



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**.

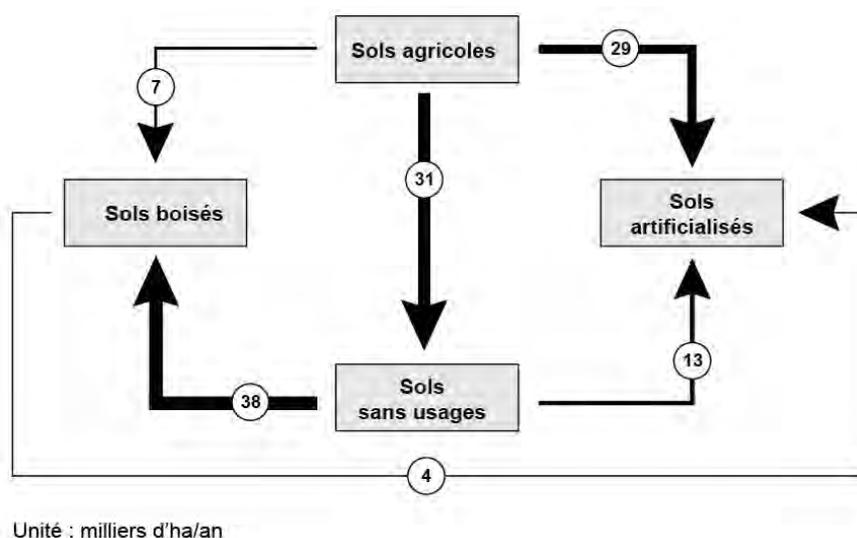


Figure 1 : Echanges nets de surfaces entre les 4 types d'espace entre 1992 et 2002
 Source : Agreste –TERUTI 1992-2002 in Lee et Slak (2007)

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 éparées, 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.

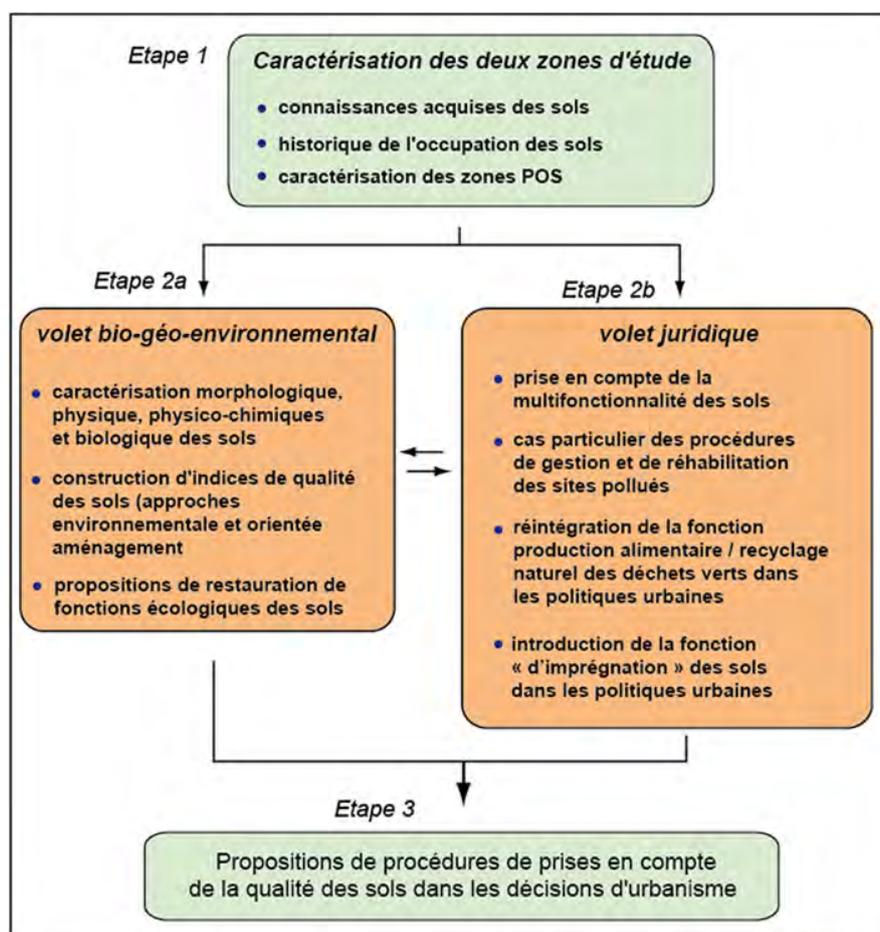


Figure 2 : Déroulement de la recherche tel que prévu dans le projet initial

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 favorable 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.

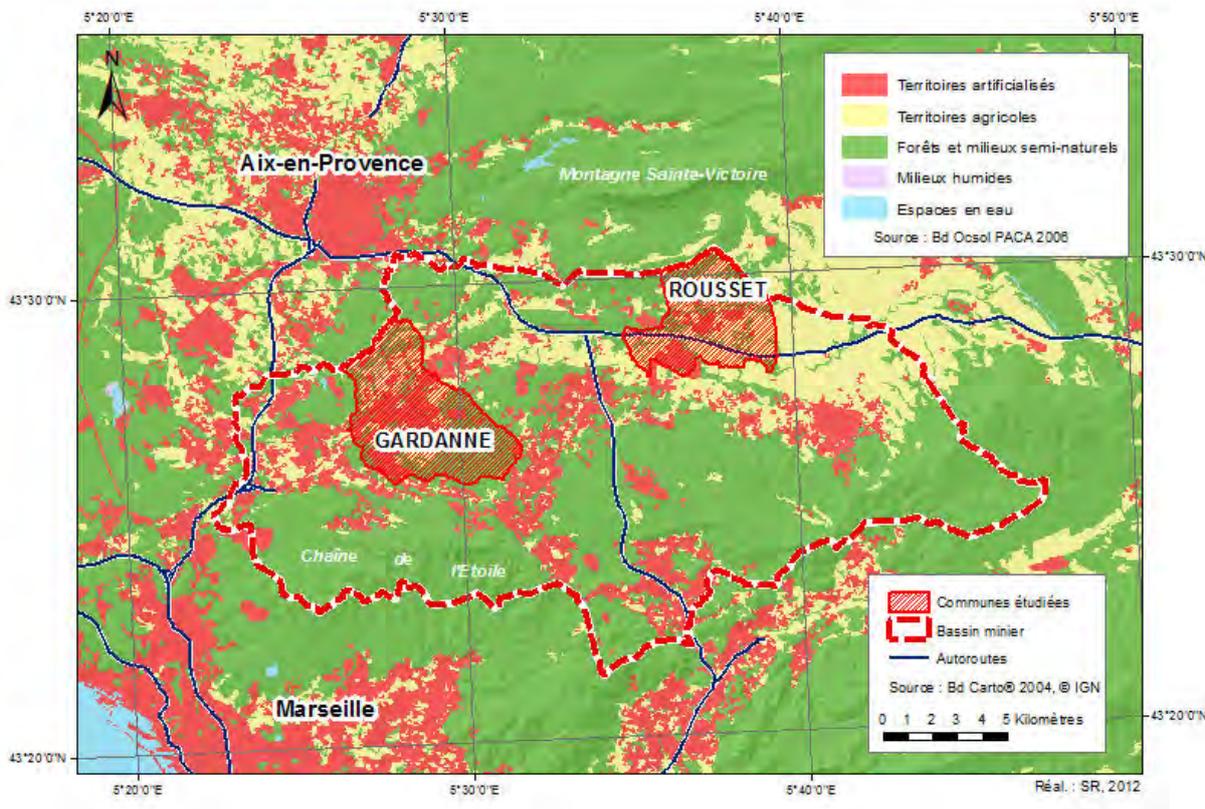


Figure 3 : Le bassin minier de Provence et les deux communes d'étude

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%).

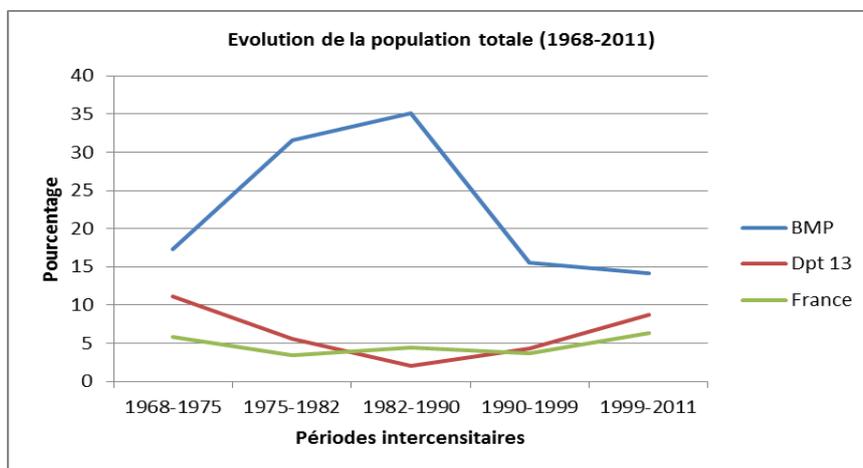


Figure 4 : Rythmes d'évolution récente de la population dans le bassin minier de Provence
Source : INSEE.

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

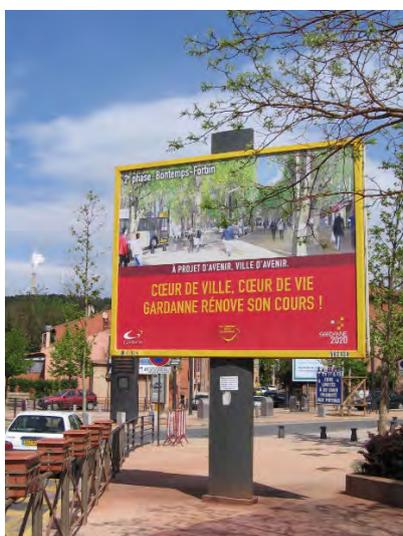
Rousset est une commune plus petite (19 km²) et moins peuplée (4500 habitants en 2011). Elle s'étend sur le versant Sud du plateau du Cengle, qui appartient au massif de la montagne Sainte-Victoire, occupe une partie de la vallée de l'Arc et est principalement dominé par l'agriculture (vignes, céréales), 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 : terri 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.

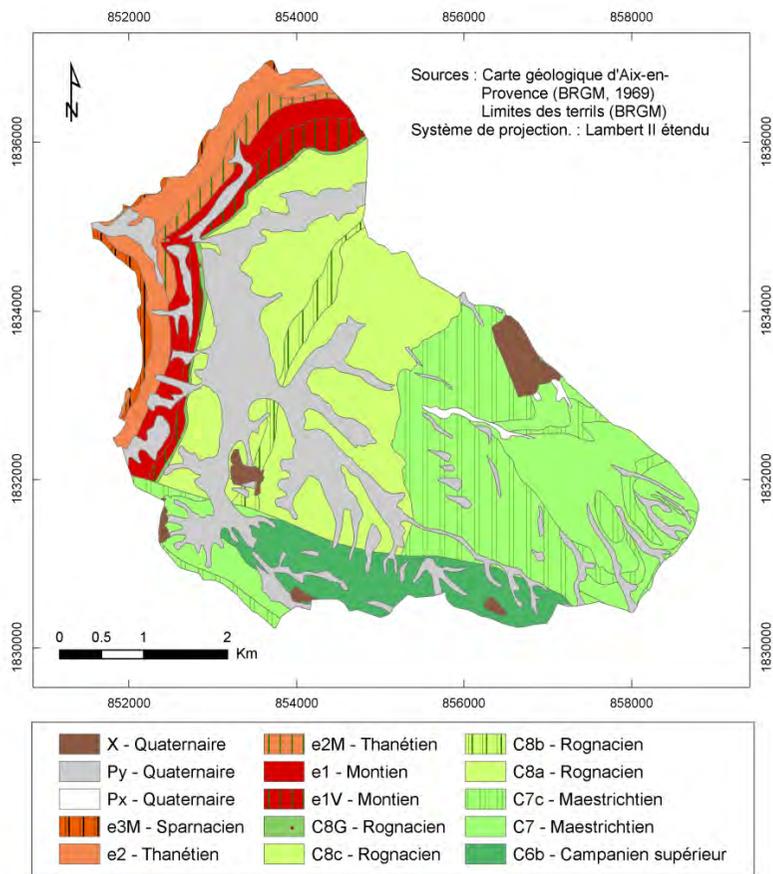


Figure 5 : Carte géologique au 1 : 50 000 de la commune de Gardanne (d'après BRGM, 1969).

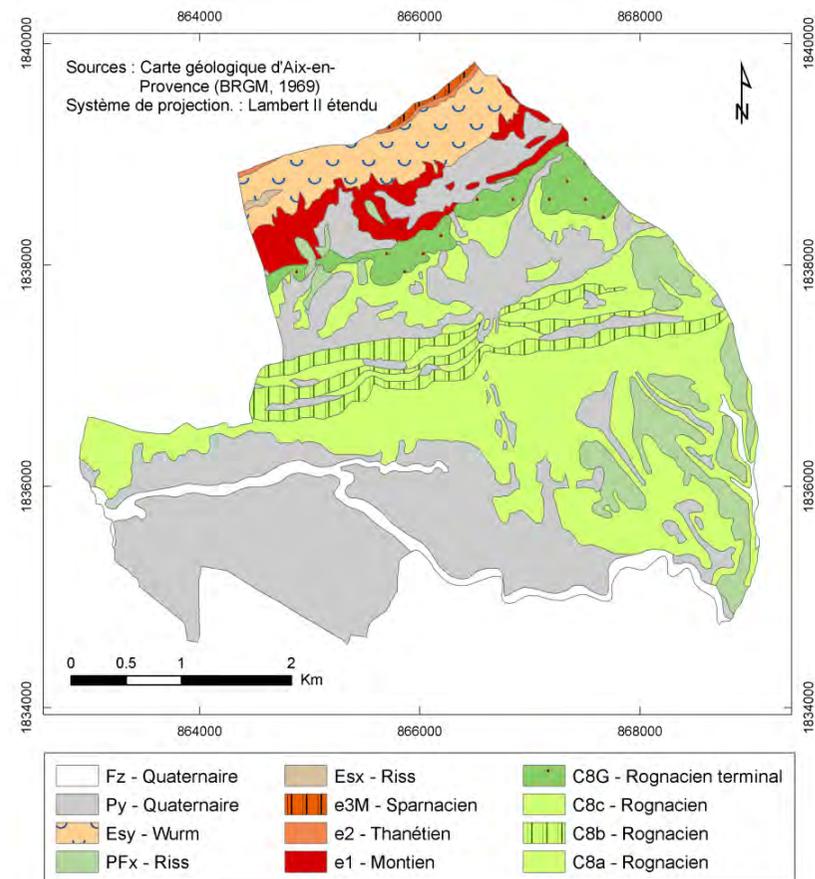


Figure 6 : Carte géologique au 1 : 50 000 de la commune de Rousset (d'après BRGM, 1969).

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.

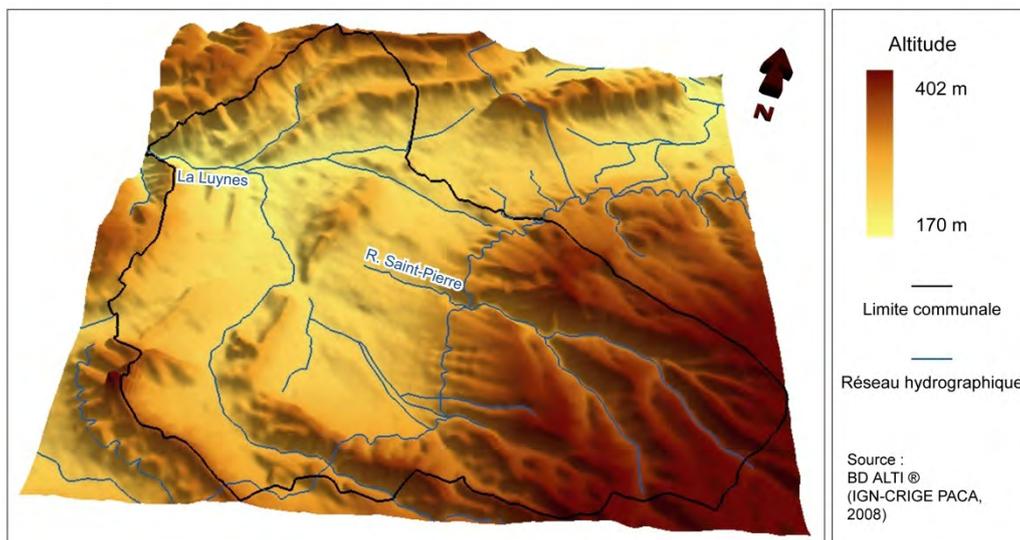


Figure 7 : Représentation en trois dimensions de la topographie de Gardanne.

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.

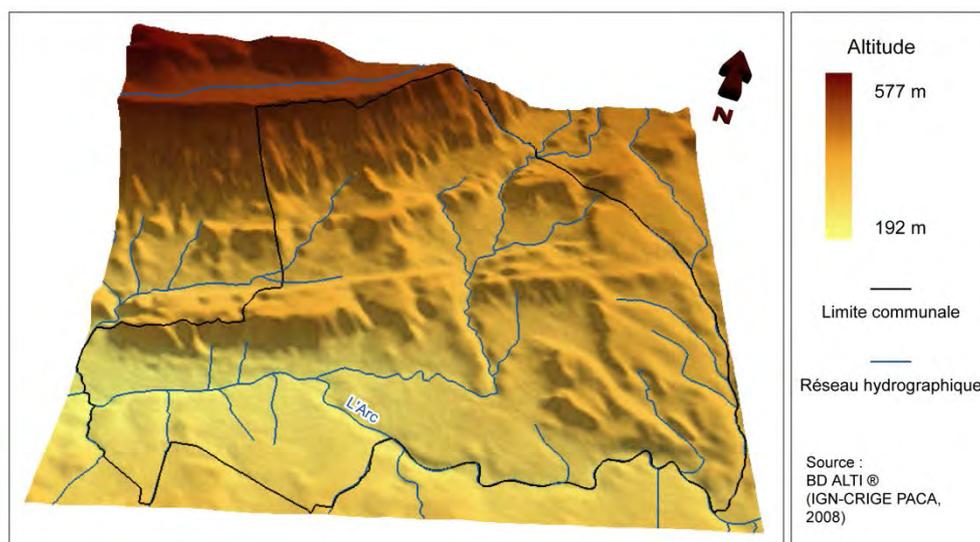


Figure 8 : Représentation en trois dimensions de la topographie de Rousset.

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.

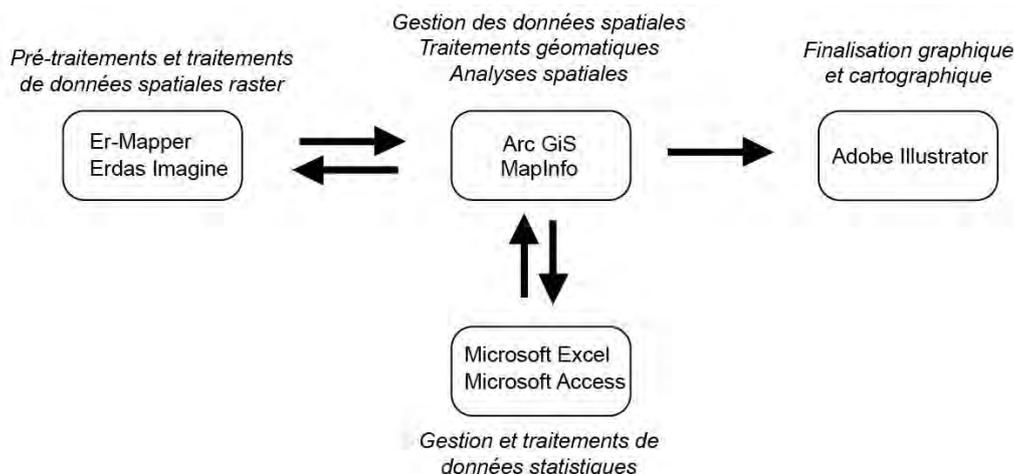


Figure 9 : Chaîne logicielle de traitement de l'information

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.

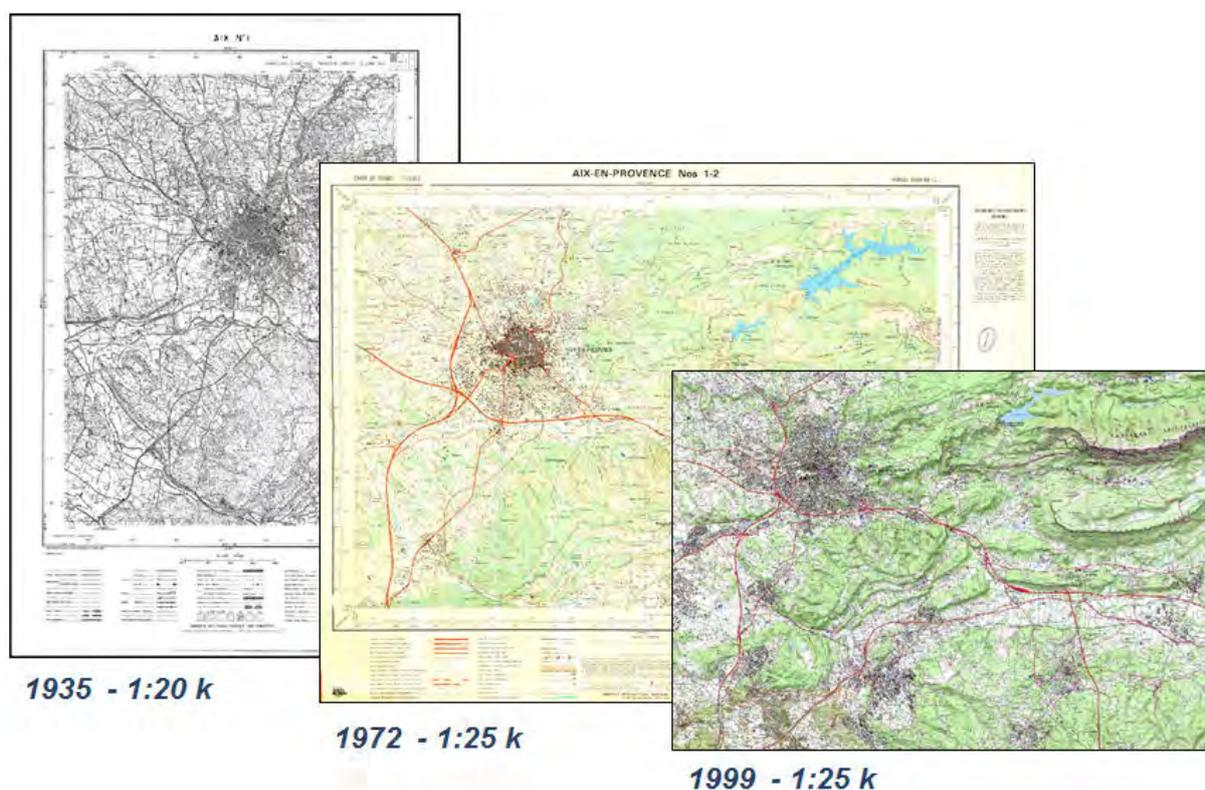


Figure 10 : La zone d'étude à travers trois couvertures topographiques à grande échelle.

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.

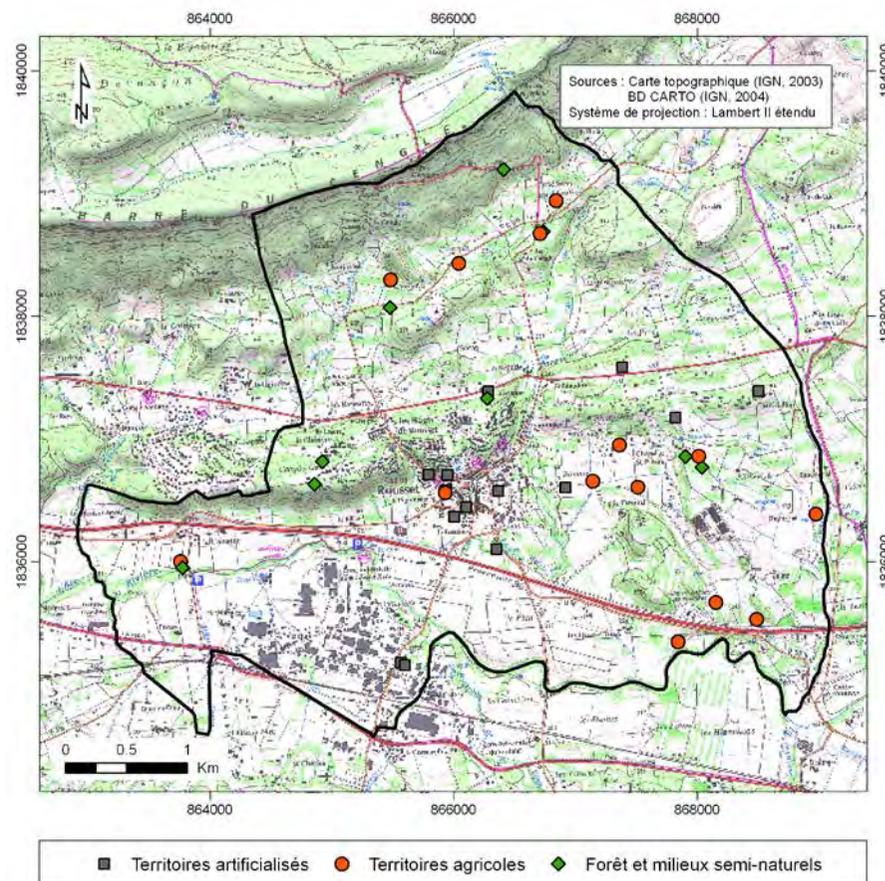
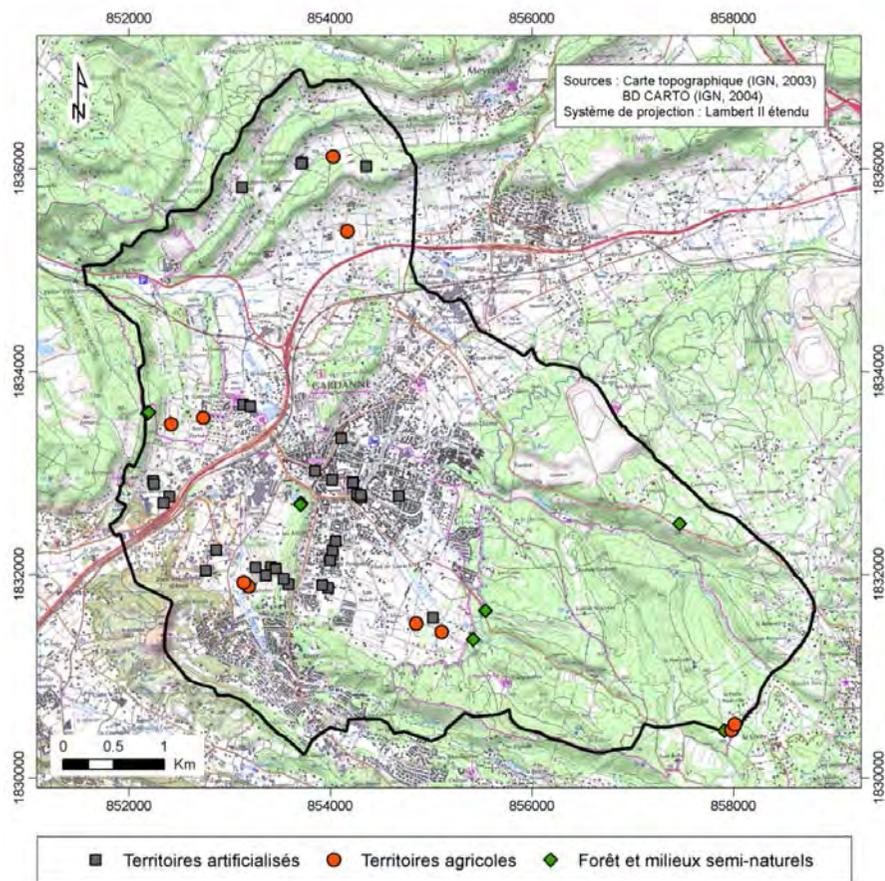


Figure 11 : Localisation des points d'échantillonnage à Gardanne (à gauche) et à Rousset (à droite)

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.

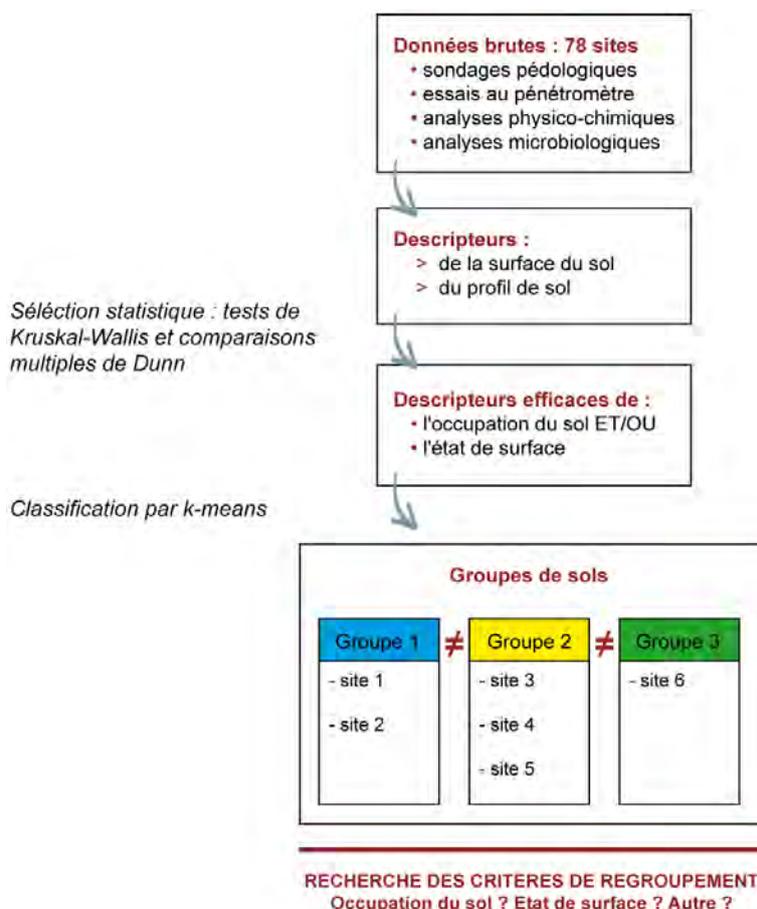


Figure 12 : Traitement statistique employé pour l’élaboration de la typologie des sols.

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).

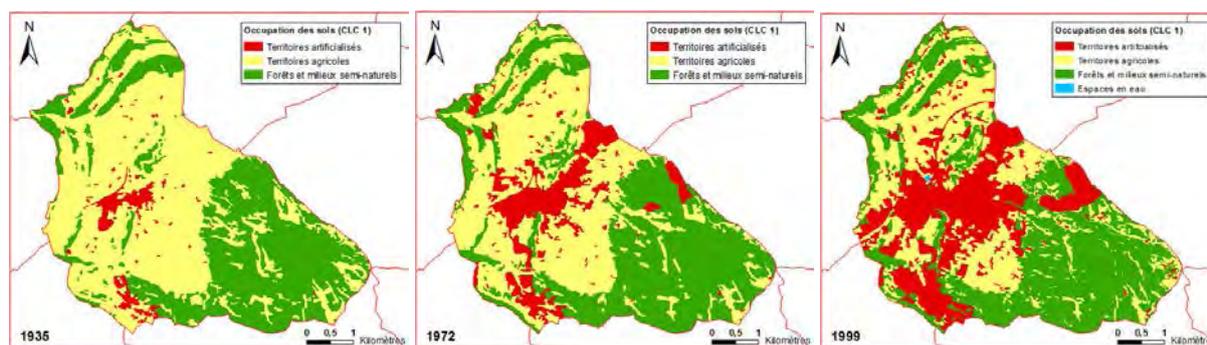


Figure 13 : Evolution de l'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)
Nomenclature Corine Land Cover de niveau 1

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.

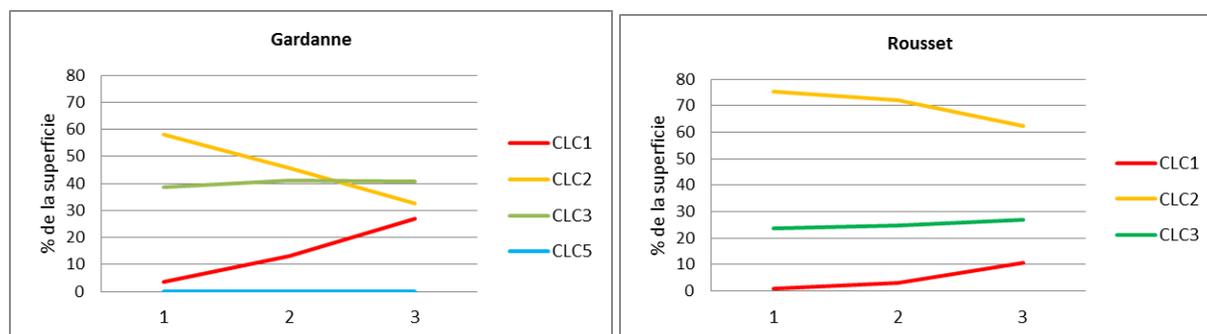


Figure 14 : Evolution de l'occupation des sols dans les deux communes (1935-1999)
 1 : 1935, 2 : 1972, 3 : 1999 - CLC1 Territoires artificialisés, CLC2 Territoires agricoles, CLC3 Forêts et milieux semi-naturels, CLC5 Espaces en eau

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.

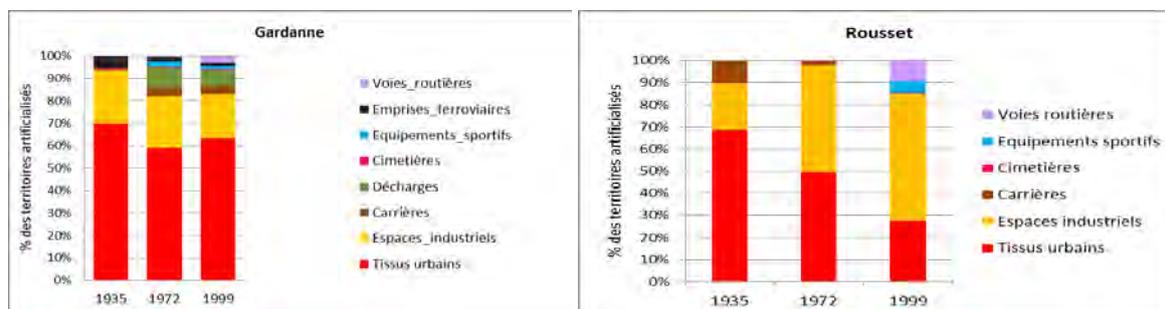


Figure 15 : Evolution des différents types d'espaces dans le total des territoires artificialisés (1935-1999)

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.

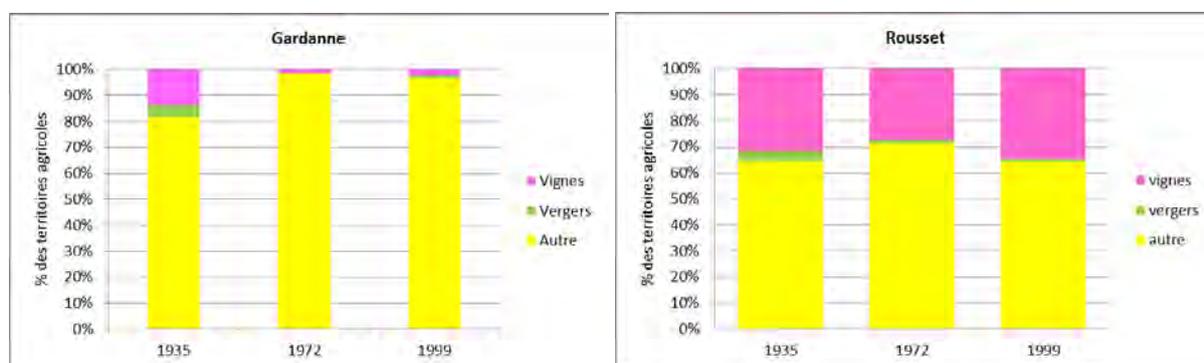


Figure 16 : Evolution des différents types d'espaces dans le total des territoires agricoles (1935-1999)

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.

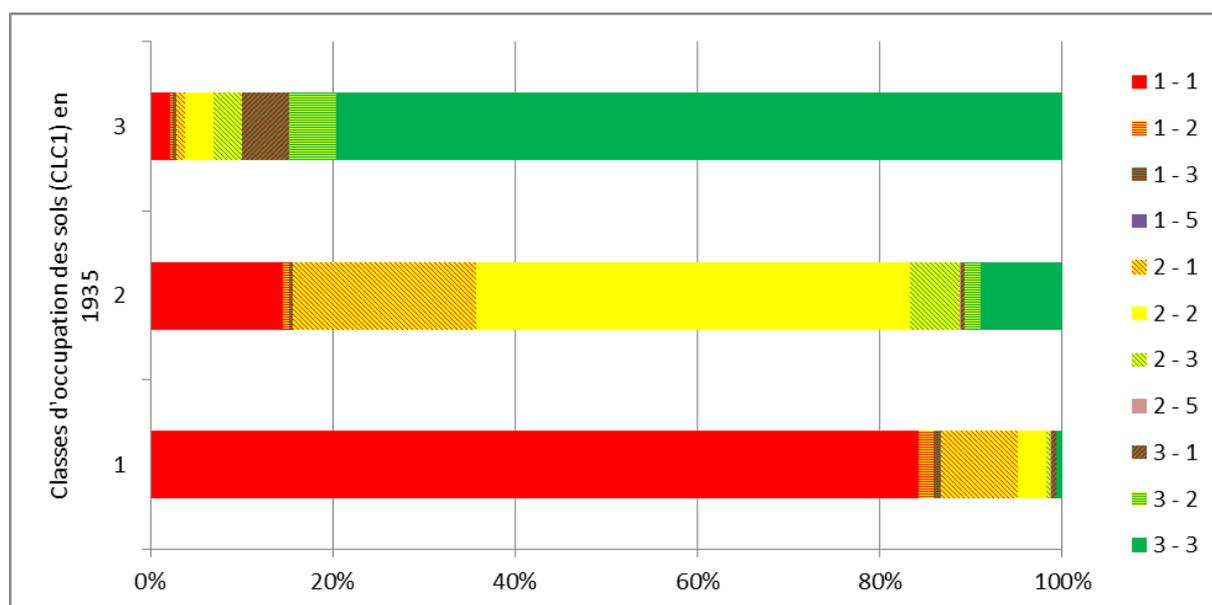


Figure 17 : Transitions entre les principales classes d'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)

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...

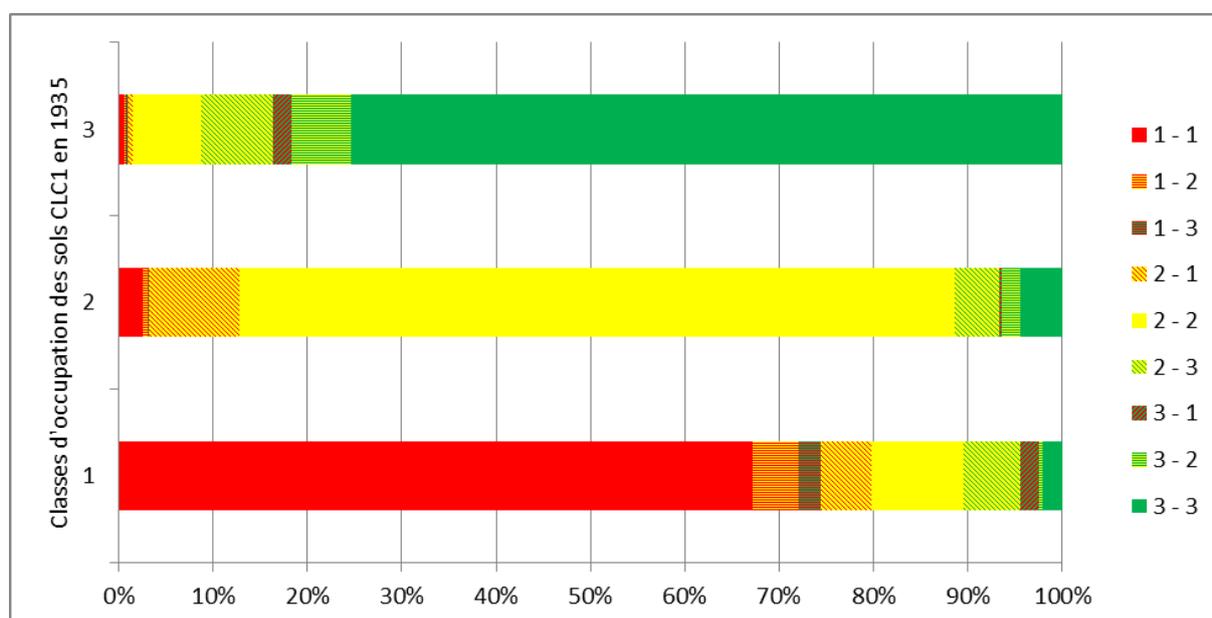


Figure 18 : Transitions entre les principales classes d'occupation des sols à Rousset (1935-1999)

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.

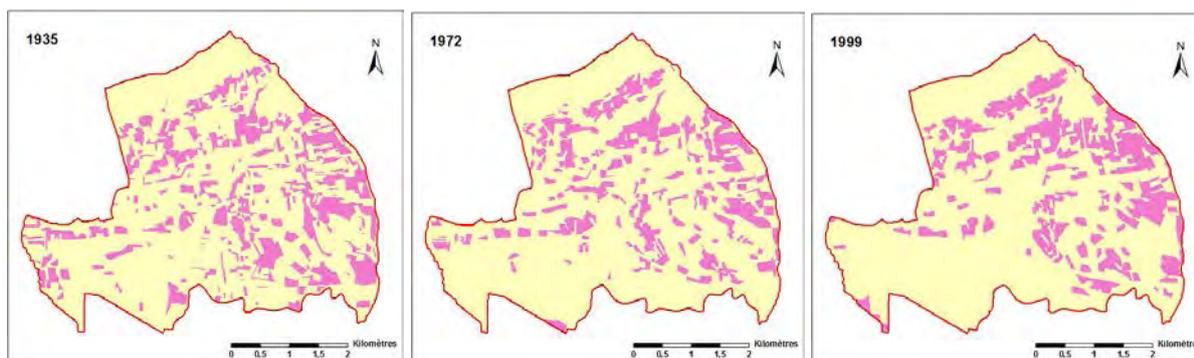


Figure 19 : Variation de l’emprise géographique des vignes à Rousset (1935-1999)

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).

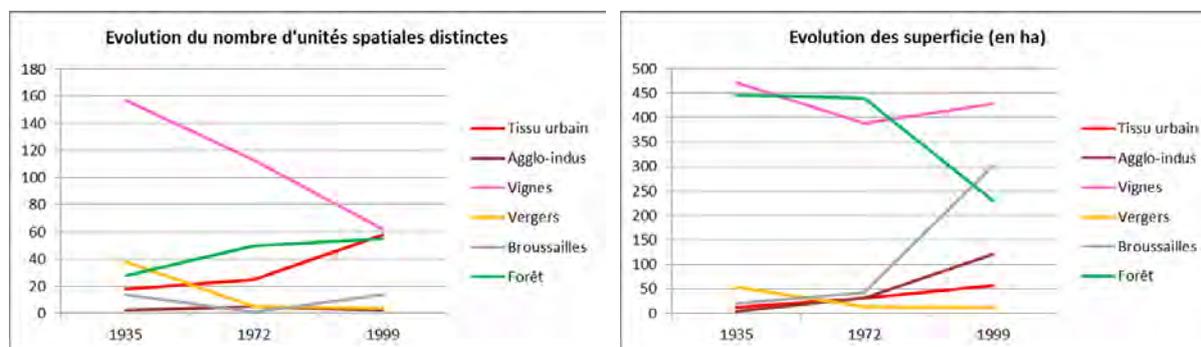


Figure 20 : Evolution comparée des superficies et des unités spatiales distinctes de quelques types d’occupation des sols à Rousset (1935-1999)

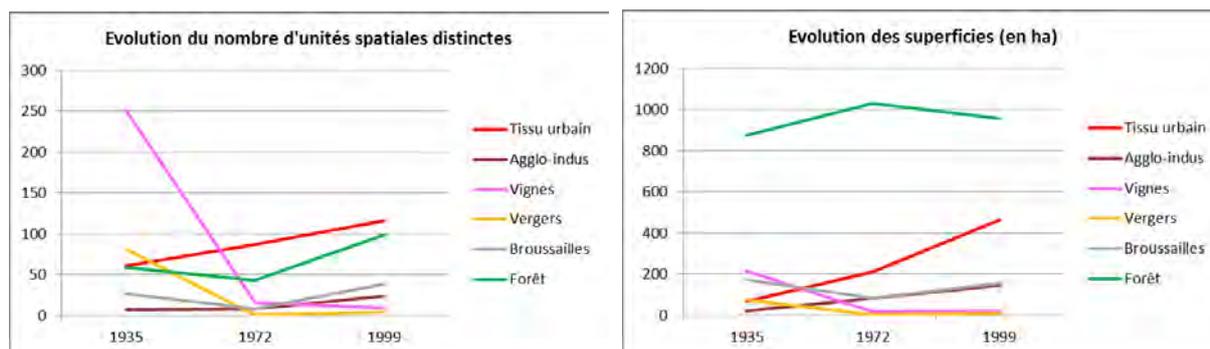


Figure 21 : Evolution comparée des superficies et des unités spatiales distinctes de quelques types d'occupation des sols à Gardanne (1935-1999)

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**).

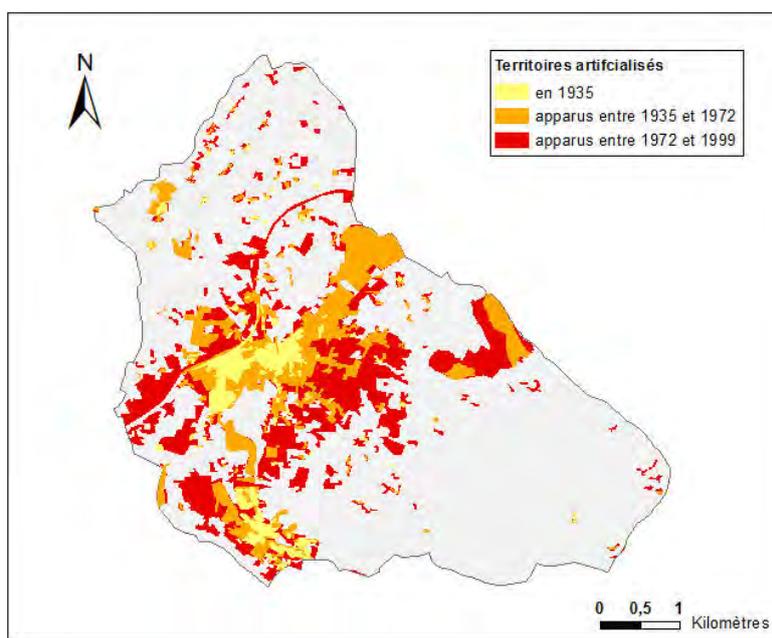


Figure 22 : Progression des territoires artificialisés à Gardanne (1935-1999)
Étalement urbain marqué, mais en relative continuité avec les agglomérations de bâtis existantes.

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**).

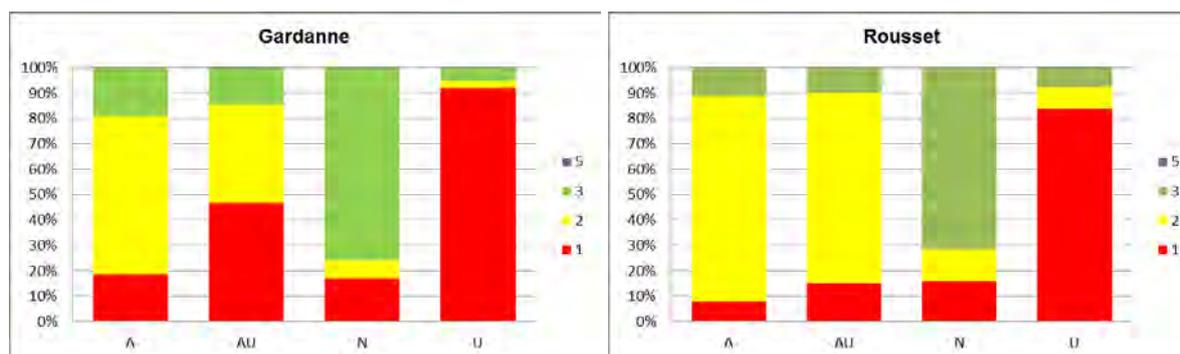


Figure 23 : Occupation des sols dans les zones PLU des deux communes

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-propriétaires 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 biologs 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.

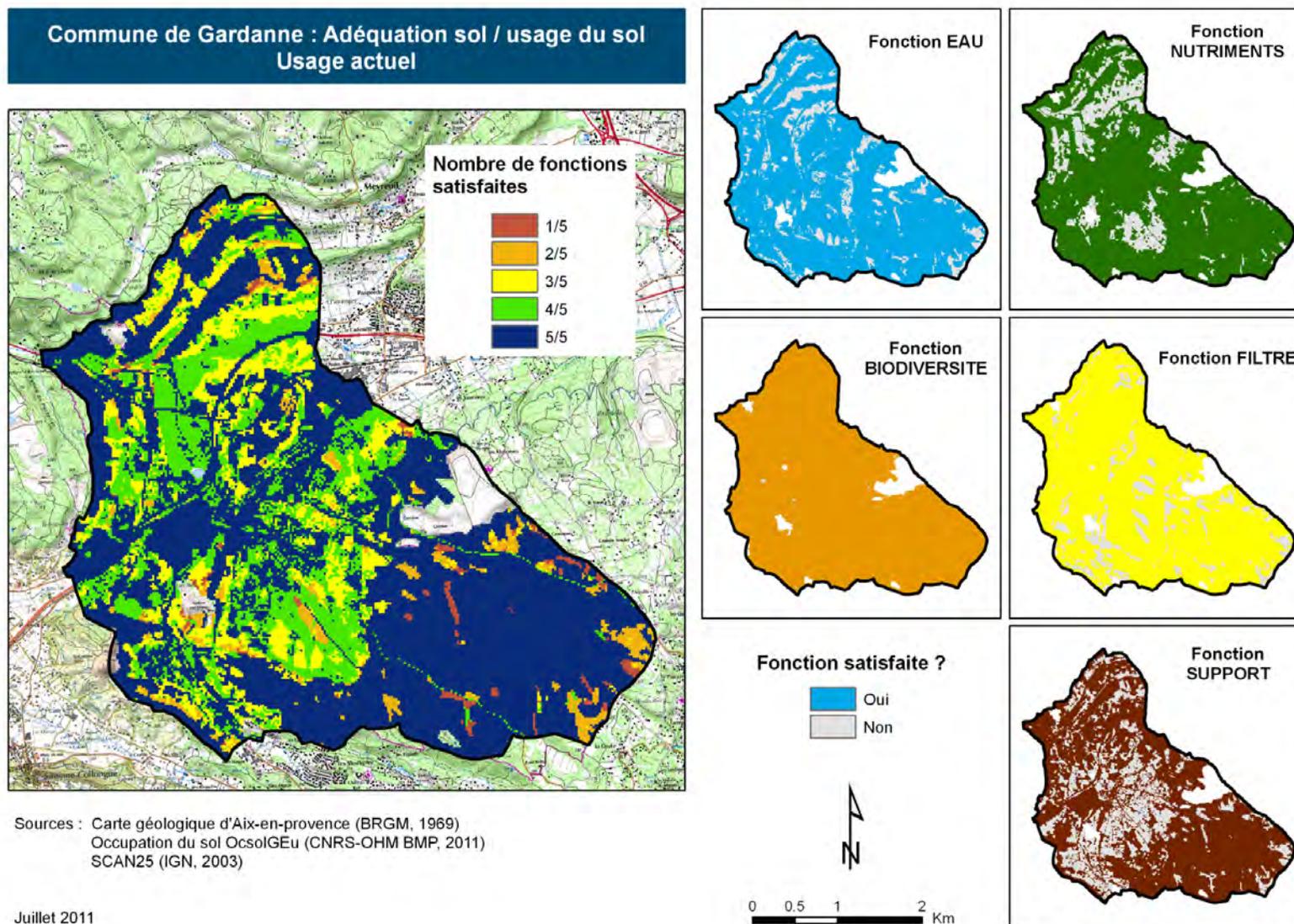


Figure 24 : Carte d'adéquation du sol à l'usage actuel du sol présentée en nombre de fonctions satisfaites (à gauche) et cartes produites par fonction pour l'usage actuel (à droite) pour Gardanne.

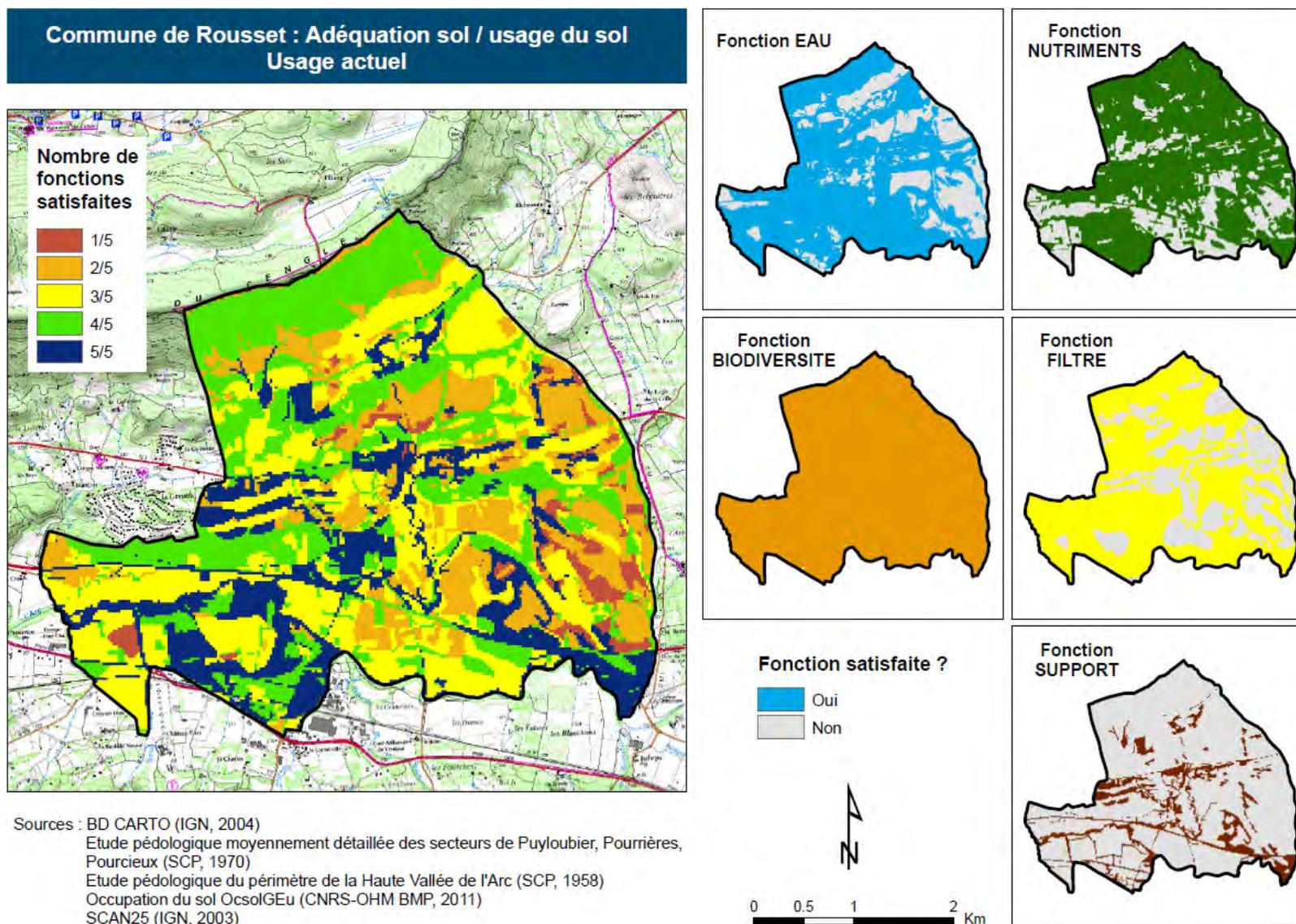


Figure 25 : Carte d'adéquation du sol à l'usage actuel de ce sol présentée en nombre de fonctions satisfaites (à gauche) et cartes produites par fonction pour l'usage actuel (à droite) pour Rousset.

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.

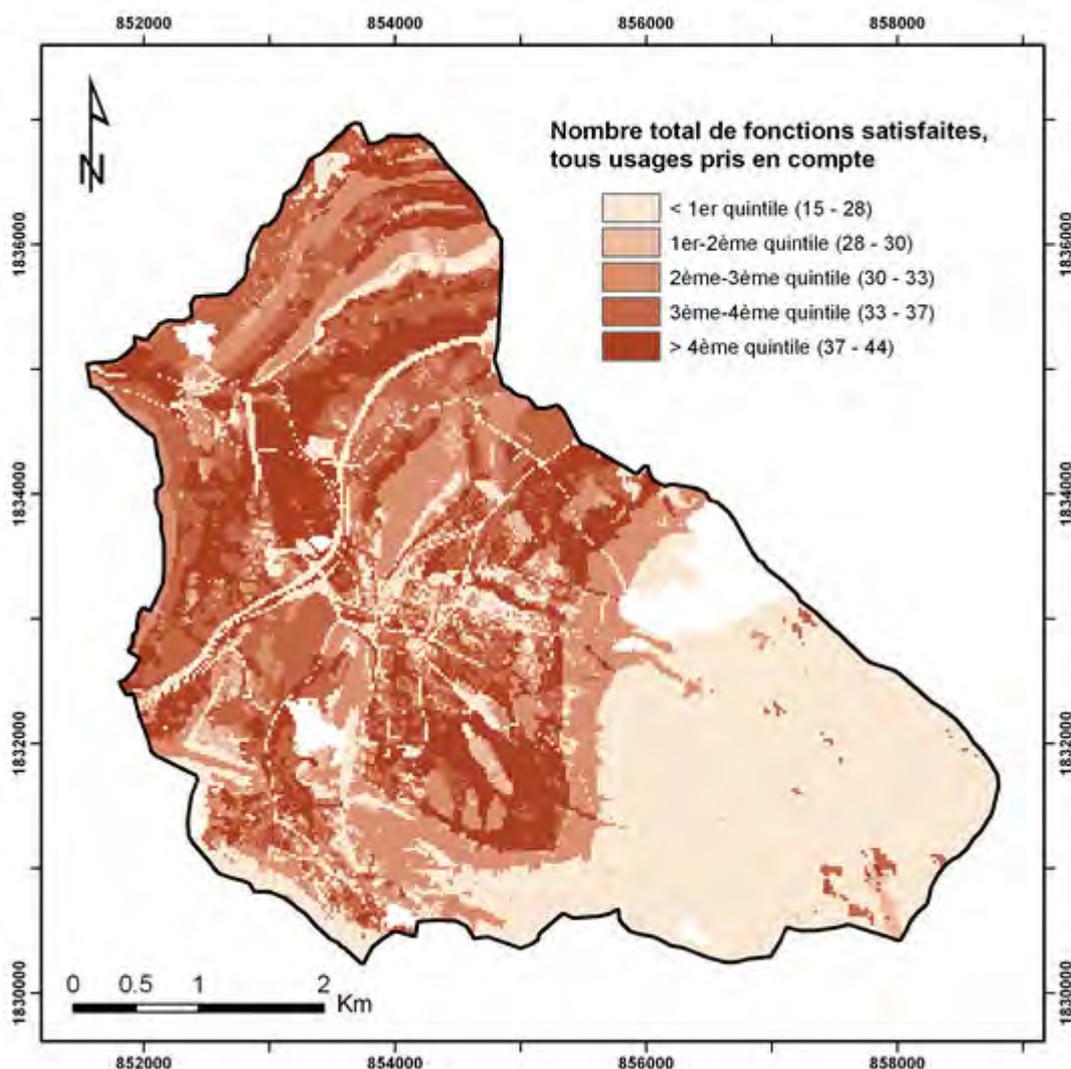


Figure 26 : Carte de l'indice de polyvalence d'usages spatialisé par pixel sur la commune de Gardanne en 2008

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.

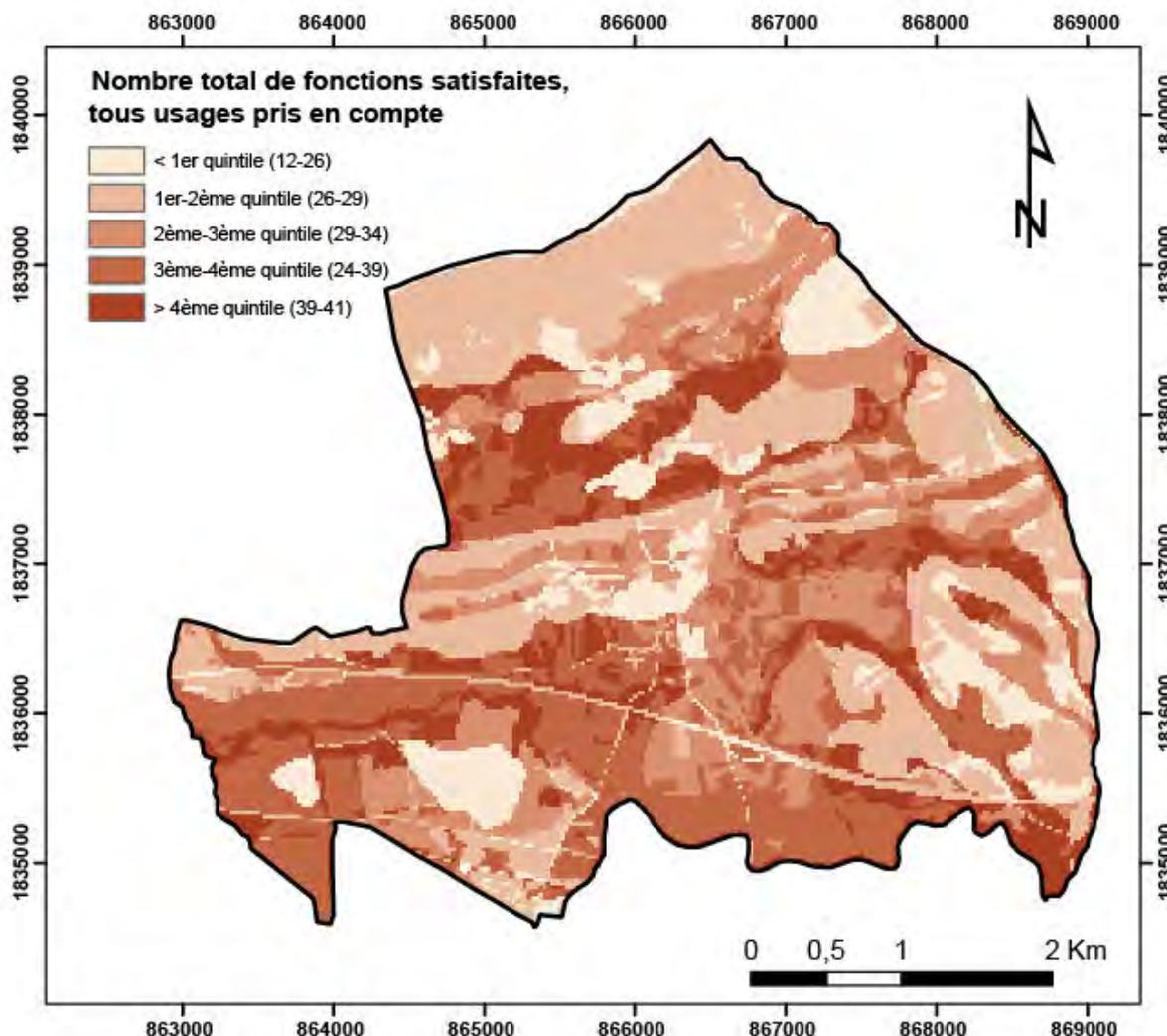


Figure 27 : Carte de l'indice de polyvalence d'usages spatialisé par pixel sur la commune de Rousset en 2008

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.

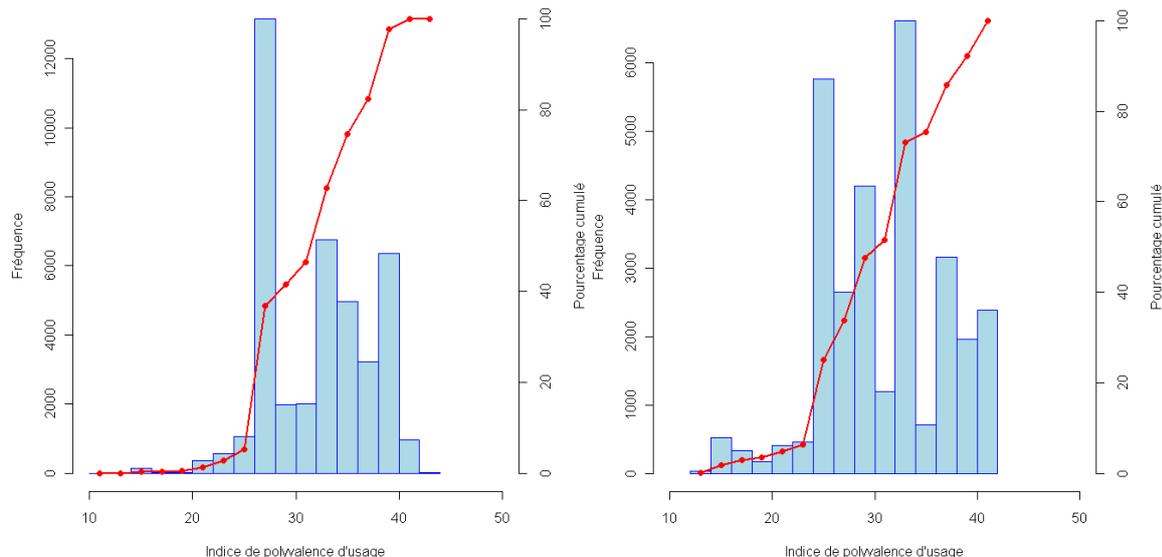


Figure 28 : Histogrammes des fréquences et courbes cumulées du nombre de fonctions satisfaites pour tous usages confondus en 2008 et par pixel pour Gardanne (à gauche) et pour Rousset (à droite).

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.

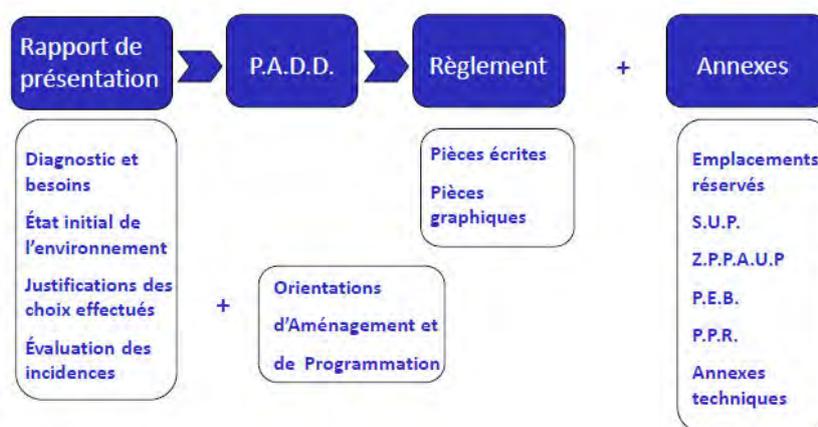


Figure 29 : Une démarche classique d'élaboration d'un PLU (le cas de Marseille)

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 ».

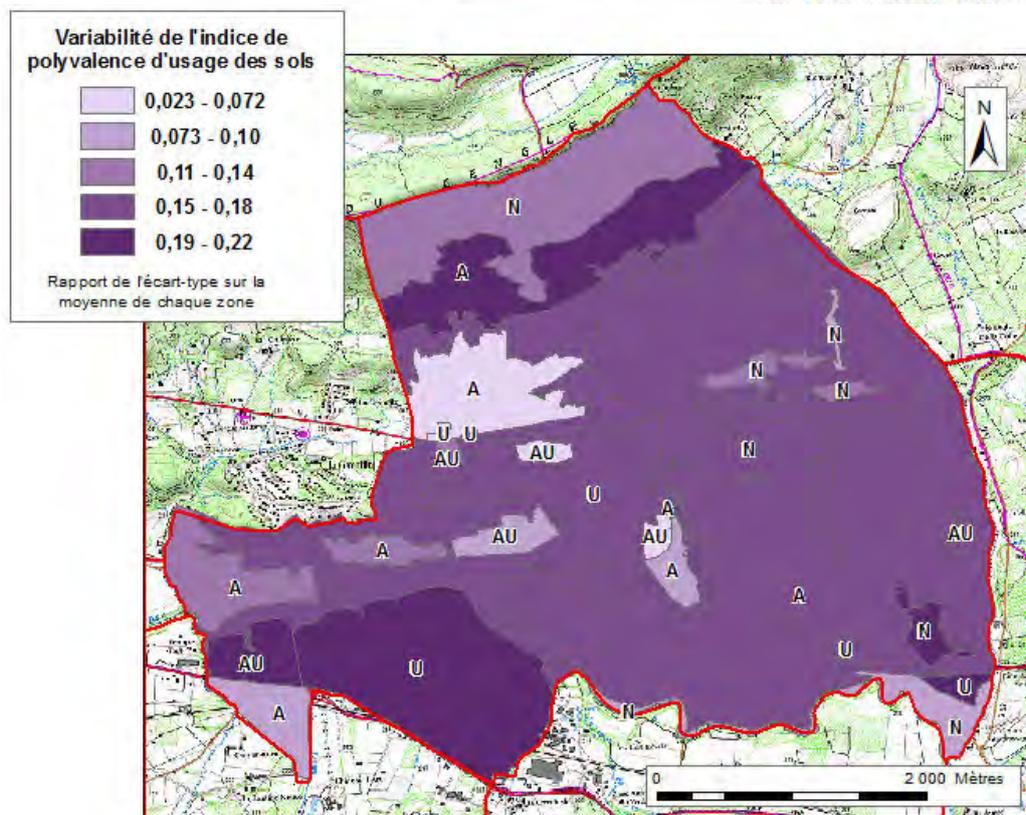
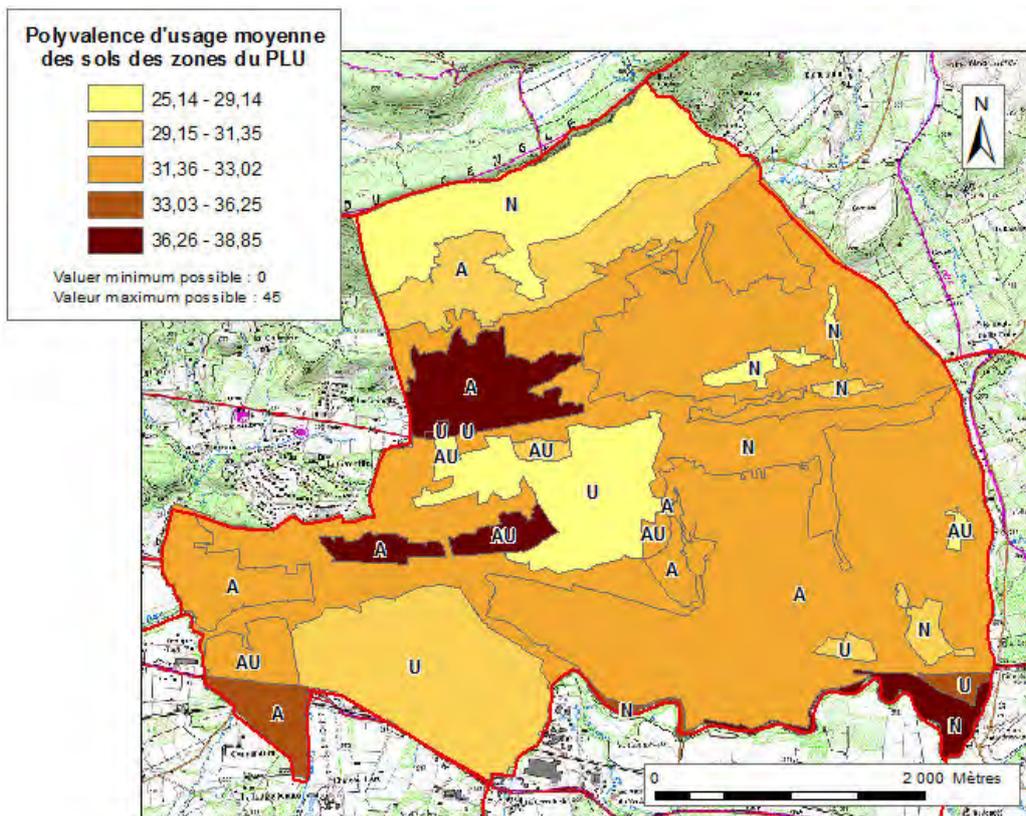


Figure 30 : Polyvalence d'usage des sols par zones du PLU de Rousset
Valeur moyenne (haut) et variabilité intra-zone (bas)

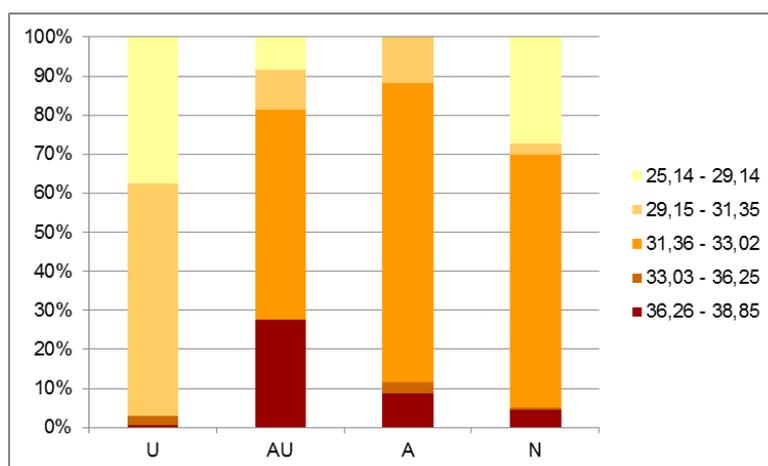


Figure 31 : Part de chaque classe de la carte de la Figure III-22 dans la superficie totale de chaque catégorie de zones du PLU à Rousset

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.

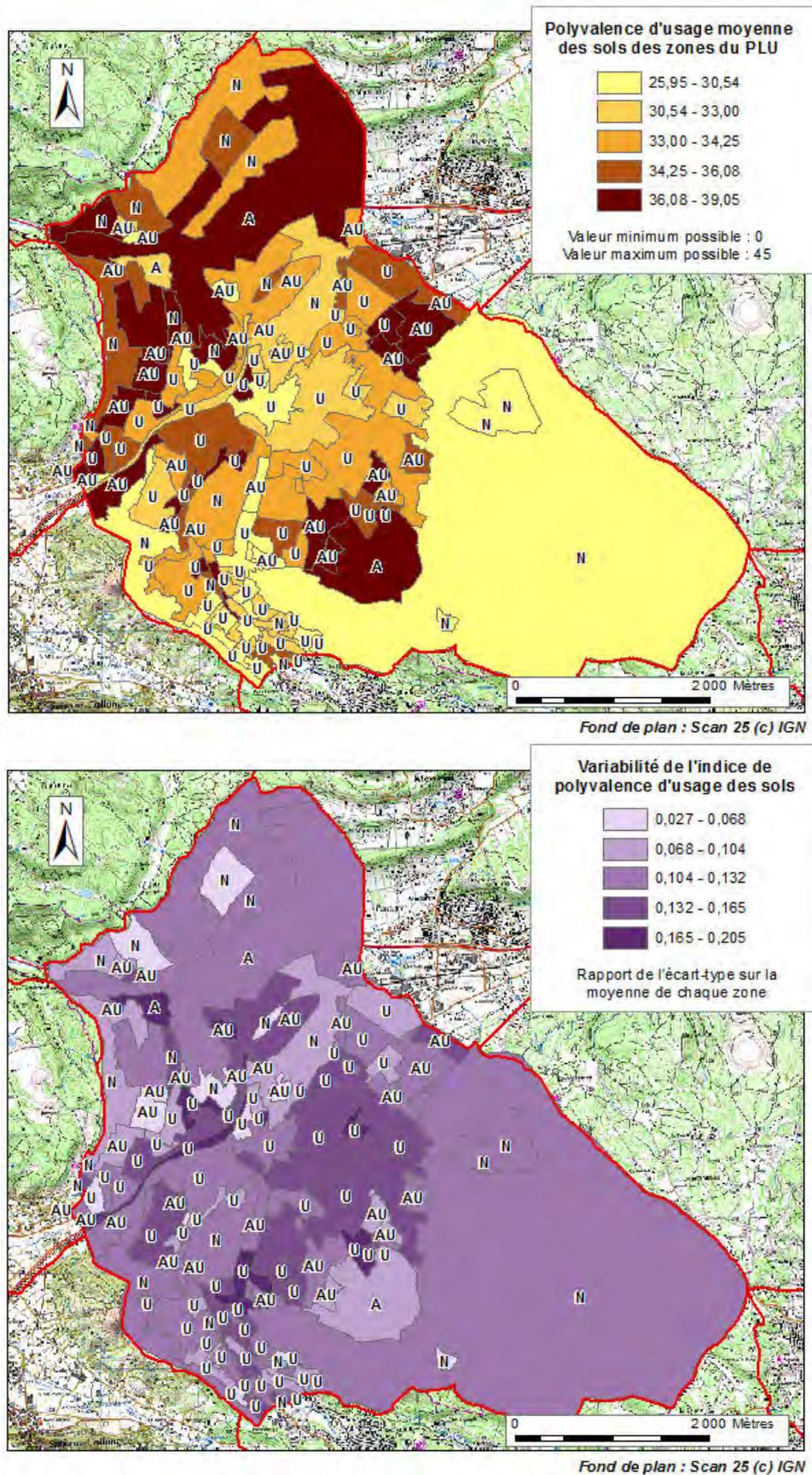


Figure 32 : Polyvalence d'usage des sols par zones du PLU de Gardanne
Valeur moyenne (haut) et variabilité intra-zone (bas)

- 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.

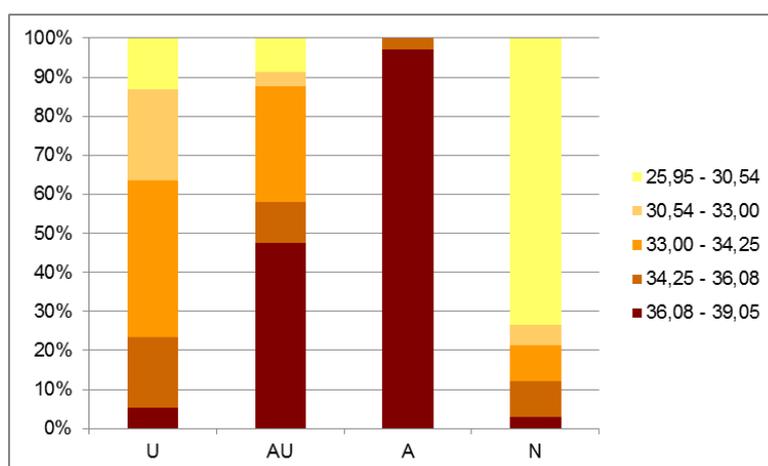


Figure 33 : Part de chaque classe de la Figure III-24 dans la superficie totale de chaque catégorie de zones du PLU à Gardanne

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**.

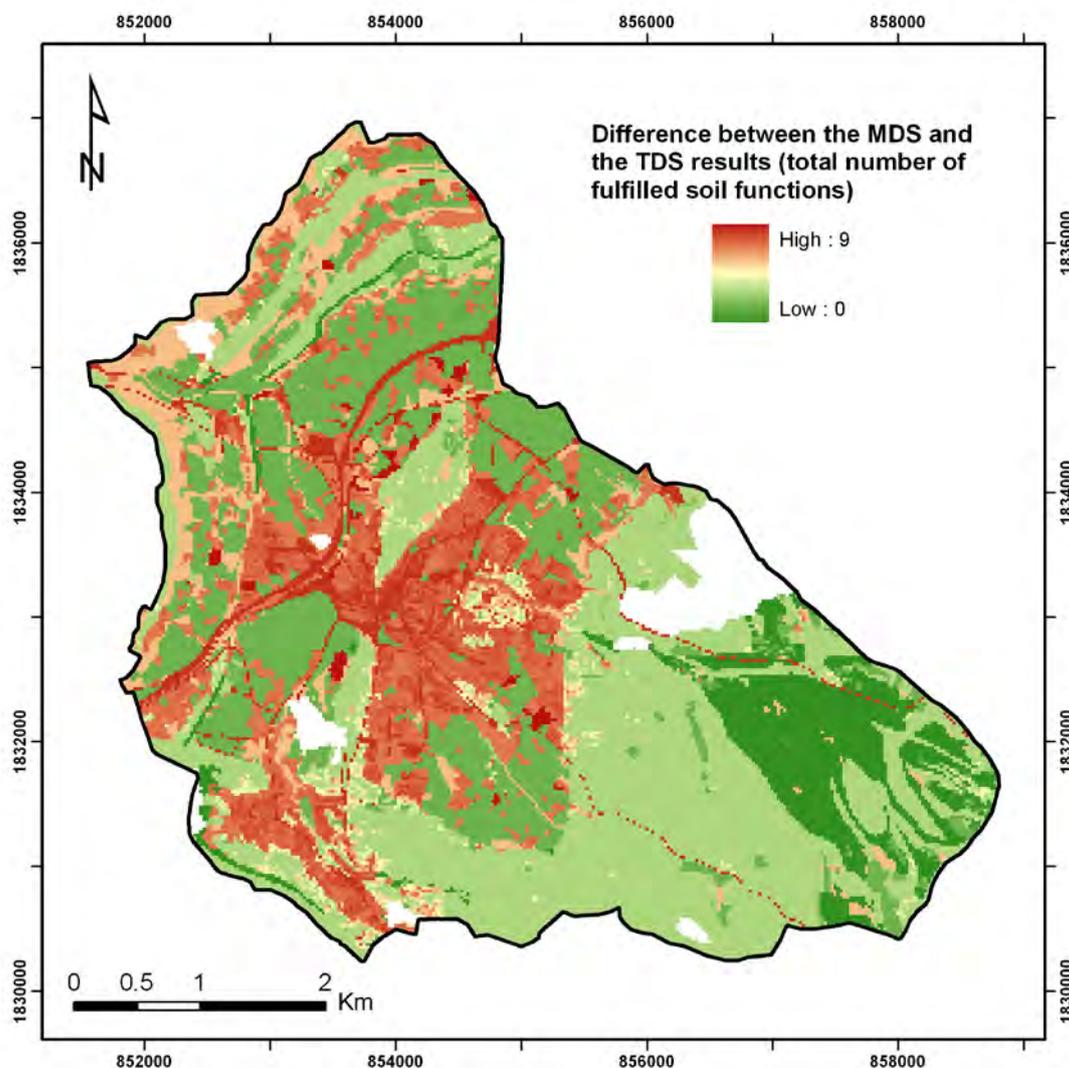


Figure 34 : Différence calculée en termes de nombre de fonctions satisfaites entre la carte utilisant 11 ou 8 paramètres de caractérisation des sols sur la commune de Gardanne.

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).

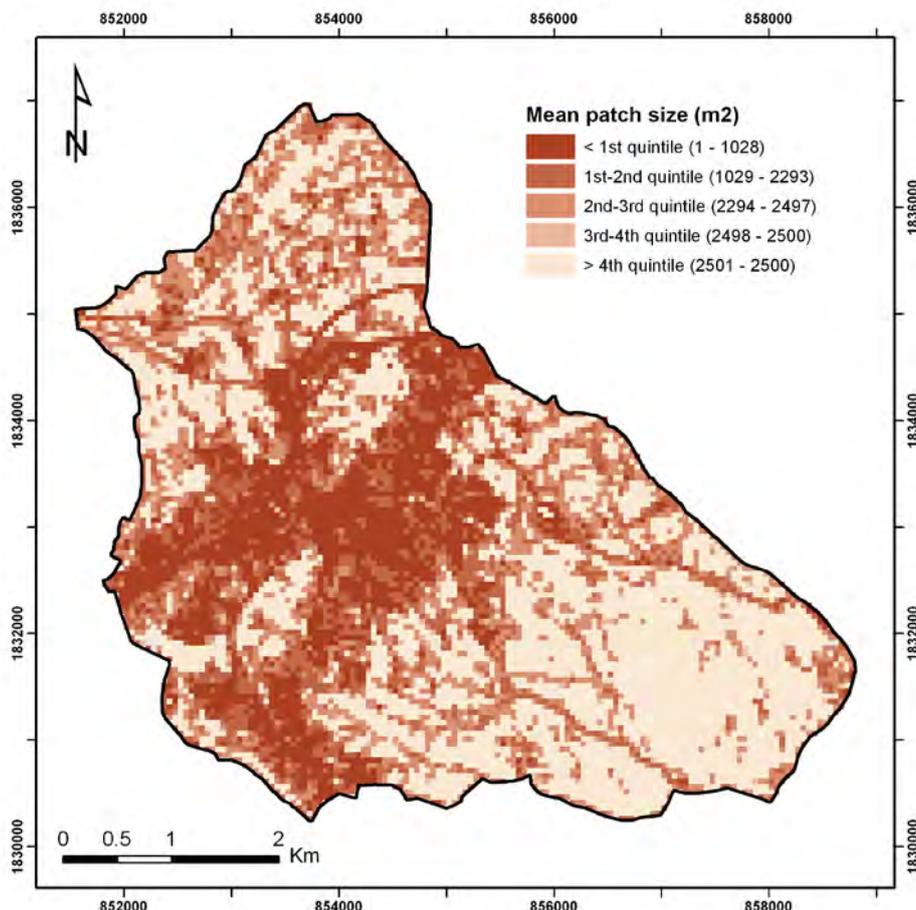


Figure 35 : Fragmentation des sols à Gardanne : taille moyenne des patches d'une même classe (ici les surfaces non artificialisées) sur une grille de 50x50m calculée à partir de la carte des états de surface simplifiée en artificialisé et non artificialisé.

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.

Chevry 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., Praplant 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 Gussem 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>