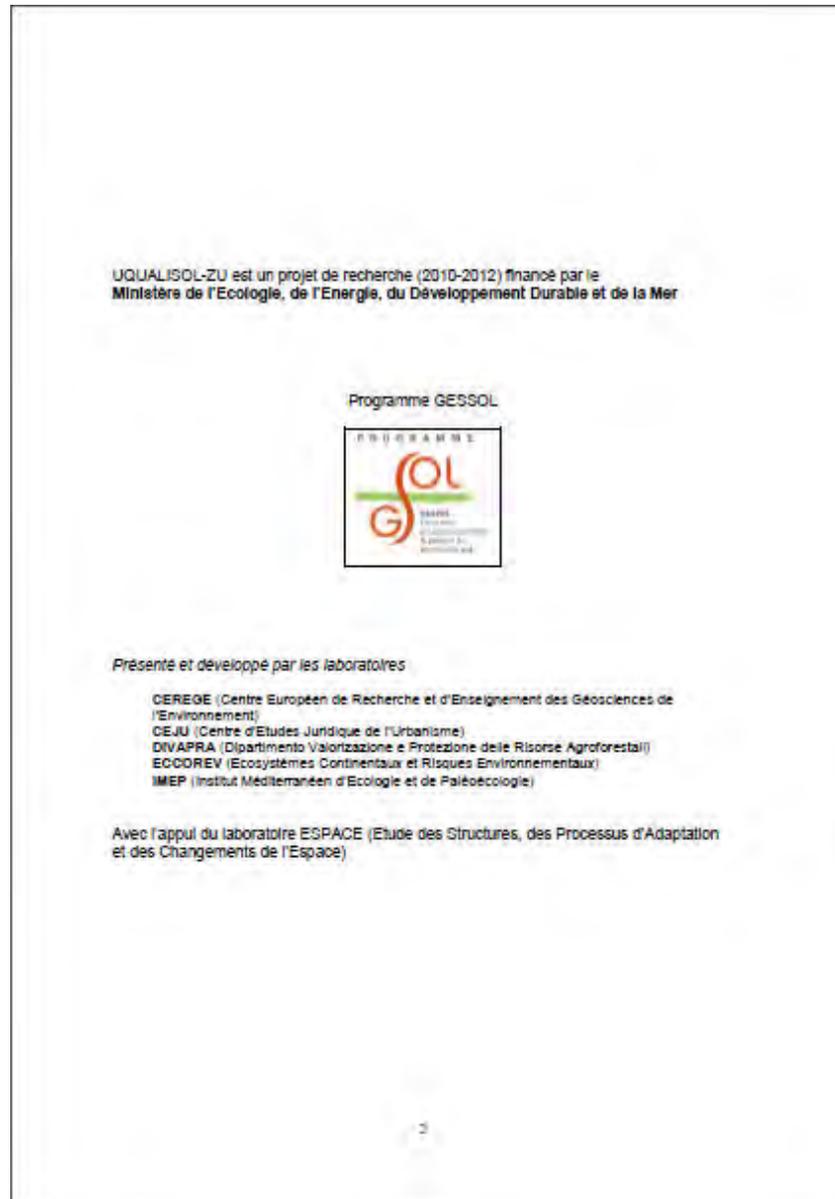
> Projet UQUALISOL-ZU : <http://www.ohm-provence.org/projetUqualisol.html>

Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE)

Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 04

Site internet : <http://www.cerege.fr>

Annexe IV-1 : Synthèse des travaux présentée aux acteurs publics de Gardanne



Ce document constitue une synthèse succincte des éléments produits dans le cadre du projet UQUALISOL-ZU. Son objet est de servir de support aux échanges entre chercheurs et gestionnaires, quant à la possibilité et à l'intérêt de la prise en compte d'une connaissance de la qualité et des potentialités des sols préalablement à la planification urbaine.

Il se compose de :

- un résumé du projet UQUALISOL-ZU
- cartes du territoire communal de Gardanne, représenté plus particulièrement en termes d'occupation des sols, de zonage d'urbanisme et de polyvalence d'usages des sols ;
- recommandations pour l'usage des données de polyvalence d'usage des sols : signification de la notion de polyvalence d'usages ; contexte et philosophie de mise en œuvre d'une caractérisation de la polyvalence d'usage des sols dans une démarche de planification ; possibilités d'intégration dans la démarche PLU ; exemple de l'intérêt de cette donnée sur un cas précis ;
- réflexions plus larges sur l'emploi de données de qualité des sols à d'autres fins, comme la prévention des risques naturels, la définition de schéma de cohérence écologique, etc. ;
- annexes techniques sur la conduite de la recherche et la production de données inédites.

UQUALISOL-ZU : résumé du projet

Le rôle tenu par les sols dans le développement économique et social des territoires est, dans la plus grande partie du monde, tout à fait majeur. Cette fonction de support des activités humaines repose sur le fait que le sol est d'abord un substrat, une surface sur laquelle se déploient et s'organisent les sociétés (sol-espace). Elle repose aussi et surtout sur la qualité des sols, qui permettent à certaines activités, en premier l'agriculture, de prospérer (sol-épaisseur). Cependant, les sols remplissent des fonctions qui ne servent pas directement la société, mais qui sont à l'évidence tout à fait essentielles, comme par exemple la conservation d'une partie de la biodiversité. Ces différentes dimensions des sols font qu'ils sont une composante fragile et indispensable des anthroposystèmes, tout particulièrement dans les zones urbaine et périurbaine, où la pression exercée sur les sols est intense. Dans ces espaces, la gestion et la conservation de cette ressource apparaissent comme un enjeu de premier ordre du fait de l'étalement urbain, des contaminations diverses liées aux activités urbaines, des friches créées par l'évolution des villes. Ceci pose par conséquent la question de la planification de l'usage des sols, c'est-à-dire des préconisations en matière d'occupation et d'usage possible des sols dans les documents d'urbanisme, et de la prise en compte de la qualité des sols dans l'élaboration de ces préconisations.

Le projet proposé consiste à mettre en perspective le droit de l'urbanisme avec la connaissance scientifique de la qualité des sols. L'objectif est triple : évaluer comment le droit permet d'intégrer une connaissance de la qualité des sols dans le processus de planification de l'usage des sols (1), évaluer quelle connaissance de la qualité des sols peut être produite pour être utilisée par le planificateur (2), et produire une application dans le contexte péri-urbain du bassin minier de Provence, aux portes d'Aix-en-Provence et de Marseille (3).

La méthode développée consistera en plusieurs étapes. Dans un premier temps, on effectuera un inventaire des informations historiques, environnementales et urbanistiques à disposition permettant de construire une base de données dédiée afin d'appréhender au mieux le contexte général (politique, juridique et environnemental) de l'aménagement du territoire actuel. Simultanément, on analysera comment les différentes fonctions des sols sont prises en compte dans les méthodologies visant à définir les procédures administratives de réhabilitation des sols pollués, ou dans les outils visant à gérer « l'après-mine », comme les Plans de Prévention des Risques Miniers.

Afin de fournir une base synthétique sur la qualité des sols utilisable dans la planification du territoire, on identifiera des unités homogènes d'occupation des sols à partir de données historiques, des cartes disponibles et de la photo-interprétation d'images satellites et de photographies aériennes. Les sols de ces différentes unités seront caractérisés d'un point de vue morphologique, physique, chimique et biologique. Après validation, les résultats permettront la création d'un indice synthétique de la qualité des sols ainsi qu'une évaluation de la valeur « écologique » des sols, en se basant sur la méthodologie proposée par Vrscaj et al. (2008), sur les POS en vigueur (et PLU en développement), sur des informations historiques voire sur des données originales. Simultanément, la pertinence des paramètres introduits dans l'indice orienté « usage du sol », ainsi que la pertinence de la prise en compte de la multifonctionnalité des sols, seront évaluées. L'indice sera donc optimisé en regard des exigences de la gestion du territoire. Les résultats seront comparés à l'utilisation actuelle ou envisagée par les POS et PLU et proposés aux acteurs de la gestion du territoire d'étude.

Synthèse cartographique

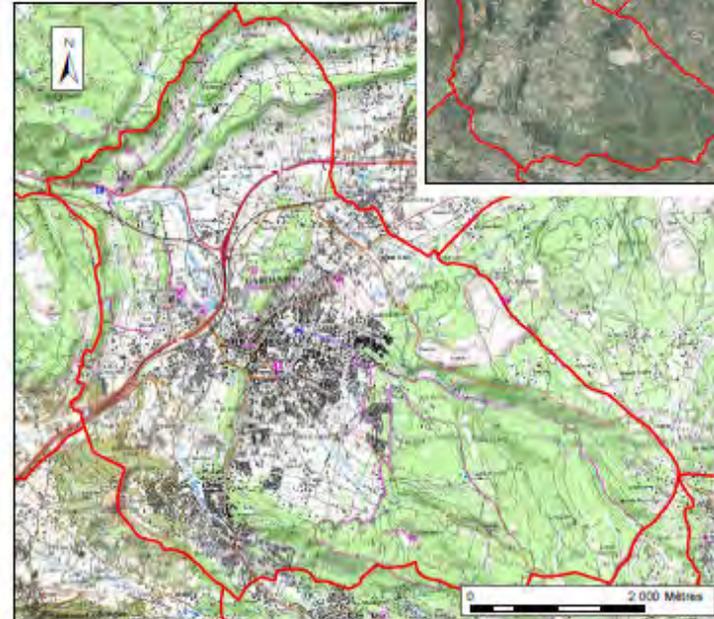
1. Le territoire communal : données de cadrage de l'Institut Géographique National
2. Occupation des sols à grande échelle (2008), niveau 1 conforme Corine Land Cover
3. Etalement urbain 1998-2003-2008
4. Zonage du Plan Local d'Urbanisme
5. Polyvalence d'usage des sols
6. Polyvalence d'usage des sols (en écart à la moyenne communale)
7. Polyvalence d'usage moyenne des sols dans les zones du PLU

UQUALISOL-ZU - Synthèse à l'attention des acteurs publics locaux

GARDANNE

Le territoire communal - données de cadrage de l'Institut Géographique National

Photographie aérienne (Bd-Ortho)



Carte topographique 1:25000 (Scan 25)



Relief (altitude en m)

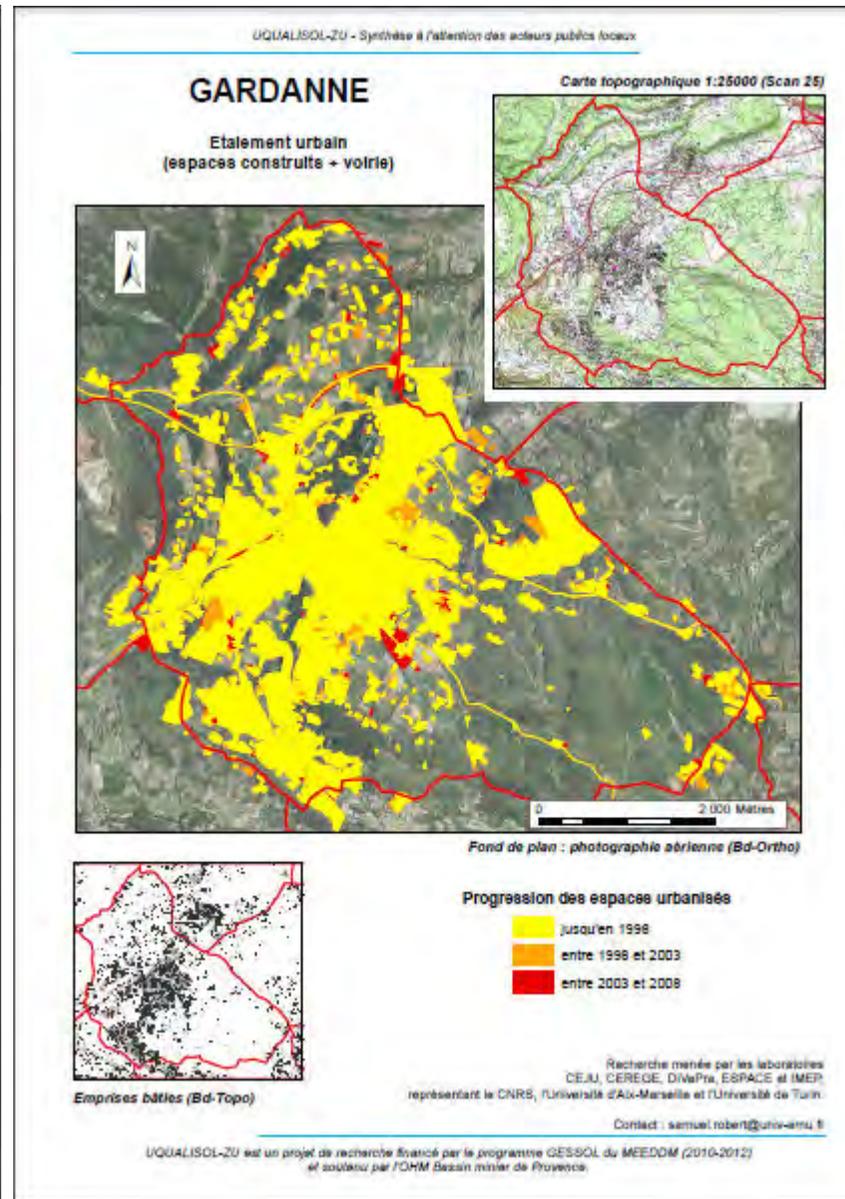
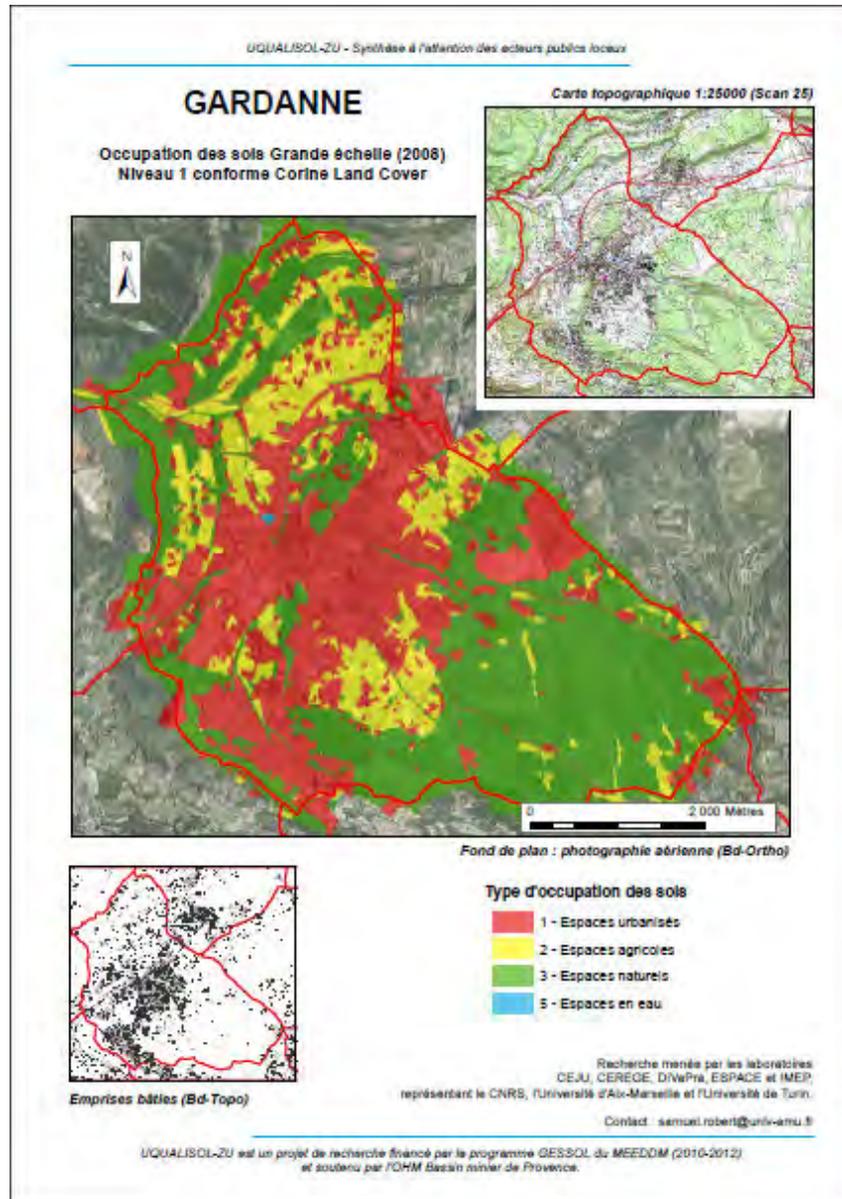
Elevée : 418
Faible : 166

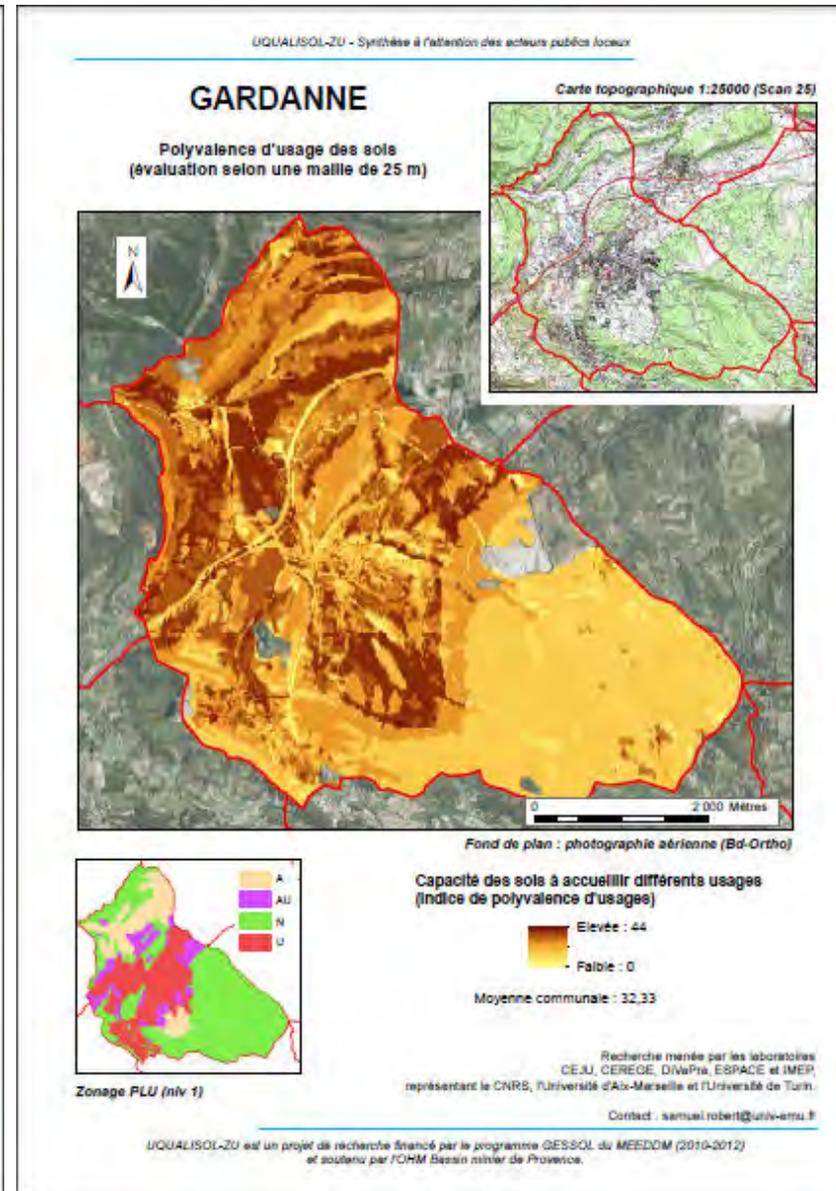
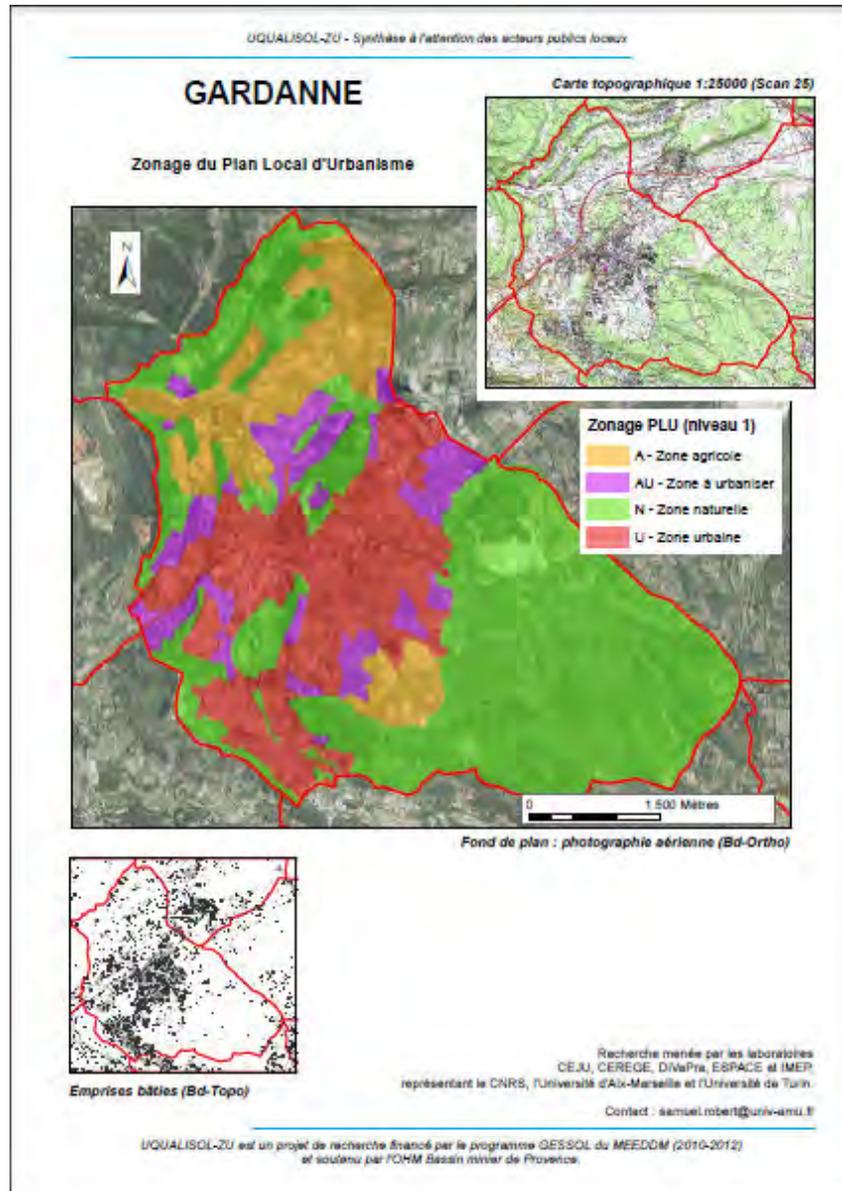
Modèle numérique de terrain 25m (Bd-Topo)

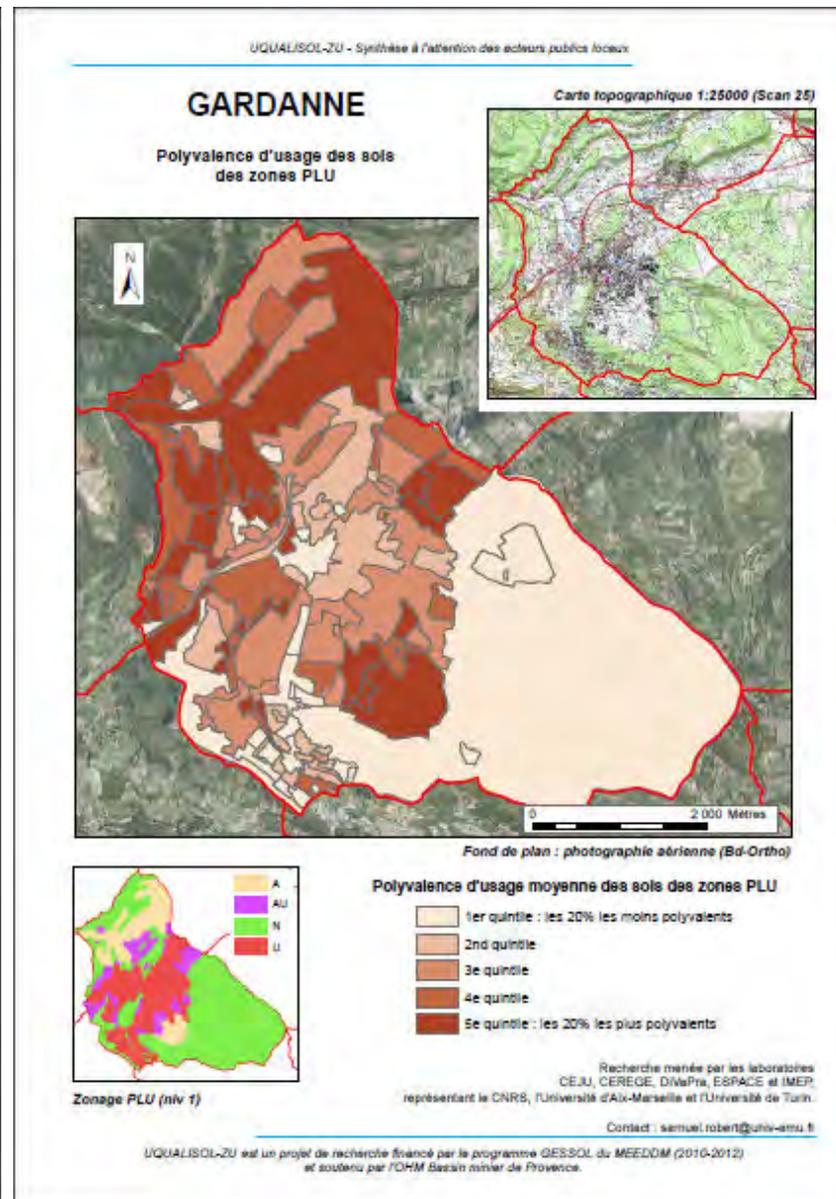
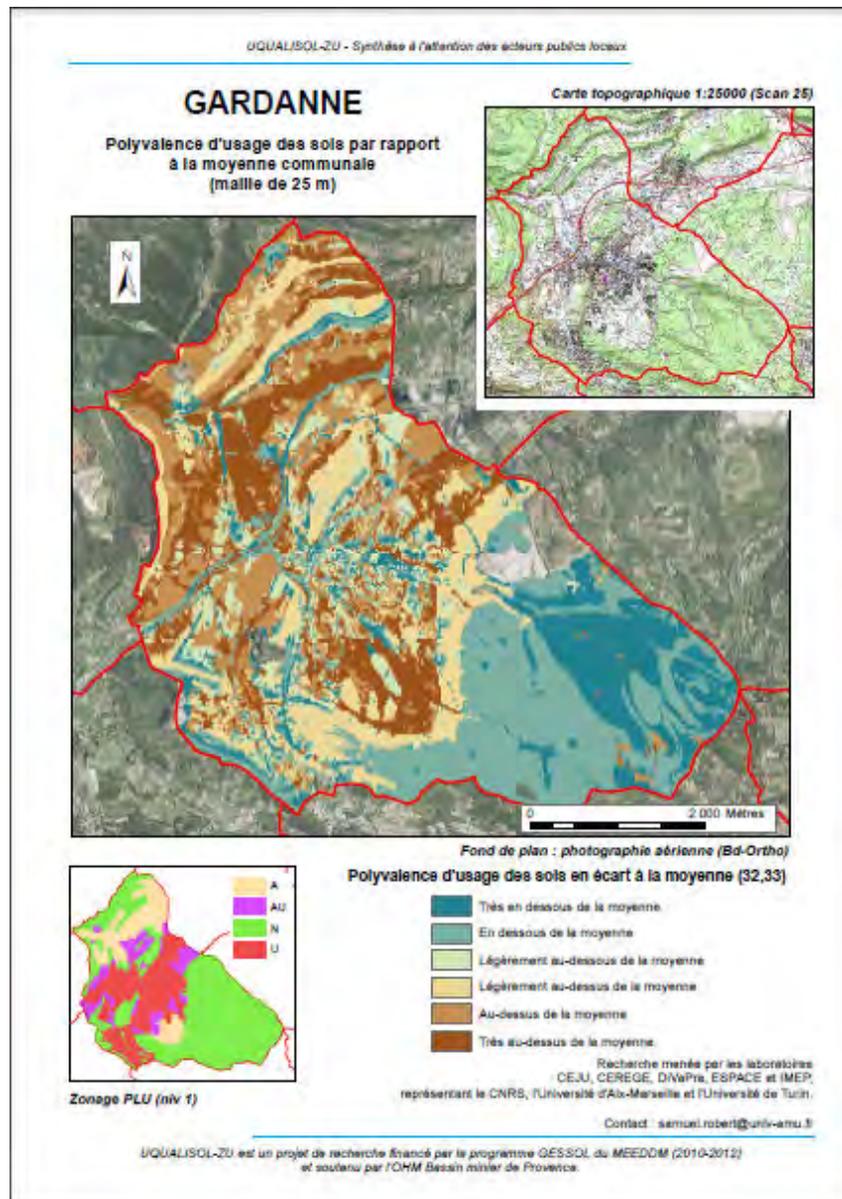
Recherche menée par les laboratoires CEJL, CEREGE, DiNaPia, ERSPACE et IMEP, représentant le CNRS, l'Université d'Aix-Marseille et l'Université de Turin.

Contact : samuel.robert@univ-amu.fr

UQUALISOL-ZU est un projet de recherche financé par le programme GESSOL du MEEDDM (2010-2012) et soutenu par l'OHM Bassin estival de Provence.







Recommandations – ce qu'il faut savoir

Le recours à une évaluation de la qualité des sols et, en particulier, à l'identification de leur polyvalence d'usage s'inscrit dans la perspective de contribuer à faciliter la définition de politiques publiques respectueuses d'un équilibre entre la préservation de l'environnement et le développement économique et social des territoires concernés. Les sols sont incontestablement une composante fondamentale de l'environnement.

Pourquoi produire une information spatialisée de la qualité des sols à destination des communes ?

Il s'agit de permettre aux acteurs publics de disposer d'une information exhaustive sur les potentialités offertes par les sols de leur territoire de compétence. Le but est de faciliter l'élaboration, en toute connaissance de cause, des politiques locales de planification des usages possibles de l'espace mais également les politiques de gestion raisonnée et de protection de l'espace et de l'environnement.

Le sol est une ressource naturelle non renouvelable. Aujourd'hui, sa prise en compte découle majoritairement de la nécessité de traiter la question de l'accès et de la gestion du foncier (espaces disponibles pour construire des logements, aménager des zones d'activités économiques, des équipements collectifs, des voies de communication, etc.) ; le sol est donc principalement considéré comme une surface. Cependant, pour des cas précis, certaines caractéristiques propres des sols sont prises en considération, par exemple son imperméabilité / perméabilité pour la lutte contre le ruissellement urbain et les inondations. Mais bien d'autres caractéristiques sont tout aussi déterminantes en matière de planification et de conservation de l'espace :

[Le sol] assure des fonctions de stockage, de filtration et de transformation de nombreuses substances dont l'eau, les nutriments et le carbone.¹ Le sol est donc un élément déterminant et irremplaçable pour la diversité biologique, le système climatique global, la gestion durable de l'eau, la « foresterie », pour l'agriculture et donc l'alimentation.²

Par ailleurs, dans le cadre du changement global, de nouveaux besoins et de nouveaux enjeux s'affirment autour de la question des sols : cultures potagères urbaines, végétalisation des espaces urbains dans le cadre de la lutte contre les canicules (îlots de chaleur urbains), piégeage du carbone (sol = puits de carbone) dans le cadre de l'atténuation du changement climatique, etc.

Pour mémoire, concernant le rôle et l'obligation des communes, le sol apparaît dans le Code de l'urbanisme, comme une ressource à gérer de façon économe (article L. 110 du Code de l'urbanisme) : « afin d'aménager le cadre de vie, d'assurer sans discrimination aux populations résidentes et futures des conditions d'habitat, d'emploi, de services et de transports répondant à la diversité de ses besoins et de ses ressources, de gérer le sol de façon économe, [...] d'assurer la protection des milieux naturels et des paysages, la préservation de la biodiversité notamment par la conservation, la restauration et la création de continuités écologiques, [...] les collectivités publiques harmonisent dans le respect réciproque de leur autonomie, leurs prévisions et leurs décisions d'utilisation de l'espace. [...] ».

En outre, l'article L. 121-1 du Code de l'urbanisme précise :
« Les schémas de cohérence territoriale, les plans locaux d'urbanisme et les cartes communales déterminent les conditions permettant d'assurer : [...] »

3° Une utilisation économe et équilibrée des espaces naturels, urbains, périurbains et ruraux, [...], la préservation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et du sous-sol, des écosystèmes, des espaces verts, des milieux, sites et paysages naturels ou urbains, [...]. »

1. Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions, « Stratégie thématique en faveur de la protection des sols », COM(2002)1 final, 22.9.2002, p. 2.
2. MICHAËL-GUÉZENNEC M., « Protection des sols », Auto-Guideur Administratif, Fiche n° 391, janvier 2008, p. 1.

La polyvalence d'usage des sols : définition et intérêt

Pour permettre aux gestionnaires publics d'incorporer une information de qualité et de potentialité d'usages des sols de leur territoire dans leur politique locale d'urbanisme, le projet UQUALISOL-ZU a forgé le concept de polyvalence d'usage des sols, qui est quantifié par un indice et représenté par des cartes. L'explicitation de ce concept nécessite de préciser les notions de multifonctionnalité et d'usage.

La multifonctionnalité renvoie au concept de fonctions bio-géo-physiques du sol, en lien direct avec ses caractéristiques naturelles. C'est une évaluation des capacités intrinsèques du sol à exercer une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- circulation et rétention de l'eau,
- rétention et cycle des nutriments,
- stabilité physique et support,
- biodiversité,
- filtration et pouvoir tampon,
- patrimoine pédologique (non pris en compte dans UQUALISOL-ZU).

L'usage se réfère à l'utilisation que la société fait ou entend faire de son territoire. Cette utilisation intègre implicitement les fonctions des sols à des degrés divers puisque ces fonctions sont plus ou moins contraignantes pour un usage donné. Il est alors possible de calculer un indice d'adéquation du sol à l'usage qui en est fait, ou qu'on désire lui attribuer en fonction de la manière dont le sol remplit ces fonctions. Pour un lieu déterminé et le sol qui s'y trouve, nous proposons ainsi de sommer le nombre total de fonctions satisfaites pour tous les usages, créant ainsi un indice de polyvalence d'usage. Cette polyvalence d'usage varie dans l'espace et hiérarchise donc les sols en fonction de leur capacité à pouvoir supporter une gamme plus ou moins étendue d'usages. Dans le cadre d'UQUALISOL-ZU, les usages retenus sont hiérarchisés et sont au nombre de 9 au niveau le plus détaillé (Tableau 1).

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Code
Territoires agricoles	Cultures annuelles, prairies temporaires		TA1
	Cultures permanentes		TA2
Forêts et milieux semi-naturels	Forêts		F1
	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée		F2
Zones humides	Zones humides intérieures et maritimes		ZH
Territoires artificialisés	Zones urbanisées	Places, cours, parkings, voies de com., équipements sportifs et de loisirs artificialisés	ZU1
		Jardins d'agrément, équipements sportifs et de loisirs non artificialisés, plates-bandes	ZU2
		Jardins potagers et familiaux	ZU3
	Zones industrielles et commerciales	Jardins = assainissement non collectif	ZU4
		Places, cours, parkings, voies de com., surfaces techniques	ZIC1
		Jardins d'agrément, plates-bandes	ZIC2

Tableau 1 : Les différents usages retenus dans le cadre du projet UQUALISOL-ZU déclinés selon le niveau d'interprétation utilisé.

L'intérêt de la notion de polyvalence d'usages des sols est de permettre une caractérisation de la totalité d'une zone sur laquelle doit être élaborée une planification d'usage des sols, notamment en termes de :

- potentialité bio-géo-physique des sols à accueillir des activités diverses, plus ou moins exigeantes par rapport à la ressource « sol » ;
- dispositions plus ou moins favorables à la conservation de la biodiversité et à l'élaboration de la trame verte ;

- capacité à exercer des fonctions de « régulation » dans divers processus concernant les flux de l'eau, de l'air et de matières : filtrage, rétention, épuration, etc.

Disposant d'une cartographie de la polyvalence d'usage des sols (Cartes 6, 8 et 7), les gestionnaires sont alors en mesure de s'orienter vers la préservation des sols les plus polyvalents pour :

- maintenir l'agriculture sur les sols les plus favorables et éviter la consommation des sols les plus polyvalents par des usages qui sont peu exigeants vis-à-vis de la ressource sol ;
- contribuer à une amélioration de la qualité de vie en milieu urbain par le biais du maintien ou de la création de zones « vertes », jardins familiaux, etc. ;
- contribuer aux réductions des risques de ruissellement et d'inondation ;
- envisager des usages et demandes futurs non encore établis (par exemple, réservoir de biodiversité).

En d'autres termes, la polyvalence d'usage des sols peut être vue comme un outil d'aide à la décision, permettant d'accompagner le planificateur dans son exercice d'élaboration des documents d'urbanisme, aussi bien dans les parties déjà urbanisées que sur les espaces et surfaces non construites du territoire relevant de sa compétence. Venant compléter les informations habituellement mobilisées pour la construction des projets de territoire, les cartes de polyvalence d'usage des sols autorisent la mise en évidence de zones sensibles, de zones fragiles ou à fort potentiel, et donc de hiérarchiser les espaces composant le territoire communal en termes d'enjeux.

Comment s'élabore la carte de polyvalence d'usages des sols ?

Les étapes de la construction pratique de l'indice sont présentées en Annexe 1. Les données prises en compte sont issues de prélèvements de terrain (prélèvements in situ), de données existantes dans les corpus cartographiques et d'études de sols déjà réalisées sur la zone considérée (Annexe 2).

Les caractéristiques pédologiques et l'occupation des sols de la zone d'étude permettent ensuite de générer une carte de la polyvalence d'usage des sols, à des niveaux de précision variés. A l'échelle communale, nous recommandons la résolution de 25 m (la carte propose une valeur de polyvalence d'usage dans une maille de 25 m de côté). Cette information peut ensuite être agrégées par unité de surface, comme par exemple les zones du PLU (Carte 7) ou bien celles de la carte d'occupation des sols.

Quand et comment utiliser l'information de polyvalence d'usage des sols ?

A quel moment se servir de l'information de polyvalence d'usage des sols ?

Il nous apparaît que l'usage de l'indice et des cartes associées pourrait avoir lieu à plusieurs niveaux et à différentes étapes de l'élaboration de la politique d'urbanisme et de la planification d'usages des sols d'une commune ou d'une intercommunalité :

- dans le cadre des réflexions plus générales sur le territoire et l'environnement : Charte de l'environnement, Agenda 21 local, Plan Energie Climat/Territoire, etc. ;
- au moment de la réflexion en amont sur les espaces à protéger dans les plans locaux d'urbanisme, en rapport notamment avec les usages qu'ils peuvent accueillir ;
- au moment de la présentation et de l'explication des choix d'urbanisme au public ;
- au moment des décisions sur les autorisations d'urbanisme : la référence à l'indice peut permettre d'expliquer des refus de permis de construire, par exemple.

Comment exploiter l'indice ? A quel niveau de l'élaboration ou de la révision du PLU ?

L'information de polyvalence d'usage des sols peut être demandée dans le cadre de l'évaluation environnementale du document d'urbanisme à élaborer. Il est en effet possible d'intégrer une étude pour connaître les potentialités des sols dans le diagnostic environnemental.

Il est ensuite possible d'insérer la préservation de la multifonctionnalité des sols comme objectif dans les documents d'urbanisme, à différents niveaux :

1) dans les outils généraux du PLU :

- dans le rapport de présentation : ce document est stratégique et non contraignant, mais l'état initial de l'environnement doit néanmoins être exhaustif ;
- dans le PADD : il s'agit d'orientations générales d'aménagement et d'urbanisme, dans le respect des objectifs L110 et L121-1 du Code de l'Urbanisme (gestion économe des sols) ; ce document est stratégique, non contraignant, mais le règlement doit être cohérent avec lui ;

2) dans les outils particuliers du PLU :

- les orientations particulières d'aménagement : celles-ci sont contraignantes, mais ne concernent que certaines zones ;
- le règlement et les zonages du PLU : contraignant pour chaque zone, mais difficile à orienter vers la protection des sols sur les zones urbaines ; plus facile pour les zones agricoles (potentiel agronomique ou biologique des sols) et les zones naturelles ;
- les emplacements réservés : ceci vise les installations d'intérêt général (captage carbone ?) ; contraignant mais ne concerne que certaines zones.

Au final, on peut considérer qu'il existe deux manières de se servir de l'information de polyvalence d'usage des sols :

- soit dans une simple réflexion en interne (au moment de la réflexion en amont sur les sols à protéger, pour divers usages) ;
- soit par un affichage transparent :
 - o dans la rédaction du PLU, ainsi qu'au moment de la présentation et de l'explication des choix d'urbanisme au public. Ceci permet une sensibilisation des acteurs ;
 - o au moment des décisions sur les autorisations d'urbanisme (la référence à l'indice permet par exemple d'expliquer des refus de permis de construire). Mais dans les deux cas, l'indice devient alors opposable.

Interpréter une carte de polyvalence d'usage : exemple

Afin d'illustrer l'usage possible d'une carte de polyvalence d'usage des sols, nous proposons d'examiner la situation d'une partie du territoire de la commune de Gardanne, localisée au sud du centre-ville.

La Figure 11 est un extrait de la carte de la valeur moyenne de polyvalence d'usage des sols par zone de PLU actuellement en vigueur à Gardanne. Sans préjuger du bien fondé des choix d'urbanisme qui ont été faits, on note que le zonage ne reflète pas nécessairement ce à quoi on pourrait s'attendre si les potentialités des sols étaient prises en compte. Dans les documents d'urbanisme consultés, il apparaît que le fil conducteur du PLU est une densification de l'urbanisation afin de limiter la consommation des terres agricoles. Or la carte nous permet de relever que des zones à urbaniser (AU) ont été planifiées sur des sols présentant une polyvalence d'usage élevée (zones classées dans le 5^{ème} quintile, indiquant un grand nombre de fonctions satisfaites). Parallèlement, des zones naturelles (N) sont plutôt maintenues là où les sols sont les moins à même de répondre efficacement à des sollicitations environnementales, alors même que les zones N sont définies comme susceptibles de posséder une qualité particulière notamment d'un point de vue écologique. Au sud-est de l'extrait, la zone agricole semble judicieusement délimitée mais on remarque aussi à l'ouest de la carte une bande de sols appartenant en quasi-continuité au 5^{ème} quintile et qui pourrait donc potentiellement participer à la définition d'un corridor de zone naturelle (trame verte ?).

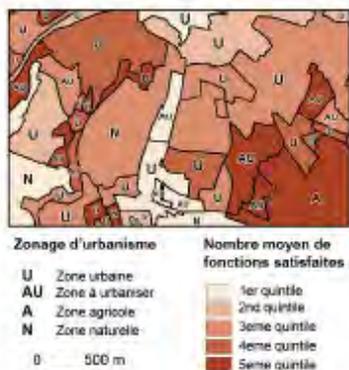


Figure 1 : Extrait de la carte de la valeur moyenne de polyvalence d'usage des sols par zone de PLU à Gardanne (voir la Carte 6 pour visualiser l'intégrité de la commune).
Les quintiles sont calculés par rapport à un maximum de 45 fonctions satisfaites pour un total de 9 usages.

Ces quelques considérations ne donnent qu'une petite idée des potentialités d'exploitation de l'information « polyvalence d'usage des sols » dans une démarche de gestion et de planification de l'espace. Intégrée dans un système d'information géographique (SIG) comprenant l'ensemble des paramètres pertinents pour une gestion avisée du territoire, l'indice de polyvalence d'usage des sols laisse entrevoir un grand nombre d'applications utiles. Bien d'autres cartes, en particulier les cartes intermédiaires par usage, peuvent par ailleurs être générées à partir des données à disposition afin d'alimenter la réflexion.

Apports et prolongements possibles d'UQUALISOL-ZU

Intégrer une connaissance scientifique de la qualité et des potentialités des sols dans les politiques publiques de planification de l'espace et de conservation de l'environnement demeure un objectif à poursuivre. En effet :

- Si la Commission européenne affirme en 2006, dans sa Stratégie thématique en faveur de la protection des sols³, que les fonctions remplies par les sols « doivent être protégées en raison de leur importance socio-économique et environnementale », il n'existe toujours pas à l'heure actuelle de Droit des sols applicable. Si la Commission a élaboré une Proposition de Directive définissant un cadre pour la protection des sols, en date du 22 septembre 2006⁴, cette dernière n'a toujours pas été adoptée, la majorité qualifiée des votes des Etats membres de l'Union européenne n'ayant pas été atteinte.
- En France, dans le code de l'environnement, il n'existe pas non plus de régime de droit spécifiquement dédié aux sols et à leur protection en tant que milieu naturel, au même titre que l'eau ou l'air.

Les résultats issus du projet UQUALISOL-ZU montrent qu'il est possible de produire une information relative à la qualité et aux potentialités des sols susceptible de fonder une politique conservatrice des sols (et des espaces), sans nier les nécessités de développement socio-économique des territoires. La recherche s'est focalisée sur la définition du concept de polyvalence d'usage et sa traduction concrète par la conception d'un indice et sa spatialisation. Les travaux se sont uniquement inscrits dans le cadre de l'élaboration de la planification et de la gestion des sols au niveau communal, mais diverses perspectives sont envisageables. Ainsi, les acquis d'UQUALISOL-ZU pourraient être exploités pour :

- l'élaboration de la politique de protection et de mise en valeur des espaces naturels périurbains par le département (C. urb., art. L. 143-1). Le Conseil Général peut en effet délimiter des périmètres d'intervention et élaborer un programme d'action précisant les aménagements et orientations de gestion destinés à favoriser la préservation et la valorisation de ces espaces (C. urb., art. L. 143-2). Les terrains concernés ne peuvent pas être inclus dans une zone urbaine ou à urbaniser d'un plan local d'urbanisme, ou dans un secteur constructible d'une carte communale (C. urb., art. L. 143-4). A l'intérieur de ces périmètres, il peut procéder à l'acquisition des terrains à l'amiable ou par expropriation ainsi que par préemption dans les zones de préemption des espaces naturels sensibles. En dehors de ces zones de préemption, les SAPER ou, si elles n'existent pas, le CG lui-même, peuvent également préempter (C. urb., art. L. 143-3).
- la définition des politiques d'acquisitions foncières des établissements publics d'aménagement et établissements publics fonciers locaux dans un but de protection d'espaces naturels périurbains, le cas échéant en exerçant le droit de préemption à la demande et au nom du département (C. urb., art. L. 321-1 et L. 324-1).
- concevoir la lutte contre les inondations dans les espaces périurbains, puisque la politique rurale doit contribuer à la prévention des risques naturels et assurer la mise en valeur et la protection du patrimoine rural et des paysages (C. rur., art. L. 111-2).

³ Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions, « Stratégie thématique en faveur de la protection des sols », COM(2006)231 final, 22.9.2006, 13 p.

⁴ Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions, « Stratégie thématique en faveur de la protection des sols », COM(2006)231 final, 22.9.2006, p. 2.

⁵ Proposition de Directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la Directive 2004/35/CE, COM(2006) 232 final, 22.9.2006, 31 p.

Si les apports d'UQUALISOL-ZU sont avérés, plusieurs autres questions restent non élucidées ou nécessitent d'approfondir la recherche. Ainsi :

- Il serait peut-être intéressant de rechercher les possibilités et l'intérêt d'intégrer une information sur les sols dans les éléments annexés au PLU qui peuvent prendre en compte les sols, comme les servitudes d'utilité publique des PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels), les cartes d'aéas, etc.
- on pourrait s'interroger sur l'intégration de cette information sur les sols dans les démarches de définition des ZAP (Zones Agricoles Protégées).

Aller-retour chercheurs/acteurs publics : vos commentaires à propos du projet et de ses résultats

A ce stade, une appréciation globale - par les acteurs locaux - de la démarche UQUALISOL-ZU, de ses résultats et des possibilités de transferts pour l'exercice de planification du territoire est souhaitée. Conformément aux objectifs du programme GESSOL du MEEDDM, ce projet de recherche ambitieux en effet d'apporter des éléments utiles aux acteurs publics et de faciliter voire anticiper le traitement de questions qui se posent ou se poseront à courte échéance à la collectivité.

Les commentaires de la commune de Gardanne pourraient par exemple porter sur :

- la compréhension de la démarche ;
- l'adhésion ou non à cette démarche (avec motivation de la réponse) ;
- le cas échéant, l'intérêt de sa mise en œuvre, avec des précisions sur les champs et les modalités d'applications envisageables et judicieuses ;
- etc.

Toutes les remarques pouvant contribuer à un approfondissement de la recherche et à une amélioration de cette démarche sont les bienvenues.

Annexes

Annexe 1 : De l'Indice d'adéquation d'usage des sols à l'Indice de polyvalence d'usage des sols

Préalablement à l'évaluation de la polyvalence d'usage des sols, il convient de mesurer l'adéquation des usages aux sols. Un Indice d'adéquation d'usage des sols a donc été conçu et calculé pour la commune de Gardanne. Il a été élaboré sur la base des six fonctions énoncées précédemment.

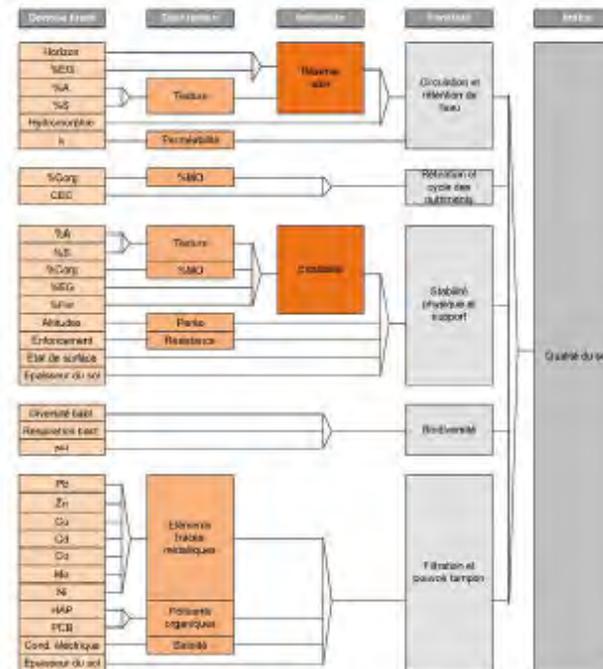


Figure 1 : Origines des données d'entrée de l'Indice d'adéquation coll'usage des sols

* : %EG : teneur en éléments grossiers, %A : teneur en argile, %S : teneur en sable, k : coefficient de perméabilité, %Corg : teneur en carbone organique, %MO : teneur en matière organique (=1,72 %Corg), CEC : capacité d'échange cationique, %Par : teneur en fer, Enfoncement : enfoncement mesuré à l'aide d'un essai au pénétromètre, Diversité bact. : diversité fonctionnelle des communautés bactériennes, IRéspiration bact. : respiration bactérienne, P_t : teneur totale en plomb, Zn : teneur en zinc, Cu : teneur en cuivre, Cd : teneur en cadmium, Co : teneur en cobalt, Mo : teneur en molybdène, Ni : teneur en nickel, HAP : teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques, PCB : teneur en polychlorobiphényles, Cond. électrique : conductivité électrique.

Les fonctions sont appréhendées (mesurées) grâce à un jeu optimal de données (optimum data set) ou liste de paramètres à mesurer caractérisant (adite fonction et établi par expertise. Le choix des paramètres a été fait à la fois sur une base scientifique (pertinence du paramètre) et en fonction de l'existence/accessibilité/disponibilité de la donnée (Figure 1). Par exemple, pour la fonction « circulation et rétention de l'eau », les paramètres déterminants sont : la réserve utile en eau, la perméabilité et le degré d'hydromorphie. Dans le cas de Gardanne, les données disponibles étaient de qualité inégale et pour certaines inexistantes. Les données nécessaires à l'élaboration de l'indice – soit, dans un premier temps, le jeu optimal de données – ont donc été obtenues par le croisement de données environnementales connues (carte géologique, modèle numérique de terrain, etc.) et de données dérivées par similitude de la carte pédologique de Roussel, ainsi que de prospection de terrain. Ces traitements préalables de l'information ne sont pas présentés ici. A noter que l'acquisition de nouvelles données avait essentiellement un but de consolidation de la démarche scientifique et ne constitue pas un prérequis à notre approche.

Le bon fonctionnement d'un sol est évalué à partir de sa multifonctionnalité, soit le nombre de fonctions satisfaites (au maximum 5) ou remplies pour tous les usages possibles ; la mesure de cette multifonctionnalité correspond donc à la somme des fonctions satisfaites (Figure 2). La valeur des paramètres est normalisée et transformée en classes de qualité, allant de 1 (bonne qualité) à 5 (mauvaise qualité) pour chaque fonction. Les seuls des classes sont établis à partir de références de la littérature ou à dire d'experts. Pour certains paramètres les références sont « absolues » car basées sur des connaissances internationalement reconnues, pour d'autres elles sont « relatives » car évaluées sur la base du jeu de données acquis sur la commune.

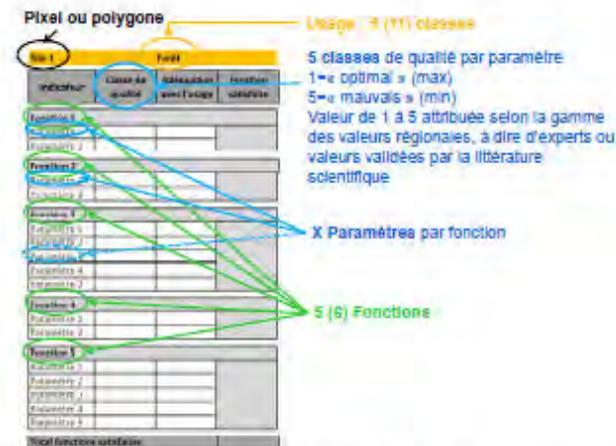


Figure 2 : Construction de l'indice : formulaires vierge
 Pour un usage déterminé, on évalue le niveau de « réalisation » de 5 fonctions pour lesquelles plusieurs paramètres sont pris en compte. Cette grille est établie pour chaque unité cartographique choisie (pixel ou polygone).

Une fonction est plus ou moins contraignante pour un usage donné : donc, le (ou les) paramètre(s) la définissant, tout en gardant la même classe de qualité, présente (présentent) une valeur acceptable ou non (seul) pour un usage donné. Pour cela, les valeurs de paramètres sont

confrontées à une grille d'adéquation (Figure 3) dans laquelle les classes de qualité appropriées selon l'usage sont indiquées pour chaque paramètre (plusieurs classes peuvent être acceptables pour une fonction et un paramètre donnés). Enfin, l'indice est également fondé sur la notion de facteur limitant, afin de mettre en avant les potentialités d'un sol à accueillir ou non un usage.

Adequation avec l'usage-grille de référence-classe de qualité du paramètre



Figure 3 : Construction de l'indice : application à un site sous couvert forestier
 Chaque grille construite est confrontée à une grille de référence pour l'adéquation à un usage donné. La différence entre les 2 est calculée afin d'évaluer l'adéquation à cet usage.

Ainsi, si un paramètre présente une valeur inférieure à celle requise pour la fonction, la fonction n'est pas satisfaite, même si les autres paramètres ont des valeurs adéquates. On somme ensuite le nombre de fonctions satisfaites pour un usage et on obtient une note sur 5 (nombre total de fonctions). Le résultat est une évaluation de l'adéquation des sols pour chacun des usages identifiés (au nombre de 5) sur le territoire d'étude (Figure 4).

Il est ensuite possible de sommer le nombre total de fonctions satisfaites pour tous les usages, créant ainsi un indice de polyvalence d'usage des sols présenté dans le corps du document. L'indice d'adéquation des sols, tout comme l'indice de polyvalence peut être spatialisé par unité de caractérisation du sol (pixel), par unité de sol ou moyenné par zones de planification d'usage du sol telles que définies dans le PLU. Cela permet ainsi de visualiser les potentialités du patrimoine sol de la commune.

confrontées à une grille d'adéquation (Figure 3) dans laquelle les classes de qualité appropriées selon l'usage sont indiquées pour chaque paramètre (plusieurs classes peuvent être acceptables pour une fonction et un paramètre donnés). Enfin, l'indice est également fondé sur la notion de facteur limitant, afin de mettre en avant les potentialités d'un sol à accueillir ou non un usage.

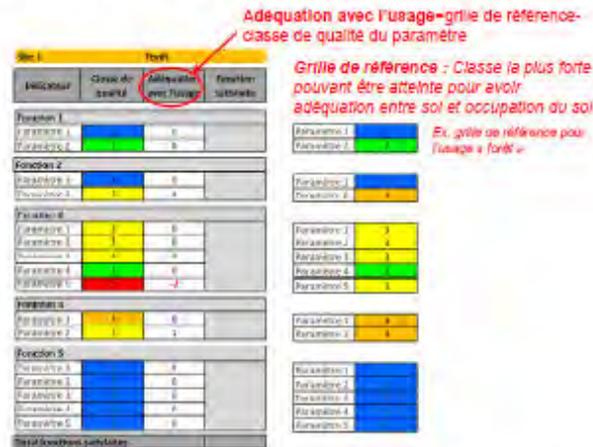


Figure 3 : Construction de l'indice : application à un site sous couvert forestier
Chaque grille construite est confrontée à une grille de référence pour l'adéquation à un usage donné. La différence entre les 2 est calculée afin d'évaluer l'adéquation à cet usage.

Ainsi, si un paramètre présente une valeur inférieure à celle requise pour la fonction, la fonction n'est pas satisfaite, même si les autres paramètres ont des valeurs adéquates. On somme ensuite le nombre de fonctions satisfaites pour un usage et on obtient une note sur 5 (nombre total de fonctions). Le résultat est une évaluation de l'adéquation des sols pour chacun des usages identifiés (au nombre de 9) sur le territoire d'étude (Figure 4).

Il est ensuite possible de sommer le nombre total de fonctions satisfaites pour tous les usages, créant ainsi un indice de polyvalence d'usage des sols présenté dans le corps du document. L'indice d'adéquation des sols, tout comme l'indice de polyvalence peut être spatialisé par unité de cartésianisation du sol (plate), par unité de sol ou moyenné par zones de planification d'usage du sol telles que définies dans le P.L.U. Cela permet ainsi de visualiser les potentialités du patrimoine sol de la commune.

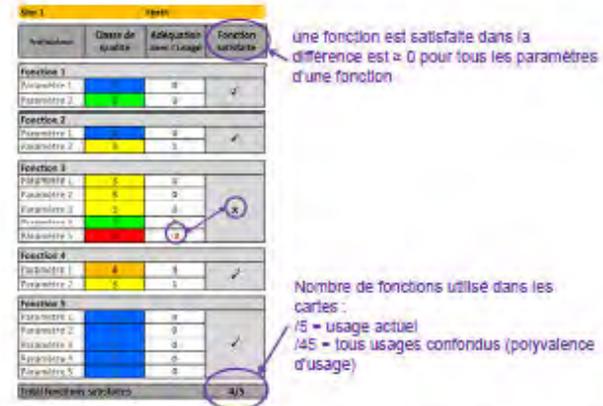
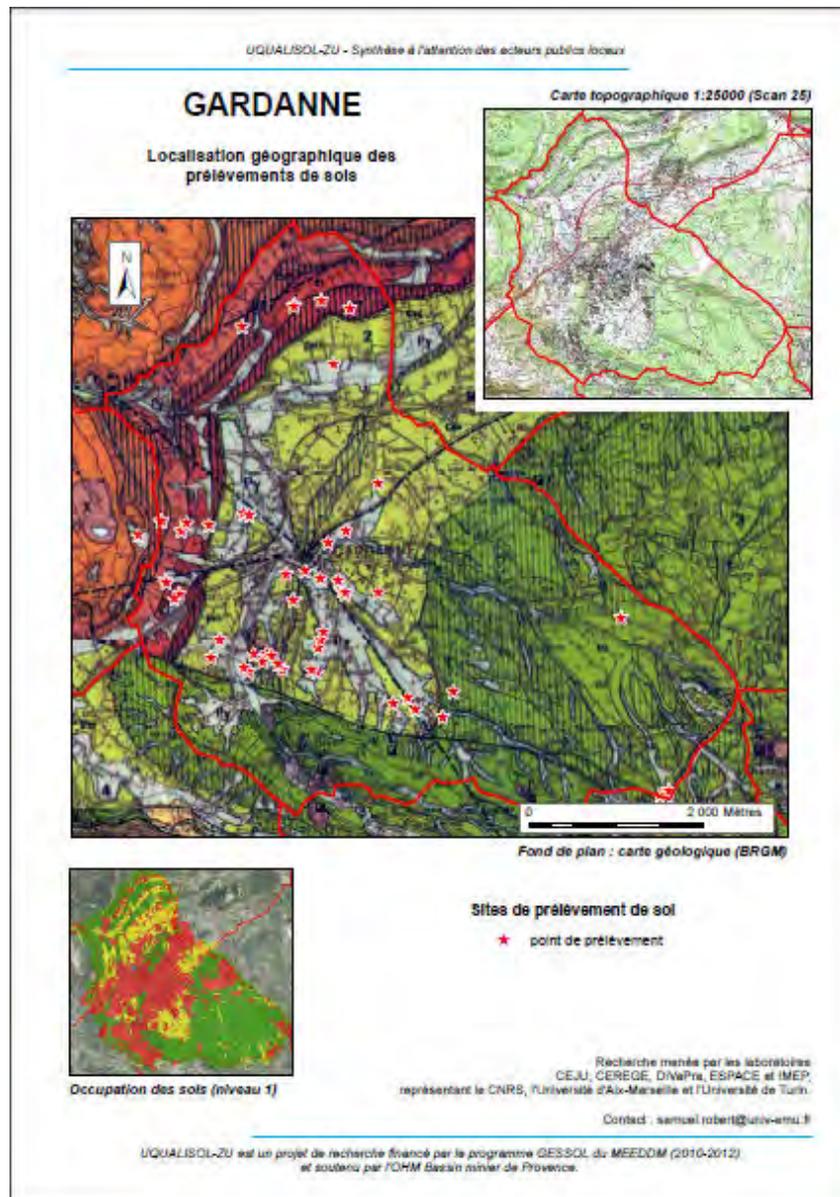


Figure 4 : Construction de l'indice : évaluation des fonctions satisfaites
Pour un site déterminé, selon que les paramètres (représentant chaque fonction) présentent une valeur de classe de qualité supérieure ou égale à la valeur d'adéquation avec l'usage, la fonction est déclarée satisfaite ou non. La somme des fonctions satisfaites est ensuite réalisée et détermine ainsi la multifonctionnalité d'un sol pour un usage précis (min = 0, max = 5). Pour chaque sol, cette opération est effectuée pour les 9 usages possibles retenus dans le cadre du projet UQUALISOL-ZU, ce qui permet d'établir la somme totale des fonctions satisfaites pour tous les usages (max = 45).



Les données issues des sondages à la tarière ont par ailleurs permis :

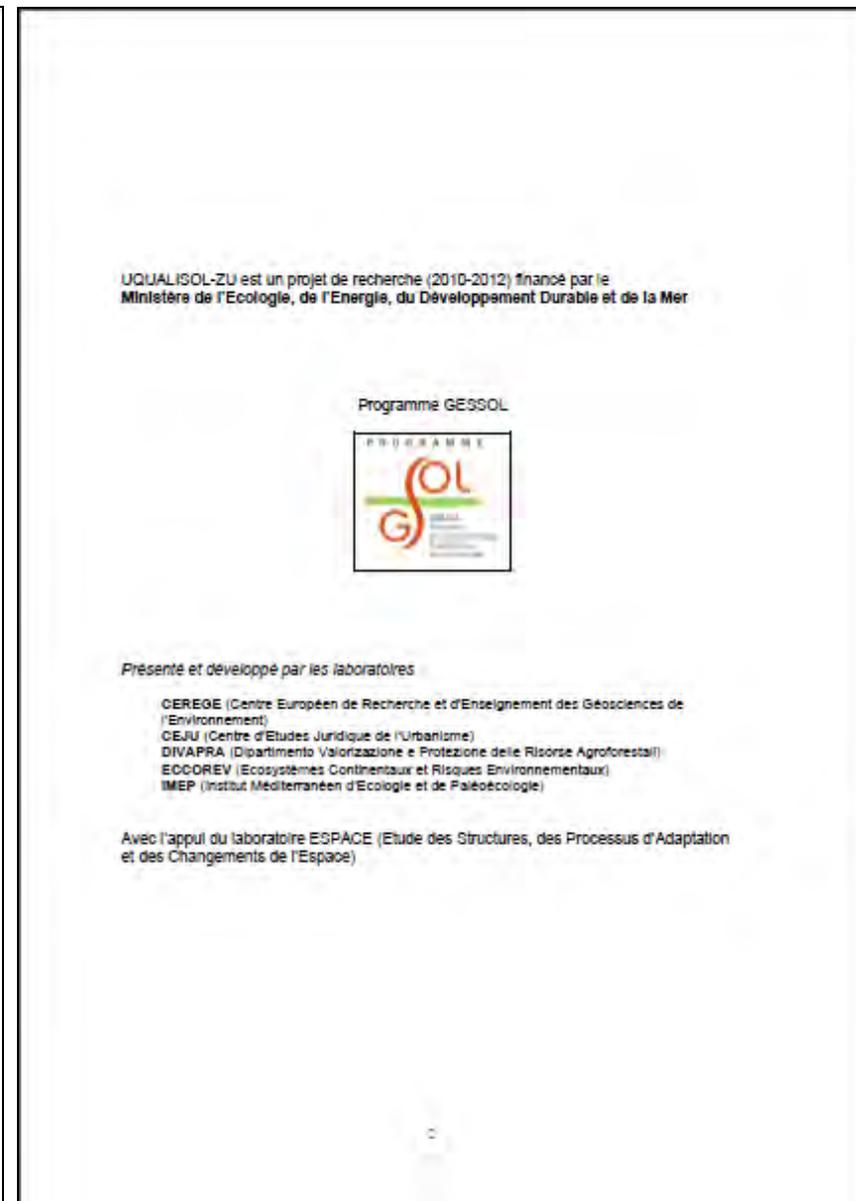
- d'apporter des compléments aux paramètres non mesurés dans la carte pédologique de Rousset (utilisée comme référence pour la constitution de la carte numérique des sols de Gardanne) ;
- la validation de la cartographie numérique des sols de Gardanne générée préalablement à la construction de l'indice (puisque la commune de Gardanne ne possède pas de carte des sols) ;
- le choix des seuils des paramètres de l'indice ne possédant pas de valeurs référencées ;
- de renseigner des zones traditionnellement non cartées (zones urbaine et péri-urbaine) et contribuer à une meilleure connaissance du territoire ;
- la vérification de l'occupation du sol et des états de surface.

D'une manière plus générale, le jeu de données obtenu a également permis une caractérisation des sols des zones urbaine et péri-urbaine, traditionnellement peu ou non étudiés.

Remarque concernant les sondages :

Les données obtenues à partir de sondages effectués chez des particuliers (hors zone agricole et forestière) ont été transmises aux intéressés sous forme d'une fiche synthétique récapitulative.

Annexe IV-2 : Synthèse des travaux présentée aux acteurs publics de Rousset



Ce document constitue une synthèse succincte des éléments produits dans le cadre du projet UQUALISOL-ZU. Son objet est de servir de support aux échanges entre chercheurs et gestionnaires, quant à la possibilité et à l'intérêt de la prise en compte d'une connaissance de la qualité et des potentialités des sols préalablement à la planification urbaine.

Il se compose de :

- un résumé du projet UQUALISOL-ZU
- cartes du territoire communal de Rousset, représenté plus particulièrement en termes d'occupation des sols, de zonage d'urbanisme et de polyvalence d'usages des sols ;
- recommandations pour l'usage des données de polyvalence d'usage des sols : signification de la notion de polyvalence d'usages ; contexte et philosophie de mise en œuvre d'une caractérisation de la polyvalence d'usage des sols dans une démarche de planification ; possibilités d'intégration dans la démarche PLU ; exemple de l'intérêt de cette donnée sur un cas précis ;
- réflexions plus larges sur l'emploi de données de qualité des sols à d'autres fins, comme la prévention des risques naturels, la définition de schéma de cohérence écologique, etc. ;
- annexes techniques sur la conduite de la recherche et la production de données inédites.

UQUALISOL-ZU : résumé du projet

Le rôle tenu par les sols dans le développement économique et social des territoires est, dans la plus grande partie du monde, tout à fait majeur. Cette fonction de support des activités humaines repose sur le fait que le sol est d'abord un substrat, une surface sur laquelle se déploient et s'organisent les sociétés (sol-espace). Elle repose aussi et surtout sur la qualité des sols, qui permettent à certaines activités, en premier l'agriculture, de prospérer (sol-épaisseur). Cependant, les sols remplissent des fonctions qui ne servent pas directement la société, mais qui sont à l'évidence tout à fait essentielles, comme par exemple la conservation d'une partie de la biodiversité. Ces différentes dimensions des sols font qu'ils sont une composante fragile et indispensable des anthroposystèmes, tout particulièrement dans les zones urbaines et périurbaines, où la pression exercée sur les sols est intense. Dans ces espaces, la gestion et la conservation de cette ressource apparaissent comme un enjeu de premier ordre du fait de l'étalement urbain, des contaminations diverses liées aux activités urbaines, des friches créées par l'évolution des villes. Ceci pose par conséquent la question de la planification de l'usage des sols, c'est-à-dire des préconisations en matière d'occupation et d'usage possible des sols dans les documents d'urbanisme, et de la prise en compte de la qualité des sols dans l'élaboration de ces préconisations.

Le projet proposé consiste à mettre en perspective le droit de l'urbanisme avec la connaissance scientifique de la qualité des sols. L'objectif est triple : évaluer comment le droit permet d'intégrer une connaissance de la qualité des sols dans le processus de planification de l'usage des sols (1), évaluer quelle connaissance de la qualité des sols peut être produite pour être utilisée par le planificateur (2), et produire une application dans le contexte péri-urbain du bassin minier de Provence, aux portes d'Aix-en-Provence et de Marseille (3).

La méthode développée consistera en plusieurs étapes. Dans un premier temps, on effectuera un inventaire des informations historiques, environnementales et urbanistiques à disposition permettant de construire une base de données dédiée afin d'appréhender au mieux le contexte général (politique, juridique et environnemental) de l'aménagement du territoire actuel. Simultanément, on analysera comment les différentes fonctions des sols sont prises en compte dans les méthodologies visant à définir les procédures administratives de réhabilitation des sols pollués, ou dans les outils visant à gérer « l'après-mine », comme les Plans de Prévention des Risques Miniers.

Afin de fournir une base synthétique sur la qualité des sols utilisable dans la planification du territoire, on identifiera des unités homogènes d'occupation des sols à partir de données historiques, des cartes disponibles et de la photo-interprétation d'images satellites et de photographies aériennes. Les sols de ces différentes unités seront caractérisés d'un point de vue morphologique, physique, chimique et biologique. Après validation, les résultats permettront la création d'un indice synthétique de la qualité des sols ainsi qu'une évaluation de la valeur « écologique » des sols, en se basant sur la méthodologie proposée par Vrscaj et al. (2006), sur les POIS en vigueur (et PLU en développement), sur des informations historiques voire sur des données originales. Simultanément, la pertinence des paramètres introduits dans l'indice orienté « usage du sol », ainsi que la pertinence de la prise en compte de la multifonctionnalité des sols, seront évaluées. L'indice sera donc optimisé en regard des exigences de la gestion du territoire. Les résultats seront comparés à l'utilisation actuelle ou envisagée par les POIS et PLU et proposés aux acteurs de la gestion du territoire d'étude.

Synthèse cartographique

1. Le territoire communal : données de cadrage de l'Institut Géographique National
2. Occupation des sols à grande échelle (2008), niveau 1 conforme Corine Land Cover
3. Zonage du Plan Local d'Urbanisme
4. Polyvalence d'usage des sols
5. Polyvalence d'usage des sols (en écart à la moyenne communale)
6. Polyvalence d'usage moyenne des sols dans les zones du PLU

LQUALISOL-ZU - Synthèse à l'attention des acteurs publics locaux

Photographie aérienne (Bd-Ortho)



ROUSSET

Le territoire communal - données de cadrage
de l'Institut Géographique National

Carte topographique 1:25000 (Scan 25)



Relief (altitude en m)

Elevée : 577

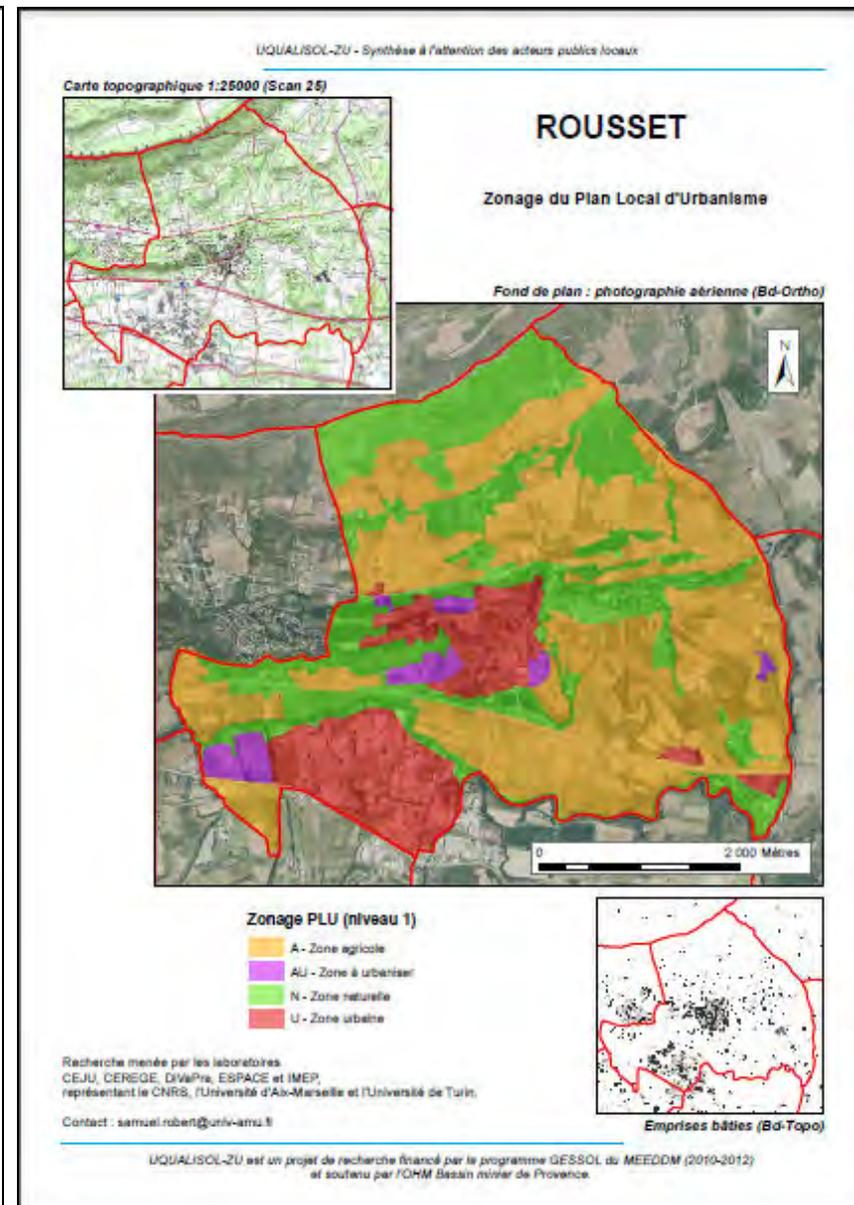
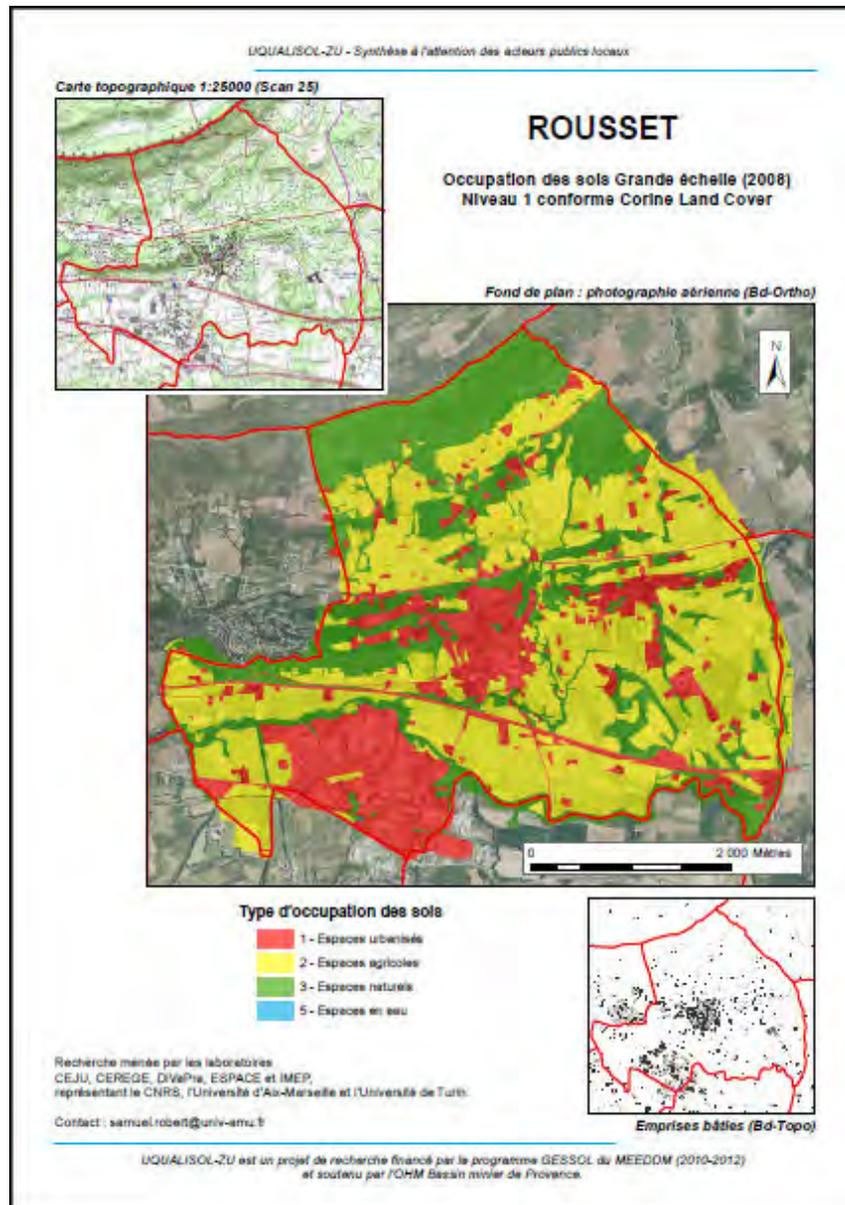
Faible : 192

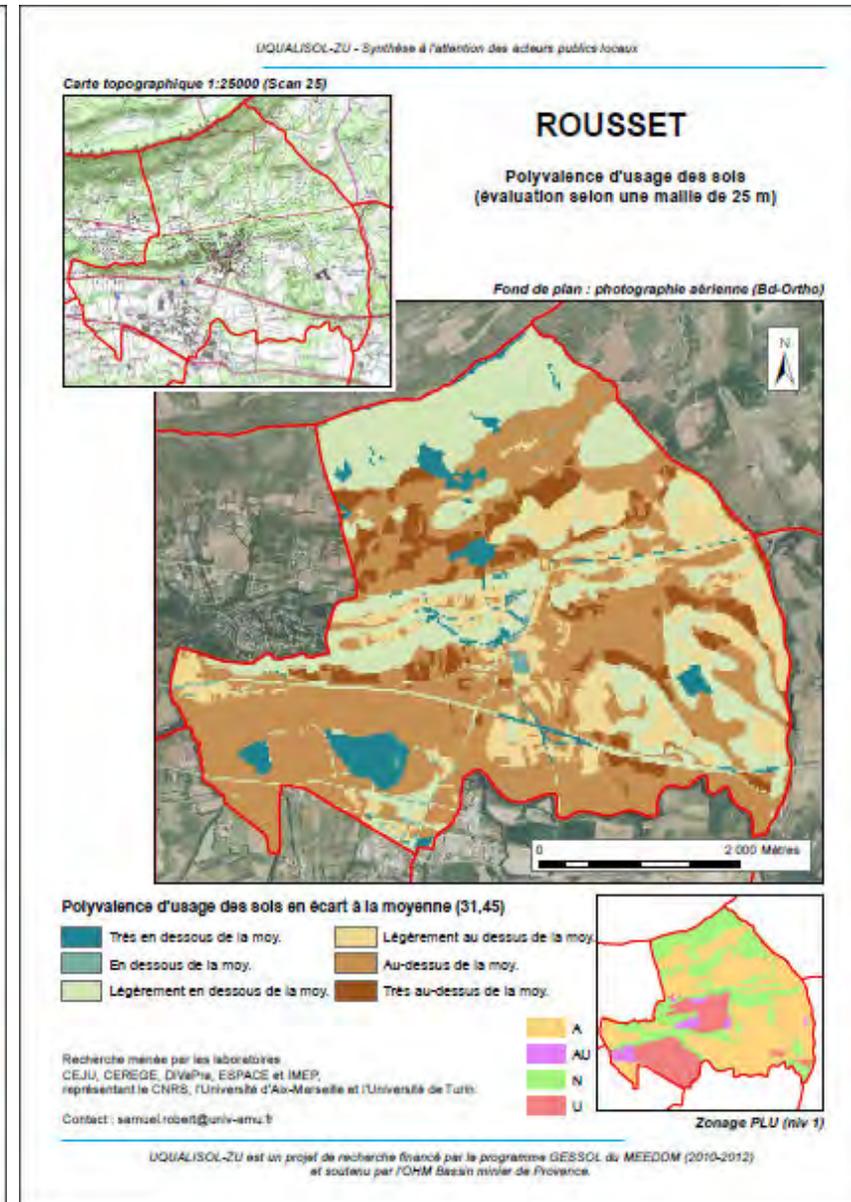
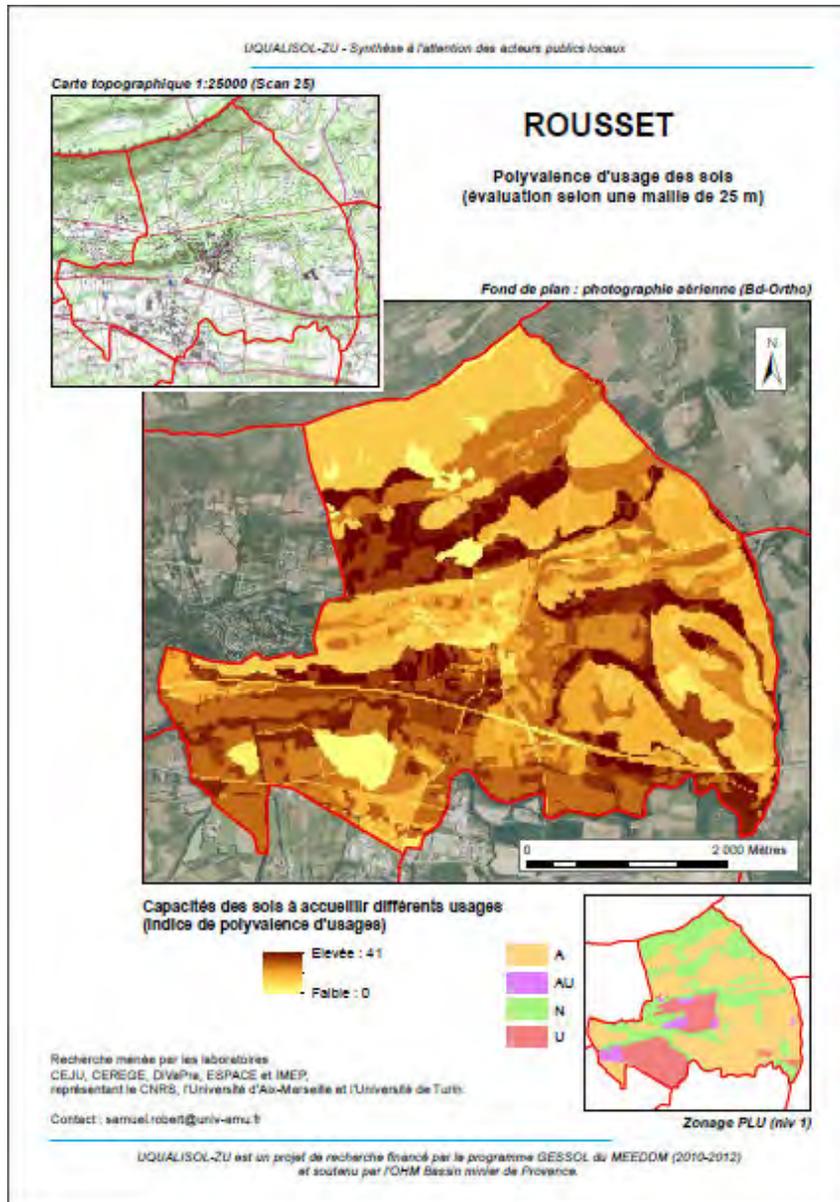
Modèle numérique de terrain 25m (Bd-Topo)

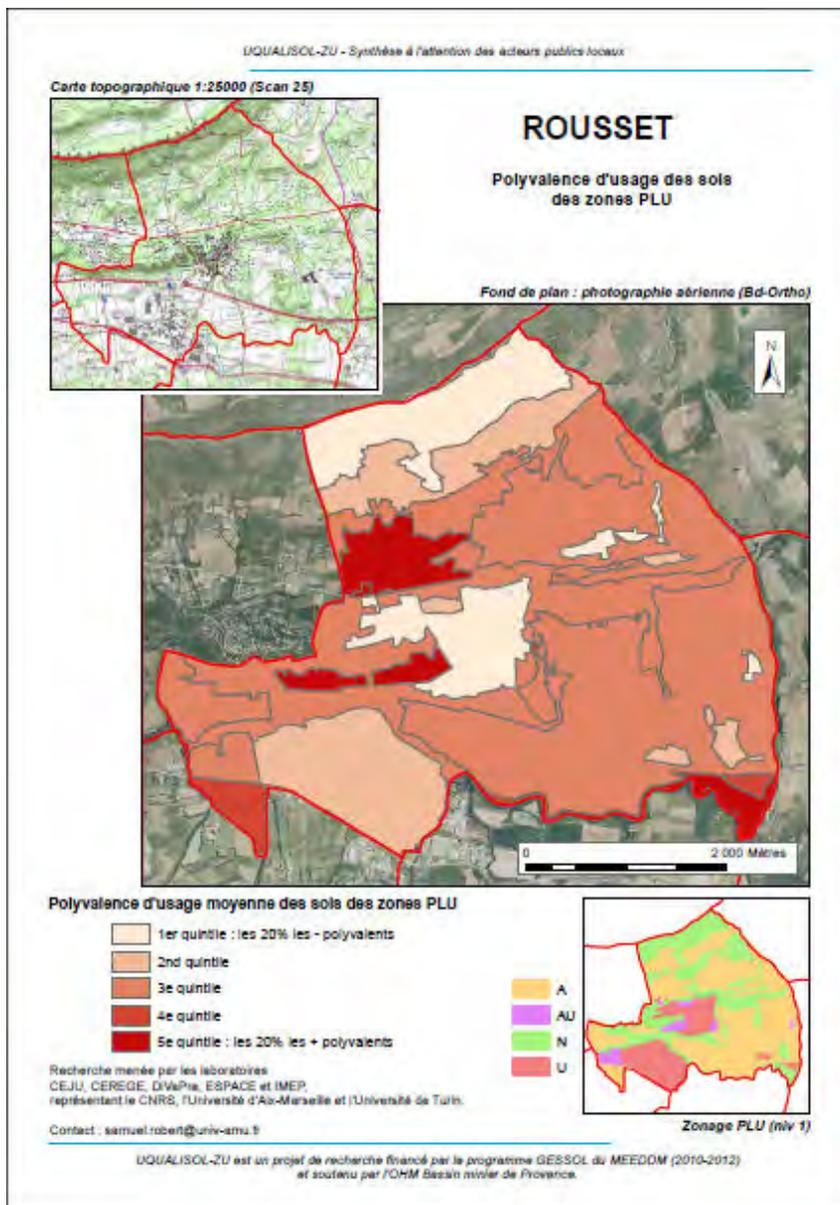


Recherche menée par les laboratoires
 CEJU, CEREGE, DIVEP, ESPACE et IMEP,
 représentant le CNRS, l'Université d'Aix-Marseille et l'Université de Toulon.
 Contact : samuel.robert@univ-amu.fr

LQUALISOL-ZU est un projet de recherche financé par le programme GESSOL du MEEDDM (2010-2012)
 et soutenu par l'OHM Bassin rivier de Provence.







Recommandations – ce qu'il faut savoir

Le recours à une évaluation de la qualité des sols et, en particulier, à l'identification de leur polyvalence d'usage s'inscrit dans la perspective de contribuer à faciliter la définition de politiques publiques respectueuses d'un équilibre entre la préservation de l'environnement et le développement économique et social des territoires concernés. Les sols sont incontestablement une composante fondamentale de l'environnement.

Pourquoi produire une information spatialisée de la qualité des sols à destination des communes ?

Il s'agit de permettre aux acteurs publics de disposer d'une information exhaustive sur les potentialités offertes par les sols de leur territoire de compétence. Le but est de faciliter l'élaboration, en toute connaissance de cause, des politiques locales de planification des usages possibles de l'espace mais également les politiques de gestion raisonnée et de protection de l'espace et de l'environnement.

Le sol est une ressource naturelle non renouvelable. Aujourd'hui, sa prise en compte découle majoritairement de la nécessité de traiter la question de l'accès et de la gestion du foncier (espaces disponibles pour construire des logements, aménager des zones d'activités économiques, des équipements collectifs, des voies de communication, etc.) ; le sol est donc principalement considéré comme une surface. Cependant, pour des cas précis, certaines caractéristiques propres des sols sont prises en considération, par exemple son imperméabilité / perméabilité pour la lutte contre le ruissellement urbain et les inondations. Mais bien d'autres caractéristiques sont tout aussi déterminantes en matière de planification et de conservation de l'espace :

[Le sol] assure des fonctions de stockage, de filtration et de transformation de nombreuses substances dont l'eau, les nutriments et le carbone.¹ Le sol est donc un élément déterminant et irremplaçable pour la diversité biologique, le système climatique globale, la gestion durable de l'eau, la « foresterie », pour l'agriculture et donc l'alimentation.²

Par ailleurs, dans le cadre du changement global, de nouveaux besoins et de nouveaux enjeux s'affirment autour de la question des sols : cultures potagères urbaines, végétalisation des espaces urbains dans le cadre de la lutte contre les canicules (îlots de chaleur urbains), piégeage du carbone (sol = puits de carbone) dans le cadre de l'atténuation du changement climatique, etc.

Pour mémoire, concernant le rôle et l'obligation des communes, le sol apparaît dans le Code de l'urbanisme, comme une ressource à gérer de façon économe (article L. 110 du Code de l'urbanisme) : « afin d'aménager le cadre de vie, d'assurer sans discrimination aux populations résidentes et futures des conditions d'habitat, d'emploi, de services et de transports répondant à la diversité de ses besoins et de ses ressources, de gérer le sol de façon économe, [...] d'assurer la protection des milieux naturels et des paysages, la préservation de la biodiversité notamment par la conservation, la restauration et la création de continuités écologiques, [...] les collectivités publiques harmonisent, dans le respect réciproque de leur autonomie, leurs prévisions et leurs décisions d'utilisation de l'espace. [...] ».

En outre, l'article L. 121-1 du Code de l'urbanisme précise :

« Les schémas de cohérence territoriale, les plans locaux d'urbanisme et les cartes communales déterminent les conditions permettant d'assurer : [...] »

3° Une utilisation économe et équilibrée des espaces naturels, urbains, périurbains et ruraux, [...] la préservation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et du sous-sol, des écosystèmes, des espaces verts, des milieux, sites et paysages naturels ou urbains, [...] »

¹ Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions, « Stratégie thématique en faveur de la protection des sols », COM(2006)201 final, 22.9.2006, p. 2.
² MOULIER-GUIGOT M., « Protection des sols », JurisClasser Administratif, Fascicule 301, janvier 2008, p. 1.

La polyvalence d'usage des sols : définition et intérêt

Pour permettre aux gestionnaires publics d'incorporer une information de qualité et de potentialité d'usages des sols de leur territoire dans leur politique locale d'urbanisme, le projet UQUALISOL-ZU a forgé le concept de polyvalence d'usage des sols, qui est quantifié par un indice et représenté par des cartes. L'explicitation de ce concept nécessite de préciser les notions de multifonctionnalité et d'usage.

La multifonctionnalité renvoie au concept de fonctions bio-géo-physiques du sol, en lien direct avec ses caractéristiques naturelles. C'est une évaluation des capacités intrinsèques du sol à exercer une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- circulation et rétention de l'eau,
- rétention et cycle des nutriments,
- stabilité physique et support,
- biodiversité,
- filtration et pouvoir tampon,
- patrimoine pédologique (non pris en compte dans UQUALISOL-ZU).

L'usage se réfère à l'utilisation que la société fait ou entend faire de son territoire. Cette utilisation intègre implicitement les fonctions des sols à des degrés divers puisque ces fonctions sont plus ou moins contraignantes pour un usage donné. Il est alors possible de calculer un indice d'adéquation du sol à l'usage qui en est fait, ou qu'on désire lui attribuer en fonction de la manière dont le sol remplit ces fonctions. Pour un lieu déterminé et le sol qui s'y trouve, nous proposons ainsi de sommer le nombre total de fonctions satisfaites pour tous les usages, créant ainsi un indice de polyvalence d'usage. Cette polyvalence d'usage varie dans l'espace et hiérarchise donc les sols en fonction de leur capacité à pouvoir supporter une gamme plus ou moins étendue d'usages. Dans le cadre d'UQUALISOL-ZU, les usages retenus sont hiérarchisés et sont au nombre de 9 au niveau le plus détaillé (Tableau 1).

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Code
Territoires agricoles	Cultures annuelles, prairies temporaires		TA1
	Cultures permanentes		TA2
Forêts et milieux semi-naturels	Forêts		F1
	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée		F2
Zones humides	Zones humides intérieures et maritimes		ZH
Territoires artificialisés	Zones urbanisées	Places, cours, parkings, voies de com., équipements sportifs et de loisirs artificialisés	ZU1
		Jardins d'agrément, équipements sportifs et de loisirs non artificialisés, plates-bandes	ZU2
		Jardins potagers et familiaux	ZU3
	Zones industrielles et commerciales	Jardins + assainissement non collectif	ZU4
		Places, cours, parkings, voies de com., surfaces techniques	ZIC1
		Jardins d'agrément, plates-bandes	ZIC2

Tableau 1 : Les différents usages retenus dans le cadre du projet UQUALISOL-ZU déclinés selon le niveau d'interprétation utilisé.

L'intérêt de la notion de polyvalence d'usages des sols est de permettre une caractérisation de la totalité d'une zone sur laquelle doit être élaborée une planification d'usage des sols, notamment en termes de :

- potentialité bio-géo-physique des sols à accueillir des activités diverses, plus ou moins exigeantes par rapport à la ressource « sol » ;
- dispositions plus ou moins favorables à la conservation de la biodiversité et à l'élaboration de la trame verte ;
- capacité à exercer des fonctions de « régulation » dans divers processus concernant les flux de l'eau, de l'air et de matières : filtrage, rétention, épuration, etc.

Disposant d'une cartographie de la polyvalence d'usage des sols (Cartes 6, 8 et 7), les gestionnaires sont alors en mesure de s'orienter vers la préservation des sols les plus polyvalents pour :

- maintenir l'agriculture sur les sols les plus favorables et éviter la consommation des sols les plus polyvalents par des usages qui sont peu exigeants vis-à-vis de la ressource sol ;
- contribuer à une amélioration de la qualité de vie en milieu urbain par le biais du maintien ou de la création de zones « vertes », jardins familiaux, etc. ;
- contribuer aux réductions des risques de ruissellement et d'inondation ;
- envisager des usages et demandes futurs non encore établis (par exemple, réservoir de biodiversité).

En d'autres termes, la polyvalence d'usage des sols peut être vue comme un outil d'aide à la décision, permettant d'accompagner le planificateur dans son exercice d'élaboration des documents d'urbanisme, aussi bien dans les parties déjà urbanisées que sur les espaces et surfaces non construites du territoire relevant de sa compétence. Venant compléter les informations habituellement mobilisées pour la construction des projets de territoire, les cartes de polyvalence d'usage des sols autorisent la mise en évidence de zones sensibles, de zones fragiles ou à fort potentiel, et donc de hiérarchiser les espaces composant le territoire communal en termes d'enjeux.

Comment s'élabore la carte de polyvalence d'usages des sols ?

Les étapes de la construction pratique de l'indice sont présentées en Annexe 1. Les données prises en compte sont issues de prélèvements de terrain (prélèvements in situ), de données existantes dans les corpus cartographiques et d'études de sols déjà réalisées sur la zone considérée (Annexe 2).

Les caractéristiques pédologiques et l'occupation des sols de la zone d'étude permettent ensuite de générer une carte de la polyvalence d'usage des sols, à des niveaux de précision variés. A l'échelle communale, nous recommandons la résolution de 25 m (la carte propose une valeur de polyvalence d'usage dans une maille de 25 m de côté). Cette information peut ensuite être agrégée par unité de surface, comme par exemple les zones du PLU (Carte 7) ou bien celles de la carte d'occupation des sols.

Quand et comment utiliser l'information de polyvalence d'usage des sols ?

A quel moment se servir de l'information de polyvalence d'usage des sols ?

Il nous apparaît que l'usage de l'indice et des cartes associées pourrait avoir lieu à plusieurs niveaux et à différentes étapes de l'élaboration de la politique d'urbanisme et de la planification d'usages des sols d'une commune ou d'une intercommunalité :

- dans le cadre des réflexions plus générales sur le territoire et l'environnement : Charte de l'environnement, Agenda 21 local, Plan Energie Climat Territorial, etc. ;
- au moment de la réflexion en amont sur les espaces à protéger dans les plans locaux d'urbanisme, en rapport notamment avec les usages qu'ils peuvent accueillir ;
- au moment de la présentation et de l'explication des choix d'urbanisme au public ;
- au moment des décisions sur les autorisations d'urbanisme : la référence à l'indice peut permettre d'expliquer des refus de permis de construire, par exemple.

Comment exploiter l'indice ? A quel niveau de l'élaboration ou de la révision du PLU ?

L'information de polyvalence d'usage des sols peut être demandée dans le cadre de l'évaluation environnementale du document d'urbanisme à élaborer. Il est en effet possible d'intégrer une étude pour connaître les potentialités des sols dans le diagnostic environnemental.

Il est ensuite possible d'insérer la préservation de la multifonctionnalité des sols comme objectif dans les documents d'urbanisme, à différents niveaux :

- 1) dans les outils généraux du PLU :
- dans le rapport de présentation : ce document est stratégique et non contraignant, mais l'état initial de l'environnement doit néanmoins être exhaustif ;
 - dans le PADD : il s'agit d'orientations générales d'aménagement et d'urbanisme, dans le respect des objectifs L110 et L121-1 du Code de l'Urbanisme (gestion économe des sols) ; ce document est stratégique, non contraignant, mais le règlement doit être cohérent avec lui ;
- 2) dans les outils particuliers du PLU :
- les orientations particulières d'aménagement : celles-ci sont contraignantes, mais ne concernent que certaines zones ;
 - le règlement et les zonages du PLU : contraignant pour chaque zone, mais difficile à orienter vers la protection des sols sur les zones urbaines ; plus facile pour les zones agricoles (potentiel agronomique ou biologique des sols) et les zones naturelles ;
 - les emplacements réservés : ceci vise les installations d'intérêt général (captage carbonne ?) ; contraignant mais ne concerne que certaines zones.
- Au final, on peut considérer qu'il existe deux manières de se servir de l'information de polyvalence d'usage des sols :
- soit dans une simple réflexion en interne (au moment de la réflexion en amont sur les sols à protéger, pour divers usages) ;
 - soit par un affichage transparent :
 - o dans la rédaction du PLU, ainsi qu'au moment de la présentation et de l'explication des choix d'urbanisme au public. Ceci permet une sensibilisation des acteurs ;
 - o au moment des décisions sur les autorisations d'urbanisme (la référence à l'indice permet par exemple d'expliquer des refus de permis de construire).
- Mais dans les deux cas, l'indice devient alors opposable.

Interpréter une carte de polyvalence d'usage : exemple

Afin d'illustrer l'usage possible d'une carte de polyvalence d'usage des sols, nous proposons d'examiner la situation d'une partie du territoire de Rousset, localisée au centre-ouest de la commune.

La Figure 1 est un extrait de la carte de la valeur moyenne de polyvalence d'usage des sols par zone de PLU actuellement en vigueur à Rousset. Sans préjuger du bien fondé des choix d'urbanisme qui ont été faits, on note que le zonage ne reflète pas nécessairement ce à quoi on pourrait s'attendre si les potentialités des sols étaient prises en compte. Conformément aux recommandations relatives à la conservation de l'espace et à la limitation de l'étalement urbain, le document d'urbanisme communal présente des zones à urbaniser (AU) à proximité du centre-ville et en continuité de l'agglomération existante. Cependant, la plus grande d'entre-elle a été planifiée sur des sols offrant une polyvalence d'usage élevée (zone classée dans le 5^{ème} quintile, indiquant un grand nombre de fonctions satisfaites), ce qui peut apparaître inopportun dans la mesure où l'urbanisation détruit le patrimoine sol. En revanche, au nord de l'extrait, une zone agricole (A) étendue semble judicieusement délimitée. Coïncidant avec des sols appartenant au 5^{ème} quintile, elle est à même de satisfaire un usage agricole de l'espace (plutôt exigeant sur la ressource sol), tout en rendant possible de multiples autres usages dans l'avenir et en conservant le patrimoine sol.

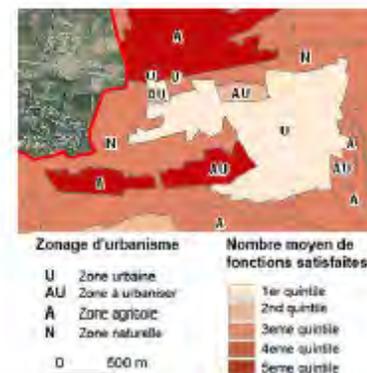


Figure 1 : Extrait de la carte de la valeur moyenne de polyvalence d'usage des sols par zone de PLU à Rousset (voir la Carte 4 pour visualiser l'intégrité de la commune).
Les quintiles sont calculés par rapport à un maximum de 45 fonctions satisfaites pour un total de 9 usages.

Ces quelques considérations ne donnent qu'une petite idée des potentialités d'exploitation de l'information « polyvalence d'usage des sols » dans une démarche de gestion et de planification de l'espace. Intégré dans un système d'information géographique (SIG) comprenant l'ensemble des paramètres pertinents pour une gestion avisée du territoire, l'indice de polyvalence d'usage des sols laisse entrevoir un grand nombre d'applications utiles. Bien d'autres cartes, en particulier les cartes intermédiaires par usage, peuvent par ailleurs être générées à partir des données à disposition afin d'alimenter la réflexion.

Apports et prolongements possibles d'UQUALISOL-ZU

Intégrer une connaissance scientifique de la qualité et des potentialités des sols dans les politiques publiques de planification de l'espace et de conservation de l'environnement demeure un objectif à poursuivre. En effet :

- Si la Commission européenne affirme en 2006, dans sa Stratégie thématique en faveur de la protection des sols³, que les fonctions remplies par les sols « doivent être protégées en raison de leur importance socio-économique et environnementale »⁴, il n'existe toujours pas à l'heure actuelle de Droit des sols applicable. Si la Commission a élaboré une Proposition de Directive définissant un cadre pour la protection des sols, en date du 22 septembre 2006⁵, cette dernière n'a toujours pas été adoptée, la majorité qualifiée des votes des Etats membres de l'Union européenne n'ayant pas été atteinte.
- En France, dans le code de l'environnement, il n'existe pas non plus de régime de droit spécifiquement dédié aux sols et à leur protection en tant que milieu naturel, au même titre que l'eau ou l'air.

Les résultats issus du projet UQUALISOL-ZU montrent qu'il est possible de produire une information relative à la qualité et aux potentialités des sols susceptible de fonder une politique conservatrice des sols (et des espaces), sans nier les nécessités de développement socio-économique des territoires. La recherche s'est focalisée sur la définition du concept de polyvalence d'usage et sa traduction concrète par la conception d'un indice et sa spatialisation. Les travaux se sont uniquement inscrits dans le cadre de l'élaboration de la planification et de la gestion des sols au niveau communal, mais diverses perspectives sont envisageables. Ainsi, les acquis d'UQUALISOL-ZU pourraient être exploités pour :

- l'élaboration de la politique de protection et de mise en valeur des espaces naturels périurbains par le département (C. urb., art. L. 143-1). Le Conseil Général peut en effet délimiter des périmètres d'intervention et élaborer un programme d'action précisant les aménagements et orientations de gestion destinés à favoriser la préservation et la valorisation de ces espaces (C. urb., art. L. 143-2). Les terrains concernés ne peuvent pas être inclus dans une zone urbaine ou à urbaniser d'un plan local d'urbanisme, ou dans un secteur constructible d'une carte communale (C. urb., art. L. 143-4). A l'intérieur de ces périmètres, il peut procéder à l'acquisition des terrains à l'amiable ou par expropriation ainsi que par préemption dans les zones de préemption des espaces naturels sensibles. En dehors de ces zones de préemption, les SAFER ou, si elles n'existent pas, le CG lui-même, peuvent également préempter (C. urb., art. L. 143-3).
- la définition des politiques d'acquisitions foncières des établissements publics d'aménagement et établissements publics fonciers locaux dans un but de protection d'espaces naturels périurbains, le cas échéant en exerçant le droit de préemption à la demande et au nom du département (C. urb., art. L. 321-1 et L. 324-1).
- concevoir la lutte contre les inondations dans les espaces périurbains, puisque la politique rurale doit contribuer à la prévention des risques naturels et assurer la mise en valeur et la protection du patrimoine rural et des paysages (C. rur., art. L. 111-2).

³ Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions, « Stratégie thématique en faveur de la protection des sols », COM(2006)231 final, 22.9.2006, 13 p.
⁴ Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions, « Stratégie thématique en faveur de la protection des sols », COM(2006)231 final, 22.9.2006, p. 2.
⁵ Proposition de Directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la Directive 2004/35/CE, COM(2006) 232 final, 22.9.2006, 31 p.

Si les apports d'UQUALISOL-ZU sont avérés, plusieurs autres questions restent non élucidées ou nécessitent d'approfondir la recherche. Ainsi :

- il serait peut-être intéressant de rechercher les possibilités et l'intérêt d'intégrer une information sur les sols dans les éléments annexés au PLU qui peuvent prendre en compte les sols, comme les servitudes d'utilité publique des PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels), les cartes d'aléas, etc.
- on pourrait s'interroger sur l'intégration de cette information sur les sols dans les démarches de définition des ZAP (Zones Agricoles Protégées).

Aller-retour chercheurs/acteurs publics : vos commentaires à propos du projet et de ses résultats

A ce stade, une appréciation globale - par les acteurs locaux - de la démarche UQUALISOL-ZU, de ses résultats et des possibilités de transferts pour l'exercice de planification du territoire est souhaitée. Conformément aux objectifs du programme GESSOL ou MEEDDM, ce projet de recherche ambitionne en effet d'apporter des éléments utiles aux acteurs publics et de faciliter voire anticiper le traitement de questions qui se posent ou se poseront à courte échéance à la collectivité.

Les commentaires de la commune de Roussel pourraient par exemple porter sur :

- la compréhension de la démarche ;
- l'adhésion ou non à cette démarche (avec motivation de la réponse) ;
- le cas échéant, l'intérêt de sa mise en œuvre, avec des précisions sur les champs et les modalités d'applications envisageables et judicieuses ;
- etc.

Toutes les remarques pouvant contribuer à un approfondissement de la recherche et à une amélioration de cette démarche sont les bienvenues.

Annexes

Annexe 1 : De l'indice d'adéquation d'usage des sols à l'indice de polyvalence d'usage des sols

Préalablement à l'évaluation de la polyvalence d'usage des sols, il convient de mesurer l'adéquation des usages aux sols. Un **Indice d'adéquation d'usage des sols** a donc été conçu et calculé pour la commune de Rousset. Il a été élaboré sur la base des six fonctions énoncées précédemment.

Figure 1 : Origines des données* d'entrée de l'indice d'adéquation d'usage des sols

* : %MO : teneur en éléments grossiers, %A : teneur en argile, %S : teneur en sable, k : coefficient de perméabilité, %Corg : teneur en carbone organique, %MO : teneur en matière organique (=1,72 %Corg), CEC : capacité d'échange cationique, %Siltar : teneur en limon, Enfoncement : enfoncement mesuré à l'aide d'un essai au pénétromètre, Diversité bact. : diversité fonctionnelle des communautés bactériennes, Répartition bact. : répartition bactérienne, Pb : teneur totale en plomb, Zn : teneur en zinc, Cu : teneur en cuivre, Cd : teneur en cadmium, Co : teneur en cobalt, Mn : teneur en manganèse, Ni : teneur en nickel, HAP : teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques, PCB : teneur en polychlorobiphényles, Cond. électrique : conductivité électrique.

Les fonctions sont appréhendées (mesurées) grâce à un jeu optimal de données (optimum data set) ou liste de paramètres à mesurer caractérisant ladite fonction et établi par expertise. Le choix des paramètres a été fait à la fois sur une base scientifique (pertinence du paramètre) et en fonction de l'existence/accessibilité/disponibilité de la donnée (Figure 1). Par exemple, pour la fonction « circulation et rétention de l'eau », les paramètres déterminants sont : la réserve utile en eau, la perméabilité et le degré d'hydromorphie. Dans le cas de Rousset, les données disponibles sont de qualité inégale voire inexistantes. Les données nécessaires à l'élaboration de l'indice – soit, dans un premier temps, le jeu optimal de données – ont été obtenues par le croisement de données extraites des cartes pédologique et de texture fournies par la DCP, avec des données environnementales (carte géologique, modèle numérique de terrain, etc.) ainsi que des données issues de prospection de terrain effectuées dans le cadre du projet. A noter que l'acquisition de nouvelles données avait essentiellement un but de consolidation de la démarche scientifique et ne constitue pas un prérequis à notre approche.

Le bon fonctionnement d'un sol est évalué à partir de sa multifonctionnalité, soit le nombre de fonctions satisfaites (au maximum 5) ou remplies pour tous les usages possibles ; la mesure de cette multifonctionnalité correspond donc à la somme des fonctions satisfaites (Figure 2). La valeur des paramètres est normalisée et transformée en classes de qualité, allant de 1 (bonne qualité) à 5 (mauvaise qualité) pour chaque fonction. Les seuils des classes sont établis à partir de références de la littérature ou à dire d'experts. Pour certains paramètres les références sont « absolues » car basées sur des connaissances internationalement reconnues, pour d'autres elles sont « relatives » car évaluées sur la base du jeu de données acquis sur la commune.

Figure 2 : Construction de l'indice : formulaire vierge

Pour un usage déterminé, on évalue le niveau de « réalisation » de 5 fonctions pour lesquelles plusieurs paramètres sont pris en compte. Cette grille est établie pour chaque unité cartographique choisie (pixel ou polygone).

Une fonction est plus ou moins contraignante pour un usage donné : donc, le (ou les) paramètre(s) la définissant, tout en gardant la même classe de qualité, présente (présentent) une valeur acceptable ou non (seul) pour un usage donné. Pour cela, les valeurs de paramètres sont confrontées à une grille d'adéquation (Figure 3) dans laquelle les classes de qualité appropriées

selon l'usage sont indiquées pour chaque paramètre (plusieurs classes peuvent être acceptables pour une fonction et un paramètre donnés). Enfin, l'indice est également fondé sur la notion de facteur limitant, afin de mettre en avant les potentialités d'un sol à accueillir ou non un usage.

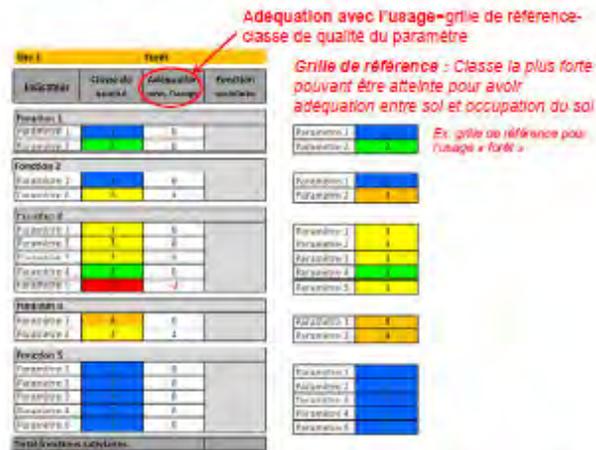


Figure 3 : Construction de l'indice - application à un site sous couvert forestier
Chaque grille construite est comparée à une grille de référence pour l'adéquation à un usage donné. La différence entre les 2 est calculée afin d'évaluer l'adéquation à cet usage.

Ainsi, si un paramètre présente une valeur inférieure à celle requise pour la fonction, la fonction n'est pas satisfaite, même si les autres paramètres ont des valeurs adéquates. On somme ensuite le nombre de fonctions satisfaites pour un usage et on obtient une note sur 5 (nombre total de fonctions). Le résultat est une évaluation de l'adéquation des sols pour chacun des usages identifiés (au nombre de 5) sur le territoire d'étude (Figure 4).

Il est ensuite possible de sommer le nombre total de fonctions satisfaites pour tous les usages, créant ainsi un indice de polyvalence d'usage des sols présenté dans le corps du document. L'indice d'adéquation des sols, tout comme l'indice de polyvalence peut être spatialisé par unité de caractérisation du sol (pixel), par unité de sol ou moyenné par zones de planification d'usage du sol telles que définies dans le PLU. Cela permet ainsi de visualiser les potentialités du patrimoine sol de la commune.



Figure 4 : Construction de l'indice - évaluation des fonctions satisfaites
Pour un site déterminé, selon que les paramètres (représentant chaque fonction) présentent une valeur de classe de qualité supérieure ou égale à la valeur d'adéquation avec l'usage, la fonction est déclarée satisfaite ou non. La somme des fonctions satisfaites est ensuite réalisée et déterminée ainsi la multifonctionnalité d'un sol pour un usage précis (min = 0, max = 5). Pour chaque sol, cette opération est effectuée pour les 5 usages possibles retenus dans le cadre du projet UQUALISOL-ZU, ce qui permet d'établir la somme totale des fonctions satisfaites pour tous les usages (max = 45).

Annexe 2 : Récapitulatif des données utilisées

Origine et nature des données utilisées :

- Carte géologique 1 : 50 000 : substrat géologique ou matériau parental du sol ;
- Modèle numérique de terrain : pente, réseau hydrographique, hydromorphie ;
- Carte pédologique de la haute vallée de l'Arc (1 : 20 000), SCP : unités de sol et caractéristiques physico-chimiques moyennes par unité ;
- "Etude pédologique moyennement détaillée des secteurs Puyoubier-Pourrières-Fourcleux" (1:20 000), septembre 1970, Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale (Carte pédologique de la haute vallée de l'Arc : unités de sol et caractéristiques physico-chimiques moyennes par unité) ;
- "Etude pédologique du périmètre de la Haute vallée de l'Arc (Trets-Peynier-Rousset-Châteauneuf-le-Rouge-Fuveau-Meyreuil)" (1:10000), Juillet 1968, Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale (carte des textures destinée à définir les potentialités d'irrigation) ;
- Cartes d'aptitude des sols à l'assainissement non collectif réalisées par la commune : perméabilité ;
- Données des états de surface générées à partir d'interprétation de photos satellitaires (résolution 50 cm) sur Gardanne : nature de la surface et degré d'imperméabilisation ;
- Données ponctuelles issues de la prospection de terrain (Figure 6) ;

Paramètres mesurés ou décrits à partir des 52 sondages

- Description morphologique effectuée à partir de sondages à la tarière manuelle incluant la profondeur du sol et l'identification de traces d'hydromorphie³ (profondeur maximale 120 cm) ;
- Résistance à la pénétration effectuée avec un pénétromètre dynamique de terrain ;
- Analyses physico-chimiques sur les horizons de surface et certains horizons diagnostique de profondeur effectuées au laboratoire :
 - o granulométrie (texture : teneurs en argiles (%A), sables (%S), limons (%L)) ;
 - o pH_{eau} ;
 - o teneurs totales en éléments traces métalliques ;
 - o azote total, phosphore total ;
 - o carbone organique total (%Corg) ou teneur en matière organique (%MO = 1,72 %Corg) ;
 - o capacité d'échange cationique (CEC, capacité de fixation des éléments) ;
 - o teneur en carbonates (CaCO₃) ;
 - o susceptibilité magnétique ;
 - o humidité (teneur en eau) ;
- Analyses microbiologiques effectuées au laboratoire :
 - o respiration basale (respiration par incubation) ;
 - o activité enzymatique globale (FDA) ;
 - o diversité fonctionnelle (évaluation de la diversité des fonctions microbiennes de dégradation de la matière organique à partir du kit BIOLOGI) ;

Ces données traitées ont donc été très nombreuses et diverses. Une partie d'entre elles a été intégrée directement, ou après calcul, dans l'indice en tant que paramètres représentatifs de fonction : c'est le « jeu optimal de données » qui comprend les paramètres suivants : réserve utile en eau, présence d'hydromorphie, teneur en matière organique, CEC, pH, profondeur du sol, pente, état de surface, érodibilité, résistance à la pénétration, respiration microbienne.

Page suivante : Figure 6 : Carte des sites de prélèvements sur fond géologique

³ Hydromorphie : engagement en eau d'un profil de sol lié à une insuffisance ou un défaut de drainage local

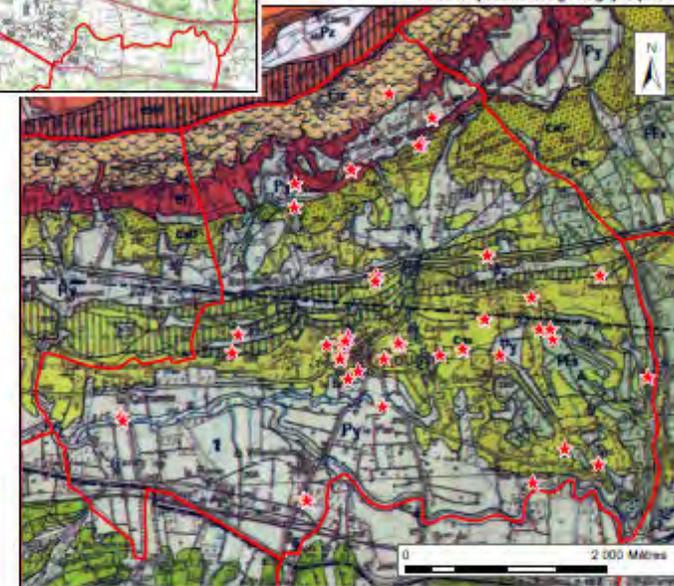
Carte topographique 1:25000 (Scan 25)



ROUSSET

Localisation géographique des prélèvements de sols

Fond de plan : carte géologique (BRGM)



Sites de prélèvement de sol

★ point de prélèvement



Emprises bâties (Bd-Topo)

Recherche menée par les laboratoires CEJU, CEREGE, DVA²PIA, ESPACE et IMEP, représentant le CNRS, l'Université d'Aix-Marseille et l'Université de Toulon.

Contact : samuel.robert@univ-amu.fr

LQUALISOL-ZU est un projet de recherche financé par le programme GESSOL du MEEDDM (2010-2012) et soutenu par l'OHM Bassin minier de Provence.

Dans un second temps, un jeu réduit de données a été testé. Il comprend les mêmes paramètres que précédemment à l'exclusion de l'éréolabilité, la résistance à la pénétration et la respiration microbienne. Il s'agit de paramètres facilement extraits de cartes des sols préexistantes. Il s'agissait d'évaluer la perte d'information (et de précision) liée à une réduction des paramètres utilisés. Ces informations ne sont pas restituées ici.

Dans les 2 cas, le statut de la contamination n'a pas été intégré car il ne discriminait pas les sols (pas de contamination mise en évidence par les sondages effectués). La conductivité électrique, indicatrice du degré de salinisation des sols n'a pas été intégrée car elle est sans objet dans le cas de Rousset.

Les données issues des sondages à la tarière ont par ailleurs permis :

- d'apporter des compléments aux paramètres non mesurés dans la carte pédologique de la haute vallée de l'Arc (utilisée comme référence) ;
- le choix des seuls des paramètres de l'indice ne possédant pas de valeurs référencées ;
- de renseigner des zones traditionnellement non cartées (zones urbaine et périurbaine) et contribuer à une meilleure connaissance du territoire ;
- la vérification de l'occupation du sol et des états de surface.

D'une manière plus générale, le jeu de données obtenu a également permis une caractérisation des sols des zones urbaine et périurbaine, traditionnellement peu ou non étudiés.

Remarque concernant les sondages :

Les données obtenues à partir de sondages effectués chez des particuliers (hors zone agricole et forestière) ont été transmises aux intéressés sous forme d'une fiche synthétique récapitulative.