



HAL
open science

Guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques

Blandine Lemerrier, Bertrand Laroche, Romain Armand, Ahmed Chafchafi,
Sébastien Détriché, Christophe Ducommun Dit Véron, Stéphanie Jalabert,
Sébastien Lehmann

► To cite this version:

Blandine Lemerrier, Bertrand Laroche, Romain Armand, Ahmed Chafchafi, Sébastien Détriché, et al..
Guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques. INRA InfoSol,
110 p., 2017, 2-7380-1408-9. hal-01595205

HAL Id: hal-01595205

<https://hal.inrae.fr/hal-01595205>

Submitted on 10 Aug 2022

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

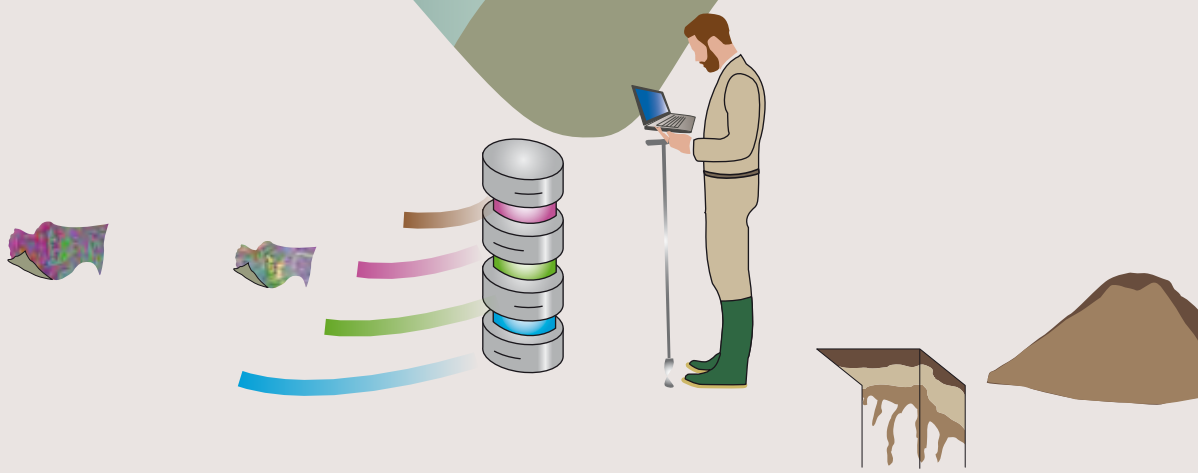
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Sols & Territoires

Réseau Mixte Technologique

Guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques



Guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques

B. Lemerrier, B. Laroche, R. Armand, A. Chafchafi, S. Détriché, C. Ducommun, S. Jalabert, S. Lehmann

V1



Avant-propos

Bien que les services rendus par les sols à l'environnement et aux sociétés humaines soient de plus en plus reconnus, les sols restent à ce jour trop largement méconnus. Le sol est un milieu que l'on ne perçoit pas facilement, souvent occulté par la végétation et les infrastructures qui le recouvrent. L'impact d'une modification de la qualité du sol n'est pas perçu de manière directe, à la différence de l'eau que l'on boit ou de l'air que l'on respire. De ce fait, les citoyens, décideurs et aménageurs ne se sont pas encore appropriés les connaissances disponibles sur les sols. De plus, les connaissances scientifiques sur la répartition fine des sols dans l'espace et sur leur composante biologique restent lacunaires. Des avancées significatives en matière de connaissance des sols français ont été rendues possibles depuis 14 ans, suite à la création en 2001 du Gis Sol (Groupement d'intérêt scientifique sur les Sols). L'objectif ambitieux du Gis Sol* est de conduire des programmes nationaux d'inventaire et de surveillance des sols, et de doter la France d'un système d'information sur les sols et sur l'évolution de leur qualité.

Parallèlement aux efforts financiers et scientifiques d'acquisition de données, les partenaires régionaux du programme IGCS* (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) se sont structurés pour mutualiser les travaux de valorisation et de diffusion des données. La structuration s'est faite initialement sous la forme d'un groupe de travail (groupe Projet) qui s'est organisé en 2010 en Réseau Mixte Technologique (RMT) «Sols et Territoires» (<http://www.sols-et-territoires.org/>). Deux grands enjeux ont été mis en avant : i) connaître les sols et donner accès à la connaissance des sols dans les territoires ii) mieux faire prendre en compte les sols dans différentes politiques, projets et programmes d'actions.

L'élaboration de ce guide est une action conduite par le RMT «Sols et Territoires». Sa vocation principale est d'apporter un appui aux actions de porter-à-connaissance des informations sur les sols qui sont menées par le RMT, pour que les données disponibles sur les sols soient valorisées de façon optimale. Il s'agit de présenter les différentes sources d'information existantes sur les sols et leurs complémentarités, en focalisant particulièrement le discours sur les bases de données au format DoneSol : quelles sont leurs potentialités et les limites d'utilisation ? Ce guide ponctué d'exemples a été pensé et conçu comme un complément à la fourniture des bases de données Sol. Il n'a pas vocation à être un traité de pédologie ou de géomatique*, il se veut accessible à tous, du décideur au géomaticien.

Sommaire

Avant-propos	3
Sommaire	5
Introduction	7
Chapitre 1 - Qu'est-ce que le sol et comment l'étudier ?	9
1.1. Qu'est-ce que le sol ?	9
1.1.1. Un milieu complexe et organisé	9
1.1.2. Un milieu réactif, interface dans l'environnement	10
1.1.3. Un milieu vivant	10
1.1.4. Un compartiment essentiel	10
1.1.5. ... mais menacé	11
1.2. Pourquoi prendre en compte le sol pour traiter les questions agronomiques, environnementales, et d'aménagement ?	12
1.2.1. Problématiques agronomiques	13
1.2.2. Problématiques environnementales	13
1.2.3. Problématiques d'aménagement du territoire	13
1.2.4. Prise en compte des sols au niveau politique et réglementaire	14
1.3. Caractérisation du sol : du terrain à la carte	15
1.3.1. Approche classique de cartographie des sols	16
1.3.2. Cartographie numérique des sols	24
Chapitre 2 - Quelles informations existent sur les sols ?	27
2.1. Le Gis Sol	27
2.2. Les programmes d'acquisition d'informations	27
2.2.1. Les programmes de connaissance	28
2.2.2. Les programmes de surveillance	32
2.2.3. Autres programmes ou autres données	33
2.3. Exemples de représentations cartographiques des sols	34
2.3.1. Carte des Unités Cartographiques de Sols (ou UCS)	34
2.3.2. Représentation des propriétés des sols	35
Chapitre 3 - Comment sont structurées les bases de données pédologiques ?	37
3.1. Bases de données à plat	38
3.1.1. BDAT	38
3.1.2. Formats régionaux	38
3.2. Bases de données complexes	38
3.2.1. Base de Données Géographique des Sols de France	38
3.2.2. VALSOL	39
3.2.3. Format GlobalSoilMap	39
3.2.4. Format DONESOL	39
3.3. Outils de transformation et de diffusion des données	44
3.3.1. Datamart	44
3.3.2. Webservices	44

Chapitre 4 - Valorisation des données pédologiques au format 45

DoneSol

4.1. Notions élémentaires de SIG	45
4.1.1. La localisation géographique	45
4.1.2. Les formats de stockage de données	46
4.1.3. Comment cartographier des données sémantiques ?	49
4.1.4. Quelques règles sur le langage cartographique	50
4.2. Optimiser la valorisation des bases de données Sol	51
4.2.1. En amont : définition des besoins	52
4.2.2. Traitement des données	55
4.2.3. Restitution des résultats	63
4.2.4. Exemples d'élaboration de cartes thématiques	63

Cartographie du pH de surface des sols en Côte d'Or 65

Objectifs et enjeux	65
Méthodologie	66
Résultats	67
Discussion	68

Quelles communes du Lot-et-Garonne ont des sols argileux ? 69

Objectifs et enjeux	69
Matériel et méthodes	69
Résultats	75
Discussion	76

Estimation du réservoir utile en eau des sols en Bretagne 77

Objectifs et enjeux	77
Méthodologie	78
Résultats	80
Discussion	81

Guide de vocation des Territoires agricoles et forestiers du 83

Rhône

Objectifs et enjeux	83
Méthodologie	83
Résultats	86
Discussion	88

Chapitre 5 - Disponibilité des données 89

Définitions et acronymes 101

Ressources documentaires 105

Bibliographie	105
Webographie	109
Formations DoneSol	109

Introduction

Le sol constitue un patrimoine naturel, environnemental, économique et social essentiel aux équilibres naturels globaux et au développement des activités humaines. De par sa position d'interface avec les autres ressources naturelles que sont l'eau, l'air et le sous-sol, il joue un rôle clé dans l'environnement et impacte le changement global par les flux de gaz à effet de serre, le recyclage des déchets, la protection de la ressource en eau, le maintien de la biodiversité et la conservation d'un patrimoine génétique. La multifonctionnalité des sols et les services écosystémiques qu'ils rendent sont maintenant largement admis, comme en témoignent «l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire» (Millenium Ecosystem Assesment, 2005) lancé par les nations unies, ou le récent avis du Conseil Économique Social et Environnemental sur «la bonne gestion des sols agricoles : un enjeu de société» paru au journal officiel de la République française (Courtois et Clavairole, 2015). A la différence de l'eau et l'air, le sol n'est pas une ressource renouvelable à l'échelle des générations humaines, et est soumis à des pressions anthropiques fortes qui altèrent ses composantes chimiques, physiques et biologiques ainsi que sa capacité à remplir ses fonctions. Les pressions qui pèsent sur les sols ont été clairement identifiées en 2002 par la Commission Européenne dans sa « stratégie pour la protection des sols ».

Les enjeux autour de la connaissance et de la préservation des sols sont désormais bien identifiés et reconnus. Cependant leur diversité et leur variabilité spatiale restent insuffisamment connues dans le cadre de diagnostics et de planification d'actions agricoles, environnementales, d'aménagement à l'échelle des territoires. Depuis les années 1960, de grands programmes d'acquisition de données sur les sols ont été mis en place en France dans le cadre d'études thématiques ou d'inventaires systématiques. Ces informations sont référencées et aujourd'hui encore disponibles sous la forme de documents papier. Depuis les années 1970, ces données sont progressivement numérisées dans un premier temps au format STIPA (Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique) et depuis la fin des années 80 au format DoneSol. L'objectif était alors de disposer d'une connaissance pédologique exhaustive en France la plus précise possible au regard de contraintes techniques, humaines et financières évidentes. Dans cette démarche, la première étape a été la mise en place d'un programme à l'échelle* 1/100 000, toujours actif aujourd'hui. En parallèle, a été lancé au début des années 1990 le volet 1/250 000 qui se concrétisera par la mise à disposition d'une information sur l'ensemble du territoire à l'horizon 2018. Actuellement seule la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF*) au 1/1 000 000, qui n'est pas au format DoneSol, permet d'avoir une vision nationale exhaustive. La création du Groupement d'intérêt Scientifique Sol (Gis Sol) en 2001 a permis de mobiliser des moyens et de créer une dynamique pour acquérir des connaissances. Le Gis Sol* a publié en 2011 un rapport sur l'état des sols de France (http://www.gissol.fr/rapports/Rapport_HD.pdf), qui vise à contribuer à l'élaboration d'une politique de gestion durable des sols.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG*) qui se sont démocratisés depuis la fin des années 1980 ont révolutionné l'acquisition, la gestion et l'analyse des données pédologiques. Les méthodes d'analyse des données, mais aussi les concepts cartographiques ont évolué grâce à l'augmentation des capacités de traitement des outils informatiques et à la disponibilité accrue des données décrivant

l'environnement. Les informations pédologiques existantes aujourd'hui sont le plus souvent informatisées et structurées en bases de données géographiques. Cela facilite la prise en compte des connaissances sur les sols dans les approches environnementales, agronomiques et d'aménagement des territoires.

Pour être utilisées et valorisées, les informations disponibles sur les sols et les méthodes pour les traiter doivent être portées à la connaissance des utilisateurs potentiels. Le présent guide a pour objectif de répondre à ce besoin d'accompagnement, à un moment où la disponibilité de données pédologiques se généralise. Il est proposé par le Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires labellisé depuis 2010 par le Ministère en charge de l'agriculture, qui associe une trentaine de partenaires de la recherche, du développement et de la formation et a pour objet d'accroître et de valoriser la connaissance des sols pour le développement durable des territoires ruraux. Cet ouvrage a pour vocation de guider les géomaticiens, les pédologues non cartographes, les cartographes non pédologues, les gestionnaires de territoires, etc. afin d'utiliser au mieux les bases de données sols disponibles, en fonction de la question qui leur est adressée. Un focus est porté sur les bases de données à 1/250 000, mais les autres échelles* sont également abordées.

Chapitre 1 - Qu'est-ce que le sol et comment l'étudier ?

La notion de sol est assez complexe et on peut retrouver de nombreuses définitions aussi bien dans la littérature que dans le langage courant. On désigne le sol pour qualifier la surface sur laquelle on marche, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Souvent encore, le sol est à tort envisagé sans discernement de profondeur, incluant ainsi les vers de terres, la nappe phréatique, le pétrole ou le magma. Certains « utilisateurs » ont quant à eux une vision plus restrictive du sol, bornée par l'épaisseur et la nature de leur objet d'étude : les 30 premiers centimètres pour les agronomes s'intéressant à la terre arable, à plus de 100 mètres pour les géotechniciens s'intéressant à l'exploitation des eaux souterraines ou à la prévention des risques naturels.

1.1. Qu'est-ce que le sol ?

Le sol est l'objet d'étude des pédologues. Il s'agit du volume qui s'étend horizontalement de manière quasi continue à la surface émergée de la Terre ; on parle alors de couverture pédologique*. Pour le pédologue, le sol est un milieu peu épais (en moyenne, de l'ordre du mètre en climat tempéré), dont les constituants et la structuration sont favorables à différentes formes de vie. Il est délimité en profondeur par l'apparition plus ou moins progressive du sous-sol lithologique étudié par les géologues.

Verticalement, il est compris entre la surface et le matériau géologique sous-jacent dont il est le plus souvent issu. Le sol provient en effet de l'altération des roches sous l'effet de l'eau, de l'air, de l'activité biologique et de la décomposition des organismes vivants (plantes, animaux, micro-organismes). La diversité des conditions naturelles relatives aux matériaux géologiques, au climat, au relief, aux types de végétation, et aux activités humaines conduit à une diversité très importante des sols au niveau mondial (Legros, 2007). Ces facteurs de la pédogenèse s'expriment à différentes échelles* spatiales et temporelles, et favorisent une large diversité des sols. Ces sols peuvent être très différents selon leurs épaisseurs, leurs constituants minéraux et organiques, les processus de transformation et de redistribution des éléments et leurs interactions avec les autres compartiments de l'environnement (eau, air, roches, biome).

1.1.1. Un milieu complexe et organisé

Les sols sont constitués de particules minérales issues d'un matériau parental (minéraux primaires dits hérités), ou transformé (minéraux secondaires dits néoformés). Ces particules sont de taille variable (argile : $< 2\mu\text{m}$, limon : 2 à $50\mu\text{m}$, sable : 50 à $2000\mu\text{m}$, éléments grossiers : $> 2000\mu\text{m}$), de nature minéralogique diverse et constituent la majeure partie du sol en masse et en volume. Le sol se caractérise par l'association intime des particules minérales et des matières organiques d'origine animale, végétale et microbienne. Il a une structuration spécifique, qui le distingue du matériau géologique dont il est issu. Le mode d'arrangement des particules solides du sol forme ou non des volumes macroscopiques, appelés agrégats et définit la structure du sol. L'ensemble des vides générés par l'arrangement des particules, les fissures inter ou intra-agrégats et les conduits et cavités d'origine biologique constitue la porosité. Cette dernière représente en

moyenne 50% du volume du sol dans les premiers centimètres. La structure et la porosité conditionnent fortement les comportements des sols vis-à-vis de la circulation de l'eau et de l'air, de l'activité biologique et de la résistance à l'érosion.

La formation et l'évolution du sol (la pédogenèse*) à partir d'un matériau parental conduisent à sa différenciation en une ou plusieurs couches, appelées horizons*, caractérisés par une ou des couleurs, une granulométrie (texture), une structure, une teneur en éléments grossiers, etc. L'identification des horizons permet de rattacher le sol observé à un groupe de référence d'une classification donnée, le Référentiel Pédologique 2008 en France (Baize et Girard, 2009).

Ainsi les sols s'organisent à différents niveaux emboîtés depuis l'agrégat jusqu'au paysage en passant par les horizons.

1.1.2. Un milieu réactif, interface dans l'environnement

Le sol est un milieu réactif dans le sens où il est le siège de nombreuses réactions biogéochimiques qui favorisent la rétention et la transformation des éléments. La réactivité des constituants minéraux, suivant leur nature et leur surface de contact avec la solution du sol, est estimée à 0,5-10 m²/g de terre. La capacité du sol à retenir et transformer les éléments permet les échanges de matières et de gaz avec l'eau et l'atmosphère. Ces échanges sont à la base de la nutrition des plantes et de la régulation de la qualité de l'environnement. Ainsi, le sol a une position d'interface essentielle et irremplaçable dans l'environnement.

1.1.3. Un milieu vivant

Le sol héberge des organismes vivants extrêmement nombreux et diversifiés, qui peuplent la porosité du sol. Ils sont généralement classés par taille : macrofaune de taille > 2 mm (insectes, arachnides, myriapodes, mollusques, vers de terre), mésofaune de taille comprise entre 0,1 et 2 mm (acariens, collemboles, protozoaires, diptères, symphiles, enchytréides), microfaune de taille inférieure à 0,1 mm (nématodes, protozoaires, rotifères), microorganismes (bactéries, champignons, algues). Ces organismes constituent le réseau trophique du sol qui permet notamment la minéralisation de la matière organique. Ils ont également un rôle essentiel dans l'élaboration et le maintien de la structure du sol en participant ainsi à l'augmentation de la porosité et donc à l'aération du sol.

1.1.4. Un compartiment essentiel...

De par sa position d'interface dans l'environnement, le sol rend des services écosystémiques d'approvisionnement : production agricole et sylvicole (aliments, fibres, énergie), de matériaux, support physique des activités humaines ; de régulation : recyclage des déchets, flux vers l'air et l'eau, stockage de carbone, habitat pour la biodiversité ; des services culturels : protection du patrimoine archéologique, structuration du paysage, spiritualité ; et des services d'auto-entretien : formation des sols, préservation de leur qualité. Ces services peuvent être en concurrence les uns avec les autres, ou au contraire en synergie (Figure 1).

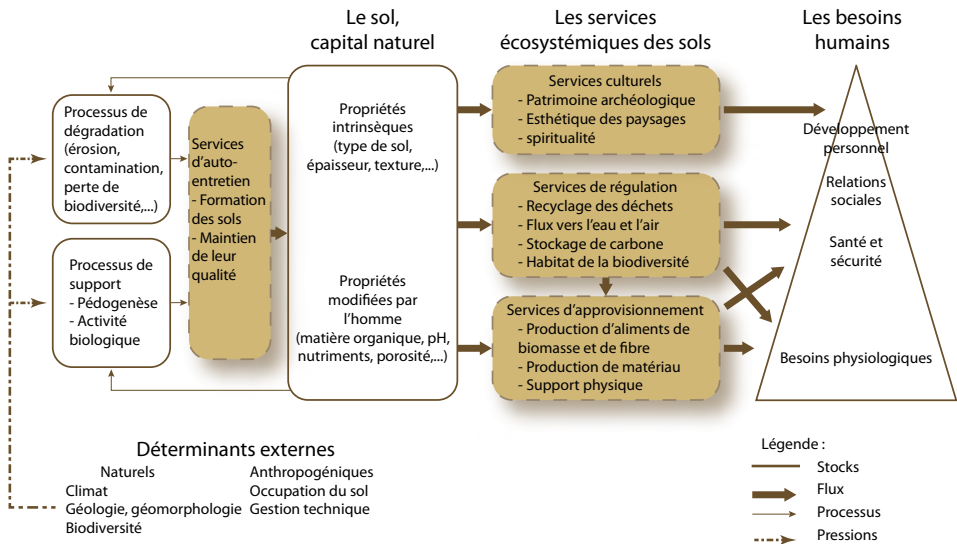


Figure 1- Schéma conceptuel positionnant le sol comme un capital naturel générant des services écosystémiques en réponse à des besoins humains (adapté de Dominati, 2010 in Walter et al., 2014)

1.1.5. ... mais menacé

Le sol est une ressource non renouvelable à l'échelle temporelle humaine et doit être considéré comme un capital à préserver. Au niveau mondial, seuls 17% des terres émergées sont cultivables. L'enjeu est donc considérable pour assurer la nutrition de la population humaine croissante et la gestion durable de l'environnement. Les sols sont soumis à des pressions naturelles et anthropiques fortes qui altèrent leurs composantes chimiques, physiques et biologiques ainsi que leur capacité à remplir leurs fonctions de production, environnementales et écologiques. Les pressions qui pèsent sur les sols ont été identifiées en 2002 par la Commission Européenne dans sa « stratégie pour la protection des sols ». Elles concernent la dégradation physique (érosion, tassement, inondations et glissements de terrain), la dégradation chimique (acidification, appauvrissement en matière organique, salinisation), la diminution de la biodiversité, les contaminations ponctuelles ou diffuses et l'imperméabilisation due à l'expansion des zones urbaines et des infrastructures commerciales et routières.

En 2014, l'Association Française pour l'Etude du Sol (AFES) a proposé une définition du sol :

Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique* qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons* correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et microflore microbienne et fongique).

1.2. Pourquoi prendre en compte le sol pour traiter les questions agronomiques, environnementales, et d'aménagement ?

Disposer d'informations sur les sols et les valoriser est nécessaire à la gestion durable des territoires. Historiquement, les besoins en informations sur les sols venaient plutôt du secteur agricole qui devait tenir compte de leur diversité, de leurs contraintes et de leurs potentialités. L'évolution de l'agriculture, les préoccupations environnementales et le contexte de crise de sécurité alimentaire mondiale ont amené à considérer d'autres fonctions du sol que celle de la production. Depuis la fin des années 1990, les problématiques environnementales liées à la préservation des sols, de l'eau et de l'air se sont avérées de plus en plus prégnantes (Le Bas et Schnebelen, 2006) (Figure 2). Plus récemment, les réflexions ont été croissantes autour de la préservation des terres agricoles dans le cadre d'aménagements du territoire.

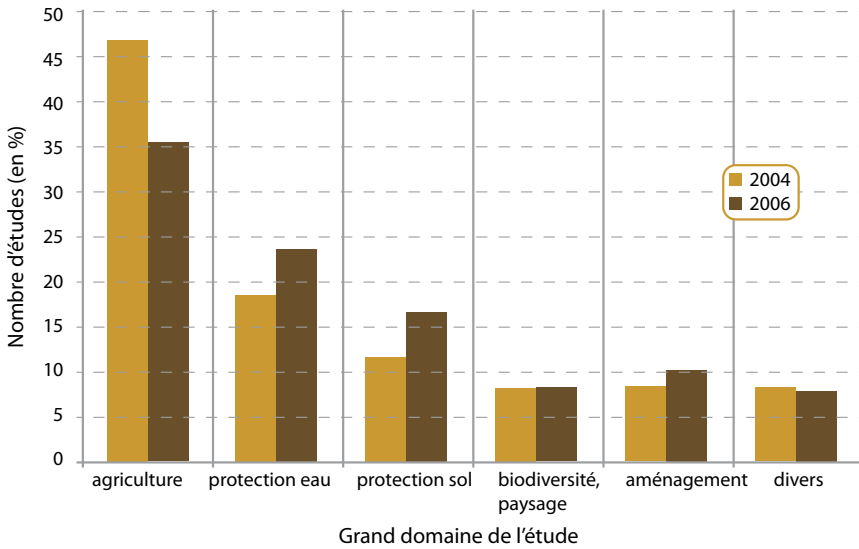


Figure 2 - Nombre d'études réalisées en 2004 et 2006 par grands domaines thématiques en lien avec le sol (Le Bas et Schnebelen, 2006)

La prise en compte des sols doit permettre d'identifier les zones sensibles à certains enjeux ou disposant de certaines potentialités et de sélectionner des sites d'étude ou des exploitations agricoles représentatifs de la diversité des situations pédologiques. Ainsi les sols devront être considérés pour anticiper les évolutions à venir et assurer la pérennité des territoires ruraux, dans une optique de conseil agronomique (à l'échelle de l'exploitation agricole) ou d'actions territoriales (développement de filières, préservation des ressources naturelles, raisonnement de l'aménagement du territoire).

1.2.1. Problématiques agronomiques

1.2.1.1. Evaluation des terres

L'évaluation des terres consiste en le classement de la qualité des sols en vue d'une utilisation donnée. Elle peut être conduite dans le cadre d'aménagements fonciers, notamment le remembrement agricole. Il s'agit alors d'identifier les principales potentialités et contraintes des sols vis-à-vis de la production agricole et de la qualité de l'eau. L'évaluation des terres est aussi mobilisée pour évaluer l'aptitude des sols à l'épandage d'effluents issus des collectivités, des industries agro-alimentaires et de l'agriculture ou à l'assainissement autonome.

1.2.1.2. Choix des systèmes d'exploitation et de culture

La connaissance des sols est nécessaire dans la phase de diagnostic sur un territoire vis-à-vis d'un enjeu environnemental ou économique (plans locaux d'urbanisme, diagnostic territorial multi-pression par exemple), mais aussi pour la conception et la mise en œuvre de solutions techniques (travail du sol, raisonnement des systèmes pour limiter l'érosion). Il faut en effet évaluer la sensibilité ou les potentialités d'un milieu, en combinaison avec les pratiques et les activités recensées sur le territoire.

1.2.2. Problématiques environnementales

1.2.2.1. Gestion qualitative et quantitative de l'eau

Les sols, par leur capacité d'infiltration et de stockage de l'eau, régule les transferts hydriques. Ils jouent un rôle déterminant vis-à-vis de la dynamique de l'eau en influençant des processus tels que le ruissellement, l'érosion, l'alimentation en eau des plantes, le devenir d'éléments à caractère potentiellement polluant (nitrates, éléments traces métalliques, pesticides...). Par leurs fonctions de transfert, de rétention, et de dégradation des substances polluantes, les sols interviennent également sur la qualité de l'eau.

1.2.2.2. Ecologie, biodiversité

De nombreuses études ont montré que le sol était un réservoir important de biodiversité tant aux niveaux quantitatif que qualitatif. Ce compartiment biologique, souvent sous-estimé, est au cœur des services écosystémiques rendus par le sol. Il participe notamment à de nombreux processus : cycle des éléments nutritifs, recyclage des déchets, structuration du sol, cycle de l'azote, transfert hydrique, constitution de niches écologiques spécifiques... A ce titre, la commission européenne identifie le déclin de la biodiversité des sols comme faisant partie des risques majeurs qui pèsent sur les sols (CCE, 2002).

1.2.3. Problématiques d'aménagement du territoire

Durant le XXème siècle et plus amplement au cours de ces 40 dernières années, la population française s'est concentrée dans les villes. La conséquence est la modification rapide de l'usage des sols en proximité de ces zones. Cette modification peut aller jusqu'à la destruction du sol par l'artificialisation. D'autres conséquences secondaires, comme le

ruissellement sur ces zones imperméables, sont aussi des facteurs à prendre en compte dans l'extension de ces zones urbaines. La surface artificialisée nationale croît d'environ l'équivalent d'un département tous les dix ans. Entre 2006 et 2010, ces surfaces ont gagné 339 000 hectares sur les terres cultivées (Agreste, 2011). Ce constat a entraîné une prise de conscience de l'enjeu sol dans ces secteurs. De plus en plus, les études actuelles ne considèrent plus le sol seulement à des rapports de surface ou sur des aspects fonciers, elles s'intéressent aujourd'hui à l'aspect sol-matière, disponible et apte à rendre des services autres qu'un simple support d'infrastructure.

Le RMT «Sols et Territoires», en concertation avec d'autres groupes de travail (GESSOL, CEREMA...) s'investit sur la thématique spécifique des sols urbains et péri-urbains.

De nombreuses autres problématiques sur les territoires nécessitent de mobiliser des références sur les sols. Il peut s'agir de comprendre et de quantifier des processus (notamment pour sensibiliser les acteurs, établir des diagnostics) ou d'élaborer des références pour l'action (conception, mise en œuvre et évaluation de solutions).

Cette liste des thématiques dans lesquelles il est essentiel de prendre en compte les sols est non exhaustive. D'autres domaines d'application nécessitent aussi des informations sur les sols : archéologie, gisements de matériaux de construction, gestion des sites et sols pollués, etc.

1.2.4. Prise en compte des sols au niveau politique et réglementaire

Le renforcement des outils de planification territoriale d'envergure régionale (Schéma Régional de Cohérence Ecologique – SRCE -, Schéma Régional Climat Air Energie - SRCEA -) et intercommunale (Schéma d'Aménagement et de gestion des Eaux – SAGE - Schéma de Cohérence Territoriale – SCoT -...) doit être l'occasion de replacer le sol au cœur des enjeux de production d'aliments de qualité et de préservation des ressources et du cadre de vie dans un contexte de changements globaux. Le Conseil Economique Social et Environnemental a émis un avis en 2015 intitulé «La bonne gestion des sols agricoles : un enjeu de société» (Courtoux et Claveirole, 2015), librement téléchargeable, dans lequel la préservation ainsi que le maintien de la qualité des sols apparaissent comme des enjeux de société. Des préconisations concrètes y sont formulées concernant le renforcement des outils de la connaissance, la protection du foncier agricole, la préservation et l'amélioration de l'état des sols agricoles, et la sensibilisation aux enjeux liés au sol.

Depuis quelques années, les instances politiques ont pris conscience de la pertinence d'intégrer le sol dans leurs décisions. Par exemple, l'arrêté du 24 juin 2008 modifié le 1er octobre 2009, applicable en France métropolitaine et en Corse, précise les deux critères de définition et de délimitation des zones humides : le sol et la végétation. En l'absence de végétation ou d'habitats naturels, l'identification des zones humides à partir des sols est cruciale. En raison du caractère stratégique des services rendus par les zones humides, leur « préservation » et leur « gestion durable » sont considérées comme « d'intérêt général » par la loi française (code env., art. L. 211-1). La préservation et la gestion durable des zones humides s'inscrivent également dans le cadre des politiques européennes de

gestion durable des ressources naturelles et de préservation de la biodiversité (directive-cadre 2000/60/CE sur l'eau, réseau « Natura 2000 » issu des directives 92/43/CEE « Habitats » et 79/409 /CEE « Oiseaux », notamment).

Autre exemple, la Commission Européenne a adopté en avril 2009 la révision de la classification des zones agricoles à handicaps naturels hors zone de montagne. Ce classement permet aux agriculteurs des communes concernées de bénéficier d'aides communautaires. Les critères définis sont de 2 natures : i) des critères technico-économiques et ii) des critères biophysiques établis à partir des informations climatiques, topographiques et pédologiques. Les critères pédologiques de la classification des zones agricoles à handicaps s'appuient sur les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP*) (chapitre 2).

1.3. Caractérisation du sol : du terrain à la carte

L'étude du sol peut répondre à des objectifs et s'appliquer à des étendues variées : de la caractérisation fine du sol d'une parcelle ou d'une localisation précise à la caractérisation de la variabilité pédologique sur une zone d'étude beaucoup plus vaste, comme un petit bassin versant* de quelques km² ou une région. Le sol n'est pas aisément accessible dans ses 3 dimensions. Seule la surface est en général observable assez facilement, lorsque le sol n'est pas recouvert de végétation... Pour caractériser les sols, l'observation en surface n'est pas suffisante, et il est nécessaire de mettre en œuvre des moyens d'observation intrusifs. Cela consiste à réaliser des sondages à la tarière, complétés ou non de fosses pédologiques qui pourront faire l'objet de prélèvements de terre en vue d'analyses complémentaires. La densité des observations sera fonction de l'échelle* de restitution de la carte. Le pédologue cartographe dispose alors d'informations pédologiques ponctuelles sur lesquelles il s'appuie pour construire la carte. Différentes sources d'informations externes (carte géologique, topographie...) peuvent également être utilisées pour compléter les données sols.

La représentation des sols se fait majoritairement sous la forme de carte qui est, et reste, une interprétation de la répartition des sols à partir d'observations faites sur le terrain.

Les données sur le sol sont des informations géographiques qui ont pour point commun de contenir une ou deux composante(s) (Figure 3) :

- la composante géographique désigne la partie «visible» de la donnée : il s'agit de l'équivalent numérique d'une carte papier sur lequel il est possible de zoomer ou de dé-zoomer. Les objets sont souvent représentés par des points (sondages ou fosses pédologiques) ou des surfaces telles que les unités cartographiques de sols (UCS*).
- la composante sémantique contient l'information du fichier pédologique. Elle prend généralement la forme d'une table constituée de colonnes et de lignes. C'est la composante sémantique qui permet de réaliser des opérations de sélection ou de calcul. Quand ces informations complètent la composante géographique, on parle d'attributs ou de données attributaires.

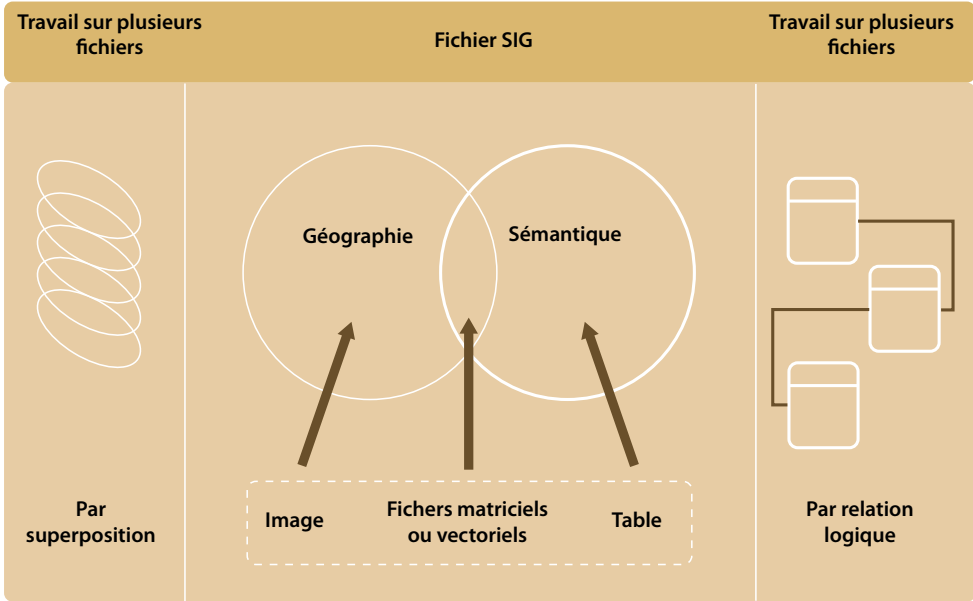


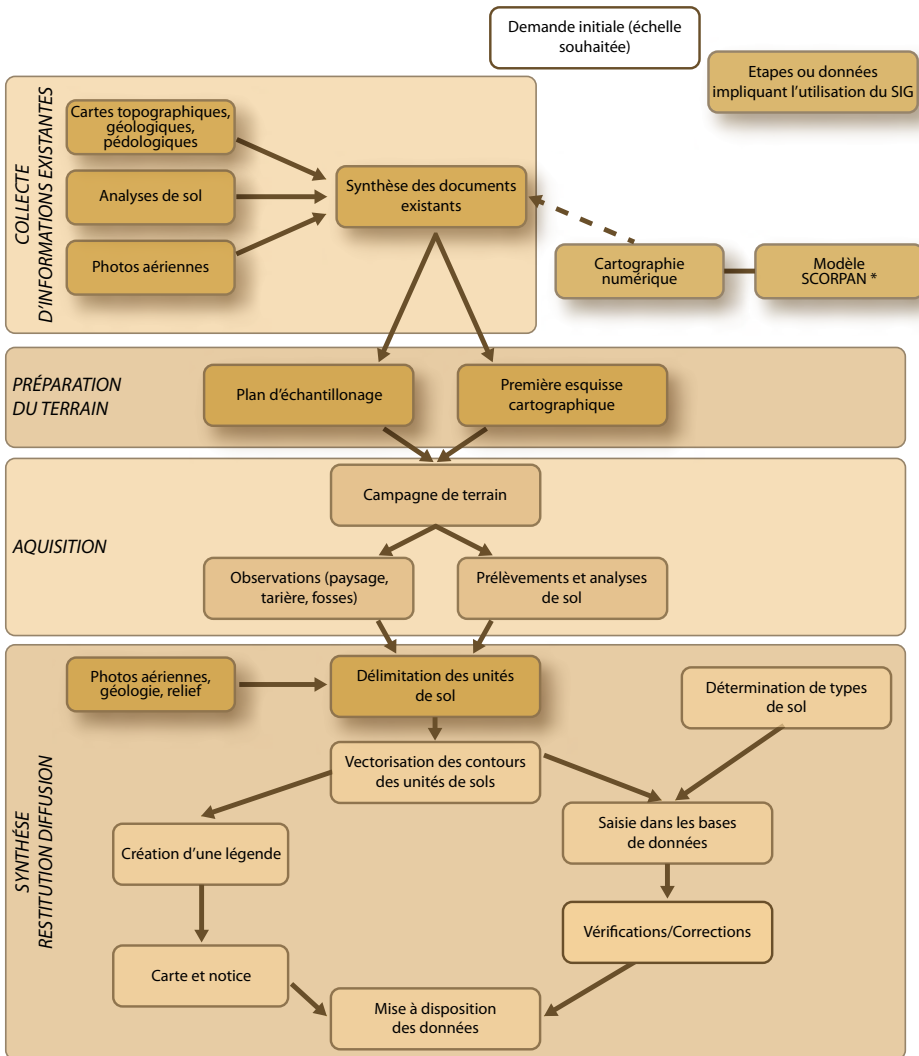
Figure 3 - Les deux composantes de l'information géographique

En matière de cartographie des sols, deux grandes approches coexistent actuellement : l'approche dite classique et l'approche numérique.

1.3.1. Approche classique de cartographie des sols

L'approche classique (déterministe) développée par les premiers pédologues reposait sur l'idée que les principaux déterminants de la variabilité spatiale des sols étaient reconnaissables sur le terrain, ce qui permettait de la représenter à partir d'un nombre limité d'observations directes. Cependant les déterminants des sols sont nombreux et interagissent entre eux, et l'activité humaine, notamment agricole, se surimpose aux facteurs naturels.

La complexité des sols et de ses déterminants pouvant être difficiles à retranscrire, des approches de type statistique et numérique se sont ensuite développées. Le principe de ces approches est de décrire la variabilité des sols sans introduire d'interprétation a priori. Actuellement, les deux approches coexistent, et toutes les deux se basent sur les observations de terrain, le contexte environnemental et les analyses complémentaires (Figure 4).



* cf. Figure 9

Figure 4- Démarche pour établir une carte des sols et la base de données associée

1.3.1.1. Qualification du contexte : synthèse des documents existants

La première étape avant de démarrer la cartographie d'un secteur est de rechercher les données déjà existantes sur le secteur étudié. Pour appuyer les pédologues dans cet inventaire, le GIS Sol* a mis à disposition un outil de consultation : Refersols (<http://Refersols.gissol.fr>, cf. chapitre 2). Comme cet inventaire n'est pas exhaustif, il est aussi important de consulter les différents organismes locaux (Chambres d'Agriculture, DRAAF, ONF, CRPF, Agence de l'eau...) qui auraient pu commanditer des études et ainsi venir enrichir l'information disponible. Les informations recherchées sont de différentes

natures : sondages, profils analysés, cartes des terres agricoles, cartes de végétation, cartes de sols, cartes thématiques.

L'analyse de ces documents peut être complétée par l'exploitation de données de caractérisation du milieu : Modèle Numérique de Terrain (MNT), cartes géologiques, topographiques, hydrographiques, de végétation, images satellitaires, monographies régionales, etc.

1.3.1.2. Établissement du plan d'échantillonnage

Cette étape permet au pédologue de prendre connaissance du contexte et d'établir un plan d'échantillonnage pertinent des sites à observer, en fonction de la précision* de la carte visée et des moyens disponibles. Elle lui permet aussi de construire les premières lois de distribution des sols et de produire une première esquisse de la carte.

La stratégie d'échantillonnage sera choisie de façon à i) bien appréhender la complexité du milieu naturel, ii) optimiser les moyens mis en œuvre, tout en s'assurant de l'adéquation des informations recueillies avec l'objectif de la carte. Par conséquent, l'opérateur doit optimiser la densité, le positionnement et le type d'observation.

Le plan d'échantillonnage définit le nombre et l'emplacement des sites à observer. Il dépendra de la précision attendue de la carte finale. Si des lois de distribution des sols dans les paysages sont identifiées, la densité des observations pourra être plus faible. L'échantillonnage peut être basé sur des méthodes statistiques ou être déterministe. Dans le premier cas, il s'agit de définir au préalable les sites d'observation (sites aléatoires, transects aléatoires, nœuds d'une grille, stratification de l'espace, secteurs de référence...) et dans le second l'échantillonnage se base sur des entités pédopaysagères identifiées par l'analyse de documents existants. Le pédologue arpente ensuite le terrain et positionne ses observations par expertise le long de transects topographiques ou de cheminement en fonction de la variabilité du milieu et des observations qu'il a déjà réalisées.

Dans le cas de la méthode déterministe, le plan d'échantillonnage doit être représentatif des contextes pédologiques du secteur, définis par la lecture du paysage (morphologie du terrain, la présence de cailloux ou de pierres visibles à la surface du sol, le type de végétation spontanée, la proximité d'un cours d'eau, les éventuels éléments bocagers, l'état de surface du sol, etc.) et l'interprétation des hypothèses de distribution des sols. L'élaboration du plan d'échantillonnage débute toujours au bureau, à partir des documents préexistants, relatifs au milieu naturel de la région et éventuellement aux sols. Sur le terrain, dans le cas des plans d'échantillonnage non basés sur une approche statistique, le choix de l'emplacement final des sites d'observation se fait en fonction des éléments directement observés à un niveau très local et aux variations susceptibles d'entraîner une modification des sols : forme du relief, végétation spontanée, aspect de la surface du sol... Il convient aussi d'éviter des situations particulières (transitions matérialisées par une rupture de pente, talus, mouillères, micro-talwegs, zones remaniées...) pour chercher à caractériser les situations représentant les étendues les plus grandes.

La densité et la nature des observations (fosses ou sondages) dépendent de la complexité du milieu à étudier, de l'objectif (reconnaissance générale, cartographie

détaillée à grande échelle*...), de l'abondance des connaissances préexistantes et de l'expérience du pédologue (Legros, 1996). Quelques références sont apportées dans le Tableau 1.

Tableau 1 - Niveau de résolution et d'analyse d'une carte des sols (adapté de la norme NFX 31-560 qui précise les modalités de réalisation et de validation d'une cartographie numérisée des sols, AFNOR, 2007)

Echelle de restitution	Champ spatial exploré	Densité moyenne de sondages	Nombre de sondages/jour	Densité moyenne de profils/ha
1/250 000	Région, département	1 pour 200 à 600 ha	<10	1 pour 2000 à 6000 ha
1/100 000		1 pour 30 à 60 ha	10	1 pour 500 à 1000 ha
1/50 000		1 pour 10 à 30 ha	15	1 pour 200 à 300 ha
1/25 000	Bassin versant	1 pour 5 à 10 ha	15 à 20	1 pour 50 à 100 ha
1/10 000	Secteur de référence	1 pour 2 à 3 ha	18 à 22	1 pour 10 à 50 ha
1/5 000		1 pour 0,5 à 1 ha	30	1 pour 5 à 10 ha

En fonction du niveau de résolution* et d'analyse choisi pour la carte des sols, le pédologue doit se conformer à une densité d'échantillonnage en sondages et profils définie par les valeurs ci-dessus. Ces références sont indicatives et valent pour les levés en zones de plaine de complexité moyenne. Elles doivent être minorées dans les zones peu complexes et majorées dans celles présentant une forte variabilité. Le nombre de sondages réalisé par jour est fonction de l'échelle* de la carte à produire : plus l'échelle est petite, plus les temps de déplacement entre les points sont importants.

1.3.1.3. Acquisition des données : observations et prélèvements pour analyses de sol

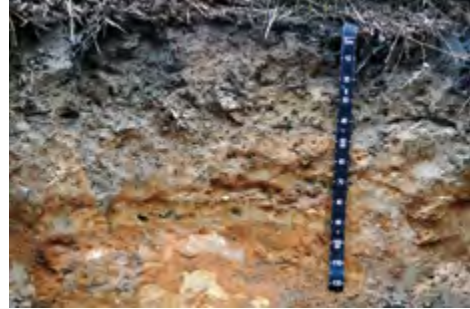
Une fois les emplacements d'observation choisis, il faut les repérer dans l'espace le plus précisément possible, à partir des coordonnées géographiques. Cela est essentiel pour l'exploitation et l'archivage des informations. Les sites d'observation peuvent être reportés sur les cartes topographiques de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) à 1/25 000 ou relevé à l'aide de récepteurs GPS.

Suite à la réalisation d'un plan d'échantillonnage à partir des documents existants, la première étape d'acquisition sur le terrain se fait au moyen de sondages réalisés à la tarière (Photo A Figure 5). Ce mode d'investigation permet d'appréhender les principaux paramètres pédologiques (Baize et Jabiol, 2011) et d'identifier les types de sols. Cette phase de reconnaissance permet aussi, par l'observation des paramètres environnementaux (topographie/géologie/végétation), d'établir les lois d'organisation et de répartition des sols. Dans une seconde étape, les types de sols ainsi définis seront caractérisés par une ou plusieurs fosses pédologiques (Photo B Figure 5). Une fosse

pédologique est une excavation d'environ un mètre de large sur quelques mètres de long et profonde d'environ 2 m (sauf si le matériau parental est rencontré à faible profondeur). Elle permet d'observer le sol en trois dimensions et d'identifier précisément les couches ou horizons* qui se succèdent depuis la surface jusqu'au fond de la fosse. Elle complète les informations fournies par les sondages (Tableau 2) et permet d'échantillonner sans perturbation les différents horizons*.



A - Exemple de sondage
(© C. Jolivet - Inra - InfoSol)



B - Exemple de fosse pédologique
(© S. Desbourdes - 2015 - Inra - InfoSol)

Figure 5 - Exemple de sondage et de fosse pédologiques

La Figure 6 présente un exemple de positionnement des sondages (points) en fonction de la topographie et des différents matériaux géologiques. Suite à ces observations, l'opérateur choisit les sites où caractériser plus finement les sols (carrés) en réalisant des fosses pédologiques.

Différenciation des sols sur terrasses alluviales en fonction de l'altitude

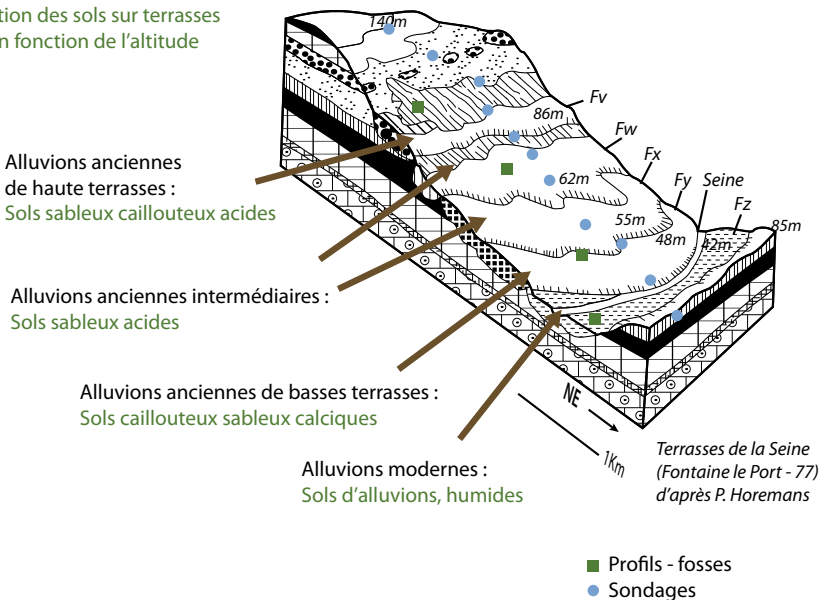


Figure 6 - Exemple d'implantation des sondages à la tarière et des fosses pédologiques en fonction des conditions géomorphologiques

Après en avoir nettoyé les parois de la fosse à échantillonner, les prélèvements sont réalisés par horizons* successifs du bas vers le haut afin d'éviter la contamination des horizons non encore prélevés.

Un grand nombre de paramètres peuvent être analysés. Voici un exemple de mesures génériques : granulométrie 5 fractions, matière organique, pH eau, pH KCl, calcaire total et actif, Capacité d'Echange Cationique (CEC), cations échangeables (Ca, Mg, K, Na), azote, carbone organique, rapport C/N, P2O5,

Des mesures ou observations sur le terrain peuvent compléter ces analyses de laboratoire : densité apparente (ou masse volumique), pH, effervescence à l'HCl pour mettre en évidence la présence de carbonate de calcium, test de présence de fer réduit, résistance de pointe (pénétrométrie), conductivité, humidité pondérale ou massique...

Le Tableau 2 synthétise les informations apportées par les différents moyens de prospection des sols mobilisables par la pédologie cartographe.

Tableau 2 - Appréhension de quelques critères pédologiques par sondage à la tarière, profil ou analyses de terre (Rivière et al., 1992)

Moyen d'appréhension	Observation à l'aide d'un sondage «méthode tarière» (MA)	Observation à partir d'un profil	Mesures faites au laboratoire (analyse de terre)
Nature du critère			
Nature du matériau			
Géologie	+	++	o
Texture	++	++	++
Profondeur	++	+++	o
Hydromorphie	++	+++	o
Pierrosité	+	+++	o
Etat structural	+	+++	o
Etat organique	+	+	++
Etat chimique	o	o	++

0 : inadapté, + : peu adapté, ++ : correct, +++ très bon

Le prospecteur effectue sa description sur une fiche codifiée, dont il existe plusieurs versions. Des exemples sont proposés (voir www.sols-de-bretagne.fr) ou sur le site du GIS Sol* sur la page d'accueil de DoneSolWeb (<https://dw3.gissol.fr/login>). Des typologies* régionales ont été développées (par exemple la méthode «4 critères» pour le Massif armoricain).

1.3.1.4. Synthèse, restitution et diffusion

Délimitation et caractérisation des unités de sols

Les données recueillies sur le terrain (descriptions des fosses et sondages, observation du paysage, ...) permettent de valider ou d'affiner les hypothèses de répartition des sols établies lors de la première étape. Les limites ainsi définies et ajustées seront les limites des unités cartographiques de sols (UCS). Au 1/250 000, elles correspondent généralement aux limites topographiques, géologiques, pédologiques ou de changement d'occupation du sol.

Le résultat cartographique est une représentation en 2D d'un objet tridimensionnel. Il consiste en une association de polygones délimités dans l'espace, dont le contenu est supposé homogène. La carte produite doit refléter au mieux les connaissances acquises tout en restant compréhensible pour les utilisateurs finaux.

Or les sols n'ont que très rarement des limites nettes. La transition entre deux entités est toujours plus ou moins floue. C'est pour cette raison que la notion d'échelle* de représentation est très importante. Ainsi, à l'échelle 1/250 000, le tracé de la limite entre 2 polygones a une incertitude de 250 m sur le terrain. Au sein de ces ensembles homogènes, les différents types de sols rencontrés (UTS*) sont définis à partir des observations ponctuelles. Bien que les UTS ne soient pas spatialisées, des informations sur l'organisation des UTS au sein de l'UCS seront renseignées dans la base de données en fonction des observations de terrain et de l'expertise du pédologue cartographe.

Il est généralement admis que les plus petites plages cartographiques représentables et repérables sur une carte ne doivent pas être plus petites que $\frac{1}{4}$ de cm^2 (carré de 5 mm de côté et/ou cercle de 2,8 mm de rayon (Boulaine J., 1980)). Ainsi, à titre d'exemple, à l'échelle* du 1/250 000, la plus petite plage de forme carré admise est de 150 ha, et de 0,25 ha à l'échelle 1/10 000. Cependant, aujourd'hui les outils numériques (SIG*) permettent d'apporter un peu de souplesse à ces règles si, bien entendu, la densité des observations est respectée.

La vectorisation des contours peut se faire i) à partir d'une table à digitaliser (technique de moins en moins utilisée), ii) par un dessin direct à l'écran, ou iii) par scan d'un calque stable. Quelle que soit la méthode, elle implique à *posteriori* la vérification du calage par rapport à des couches de références, une vérification de la topologie, et une indexation de chaque polygone.

Renseignement de la Base de Données DoneSol

Des informations pédologiques sont associées à cette couche graphique. Elles peuvent être dans une table unique ou dans une base de données relationnelle.

Les différents objets (surfaciens : UCS, et ponctuels : sondages ou fosses pédologiques) sont alors décrits dans une base de données (voir chapitre 3) à partir des informations collectées sur le terrain et de l'exploitation de données existantes. Leur renseignement peut se faire dans les différentes tables de la base données DoneSol qui constitue la structure nationale de stockage de l'information pédologique. La saisie se fait alors *via* une interface web nommée DoneSolWeb (<https://dw3.gissol.fr/login>). Sa page d'accueil est présentée en Figure 7.



Figure 7 - Page d'accueil DoneSolWeb

Après une connexion par un identifiant/mot de passe, l'interface permet un accès en saisie ou en consultation sur différents onglets : i) sur les données générales ; ii) les données surfaciques iii) ; les données ponctuelles (sondages et fosses) (Figure 8).

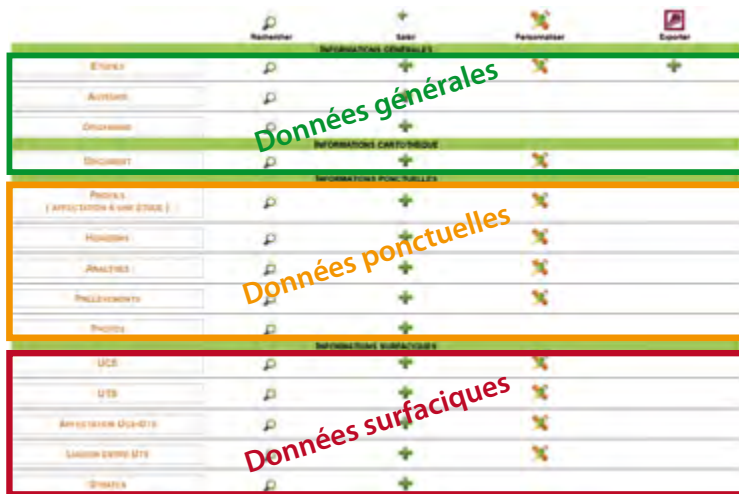


Figure 8 - Interface DoneSolWeb de saisie des différentes informations

La saisie des données ponctuelles se fait à partir des observations sur le terrain et des analyses réalisées en laboratoire. Les données surfaciques sont issues de l'interprétation, de l'interpolation des données ponctuelles sur les plages de sols.

Chaque information est codifiée pour assurer un format national de la donnée pédologique. Suite à la saisie des données, des vérifications de conformité et de cohérence des données sont effectuées. Sur le volet 1/250 000 du programme IGCS* ces aspects vont jusqu'à l'attribution d'un niveau de qualité remis par le Ministère en charge de l'agriculture.

Dans le cadre de ce programme et dans un souci de compréhension de la base de données produite, des documents d'accompagnement peuvent être rédigés en parallèle et mis à disposition sous la forme d'une carte et d'une notice détaillée.

La diffusion des données se fait principalement sous 3 formes :

- une carte et sa notice associée ;
- la diffusion des données *via* DoneSol avec la possibilité d'exporter au format csv ou access depuis l'interface (généralement après signature d'une licence avec le propriétaire des données) ;
- la diffusion *via* des portails cartographiques.

Le mode de diffusion est propre à chaque organisme et aux politiques de diffusion définies entre les co-propriétaires des données.

1.3.2. Cartographie numérique des sols

La Cartographie Numérique des Sols (CNS), ou Digital Soil Mapping (Mc Bratney *et al.*, 2003) peut être définie comme « la création et l'enrichissement de systèmes d'information pédologiques à références spatiales par des modèles numériques inférant les variations spatiales et temporelles des sols et de leurs propriétés à partir d'observations de sol et de données spatiales d'environnement des sols » (Lagacherie & McBratney, 2007). Initiée à la fin des années 1980 par des travaux pionniers en Australie (McKenzie et Austin, 1993), aux Etats Unis (Bell *et al.*, 1992) et en France (Lagacherie & Depraetere., 1989 ; Merot *et al.*, 1995), la CNS a émergé véritablement avec la revue bibliographique publiée par McBratney *et al.*, 2003, jugée depuis fondatrice du concept. Le principe général de la cartographie numérique des sols est résumé sur la Figure 9.

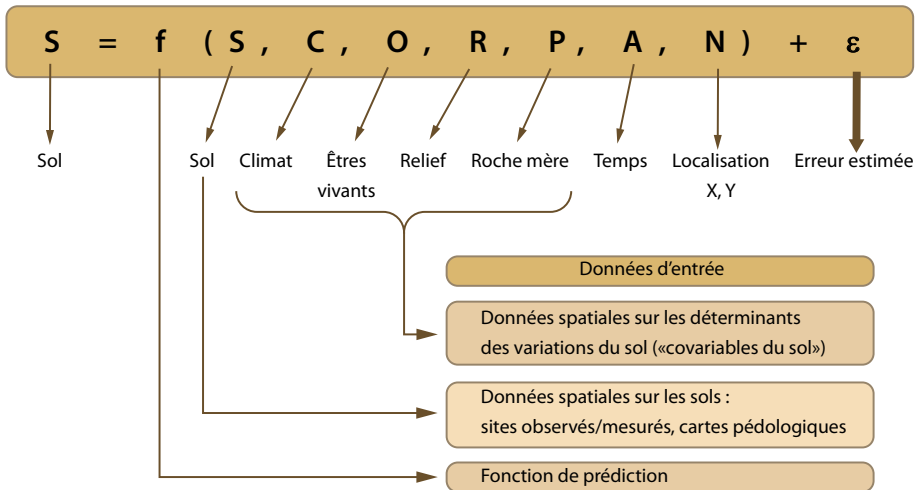


Figure 9 - Principe général de la cartographie numérique des sols (modifié d'après McBratney *et al.*, 2003)

La cartographie numérique des sols consiste à prédire des classes de sol ou des propriétés de sol en utilisant d'une part les données pédologiques disponibles sur la zone à étudier et, d'autre part, les données spatiales représentant des éléments du paysage en relation (de causalité ou non) avec les sols, appelées dans la suite « covariables du sol ». Ce concept reprend en partie le concept dit « CLORPT » de Jenny (1941) : Soil = f(CLimate, Organisms, Relief, Parent material, Time). Il y rajoute une dimension spatiale supplémentaire, la notion d'incertitude* ou de variabilité « non prédictible », ainsi que le recours possible à des données spatiales numériques (Modèles Numériques d'Altitude, images de télédétection, données de capteurs de propriétés de sol) qui sont devenues disponibles pour les pédologues cartographes. Ces prédictions sont réalisées par des fonctions de prédiction induites soit par des modèles statistiques ou géostatistiques prenant en compte les données disponibles, soit par des formalisations numériques de l'expertise de pédologues. Un grand intérêt est que ces fonctions, totalement explicites, peuvent être calibrées et validées, délivrant ainsi une estimation de l'incertitude de prédiction. Un autre intérêt est qu'à la différence de l'expertise du pédologue, ces modèles sont totalement reproductibles et transférables, et qu'ils peuvent être améliorés constamment par l'ajout de nouvelles données ou par des avancées méthodologiques.

En conclusion de cette partie, la carte des sols ne se résume pas à une représentation spatiale dont la précision* sera fonction de la densité des observations utilisées pour la construire. C'est aussi une base de données riche en informations qui peuvent être mobilisables dans le traitement des données pour répondre à des questionnements variés en lien avec différentes thématiques.

Concepts de résolution* et d'échelle en pédologie :

L'échelle est le rapport entre une distance sur la carte et la distance correspondante sur le terrain. L'échelle est d'autant plus grande que le dénominateur est petit. Cette notion est différente de celle du **champ spatial** (étendue de la zone représentée sur la carte), du **niveau d'analyse** et de la résolution. Le niveau d'analyse, souvent sous-entendu dans la pratique par le concept d'échelle, correspond à l'ensemble des informations définissant, pour une carte ou une plage cartographique* données, le type et le nombre de caractéristiques utilisées ainsi que la précision* des mesures et observations. La **résolution** est la plus petite aire pour laquelle on ne dispose que d'une information pour chacune des caractéristiques prises en compte.

Ainsi, pour un champ spatial donné, plus la résolution sera grande, plus il y aura de sites étudiés ; et plus l'échelle sera grande, plus la surface de papier nécessaire au tirage sera grande.

Actuellement, les systèmes d'information géographique permettent de disjoindre ces notions d'échelle, de résolution et de champ spatial. Le fait de zoomer une carte ne change rien à sa résolution ni à son niveau d'analyse, ni à son champ spatial.

Les définitions ci-dessus sont tirées de l'ouvrage « Etude des sols » (Girard et al., 2011).

Les concepts de résolution et d'échelle sont plus faciles à appréhender avec un raster* (Figure 10). Le niveau de détail (des entités/phénomènes) représenté par un raster dépend bien souvent de la taille de cellule (pixel) ou de la résolution spatiale du raster. La cellule doit être suffisamment petite pour capturer le détail requis, mais suffisamment grande pour que le stockage et l'analyse sur l'ordinateur soient efficaces. Il est possible de représenter davantage d'entités, de plus petites entités ou plus de détails dans l'étendue des entités en utilisant un raster avec une taille de cellule plus petite. Cependant, le mieux est parfois l'ennemi du bien. Des tailles de cellule plus petites produisent des jeux de données plus volumineux pour représenter une surface totale ; cela implique donc un espace de stockage plus important et, bien souvent, un temps de traitement plus long.

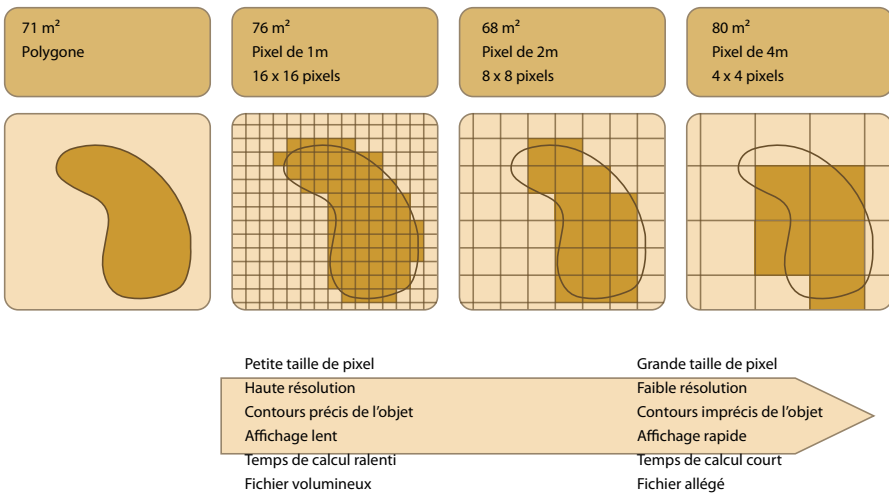


Figure 10 - comparaison entre les tailles de cellules d'un même polygone avec différentes résolutions (la surface et la forme de l'entité d'origine varie selon la résolution)

Chapitre 2 – Quelles informations existent sur les sols ?

2.1. Le Gis Sol

Pour répondre aux demandes d'informations sur les sols, les inventaires cartographiques initiés dans les années 60 ont été poursuivis à différentes échelles* et se sont structurés en un programme national unique : Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS). Ce programme est aujourd'hui piloté par le Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol).

Le Gis Sol a été créé en France en 2001. Il regroupe le Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt, le Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie, l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN).

L'objectif du Gis Sol est de constituer et de gérer un système d'information sur les sols de France, par rapport à leur distribution spatiale, leurs propriétés et l'évolution de leurs qualités. Ce système d'information sur les sols devra répondre à échéance réaliste aux besoins régionaux et nationaux, dans le contexte européen.

Les programmes du Gis Sol sont coordonnés par l'Unité de Service InfoSol de l'INRA avec différentes missions :

- réalisation ou coordination de l'acquisition des données nécessaires à la constitution d'un système d'information sur les sols de France ;
- contrôle de la qualité de ces données ;
- création et alimentation des bases de données permettant l'archivage et l'exploitation des informations ;
- gestion de l'accès aux demandeurs dans le respect des règles de la déontologie et des conventions passées avec les partenaires des programmes ;
- contribution à leur diffusion et à leur valorisation en assurant notamment l'articulation avec les bases de connaissances sur les sols et les outils d'exploitation thématique produits par les recherches de l'Institut.

2.2. Les programmes d'acquisition des données

Deux types d'informations sont capitalisés dans le cadre des programmes du Gis Sol* :

- des données d'inventaire issues du programme IGCS*, qui a été redynamisé à la création du Gis Sol. Cet inventaire permet d'identifier les différents types de sols sur un territoire donné et de caractériser leur répartition spatiale. Il s'accompagne généralement du recueil des données pérennes à l'échelle de l'Homme, acquises à différentes résolutions*

en fonction des commandes et des budgets disponibles. Outre la représentation des sols sous la forme de plages (ou de polygones sur la carte), elle est généralement associée à une base de données (format national DoneSol ou sous un autre format) ;

- des données des programmes de surveillance (RMQS*, BDAT*, BDETM) ; ils sont caractérisés par des observations, des mesures ou des évaluations continues ou répétées du sol ou de données associées, selon une planification définie et utilisant des méthodes standardisées. Les variables pédologiques classiques sont associées à des mesures de propriétés de sols présumées variables dans le temps, afin d'en déterminer les évolutions possibles. Les données issues du programme RMQS sont obtenues sur 2200 références ou sites sur lesquels un protocole d'analyse a été réalisé. Toute schématisation se fera sur la base de ces 2200 sites.

Que ce soit pour les programmes d'inventaire ou de surveillance des sols, les bases de données spatialisées sont au cœur de ces programmes.

2.2.1. Les programmes de connaissance

2.2.1.1. Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS)

Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols vise à constituer des bases de données sur les sols et leur répartition géographique, gérées au sein d'une base à structure unique "DoneSol" (Laroche *et al.*, 2014). Ce programme d'inventaire est multi-échelle et il s'appuie sur une structure de base unique et nationale : DoneSol. Cette base permet le transfert des données des échelles* les plus détaillées vers les échelles couvrant des espaces plus vastes. Les différents objectifs d'IGCS sont :

- identifier, définir et localiser les principaux types de sols d'une région ou d'un territoire, caractériser leurs propriétés présentant un intérêt pour l'agriculture et l'environnement ;
- élaborer des documents cartographiques de l'échelle parcellaire à l'échelle régionale ;
- constituer les bases de données permettant leur interrogation au sein de Systèmes d'Informations Géographiques (SIG*) ;
- produire des données de qualité, conformes aux besoins des utilisateurs ,
- évaluer les aptitudes à différents usages en précisant les risques pour aider aux décisions.

Suivant l'échelle de restitution, il comprend 3 volets :

Au 1/250 000 : le Référentiel Régional Pédologique (RRP) ou l'élaboration d'une base de données géographique régionale

Les RRP sont des bases de données géographiques régionales ou départementales, documentées et mises à jour. Leur structure permet de manipuler aisément les informations sur les sols avec des logiciels d'analyse cartographique (SIG) et de les intégrer dans des domaines d'application variés. Leur précision correspond au minimum à celle d'une représentation cartographique à 1/250 000.

L'échelle* du 250 000 est actuellement l'échelle prioritaire avec pour objectif d'obtenir une carte au 1/250 000 de la France entière. Depuis août 2016, plus de 90% du territoire est couvert à cette échelle, l'ensemble des départements étant aujourd'hui engagé dans cette démarche. L'état d'avancement est présenté en Figure 11. A ce jour, la seule information disponible sur l'ensemble du territoire est la Base de Données Géographiques des Sols de France à l'échelle 1/1 000 000.

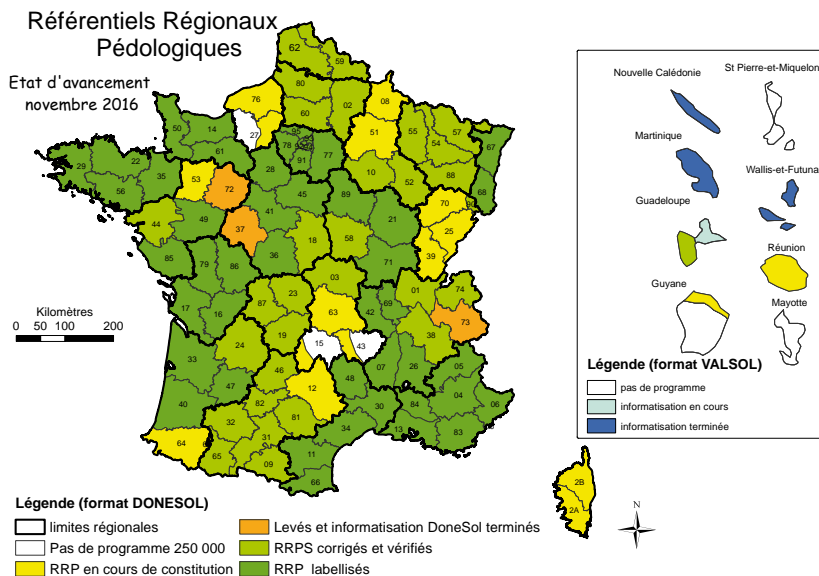


Figure 11 - État d'avancement du volet RRP (novembre 2016)

A la finalisation d'un Référentiel Régional Pédologique, un niveau de qualité peut être attribué à l'issue d'une procédure de vérification et d'expertise. Il prend la forme de 3 niveaux du plus faible au plus élevé : opérationnel, avancé, optimum. Ces niveaux sont définis dans le Cahier des Clauses Techniques Générales (InfoSol, 2014). Ce système donne une garantie de qualité aux données sols pour les usagers actuels ou futurs des bases de données. De la sorte, les utilisateurs sont à même de mieux connaître les possibilités et les limites d'utilisation des informations contenues dans la base de données.

Ces opérations de vérification ont aussi été consolidées depuis 2008 par la publication de la norme AFNOR NFX31-560 sur l'« acquisition et gestion informatique des données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols ». Le document de base utilisé pour l'établissement de cette norme a été le Cahier des Clauses Techniques Générales d'IGCS, établi par InfoSol.

Les informations spatiales sont au format vecteur*, compatible avec une représentation à 1/250 000. Les données associées sont au format national DoneSol. Ce volet s'est développé région par région avec un porteur local qui est le référent qui applique les règles de diffusion fixées localement.

Du 1/50 000 au 1/100 000 : Connaissance Pédologique de France (CPF) pour mieux connaître la diversité et la distribution des sols

Leur objectif est d'établir les lois de répartition des sols sur la base des facteurs de formation des sols : le matériau géologique, la géomorphologie, le climat, la végétation et les actions anthropiques. Le choix des zones d'étude est réalisé en fonction des problématiques scientifiques rencontrées dans les domaines agricoles et environnementaux.

La précision* des représentations cartographiques va du 1/50 000 au 1/100 000 (Figure 12). La structuration des données associées à ces cartographies est généralement sous la forme d'une base au format DoneSol. D'autres structures de base de données existent localement.

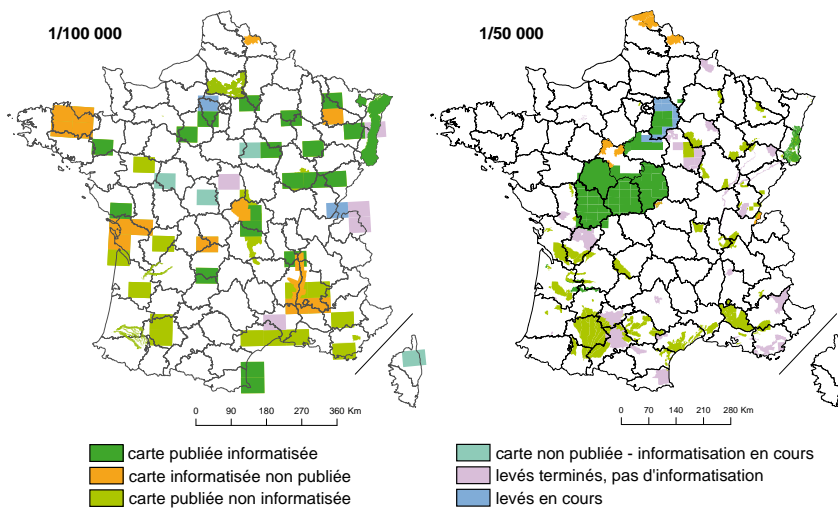


Figure 12 - Etat d'avancement du programme CPF* aux échelles 1/100 000 (carte de gauche) et 1/50 000 (carte de droite) (d'après Richer de Forges et al., 2014)

Du 1/5 000 au 1/25 000 : Les Secteurs de Référence (SR*) fournissent des références locales

Les secteurs de référence (SR*) sont des études pédologiques plus détaillées permettant de traiter des questions agricoles ou environnementales avec une meilleure précision à l'échelle locale : irrigation, drainage, aptitudes des sols, gestion de l'eau, adaptation des cépages aux terroirs... L'acquisition de références techniques sur les types de sol représentatifs d'une petite région naturelle permet de formuler des recommandations adaptées. La précision cartographique des secteurs de référence est inférieure au 1/50 000, généralement comprise entre 1/5 000 et 1/25 000.

La Figure 13 présente l'imbrication des différents volets du programme IGCS sur un territoire. Elle montre que la précision de l'information est fonction de l'échelle.

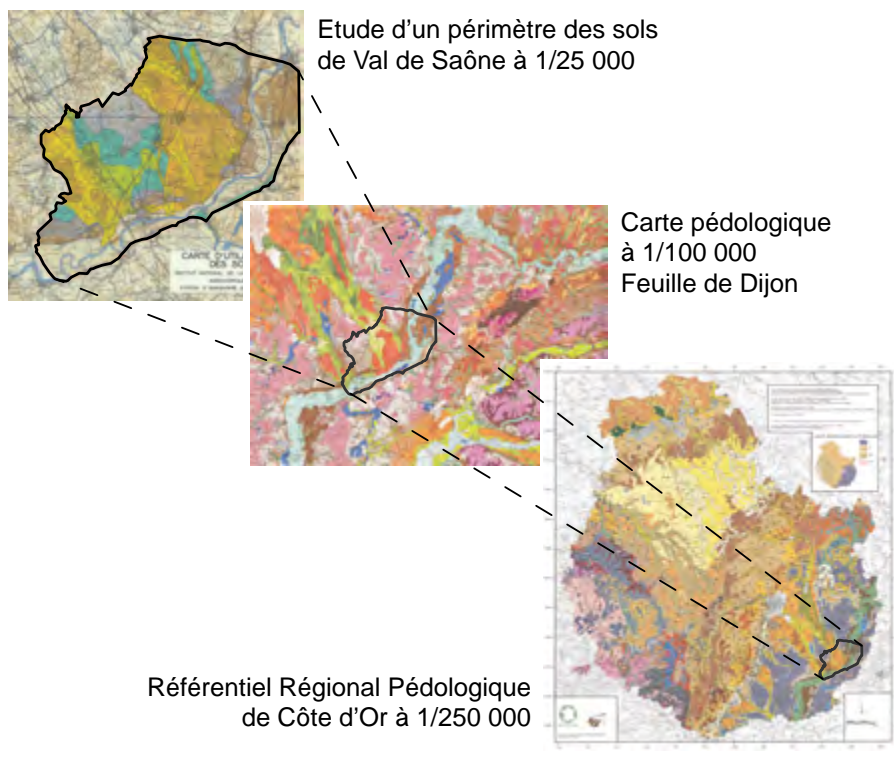


Figure 13 - Imbrication des représentations des sols en fonction de l'échelle sur un secteur du Val-de-Saône

Le programme IGCS est mené en collaboration avec de très nombreux partenaires régionaux ou départementaux. Ils disposent sur leur territoire de cette compétence et de cette expertise pour conduire les travaux. Ce sont des Chambres d'agriculture, des écoles d'agronomie ou des associations. L'ensemble des données produites est structuré et stocké suivant le format national DoneSol, et selon la norme AFNOR NF X31-560, relative à l'acquisition et à la gestion informatique de données pédologiques en cartographie des sols.

2.2.1.2. Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF)

La Base de Données Géographique des Sols de France à l'échelle* du 1/1 000 000 est une représentation simplifiée de la diversité spatiale de la couverture de sol et constitue à ce jour la seule base de données pédologiques exhaustive et homogène au niveau national.

La méthodologie utilisée pour différencier et nommer les principaux types de sol est basée sur la terminologie de la légende de la carte des sols du monde établie en 1974 par la FAO à l'échelle du 1/5 000 000. Cette terminologie est fondée sur la distinction des processus pédologiques responsables de la différenciation des sols, c'est-à-dire la

brunification, le lessivage, la podzolisation, l'hydromorphie, etc. Elle a été revue et adaptée pour prendre en compte les spécificités des paysages français.

La BDGSF* constitue un modèle, sous forme numérique, de notre compréhension et de notre connaissance du paysage pédologique (Jamagne, 1995).

2.2.2. Les programmes de surveillance

2.2.2.1. Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)

Un réseau de sites, dit « Réseau de Mesures de la Qualité des Sols » (RMQS) est mis en place sur le territoire français (Jolivet *et al.*, 2006 a et b). Ce réseau constitue un cadre national pour l'observation de l'évolution de la qualité des sols. Le réseau RMQS repose sur le suivi de 2200 sites répartis uniformément sur le territoire français, selon une maille carrée de 16 km de côté, calée sur le Réseau européen de suivi des dommages forestiers (ICP forest, placettes de niveau I). Des prélèvements d'échantillons de sols, des mesures et des observations sont effectués à périodicité régulière (environ 15 ans) au centre de chaque maille.

Il s'agit d'un échantillonnage non biaisé, représentatif de la diversité des sols et des diverses occupations (milieux agricoles, forestiers, naturels, péri-urbains et urbains).

Ce programme a été mis en place pour répondre à différents objectifs :

- établir un bilan national : le RMQS permet de disposer d'un tableau de bord de la qualité des sols et de réaliser des bilans sur l'état des sols français. Il sert de référence nationale vis-à-vis des propriétés mesurées ;
- caractériser des gradients : le RMQS permet de mettre en évidence et de cartographier des gradients de valeurs de paramètres du sol à l'échelle du territoire (GIS Sol, 2011) ;
- détecter des évolutions : à partir de la deuxième campagne de mesures, ce réseau permettra de mesurer et de suivre l'évolution des propriétés du sol ;
- constituer un support de validation : le RMQS est le seul réseau d'observation des sols couvrant la totalité du territoire national. A ce titre, il constitue une base de données d'une grande richesse qui permet, par exemple, de valider des prédictions géographiques établies à partir de modèles d'évolution ;
- créer une banque d'échantillons : la totalité des échantillons prélevés sur les sites du RMQS est archivée au Conservatoire d'Échantillons de Sols. Ce conservatoire représente une véritable banque d'échantillons constituant ainsi la « mémoire » des sols français.

Les demandes d'accès aux données issues du programme RMQS sont à transmettre à l'unité InfoSol d'Orléans (infosol@inra.fr).

2.2.2.2. Base de Données des Analyses de Terre (BDAT)

Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT*) regroupe depuis vingt ans les résultats d'analyses d'horizons de surface de sols cultivés, effectuées sur l'ensemble du territoire national, à la demande d'agriculteurs, par des laboratoires agréés par le Ministère en charge de l'agriculture (Saby *et al.*, 2014). A ce jour la BDAT* consigne plus de 23 millions de résultats analytiques provenant de 2 millions d'échantillons récoltés

sur la période 1990-2010. Les résultats analytiques sont regroupés par canton d'origine de l'échantillon et des statistiques sont calculées (moyenne, écart-type, médiane, quartiles, déciles...) pour chaque canton et chaque paramètre pédologique. L'analyse de ces données permet par exemple de mettre en évidence à l'échelle nationale une forte hétérogénéité spatiale de la richesse en phosphore assimilable, des baisses des teneurs en carbone des sols initialement les plus pourvus et d'une hausse généralisée des pH des sols non calcaires (Lemerrier *et al.*, 2006 ; Swiderski *et al.*, 2012). Les biais statistiques inhérents à la stratégie d'échantillonnage adoptée peuvent être importants et sont difficilement quantifiables. Des précautions doivent être prises pour interpréter les résultats issus d'analyses d'une telle base de données. Cependant, le programme BDAT* constitue une source d'informations importante sur la variabilité des propriétés des horizons de surface des sols cultivés et les résultats statistiques agrégés sont aujourd'hui librement disponibles sur internet à partir de l'outil de cartographie Geosol accessible sur le site du Gis Sol* (<http://estrada.orsay.inra.fr/geosol/>).

2.2.2.3. Base de Données Eléments Traces Métalliques (BDETM)

La Base de Données Eléments Traces Métalliques est issue de la collecte des analyses faites sur des échantillons de sols prélevés en surface des terrains agricoles devant recevoir des épandages de boues d'épuration. Cette disposition se fait conformément aux prescriptions de la norme AFNOR NF U 44.041, les teneurs en huit éléments traces sont ainsi déterminées (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn).

La première collecte, effectuée en 1997 et 1998, a permis de recueillir des analyses pour plus de 11 000 sites provenant principalement d'une trentaine de départements métropolitains.

Une seconde collecte s'est déroulée de novembre 2008 à janvier 2010 (Duigou *et al.*, 2011). Elle a été réalisée selon les mêmes principes que la première mais avec des moyens informatiques plus importants. Elle inclut toutes les données déjà rassemblées et traitées en 1998 et contient plus de 73 400 sites.

2.2.3. Autres programmes ou autres données

D'autres données sont disponibles sous différents formats. Les organismes forestiers par exemple disposent de données structurées : données de l'inventaire forestier (IGN - IFN), ECOPLANT, des données issues de différents réseaux RENECOFOR, BIOSOIL. Les variables peuvent être représentées sous la forme pixellisée (raster) où pour chaque pixel est associée une valeur du paramètre représenté. Ce sont typiquement les catégories de données utilisées dans le cadre du projet GlobalSoilMap, *cf.* chapitre 3.2.3.

Le Tableau 3 récapitule l'ensemble des programmes de connaissance des sols au niveau national.

Tableau 3 - Synthèse des programmes de surveillance et d'inventaire des sols menés en France

		Base graphique	Données sémantiques	Base de données	Accessibilité	Métadonnées
IGCS	Inventaire	Polygone	Données surfaciques : description des UCS, UTS, Strates. Pour chaque strate à <i>minima</i> pierrosité, taux de chaque fraction granulométrique, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique, pH eau, teneur en calcaire et texture (GEPPA, Aisne), couleur, taille des sables, dimension, nom, abondance des taches d'oxydo-réduction, effervescence, porosité, type de structure, contraintes, salure.		DonesolWeb3 (DW3), Outil d'export de DW3, Websol (à paraître), Cas par cas/propriétaire.	Réfersols, Dictionnaire D3 en ligne, Modèle D3 en ligne <i>Appicasol</i>
		Coordonnées X, Y	Données ponctuelles : environnement du profil et données synthétiques, description d'horizons, analyses (paramètres pédologiques classiques (granulométrie, PH, cations, C, N,...).		Cas par cas/propriétaire.	
BDGSF	Inventaire	Polygone	Description UCS et UTS Pas de données ponctuelles.	Format propre UCS/UTS	InfoSol signature d'une licence	Dictionnaire Envoi par <i>mail</i>
RMQS	Surveillance	Grille de points, Coordonnées X, Y	Paramètres pédologiques : pH, C, N, P ass., granulométrie, CEC, cations éch., éléments majeurs, B, Contaminants : <i>éléments traces</i> : As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Ti, Zn (extraction totale ou partielle) <i>micropolluants organiques</i> : HAP, PCB, dioxines, furanes, OCP, herbicides (sélection de sites).	Donesol	DonesolWeb3 (DW3), InfoSol	Dictionnaire RMQS Modèle D3
BDAT	Surveillance	Statistiques cantonales	Données physico-chimiques : pH, pH KCl, Calcaire total et actif, capacité d'échange, taux de saturation Données chimiques : azote, bore, carbone, cuivre, fer, magnésium, manganèse, phosphore, potassium, sodium, zinc Données granulométrique.	Table de données unique	Sur internet Gessol	PgDadi
BDTEM	Surveillance	Statistiques par région agricoles	Données brutes Cadmium, Chrome, Cuivre, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc.	Table de données unique	Internet	Envoi par <i>mail</i>

2.3. Exemples de représentations cartographiques des sols

Dans les cartes disponibles aujourd'hui, la représentation des sols se fait sous différentes formes :

2.3.1. Carte des Unités Cartographiques de Sols (ou UCS)

« Une Unité Cartographique de Sol est définie comme un morceau de la couverture pédologique*. Elle a pour but de représenter l'extension géographique d'un ou de plusieurs types de sol. De façon concrète, cela se traduit par la délimitation de plages cartographiques. Les contours de ces plages cartographiques sont décrits sous la forme de polygones dans l'ensemble « géométrique » de données qui est stocké et géré sous un Système d'Information Géographique (SIG*) » (InfoSol, 2015).

Exemples de cartes :

- carte à 1/250 000 (Référentiel Régional Pédologique) généralement accompagnée d'une notice ;
- carte pédogénétique (1/100 000 ou 1/50 000) (Figure 14) : L'organisation des sols dans la légende est fonction de leur degré d'évolution pédologique (volet CPF* du programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols, Richer de Forges *et al.*, 2014).

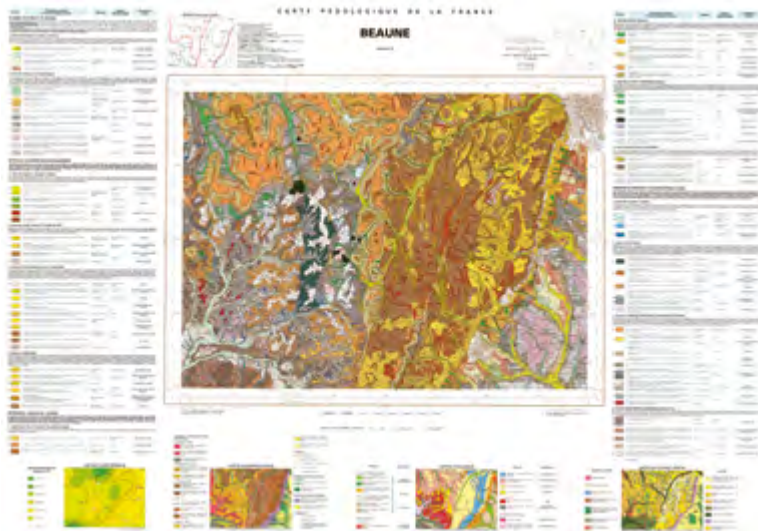


Figure 14 - Exemple de carte à 1/100 000 : Beauce (21) (Chrétien, 1995)

2.3.2. Représentation des propriétés des sols

- cartes thématiques : représentation d'une variable des unités cartographiques (le pH, les éléments grossiers, la texture, l'hydromorphie, la teneur en calcaire) ou représentation d'une variable élaborée des unités cartographiques (la Réserve Utile des sols par exemple).

- carte représentant un découpage en UCS* avec en surimposition des indicateurs des propriétés des sols (Figure 15).

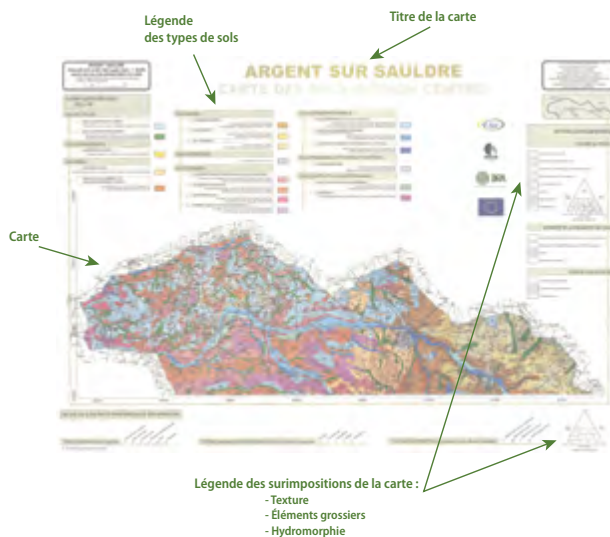



Figure 15 - Un exemple de carte : Argent sur Sauldre (Cher) (Servant et al., 2005)




REFERSOLS est un outil en ligne (<http://refersols.gissol.fr/>) qui permet la consultation des métadonnées* des études pédologiques. Il est le répertoire des études pédologiques existantes sur un secteur donné :

L'objectif principal est de porter à connaissance l'existence de ces études afin que les informations soient réutilisées dans les cas i) d'une nouvelle étude sur un même secteur ou ii) de la remobilisation des données pour une étude plus précise.

Refersols est le répertoire national des études (cartographiques ou non) de sol recensées par l'INRA.

Le bénéfice de cet outil est principalement de fournir une recherche rapide par le Web des études pédologiques disponibles sur un secteur donné. Lors de votre recherche, si une étude vous intéresse, vous devez envoyer son numéro d'étude par mail à infosol@inra.fr. Une réponse vous sera alors adressée avec des informations sur le format de l'étude (documents papier, couche graphique en shapefile, données sémantiques en format DoneSol...) et sur le propriétaire des données (à contacter pour les obtenir).



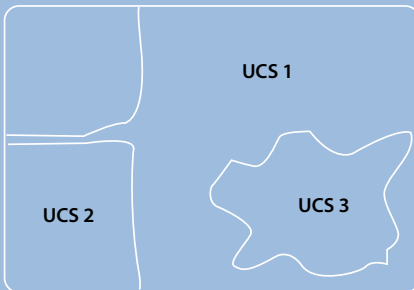
Chapitre 3 - Comment sont structurées les bases de données pédologiques ?

En fonction de la nature et de de la quantité d'information que l'on souhaite stocker, la composante sémantique peut prendre des formes différentes (Figure 16). Dans les cas les plus simples, les informations sont contenues dans une table unique d'où il est très facile d'extraire les informations. Ces bases de données sont dites «à plat». Dans d'autres cas, l'information est structurée dans une base de données relationnelle. L'information est alors éclatée entre différentes tables reliées entre elles. Il faut alors recourir à des traitements plus complexes pour extraire des informations (requêtes informatiques). De cette manière, il est possible de classer les bases de données des plus «simples» aux plus «complexes».

Base complexe : les informations sémantiques sont stockées dans une base de données à part autre que la base géographique

No_profil	No_UTS	No_UC	No_	No_	CaCo3
236	1	1	RPF	Aca	15.3
236	1	1	R	Aca	12.3
237	12	4		Sca	35.2
238	15	14		C	25.58
239	89	101		LA	12.6
238	3	3		S1	0
238	4	4		S2	
238	4	4		R	

Base à plat : les information sémantiques sont stockées dans la table attributaire de la base géographique



UCS	Pente	Surface
UCS 1	5	136.5
UCS 2	15	78.6
UCS 3	25	62.7

Figure 16 - Les différents niveaux de profondeur/complexité/organisation des bases de données sols

3.1. Bases de données à plat

Dans le cas d'une base de données à plat, la base sémantique est la table attributaire de la base graphique.

3.1.1. BDAT

La Base de Données des Analyses de Terre couvre l'ensemble du territoire métropolitain. Elle est composée d'une table unique où les individus sont des cantons et les variables des descripteurs statistiques.

3.1.2. Formats régionaux

Le format STUDER est un de ces formats régionaux, spécifique au sud de la région Centre élargie à la Haute-Vienne et la Vienne construit dans les années 1980 par Studer R. et *al.*, 1982. La représentation des sols se fait à l'échelle* du 1/50 000. A chaque polygone sont associées des informations dans une table comprenant une douzaine de champs. Ce sont essentiellement des données qualitatives : type de sol (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS), profondeur d'altération, profondeur d'apparition du substrat, texture de surface, présence et taille d'éléments grossiers, drainage, nom du matériau, géologie...), l'information est définie par un dictionnaire de données (Studer, 1982).

Des formats locaux de classification des sols ont été mis en place en Franche-Comté (Bruckert, 1989), dans l'Aisne (Jamagne, 1967) ou encore le Massif armoricain (Rivière *et al.*, 1992) avec un système de codification qui permet par simple lecture d'avoir une idée des paramètres pédologiques.

3.2. Bases de données complexes

Il existe deux types de bases de données complexes : par construction (BDGSF* et ValSol) et des bases de données dérivées d'informations existantes (GlobalSoilMap, Datamart Typterre et Webservices). Les données natives peuvent en effet être transformées (stockées différemment) en vue de la valorisation finale de la base, éventuellement au travers d'outils Web.

3.2.1. Base de Données Géographique des Sols de France

La Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF*) à l'échelle* du 1/1 000 000 est une représentation simplifiée de la diversité spatiale de la couverture de sol. Elle est la seule couche d'informations sols qui couvre l'ensemble du territoire métropolitain à ce jour.

L'inventaire qui en est fait constitue une liste d'Unités Typologiques de Sols (UTS), construit sur le même principe que la base de données DoneSol (*cf.* chapitre 3.2.4). Seules les strates ne sont pas décrites dans la BDGSF*.

Cependant, à l'échelle du 1/1 000 000, il n'est pas possible de localiser et de délimiter toutes ces UTS. Des regroupements sont donc nécessaires et définissent des

Unités Cartographiques de Sols (UCS*). Ces UCS sont des objets que l'on sait localiser dans l'espace et qui sont composés d'UTS bien identifiées.

Les UTS sont chacune décrites sous la forme de variables qualitatives caractérisant la nature et les propriétés des sols, en surface comme en profondeur : par exemples la texture, le régime hydrique, la charge en éléments grossiers, le matériau originel, etc. Un dictionnaire donne la définition de chaque occurrence de variable.

3.2.2. VALSOL

Les données pédologiques des territoires hors métropole produites par l'ORSTOM (puis l'IRD) depuis de nombreuses années sont capitalisées au sein d'une base de données appelée VALSOL. Les modèles conceptuels et physiques de VALSOL diffèrent de ceux de DoneSol par la spécificité des données liée aux milieux tropicaux et de leur organisation (Beaudou et Le Martret, 2004). Ainsi, la structure de VALSOL est basée sur un découpage :

- en informations localisées, caractérisées par des données de profils, segments, paysages et grands paysages ; ce sont des objets observés et spatialement localisés, ponctuels ou linéaires ;
- en informations cartographiques, caractérisées par des unités de segments, de paysages et de grands paysages ; ces unités «surfaiques» représentent la variabilité spatiale d'un ensemble de sols et de ses composantes.

3.2.3. Format GlobalSoilMap

Le projet GlobalSoilMap vise à produire à terme une base de données numérisée harmonisée et mondiale de quelques propriétés des sols. La prédiction de ces propriétés à des profondeurs, définies par les spécifications du projet, est faite en utilisant la fonction « Spline » pour transformer des données recueillies par horizon ou par couche de profondeurs connues en un profil continu modélisant la distribution de la propriété en fonction de la profondeur.

La représentation se fait sous la forme d'une carte au format raster*, avec pour chaque pixel une information sur un paramètre pédologique associée à une incertitude* d'estimation de ce même paramètre (Hempel *et al.*, 2013 ; Lagacherie *et al.*, 2013).

3.2.4. Format DONESOL

Les objets figurés dans la base géographique sont décrits dans la base sémantique, le lien se faisant par le numéro d'Unité Cartographique de Sol. La base sémantique est gérée au sein d'un Système de Gestion de Base de Données Relationnelle. La spécificité de la couverture pédologique* a conduit à concevoir un modèle de données original dénommé DoneSol (Grolleau *et al.*, 2004).

Dès 1987, l'INRA (sur les Centres de Grignon, Montpellier, Orléans, Versailles) a entrepris de structurer l'information pédologique à l'aide du formalisme entités-associations, dans un socle commun qui prendra le nom de « DoneSol ». Cet outil a été conçu en s'appuyant sur un Système de Gestion de Base de Données Relationnelle et un Système d'Information Géographique afin de gérer et de stocker toutes les informations liées aux cartes par un modèle commun de données pédologiques.

Le modèle de données DoneSol (Figure 17) permet ainsi de stocker, en un endroit unique et de façon harmonisée, l'ensemble des informations pédologiques d'un territoire (Dictionnaire DoneSol).

Cette structure unique et multi-échelle permet de stocker toutes les informations relatives au sol. Elle est conforme à la norme NF X31-560 qui fixe les règles de l'acquisition et la gestion informatique de données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols.

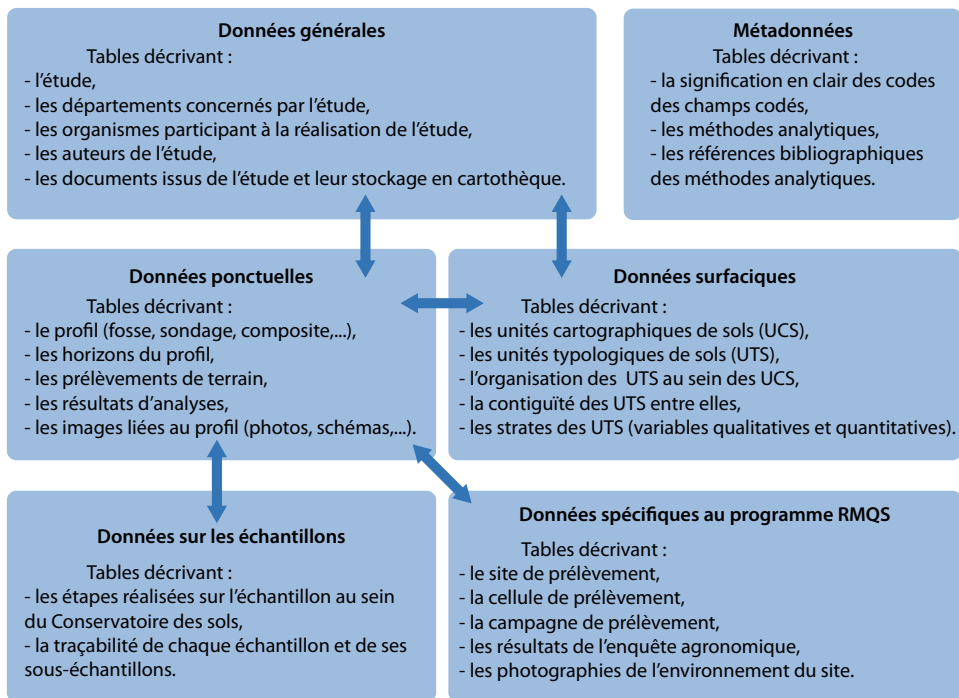


Figure 17 - Structuration générale de la base DoneSol 3 (INRA, Unité InfoSol, 2015)

Les informations contenues dans DoneSol sont de 2 types dont l'utilisation sera différente :

- les données ponctuelles :

L'inventaire des sols repose principalement sur l'observation des sols sur le terrain. Cette observation s'effectue sous la forme de sondages à la tarière ou de fosses pédologiques appelées aussi profils de sol. Ces observations, dites ponctuelles, sont localisables par leurs coordonnées géographiques (longitude, latitude).

Ces observations ponctuelles permettent ainsi d'étudier la succession des horizons qui forment le sol depuis la surface jusqu'au matériau parental ou au substrat. Une description détaillée de ces horizons (limites, paramètres physiques, etc.), ainsi que les résultats d'analyses des échantillons prélevés dans ces horizons, vont permettre de

définir les processus de formation du sol (lessivage, podzolisation, etc.), souvent utilisés ensuite pour les classer dans une nomenclature donnée.

Les données ponctuelles décrites dans DoneSol sont les profils, les horizons, les analyses, et les photographies.

- les données surfaciques :

Ces données sont issues de la synthèse des observations des sols (données ponctuelles) et du paysage faite par le pédologue cartographe. Elles se composent des Unités Cartographiques de Sol, des Unités Typologiques de Sol et des strates (Figure 18).

Une **Unité Cartographique de Sol (UCS)** est définie comme un morceau de la couverture pédologique*. Elle a pour but de représenter l'extension géographique d'un ou de plusieurs types de sol. Elle constitue donc le regroupement d'une ou de plusieurs Unités Typologiques de Sol (UTS*) de façon à pouvoir en faire une représentation cartographique à une échelle* donnée. Au 1/250 000ème, les UCS sont assimilées aux **pédopaysages*** qui sont une portion de l'espace où les facteurs de la pédogénèse (géologie, relief, végétation, climat) sont homogènes.

L'**Unité Typologique de Sol (UTS)** représente une portion de la couverture pédologique* qui présente les caractères diagnostiques d'une pédogenèse identique et qui présente en tout lieu de l'espace la même succession d'horizons*, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être absent.

La **strate*** représente, quant à elle, la variation dans l'espace d'un horizon, ou d'une couche issue d'un horizon ou d'un regroupement de plusieurs horizons (lorsque ceux-ci présentent entre eux des variations très faibles de leurs caractéristiques). La variabilité des propriétés physico-chimiques est exprimée dans chaque strate par des valeurs minimale, maximale et modale pour les données quantitatives et par des valeurs de mode principal, secondaire et mineur pour les données qualitatives. Une strate est affiliée à une seule et unique UTS.

La carte des sols se traduit par la délimitation de plages cartographiques, les UCS. Les contours de ces plages cartographiques sont décrits sous la forme de polygones, stockés et gérés sous un SIG*. Ces UCS sont des objets que l'on sait localiser dans l'espace et qui sont composés d'une ou plusieurs UTS bien identifiées. Ces UTS ne sont pas délimitées géographiquement aux échelles petites et moyennes. Dans ce cas, on parle d'UCS complexes, contenant plusieurs UTS. Pour des cartographies à grandes échelles, on pourra délimiter des UCS où une seule UTS est présente. Dans ce dernier cas, on parlera d'UCS pures.

Lorsque l'UCS est complexe, constituée de plusieurs UTS, il faut alors décrire leur mode d'organisation spatiale (chaîne, séquence, juxtaposition de sols) ainsi que le pourcentage de surface relatif de chaque UTS au sein de l'UCS (Figure 18), en s'appuyant sur les éléments descriptifs du milieu comme la géologie, la géomorphologie ou l'occupation du sol qui permettent de définir de grandes lois de distribution des sols au sein des pédopaysages*. Ces informations sont renseignées dans les tables de liaison L_UCS_UTS et L_UTS de DoneSol (Figure 19).

La connaissance de l'organisation des UTS au sein des UCS peut être valorisée pour établir des clés d'identification des sols qui accompagnent ces typologies*. Ces clés peuvent être traduites par des méthodes de cartographie numérique ou par une prospection complémentaire orientée qui peuvent conduire à spatialiser les UTS au sein des UCS.

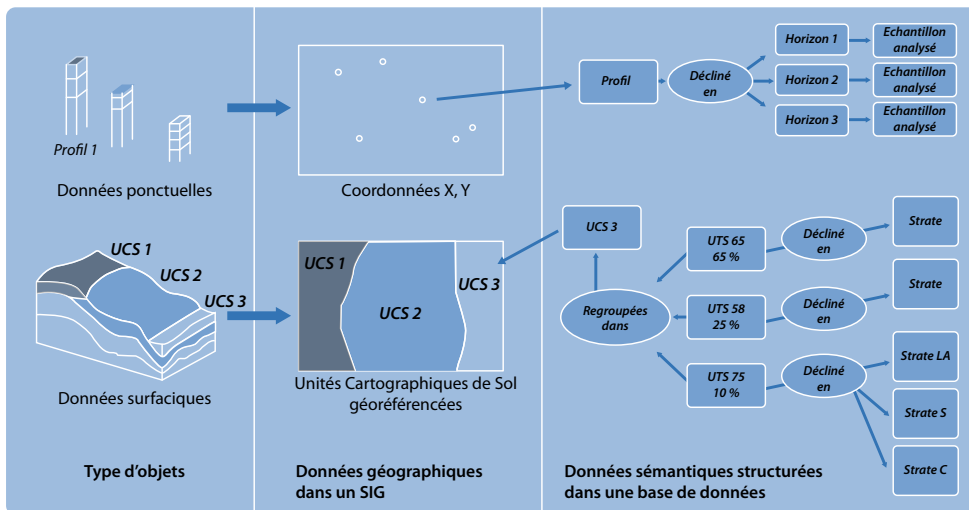


Figure 18 - Organisation des principaux objets pédologiques (UCS, UTS, strates, profils et horizons) dans le système d'information pédologique (SIG + DoneSol)

Les sols observés ponctuellement et qui présentent des caractéristiques pédologiques similaires et de même intensité sont alors considérés comme appartenant à la même UTS. La localisation de ces observations ponctuelles va permettre de définir l'extension spatiale de l'UTS, alors que l'analyse des caractéristiques des sols observés fournira des informations sur la variabilité des paramètres pédologiques des strates qui la composent.

Les strates renseignent sur la variabilité des paramètres pédologiques. Elles sont numérotées de 1 à n depuis la surface, et identifiées par un horizon diagnostique (informations dans la table STRATE) (Figure 19). Les variables sont issues de la description morphologique des sols et des analyses physico-chimiques, et sont de nature qualitative, ou quantitative :

- variables quantitatives (table STRATE_QUANT) : pierrosité (%), granulométrie, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique, pH eau, teneur en calcaire... Les valeurs minimale, modale et maximale des variables sont renseignées. Les valeurs extrêmes donnent la fourchette de variations au sein de la strate. La valeur modale est issue soit d'un calcul mathématique, soit de dire d'experts ;

- variables qualitatives (table STRATE_QUAL : classe de texture, couleur, taille des sables, nature des éléments grossiers, abondance des taches d'oxydo-réduction, effervescence, type de structure, porosité... Pour une variable donnée, les valeurs sont exprimées en modes principal, secondaire et mineur, en fonction de leur fréquence d'observation.

- 1 UCS peut être composée de 1 ou plusieurs UTS;
- La table L_UCS_UTS permet de connaître pour chaque UTS leur % surfacique au sein des UCS
- 1 UTS peut être rattachée à 1 ou plusieurs UCS
- 1 UTS est caractérisée/décrite par 1 ou plusieurs strates
- 1 Strate appartient à 1 seule et unique UTS

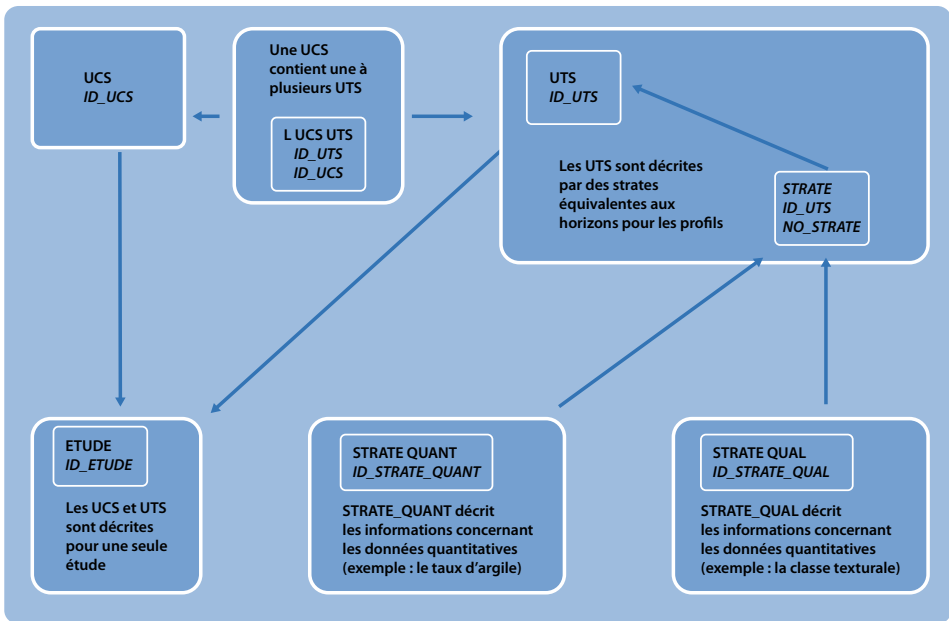


Figure 19 - Liens entre les différentes tables de DoneSol qui caractérisent les données surfaciques

3.3. Outils de transformation et de diffusion des données

Certains outils ont été développés afin de permettre un accès simplifié à des données issues de BDD profondes.

3.3.1. Datamart

Le DataMart est un ensemble de données ciblées, organisées, regroupées et agrégées pour répondre à un besoin spécifique d'un métier ou d'un domaine donné. Il est donc destiné à être interrogé sur un panel de données restreint à son domaine fonctionnel, selon des paramètres qui auront été définis à l'avance lors de sa conception . Concrètement c'est la transformation d'une base de données relationnelle en une base de données simple dite dimensionnelle (une ou plusieurs dimension ou axes d'analyse), facilement exploitable et requêtable.

3.3.2. Webservices

Les webservices (ou services web) permettent à des applications de dialoguer à distance *via* Internet, en s'appuyant sur un ensemble de protocoles Internet très répandus (XML, HTTP). Ce dialogue est basé sur le principe de demandes et réponses, effectuées avec des messages XML.

Les services web sont décrits par des documents WSDL (Web Service Description Language), qui précisent les méthodes pouvant être invoquées, leurs signatures et les points d'accès du service (URL, port).

Les services web sont accessibles *via* SOAP (Simple Object Access Protocol), la requête et les réponses sont des messages XML transportés sur HTTP.

Chapitre 4 - Valorisation des données pédologiques au format DoneSol

Dans cette partie, seules les bases de données au format DoneSol sont considérées.

La valorisation des bases de données pédologiques permet d'apporter des réponses à des questions qui se posent dans le cadre de thématiques variées. Cela nécessite de mettre en œuvre des traitements de complexités variables, des plus simples (extraction d'un paramètre de la base) aux plus élaborés (combinaison de données de natures différentes, modélisation).

Ces traitements relèvent notamment de l'analyse spatiale et font appel aux Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ces logiciels permettent de superposer les données géographiques et de réaliser des opérations logiques, algébriques ou géométriques.

Le premier paragraphe de ce chapitre apporte quelques éléments généraux sur les SIG, indispensables à la compréhension de la suite. Le second paragraphe liste les questions à se poser lorsque les données sols doivent être mobilisées, pour aider à faire les choix techniques en fonction du résultat attendu et des moyens mobilisables. Enfin, une série d'exemples de cartes thématiques produites dans différentes régions dans des domaines variés est proposée sous forme de fiches.

4.1. Notions élémentaires de SIG

Un SIG est un outil informatique de gestion de données spatialisées (localisées géographiquement). Ces données sont les entités de base d'un SIG et représentent l'espace géographique selon trois composantes caractéristiques :

- une composante géométrique : morphologie de l'entité géographique (point, ligne, polygone, pixel*) et localisation dans l'espace ;
- une composante topologique : définitions des relations spatiales avec les entités géographiques voisines ;
- une composante sémantique : propriétés et attributs de la donnée (nom, caractéristiques...).

Au sein du SIG, ces composantes se visualisent concrètement à travers les objets géographiques pour les composantes géométriques et topologiques, et les tables attributaires associées pour la composante sémantique. Sous DoneSol, le lien entre la composante géographique et la composante sémantique se fait par le champ NO_UCS, qui est le numéro d'identification des UCS.

4.1.1. La localisation géographique

Afin de pouvoir être représentées dans l'espace, les données doivent posséder une composante géographique (Figure 20). Lors de la création des données, un référentiel géographique, également appelé «système de coordonnées», est renseigné afin de localiser ces données. On parle de géolocalisation des données géographiques. La géolocalisation dans un référentiel standard permet la superposition et l'analyse croisée des données de nature et d'origine diverses.

En France, le référentiel en vigueur est le RGF93 - Lambert 93. D'autres référentiels existent, notamment le WGS84 (World Geodetic System) qui est utilisé par les récepteurs GPS permettant de faire des relevés de position sur le terrain. Il est à noter que les SIG permettent actuellement de croiser des données référencées dans des systèmes de projections différents. Lors de l'analyse spatiale, l'opérateur opte pour un référentiel et un système donnés. Si nécessaire, il procède à une projection des données.

Pour en savoir plus sur le référencement géographique : <http://www.portailsig.org/content/qui-est-ce-qui-un-georeferencement>

4.1.2. Les formats de stockage de données

En fonction de la nature de la donnée, différents formats de stockage existent.

4.1.2.1. Les données tabulaires (tables)

Si la donnée ne possède pas de composante spatiale (Figure 20), il s'agit d'une information sémantique sous forme d'une table constituée de champs (colonnes) et d'enregistrements (lignes) qui peuvent contenir des informations quantitatives (nombres entiers ou décimaux) ou qualitatives (texte).

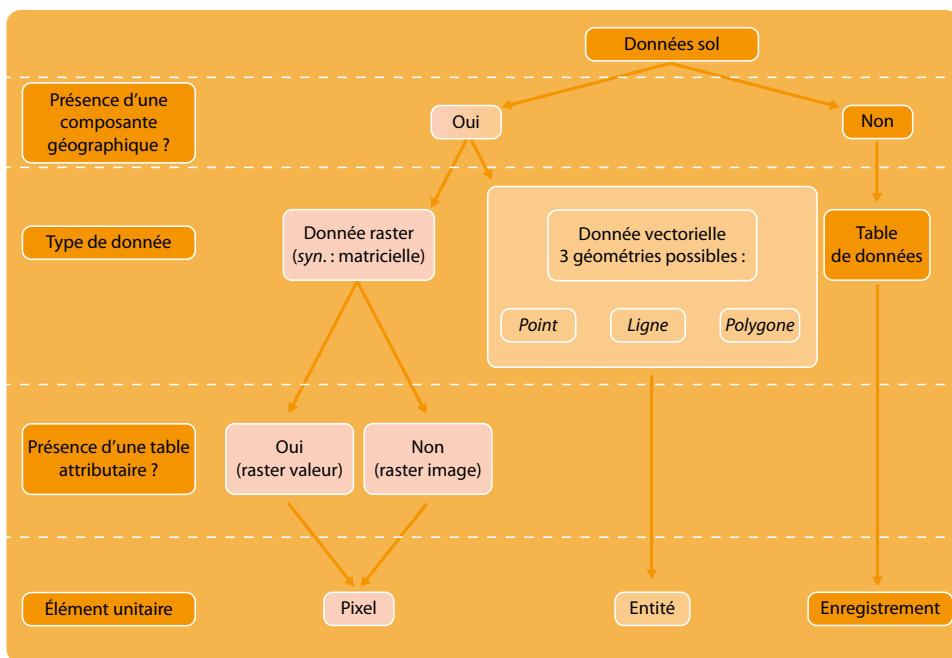


Figure 20 - Les types de données sol couramment utilisés en SIG

4.1.2.2. Format vectoriel (vecteur)

La réalité est modélisée par des objets géométriques simples : des points, des lignes ou des polygones (Figure 20). A chaque ligne de la table attributaire (la composante sémantique) correspond un objet géométrique (un jalon, une parcelle, une haie...) ce qui permet de renseigner les propriétés de l'objet (sa surface, sa nature, sa couleur, etc.). Ce format est utilisé notamment pour représenter des entités discrètes et marquer des effets de frontière comme des bâtiments, un réseau hydrographique, des parcelles ou des unités cartographiques de sol par exemple.

Tous les enregistrements d'un même lot de données (ou couche d'information) sont de même nature : polygones, polylignes ou points. Cela implique, à titre d'exemple, que des parcelles, des sondages et des haies devront être décrits dans 3 couches géographiques distinctes.

Le format de fichier le plus utilisé pour les données vectorielles est le fichier de formes ou Shapefile (extension de fichier .SHP) (©ESRI).

A noter que la tendance générale, est depuis quelques années déjà, l'utilisation des bases de données géographiques libres ou propriétaires (©Postgis, ©ESRI, ©Oracle spatial...).

4.1.2.3. Format matriciel (raster*, raster image)

La réalité est modélisée sous la forme d'une grille de cellules régulières (pixels*), géoréférencées, auxquelles une valeur du phénomène représenté peut être attachée. Ce format est utilisé surtout pour les phénomènes dont la variation sur une zone est continue, tels que l'altitude, la pluviométrie..., ainsi qu'en imagerie (photographie, télédétection).

En mode raster, la taille des cellules détermine la résolution* des phénomènes représentés. Ainsi, la résolution est d'autant plus faible que la taille est des cellules/pixels est importante.

Si le fichier ne possède pas de table attributaire, on parle de «raster image». Les possibilités de traitement sont alors limitées et le fichier sert essentiellement de fond de carte. Il nécessitera une interprétation de type experte pour être utilisé. Il s'agit notamment des photographies aériennes et des scan25® diffusés en France par l'IGN.

Les formats de fichier les plus utilisés (pour les raster images) sont ceux qui sont générés par les capteurs d'appareils photo ou de satellites : TIFF, JPEG, etc.

4.1.2.4. Approche comparative vecteur/raster

Le choix de travailler en mode raster ou vecteur est généralement raisonné en fonction de la variable qui est représentée (Figure 21) :

- si la variable est discrète, c'est-à-dire discontinue dans l'espace avec notamment des frontières bien marquées, on privilégiera les vecteurs. C'est le cas de l'occupation des

sols, des limites administratives, des réseaux, des unités pédologiques, des sondages...

- si la variable est continue, c'est-à-dire présentant un gradient dans l'espace, on optera pour les rasters. C'est le cas des propriétés physiques telles que la température ou le relief qui présentent de fortes variations spatiales.

Il est possible de passer d'un format à l'autre grâce aux outils SIG. Le procédé de conversion de données vectorielles en données matricielles (raster) est la rasterisation, et celui qui permet de passer de données matricielles à des données vectorielles est la vectorisation (Figure 22). Ces opérations sont parfois indispensables en analyse spatiale et permettent de croiser des informations de même format.

Rasters	Vecteurs
	
Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> Adaptés aux grandes surfaces Adaptés aux variables continues Adaptés aux traitements automatisés et à la modélisation Produits par des capteurs aéroportés ou satellitaires, ou issus de rasterisation 	<ul style="list-style-type: none"> Adaptés aux variables discrètes Marquent les effets de frontière Adaptés à l'analyse topologique Adaptés aux données ponctuelles, linéaires ou surfacique Taille du fichier réduite
Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> Précision* dépendante de la résolution Taille importante des fichiers en haute résolution 	<ul style="list-style-type: none"> Temps de délimitation

Figure 21 - Comparaison des formats raster et vecteur pour des objets caractérisés par une position, un linéaire ou une superficie (source image : <http://www.notre-planete.info/terre/outils/medias/vecteur.png>)

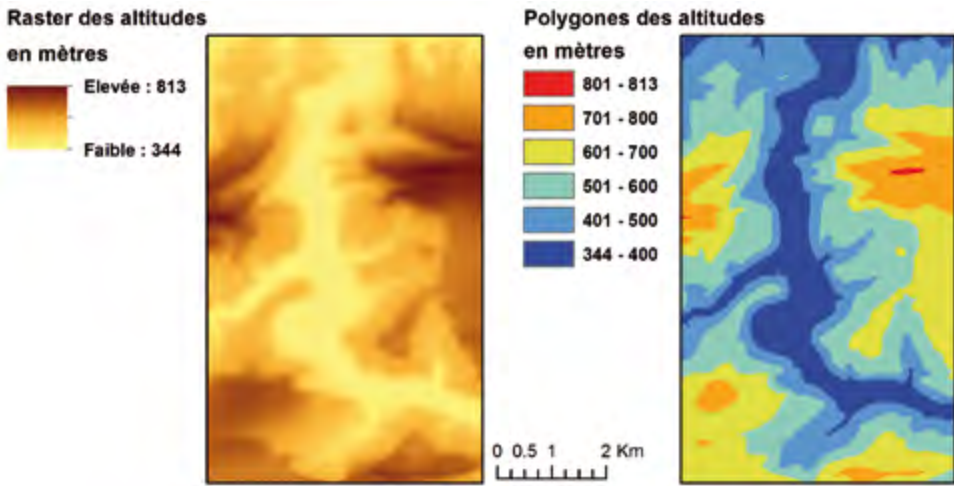


Figure 22 - Représentation d'une même information sous forme d'une couche de données continues (raster des altitudes à gauche) et sa transformation en données discontinues (polygones des classes d'altitudes à droite)

4.1.3. Comment cartographier des données sémantiques ?

Les données sémantiques (qualitatives ou quantitatives), qui correspondent aux attributs des données géographiques (ponctuelles, linéaires ou surfaciques), peuvent être visualisées sous forme de cartes.

La représentation cartographique des données sémantiques peut s'opérer de deux manières (Figure 23) :

- si les données contiennent des coordonnées XY, il est possible de créer les points correspondant à l'emplacement des coordonnées ;
- si les données sémantiques sont associés à un jeu de données géographiques (points, lignes ou polygones, fichiers SIG) par l'intermédiaire d'un identifiant commun, le lien entre les deux informations peut être fait par le biais d'une jointure attributaire. Il peut s'agir par exemple d'un code postal, d'un numéro de parcelle ou encore d'un numéro de point. Cet identifiant doit être contenu dans les deux fichiers dans des formats identiques.

A - Utilisation des coordonnées géographiques

Commune	X	Y
Sondage 1	651 900	6 862 400
Sondage 2	829 900	6 247 100
Sondage 3	843 100	6 519 400
Sondage 4	574 200	6 279 600
Sondage 5	1 044 00	6 298 500
Sondage 6	355 500	6 689 600
Sondage 7	1 050 400	6 840 900

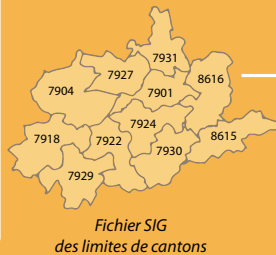


B - Jointure à un fichier SIG

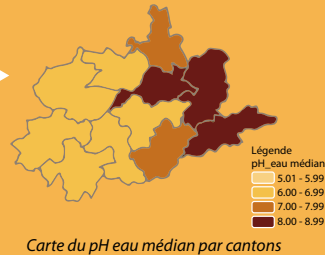
Identifiant commun (code du canton)

Code Canton	pH eau médian
7901	8.00
7904	6.13
8615	8.01
8616	8.12
7918	6.13
7922	6.28
7924	6.77
7927	6.54
7929	6.03
7930	7.11
7931	7.80

Table contenant
les données de pH



Fichier SIG
des limites de cantons



Légende
pH_eau médian

5.01 - 5.99
6.00 - 6.99
7.00 - 7.99
8.00 - 8.99

Carte du pH eau médian par cantons

Figure 23 - Comment cartographier des données sémantiques ? (les données de la partie B proviennent de la BDAT*)

4.1.4. Quelques règles sur le langage cartographique

Une carte est une représentation géométrique, plane, réduite et simplifiée de phénomènes localisables dans l'espace. Vectrice d'informations, elle a pour objectif de délivrer un message. Le cartographe construit ainsi sa carte en gardant à l'esprit la nécessité d'être compris par son lecteur. En amont, une phase de réflexion permet d'optimiser la qualité du message à délivrer à travers le document cartographique : définir les besoins, sélectionner les données, choix des méthodes pour les traiter et pour les restituer, etc. Ces étapes de réflexion sont détaillées dans le chapitre 4.2. Au moment de la conception de la carte, le cartographe utilise un langage spécifique et standard, dit langage cartographique ou sémiologie graphique. Cette dernière est l'ensemble des règles permettant l'utilisation d'un système graphique de signes pour la transmission d'une ou plusieurs informations. Le respect de ce langage conventionnel s'appuie d'une part sur des concepts issus des travaux de Bertin (1967) et relève de l'expertise cartographique, d'autre part. Cependant, cela n'est rarement ou jamais intégré dans les outils courants de cartographie (Rouleau, 1991 ; Bliin et Bord, 1993 ; Béguin et Pumain, 1994 ; Poidevin, 1999). Une carte doit pouvoir fournir au lecteur les réponses aux questions suivantes : quel est le phénomène représenté ? comment se répartit-il dans l'espace ? où ? et pourquoi ? suivant quels facteurs ? L'efficacité d'une carte est maximale si le lecteur obtient les réponses à ces questions. La carte répond à des objectifs et est un moyen de communication. Elle doit impérativement comporter :

- un titre précis : où, quand, quoi ? ;
- une légende précise et structurée : tout figuré a une signification et doit être expliqué en légende ;

- l'échelle : l'échelle graphique (barre d'échelle) reste indispensable. En effet, dans le cas où la taille du document cartographique est modifiée, la barre d'échelle sera elle-même aussi modifiée. Le rapport d'échelle sera conservé.
- l'orientation de la carte (rose des vents ou simple flèche nord) ;
- la source des données, l'auteur et la date de conception de la carte.

En sémiologie graphique, il existe des règles de représentation des données géographiques, selon que les phénomènes représentés soient des objets ponctuels, linéaires ou zonaux (surficiels) et la nature de l'information. Les données à cartographier peuvent être de nature qualitative, ordonnée, quantitative. A chaque type d'information correspond un type de figuré, auquel peuvent être appliquées des variables dites « visuelles » pour optimiser le rendu et le message cartographique : taille, forme, valeur, grain, orientation ou couleur des figurés (Bertin, 1967).

A titre d'exemple, pour une carte des sols, les données géographiques représentées sont de nature qualitative (type de sol) en implantation zonale (surficiel, les UCS). Les variables visuelles des figurés pour représenter les différentes UCS peuvent être utilisées individuellement ou en association. La variation de couleur permet de différencier chaque UCS, avec éventuellement des variations d'intensité d'une couleur pour hiérarchiser l'information (carte de teneurs en argile, avec un dégradé de marron, du plus clair (moins argileux) au plus foncé (fortement argileux)). Changer de forme d'un figuré surficiel sous-entend modifier la trame, c'est-à-dire l'intérieur de l'objet. Les UCS peuvent être différenciés par des trames hachurées, ou contenant des points, cercles, tirets, triangles... et ce, en association avec des variations de couleurs.

La cartographie assistée par ordinateur permet au cartographe de combiner de multiples informations sur sa carte. Cependant, le message transmis doit être net et concis. La carte doit rester lisible pour être efficace.

Pour en savoir plus :

WEGER G. 1999. Cartographie Volume 1 : sémiologie graphique et conception cartographique. Bibliothèque de ressources pédagogiques de l'ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques).

Disponible sur : <http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=47>

STRAUCH G.-A. date nc. Sémiologie graphique : pour le respect des règles élémentaires de la cartographie.

Disponible sur : www.uel.br/cce/geo/didatico/omar/semiologie_graphique.pdf

4.2. Optimiser la valorisation des bases de données sol

Lorsque des données sols sont mobilisées pour apporter une réponse à une problématique donnée, il est nécessaire de mener une réflexion pour optimiser leurs utilisations. En effet, des choix méthodologiques doivent être faits, en tenant compte de l'expertise pédologique nécessaire et des moyens techniques et humains disponibles. Ces choix se font à plusieurs niveaux : en amont du traitement des données (étape de définition des besoins), lors du traitement des données et à la restitution des données.

Cette partie est construite autour de ces trois étapes, sous forme de questions pour chacune. Des éléments de réflexion pour répondre à ces questions sont apportés dans les paragraphes suivants. Les fiches d'étude de cas qui suivent complètent cette partie en apportant des réponses concrètes.

4.2.1. En amont : définition des besoins

Cette étape nécessite une connaissance préalable de la base de données, et la reformulation du questionnement initial, pour identifier ce qui est attendu en termes de propriétés des sols, d'échelle* et de format de restitution.

Questions à se poser pour optimiser la valorisation des bases de données sol :

- **Etape 1 (en amont) : définition des besoins**
 - Quelle(s) propriété(s) des sols est (sont) à estimer / à représenter ?
 - Quelles UTS sont concernées par le traitement (la totalité, une sélection seulement) ?
 - Quelle sera l'échelle* de représentation ?
 - Quel format choisir pour la restitution des résultats ?
- **Etape 2 : traitement des données**
 - Quelle(s) information(s) pédologique(s) extraire et où la (les) trouver dans la base de données ?
 - Comment combiner les informations pédologiques entre elles ?
 - Quelle(s) méthode(s) d'agrégation des données au niveau des UCS envisagées ?
 - Comment combiner les informations pédologiques avec des données non pédologiques ?
- **Etape 3 : restitution des résultats**
 - Comment restituer la variabilité autour des valeurs proposées ?
 - Eléments de discussion : quelle est la validité des résultats ? Est-il possible de les confronter à une expertise ?

4.2.1.1. Quelle(s) propriété(s) des sols est (sont) à estimer / à représenter ?

La réponse à cette question conditionne la façon d'extraire les informations de la base de données et de les combiner entre elles et/ou avec des données non pédologiques. Il s'agit d'identifier le niveau de complexité requis pour aboutir au résultat souhaité.

Les propriétés des sols à estimer pourront être des propriétés primaires ou fonctionnelles.

Les propriétés primaires : ce sont celles qui sont directement mesurables sur le terrain ou au laboratoire, et que l'on peut mobiliser dans un second temps pour élaborer des propriétés fonctionnelles, ou secondaires. Elles sont renseignées dans DoneSol.

Les propriétés fonctionnelles (ou secondaires) : non présentes dans DoneSol, elles renseignent sur le fonctionnement des sols (régime hydrique, vulnérabilité à l'érosion...) et résultent de la combinaison de propriétés primaires des sols *via* des indicateurs, des fonctions de pédotransfert* ou des modèles.

L'estimation de propriétés fonctionnelles des sols est fréquemment demandée par les utilisateurs finaux de données sol. La majorité des propriétés fonctionnelles des

sols sont difficilement observables ou mesurables sur de larges territoires et à différentes profondeurs en raison de contraintes temporelles, techniques et économiques évidentes. Pourtant, avoir une estimation de propriétés notamment physiques des sols est un préalable indispensable à de nombreuses applications thématiques, comme le calcul de la réserve utile ou la réalisation de bilans hydriques pour gérer au mieux la ressource en eau en agriculture et s'adapter au changement climatique, ou l'estimation de stocks d'éléments dans les sols pour estimer des ressources ou des risques de transfert vers les eaux superficielles ou souterraines de substances potentiellement polluantes.

Pour remédier à ce manque d'information, il s'agit de « traduire les données dont nous disposons en données dont nous avons besoin ». Des relations statistiques peuvent être établies entre une propriété ou un comportement du sol à estimer et d'autres caractéristiques du sol aisément observables sur le terrain ou disponibles dans les bases de données existantes. Les outils et modèles qui en découlent sont des Fonctions de Pédotransfert* (FPT*) (Al Majou *et al.*, 2007). Les FPT* peuvent décrire de façon continue (FPTC) la relation pouvant exister entre certaines caractéristiques du sol (composition granulométrique, teneur en carbone organique, pH...) et ses propriétés de rétention en eau. D'autres outils, les règles de Pédotransfert (CFPT), font appel à l'expertise en donnant une estimation des propriétés après avoir regroupé et classé les sols selon leurs caractéristiques (classes texturales par exemple).

Voici deux exemples de propriétés fonctionnelles estimées à partir de fonctions de pédotransfert :

réserve utile en eau (définie pour le Massif armoricain par Walter et al., 1992) :

$$RU_{\text{horizon}} \text{ (mm/cm de sol)} = 0,1 \times (\% \text{argile}/9,5 + \% \text{MO}/2,8 + \% \text{Limons fins}/1,8 + \% \text{limons grossiers}/4,45)$$

$$RU_{\text{horizon}} \text{ (mm)} = RU_{\text{strate}} \text{ (mm/cm de sol)} \times \text{épaisseur (cm)} \times (100 - \% \text{éléments grossiers})/100$$

$$RU_{\text{profil}} \text{ (mm)} = \sum_{i=1}^n RU_{\text{strate } i} \text{ (mm)}$$

Indice de battance (Rémy et Marin-Lafèche, 1974) :

$$IB = (1.5 * \text{Limons fins} + 0.75 * \text{Limons grossiers}) / (\text{Argile} + 10 * \text{Matière organique})$$

[- 0.2 (pH - 7) si pH > 7]

Il est indispensable de prêter attention au domaine de validité des règles et fonctions de pédotransfert*. Comme tout modèle construit à partir de régressions mathématiques, ces FPT* ne peuvent être utilisées sans précaution en dehors des conditions pédo-climatiques dans lesquelles elles ont été construites. Il est alors essentiel de se reporter aux documents de références de ces outils.

Les propriétés des sols que l'on cherche à estimer seront soit directement extraites de DoneSol (propriétés primaires), soit elles devront être estimées à partir de règles ou fonctions de pédo-transfert (propriétés fonctionnelles) appliquées à des propriétés primaires.

4.2.1.2. Quelles UTS sont concernées par le traitement ?

Le traitement peut s'appliquer à l'ensemble ou à une sélection d'UTS présentes sur la zone d'étude. Suivant les spécificités de la commande : restriction géographique (comme un bassin versant*), ou sur une catégorie de types de sols (ex : LUVISOL), l'opérateur peut circonscrire son travail à un sous-ensemble d'UTS qu'il juge pertinent. Une sélection des UTS sera alors effectuée à partir des critères souhaités et le traitement se fera uniquement sur celles-ci.

La structure des bases de données sol permet de restreindre les UTS* sur lesquelles portera le traitement pour rendre les résultats plus pertinents.

4.2.1.3. Quel format choisir pour la restitution des résultats ?

Une représentation cartographique n'est pas forcément nécessaire, l'élaboration d'une typologie* non spatialisée peut suffire, par exemple dans le cas de la production de références pour l'élaboration de conseils. La connaissance des sols n'est pas spatialisée de manière précise ; elle est organisée sous forme d'un référentiel des principaux types de sol du territoire, décrivant au minimum leurs caractéristiques morphologiques et analytiques (texture, propriétés chimiques, etc.), ainsi que leurs lois de répartition dans le paysage (voir le guide méthodologique «Connaître les sols pour préserver la ressource en eau» <https://www.gissol.fr/publications/guide-bv-807>).

S'il s'avère qu'une carte est indispensable, il faudra préciser l'échelle* de représentation visée, quelle information sera représentée, avec quel indicateur de précision. Par exemple : valeur moyenne, médiane, ou dominante, valeurs continues ou classes, pourcentage de la superficie des unités cartographiques présentant des valeurs au-dessus ou au-dessous d'un certain seuil, valeurs absolues ou classification, etc. (voir le paragraphe 4.2.2.3). Pour un même paramètre, les choix de représentation peuvent modifier de façon très importante l'interprétation qui sera faite des résultats.

La carte n'est pas obligatoirement une finalité, la demande peut se limiter à une typologie* ou à la constitution de références.

4.2.1.4. Quelle sera l'échelle de représentation ?

L'adéquation doit être maximale entre la demande (échelle* souhaitée) et les données disponibles, en termes d'échelle. Ainsi un Référentiel Régional Pédologique à 1/250 000 ne sera jamais pertinent pour réaliser des applications thématiques nécessitant une résolution parcellaire (Figure 13).

Dans le cas où les bases de données ne seraient pas assez précises pour répondre à la question posée, l'acquisition d'informations complémentaires sur le terrain pourra s'avérer nécessaire (voir le guide méthodologique «Connaître les sols pour préserver la ressource en eau» <https://www.gissol.fr/publications/guide-bv-807>).

L'échelle de restitution et la résolution des données sol utilisées doivent être similaires pour obtenir des résultats cohérents.

4.2.2. Traitement des données

Une fois les besoins définis, le traitement des données passe le plus souvent par la mise en œuvre de modèles et algorithmes d'analyse, et il est nécessaire d'organiser l'enchaînement des traitements pour aboutir aux résultats recherchés.

4.2.2.1. Quelle(s) information(s) pédologique(s) extraire et où les trouver dans DoneSol ?

Une fois la ou les propriété(s) des sols à estimer identifiée(s), il faut rechercher dans la base de données DoneSol les paramètres à extraire, et la ou les tables dans lesquelles les trouver. La structure multi-étages de DoneSol (Figure 18, chapitre 3) implique en effet que les informations sur les sols sont réparties dans différentes tables, notamment celles liées aux UTS et aux strates. Pour trouver les tables et les champs à mobiliser, le dictionnaire de données DoneSol doit être utilisé.

Pour un paramètre pédologique donné, l'information peut se trouver à différents niveaux de la base de données. L'information qualifie et est pertinente pour chaque niveau où elle est renseignée. Par exemple, pour caractériser le degré d'hydromorphie, l'information peut être mobilisée à partir de différentes tables dans la base, qui décrivent différents objets, soit des UTS, soit des strates :

- UTS (dénomination spécifique de l'UTS, ou classe de drainage naturel) ;
- Strate (profondeur d'apparition/disparition de strates identifiées comme typiques de sols hydromorphes, caractéristiques morphologiques des strates : pourcentage de taches ou autres traits morphologiques caractéristiques).

Ces niveaux d'analyse seront choisis en fonction du niveau de précision* attendu, des caractéristiques de la base de données, du temps et du niveau d'expertise à disposition.

Il est donc nécessaire de bien connaître la structure de la base de données DoneSol pour savoir quelles tables interroger, comment faire les liens entre les tables et les objets. Obtenir des informations sur la façon dont les bases de données ont été constituées, notamment en se rapprochant du gestionnaire des bases pédologiques concernées, peut être bénéfique pour la compréhension des résultats.

Une bonne connaissance de la structure de DoneSol permet d'identifier où se trouve l'information recherchée et quels objets (UCS*, UTS*, strates) sont les plus pertinents. L'appui du gestionnaire de la base de données peut alors s'avérer capital. Il est important d'identifier les unités dans lesquelles les données sont exprimées. Le taux d'argile est exprimée en pour mille par exemple dans la table strat_quant.

4.2.2.2. Comment combiner les informations pédologiques entre elles ?

La combinaison de paramètres pédologiques primaires permet d'estimer des propriétés fonctionnelles. Ce travail d'évaluation d'une valeur se fait au niveau des UTS. On obtient alors une valeur de la propriété fonctionnelle par UTS. Pour la représenter graphiquement, une information par UCS est nécessaire. Il est alors indispensable de passer par une phase d'agrégation au niveau de l'UCS. Cette étape est identique à celle appliquée pour les propriétés primaires (voir paragraphe suivant).

Il est fortement conseillé de combiner les propriétés primaires entre elles pour chaque UTS* avant d'agréger et de spatialiser par UCS*, plutôt que de spatialiser les propriétés des sols puis de les combiner.

4.2.2.3. Quelles méthodes d'agrégation des données au niveau des UCS envisager ?

Représenter cartographiquement les propriétés primaires ou fonctionnelles des sols implique d'agréger l'information disponible au niveau des UTS à celui des UCS, selon une méthode choisie parmi celles proposées ci-dessous, l'UCS étant l'unique support de la représentation cartographique.

D'un point de vue purement géomatique*, la représentation cartographique de données pédologiques issues de la base de données DoneSol consiste à associer à un polygone (UCS), la valeur du paramètre que l'on souhaite représenter.

Les UCS sont des objets que l'on sait localiser dans l'espace, composés d'une ou plusieurs UTS identifiées. On parle d'UCS simples (une seule UTS) ou d'UCS complexes (plusieurs UTS). Concernant les études à grande échelle*, c'est-à-dire les cartes détaillées, la majorité des UCS sont simples. Dans ce cas, la valeur du paramètre pédologique à représenter cartographiquement sera celle de l'UTS unique. Dans le cas des UCS complexes, la valeur du paramètre représenté résultera de la combinaison, ou l'agrégation, des valeurs renseignées pour les différentes UTS. Pour ce faire, trois méthodes sont couramment utilisées :

- l'agrégation par la dominante ;
- l'agrégation par la moyenne pondérée ;
- la représentation du pourcentage de chaque classe (selon une classification à définir spécifiquement pour chaque étude).

La méthode d'agrégation appliquée dépendra notamment de la nature de la variable que l'on souhaite spatialiser. En effet, l'agrégation par la moyenne ne pourra pas s'appliquer à une variable qualitative du type classe de texture, faire une moyenne de classes de texture n'ayant aucun sens. Les variables quantitatives (par exemple un taux d'argile) pourront être représentées par la moyenne, ou traduites sous la forme de classes pour être représentées par les deux autres méthodes d'agrégation.

Un exemple est proposé en Figure 24, qui présente un tableau de résultats avec le Réservoir Utile en eau du sol (RU) comme variable d'intérêt. Cet exemple sera décliné suivant les différentes méthodes d'agrégation présentées ci-après.

(Les classes de RU sont les suivantes : 0-40 mm, 40 - 80 mm, 80 -120 mm, 120 - 160 et > 160 mm)

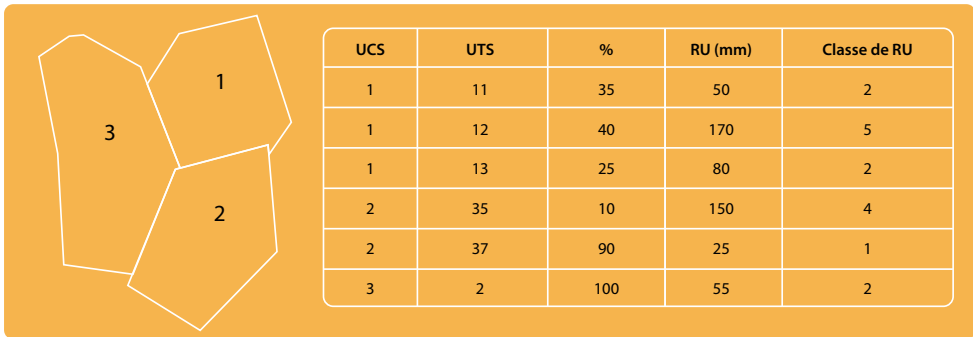


Figure 24 -Exemple de résultat du traitement de données par UTS, à spatialiser par UCS

La méthode d'agrégation par la dominante

Deux variantes de cette méthode existent :

1. Dans une UCS, chaque UTS est renseignée avec un pourcentage de représentation au sein de l'UCS. C'est ce pourcentage qui sert à évaluer la modalité dominante d'une variable pédologique située au niveau de l'UTS : la valeur de l'UTS qui a le plus de poids en termes de pourcentage d'occurrence est attribuée à l'UCS. Avec cette méthode, il est souhaitable d'associer à la représentation cartographique d'une variable pédologique, une carte de pureté de l'UCS au regard de la variable représentée. La pureté correspond alors au pourcentage de l'UTS dominante.
2. La valeur attribuée à l'UCS est la valeur dominante d'une propriété au sein de l'UCS, toutes UTS confondues, plusieurs UTS d'une même UCS pouvant avoir la même modalité pour une propriété donnée. La carte de pureté correspond alors à la somme du pourcentage d'occurrence des UTS qui prennent la modalité dominante.

L'exemple présenté s'appuie sur la deuxième variante de la méthode. Pour l'UCS 1, la modalité dominante est la classe 2 (35 +25 %) > classe 5 (40 %). Pour l'UCS 2, la dominante est la classe 1 avec 90 %. Ces classes dominantes sont alors affectées à chaque UCS correspondante.

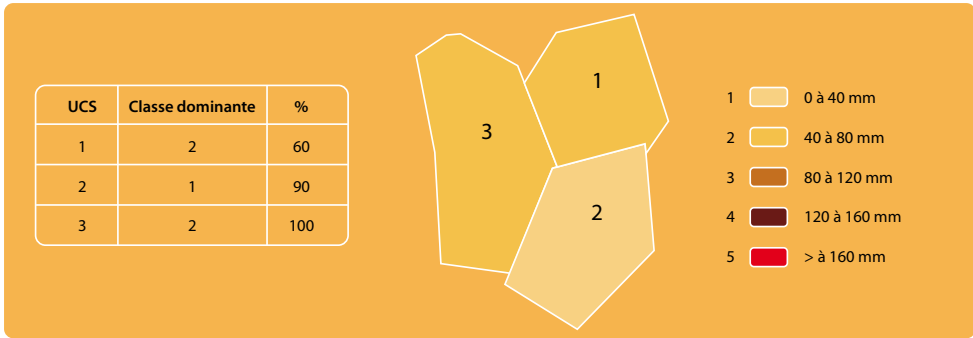


Figure 25 - Agrégation et spatialisation par UCS des valeurs des UTS selon la méthode de la classe dominante

Cette carte pourra être accompagnée d'une carte de pureté de l'information qui représentera pour chaque UCS le pourcentage que représente la classe dominante. Elle sera issue de la colonne «pourcentage» du tableau de la Figure 25.

La méthode d'agrégation par la moyenne pondérée

Cette méthode consiste à pondérer les valeurs obtenues par UTS par la superficie relative occupée par chacune d'elle dans l'UCS. Ainsi, les UTS dont les pourcentages au sein de l'UCS sont élevés ont un poids plus important sur le résultat final, à la différence d'une moyenne classique où chaque UTS a un poids identique quelle que soit sa fréquence d'occurrence. La moyenne pondérée se calcule de la manière suivante :

1. faire la somme des pourcentages des UTS dans l'UCS (cette valeur est le plus souvent égale à 100, sauf dans le cas où toutes les UTS ne sont pas considérées (voir paragraphe 4.2.1.2) ;
2. affecter à chaque UTS une valeur «pondérée» de la propriété d'intérêt, en multipliant la valeur initiale par le pourcentage de l'UTS dans l'UCS puis en la divisant par la somme des pourcentages dans l'UCS ;
3. Faire la somme des valeurs recalculées et attribuer cette valeur à l'UCS.

Suivant l'exemple, le calcul de la moyenne pondérée pour l'UCS 1 s'effectue de la manière suivante :

1. La somme des pourcentages de l'UCS 1 = 100 %
2. UTS 1 : $(50 * 35)/100 = 17.5$ mm
 UTS 2 : $(170 * 40)/100 = 68$ mm
 UTS 3 : $(60 * 25)/100 = 15$ mm
3. $17.5 + 68 + 15 = 100.5$ mm ce qui est la valeur moyenne pondérée pour l'UCS 1. Le calcul est effectué pour chaque UCS et les valeurs sont représentées sous la forme de classes.

Cette carte pourra être accompagnée d'une carte complémentaire issue du calcul de l'écart-type indiquant la variabilité des valeurs au sein de l'UCS.

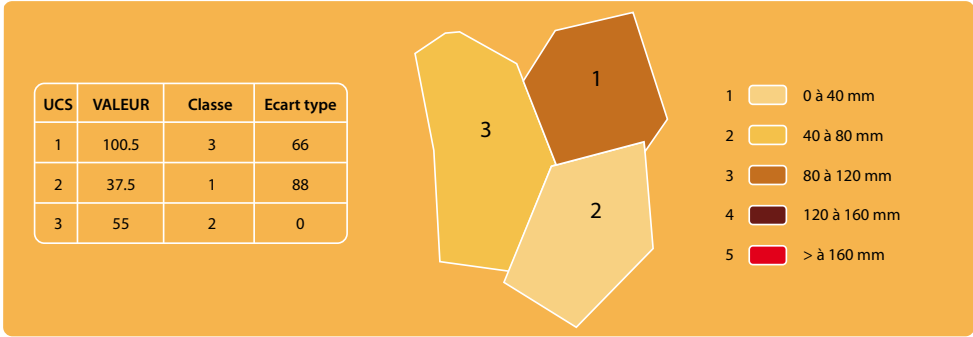


Figure 26 - Agrégation et spatialisation par UCS des valeurs des UTS selon la méthode de la moyenne pondérée

La représentation du pourcentage de chaque classe

Cette méthode permet de montrer l'étendue de la variabilité des informations dans les différentes UCS. La représentation se fait par classes dont le nombre et les bornes sont contrôlés par l'opérateur. Les pourcentages pour chaque classe définie sont représentés pour chaque UCS. Il y a donc autant de cartes que de classes. La seule contrainte est que le nombre de classes ne doit pas être trop élevé pour limiter le nombre de cartes. Elle s'applique parfaitement à des variables qualitatives. Pour représenter des variables continues (par exemple la teneur en carbone organique), cette méthode nécessite de transformer au préalable les valeurs des UTS en classes, avec un nombre de classes et des bornes pertinents.

Dans le cas de notre exemple, les cinq classes sont représentées sur cinq cartes.

L'UCS 2 est caractérisée par 2 UTS avec des modalités différentes, la classe 1 (UTS 37) représente 90 % de la surface et la classe 4 (UTS 35) seulement 10 % (voir Figure 24). Sur la carte concernant la classe de RU 1, l'UCS 2 est représentée dans la tranche de 65 à



Figure 27 - Agrégation et spatialisation par UCS des valeurs des UTS selon la méthode du pourcentage de chaque classe

100 %, et dans la tranche de 1 à 30% sur la carte de la classe 4. Cette UCS reste en valeur 0 pour les autres classes, puisqu'elle ne contient pas de sols répondant à ces critères.

Une fois les données agrégées au niveau des UCS, la dernière étape du traitement des données consiste à spatialiser les résultats, c'est-à-dire à les représenter cartographiquement. Le lien (jointure) avec la couche graphique se fait par le champ NO_UCS.

Trois méthodes d'agrégation (dominante, moyenne, classes) sont à disposition pour traduire une information de l'UTS* à l'UCS*. La méthode choisie sera fonction de la nature de la donnée à représenter et des objectifs recherchés.

4.2.2.4. Comment combiner les informations pédologiques avec des données non pédologiques ?

Pour répondre aux besoins de connaissances, il est souvent nécessaire de croiser les données sol avec d'autres sources d'information, comme des données sur le climat, l'occupation du sol, le relief, des données socio-économiques, etc.

En fonction de la problématique à traiter, l'approche par l'analyse spatiale et la combinaison de données *via* un SIG peut se révéler complexe. Plusieurs étapes intermédiaires peuvent être envisagées. Par souci d'organisation il est donc conseillé de procéder à l'établissement d'une stratégie globale d'approche avec la définition des étapes de traitements, la préparation des données en entrée, leur enchaînement, la validation, etc. Ces étapes peuvent être formalisées sous la forme d'un diagramme de traitement et d'un arbre de décision abordés tous deux ci-dessous.

Diagramme de traitement

Le diagramme de traitement définit l'enchaînement des opérations et leur succession. Il est constitué d'opérations élémentaires (traitement ou géotraitement des informations) et de données en entrée et en sortie. Une donnée en sortie, si elle n'est pas le résultat final, alimente l'opération suivante. Elle en est alors une donnée d'entrée.

Certains logiciels SIG proposent des outils de construction de diagrammes de traitement qui permettent d'automatiser les opérations comme c'est le cas avec «ModelBuilder» pour ArcGis ou le «modeleur de traitement» pour Quantum Gis.

Arbre de décision

Un arbre de décision définit la manière dont sont combinées les différentes couches d'information utilisées afin de procéder à des sélections de variables pour aboutir à un résultat donné. L'exemple proposé dans la Figure 28 montre la combinaison de données d'occupation du sol (présence de sol nu selon deux modalités), de relief (3 classes de pente) et de sol, par l'indice de battance (propriété fonctionnelle résultat de la combinaison de plusieurs propriétés primaires), pour estimer la vulnérabilité des terrains à l'érosion définie ici en 4 classes.

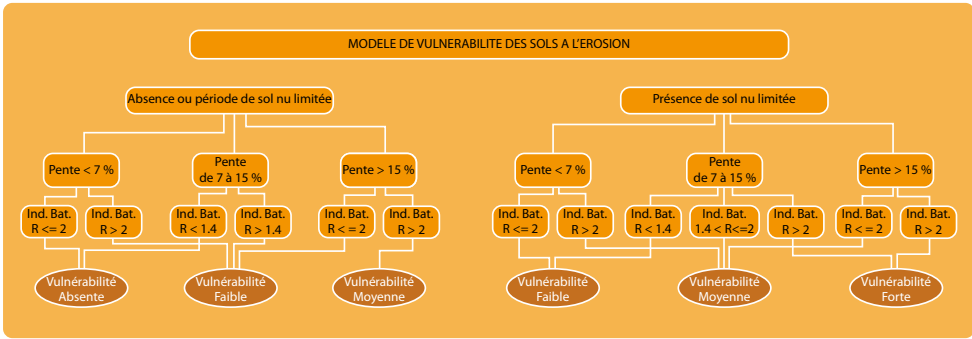


Figure 28 - Arbre de décision pour estimer la vulnérabilité des terrains à l'érosion (GVTAFA*)

Selon que les données d'entrée et de sortie attendues sont en format vecteur* ou raster*, les modalités de traitement sont différentes.

Deux types de croisement de données sont pratiqués couramment :

- croisement simple en mode vecteur ou raster : superposition et extraction d'information par des opérations géomatiques*, ne nécessitant pas forcément que toutes les données d'entrée soient au même format. Il est par exemple possible d'informer la couche des UCS par des données sur l'occupation du sol.
- modélisation qui permet de calculer de nouveaux indices en mode raster. Dans la plupart des cas, les modèles nécessitent des données d'entrée dans un format unique, ce qui impose le format raster, de même résolution* pour toutes les couches d'information. Il sera alors nécessaire de transformer les données initiales.

Quelle que soit la méthode utilisée, une attention particulière doit être accordée aux notions d'échelle* et de résolution, expliquée dans les chapitres précédents.

Il est difficile de donner une méthode générique de traitements mobilisant des données sols. Ces traitements sont en effet très nombreux et dépendants de l'objectif, des données d'entrée, des outils, des moyens disponibles. Une fois de plus, il peut s'avérer nécessaire de prendre conseil auprès de l'auteur des données ou du gestionnaire de la base de données pour optimiser l'utilisation des informations et indirectement gagner du temps.

Etapes clefs pour la réalisation d'une carte thématique

La réalisation de ces cartes thématiques impose un « itinéraire cartographique », constitué de différentes étapes. Ici le choix du format (vecteur ou raster*) est indépendant de ces étapes et sera généralement déterminé par le modèle utilisé.

- étape 1. Définition précise de l'emprise géographique de l'étude
- étape 2. Assemblage de l'ensemble des données de base nécessaires à l'élaboration des cartes thématiques (acquisition, structuration, mise en cohérence)
- étape 3. Recherche des critères d'analyse par thématique. Il s'agit de sélectionner

parmi les paramètres du milieu (sols, climat, occupation des sols, relief...), les critères ou données de base susceptibles d'approcher au mieux la problématique étudiée.

- étape 4. Traitement de données et conception de modèles d'analyse. Il s'agit de hiérarchiser l'influence des critères définis dans l'étape 3, puis de déterminer les modèles de classification et de combinaison, les mieux à même de fournir des représentations cartographiques pertinentes. Ce travail de modélisation est réalisé en partenariat étroit avec les experts métiers, sur la base d'un arbre de décision tel que celui présenté en Figure 28.

- étape 5. Test et validation des modèles d'analyse sur une ou plusieurs zones test
- étape 6. Estimation et cartographie de l'incertitude*
- étape 7. Réalisation de l'étude finale à partir de la démarche validée

A noter ici la nécessité d'une expertise technique pour la sélection des critères, la modélisation et la validation des résultats.

DoneSol et Mode raster*

Les données pédologiques sont par défaut dans un format vectoriel. En modélisation, le passage au mode raster s'avère généralement nécessaire car c'est le seul mode de données supporté pour les données en entrée de la plupart des modèles. La rasterisation impose de retenir une taille adéquate de pixel* au regard de la précision souhaitée et de la précision des sources d'information (Hengl, 2006).

L'adoption du format « raster » facilite le croisement des couches et les calculs matriciels (possibilité d'utiliser une calculatrice raster). De plus, cette approche permet d'éliminer les polygones parasites de petite taille. Il faut savoir que chaque pixel ne peut correspondre qu'à une seule information. Une UCS étant composée elle-même de différentes UTS, on pourra se référer au chapitre 4.2.2.3 pour déterminer la méthode d'agrégation la plus adaptée au besoin.

Lorsque l'on combine des données pédologiques et des données non pédologiques, l'information représentée au final ne concerne pas directement le sol. Il demeure cependant important de passer par une étape préalable de représentation de l'information pédologique qui a servi d'entrée au modèle. Cela permet en effet de se rendre compte de la qualité de l'information pédologique utilisée, et donc de pouvoir être critique quant à la pertinence des résultats. Sans cela, le risque est grand de faire passer sous silence une utilisation abusive de l'information pédologique, notamment quand il y a une différence importante de résolution entre la donnée pédologique en entrée et le résultat final.

Pour combiner des informations pédologiques avec des informations non pédologiques, la succession d'opérations implique généralement le changement de format des données pédologiques. Cela se réalise par des opérations géomatiques* simples consignées dans un diagramme de traitements. Le croisement des données en lui-même implique d'utiliser un modèle statistique ou des règles de croisement expertes formalisées dans un arbre de décision.

4.2.3. Restitution des résultats

4.2.3.1. Comment restituer la variabilité connue autour des valeurs proposées ?

On considère ici la variabilité intra-UCS comme étant connue, et on peut l'estimer de manière fiable à partir des informations renseignées dans la base de données. Il convient de distinguer la variabilité de l'incertitude*, qui est liée à la dispersion des valeurs autour d'une distribution.

La variabilité intra-UTS peut être exprimée au travers d'une carte des écarts-types dans le cas où on représente la moyenne (qu'elle soit pondérée ou non), ou de la proportion de la superficie concernée (carte de pureté) dans le cas où la dominante est représentée.

Les indicateurs de variabilité intra-UCS peuvent être calculés à partir des valeurs des différentes UTS qui composent l'UCS comme évoqué ci-dessus, mais la structuration de DoneSol prévoit également le renseignement de la variabilité au niveau des strates (valeurs minimales, modales, maximales).

4.2.3.2. Eléments de discussion : quelle est la validité des résultats?

Est-il possible de les confronter à une expertise ?

Une fois les résultats finalisés, la dernière étape consiste à prendre du recul sur leur qualité et leur pertinence. Pour cela, il faut comparer les résultats à d'autres références disponibles sur la zone d'étude. Il pourra s'agir de faire appel à un expert local qui connaît les sols et qui pourrait identifier des points de vigilance, comparer les résultats avec d'autres sources d'information (BDAT*, références locales...) et/ou de réaliser des tests sur le modèle utilisé afin de le valider.

4.2.4. Exemples d'élaboration de cartes thématiques

Les fiches suivantes illustrent les propos ci-dessus en montrant des exemples concrets d'utilisation des bases de données DoneSol pour des applications thématiques dans différents domaines : agronomie, environnement, aménagement. Les extractions de données par des requêtes sur les bases de données et les traitements réalisés sont plus ou moins complexes.

Cartographie du pH de surface des sols en Côte d'Or

Thématiques : Agronomie, environnement

Zone d'étude : Bourgogne, Côte d'Or (21)

Echelle de restitution : 1/250 000

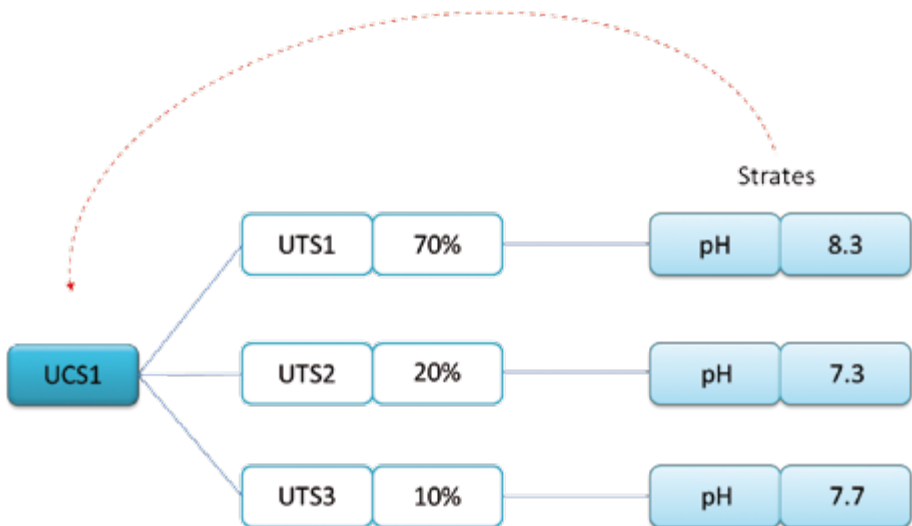
Base de données utilisée : RRP* de la Côte d'Or

Contact : Sebastien.Lehmann@inra.fr

Objectifs et enjeux

L'acidité des sols, estimée par la mesure du pH, est une caractéristique agronomique déterminante pour la fertilité des sols. Dans les sols agricoles, le pH optimal est la plupart du temps compris entre 6,5 et 7,5. En dehors de cette fourchette, des problèmes d'assimilabilité des éléments fertilisants et des oligo-éléments peuvent se poser. Dans les sols très acides (pH < 5,5), l'aluminium peut être libéré et devenir toxique pour les cultures. D'un point de vue environnemental, des éléments potentiellement polluants peuvent migrer en conditions de sols très acides et contribuer à la pollution des eaux. L'acidification est un processus naturel, qui peut être amplifié par l'action de l'Homme (intensification agricole, manque d'amendements calciques par exemple). Le pH des sols est une propriété très variable dans le temps, sur laquelle l'homme agit directement pour maintenir la fertilité et la stabilité structurale des sols.

Cette donnée n'est pas directement rattachée aux UCS* qui représentent le seul découpage cartographique disponible au niveau de la couche SIG* des sols. Pour faire « remonter » cette information depuis les strates* vers la couche SIG afin de cartographier le pH, il faut procéder à une agrégation de l'information *via* la table indiquant le pourcentage des UTS* (et de leurs strates) au sein des UCS (F1-1).



F1-1 - Exemple de relations entre une UCS, ses UTS et leurs strates pour le cas du pH

Méthodologie

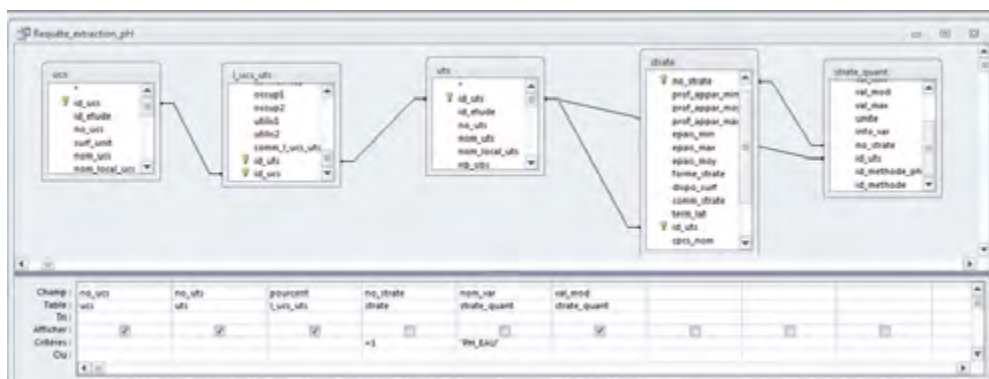
- Plusieurs étapes sont nécessaires pour conduire cette application thématique :
1. sélection des strates de surface des UTS et extraction de la variable recherchée : le pH (valeur modale) ;
 2. agrégation de l'information au niveau de l'UCS selon 2 méthodes : valeur dominante ou moyenne pondérée ;
 3. cartographie du pH et de sa variabilité intra-UCS.

Quelles informations extraire de la base de données ?

Variable à extraire	Nom du champ	Table
PH_EAU (VAL_MOD)	nom_var	STRATE_QUANT
Identification des strates de surface des UTS	no_strate, id_strate, id_uts	STRATE
Vérification des valeurs par UTS	id_uts, no_uts	UTS
Pourcentage pour l'étape d'agrégation (étape 3)	pourcent, id_ucs	L_UTS_UCS
Cartographie - Lien entre les bases sémantique et graphique	id_ucs, no_ucs	UCS

Etape 1 : sélection des strates de surface des UTS et extraction du pH (valeur modale)

La Figure ci-dessous illustre le type de requête à produire sous Access® afin d'obtenir une table permettant d'afficher tous les champs nécessaires à l'agrégation pour la couche superficielle du sol (strate 1) et la modalité «PH_EAU» de la variable «NOM_VAR».



F1-2 – Requête d'extraction des variables dans Access (exemple du PH_EAU)

Le résultat prend la forme d'une table (F1-3).

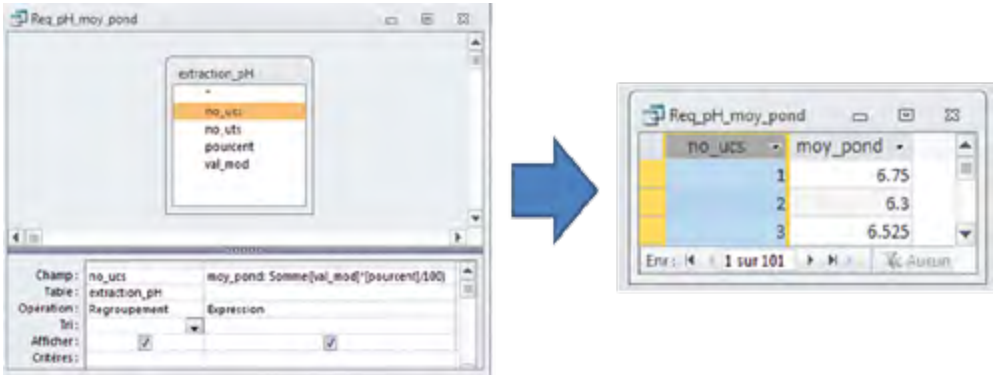
no_ucs	no_uts	pourcent	val_mod
1	1	75	6.5
1	2	25	7.5
2	3	100	6.3
3	5	5	7
3	4	95	6.5

F1-3 – Résultat de l'extraction des variables (exemple du PH_EAU, extrait des 3 premières UCS)

Etape 2 : agrégation de l'information au niveau de l'UCS selon 2 méthodes : valeur dominante ou moyenne pondérée

A partir de cette table, il est possible de générer de nouvelles requêtes qui permettent d'extraire 2 types d'information :

- Le pH de l'UTS dominante : il est extrait en sélectionnant pour chaque UCS, l'UTS la plus représentée et la valeur modale du pH qui lui est associée ;
- Le pH moyen pondéré (F1-4) par le pourcentage des UTS au sein des UCS : pondération de la valeur moyenne du pH au niveau d'une UCS par les pourcentages de représentation des UTS dans l'UCS.



F1-4 - Requête de calcul du pH moyen pondéré

Au final on obtient :

- une table avec, pour chaque UCS , le pH de l'UTS dominante ;
- une table avec, pour chaque UCS , le pH moyen pondéré

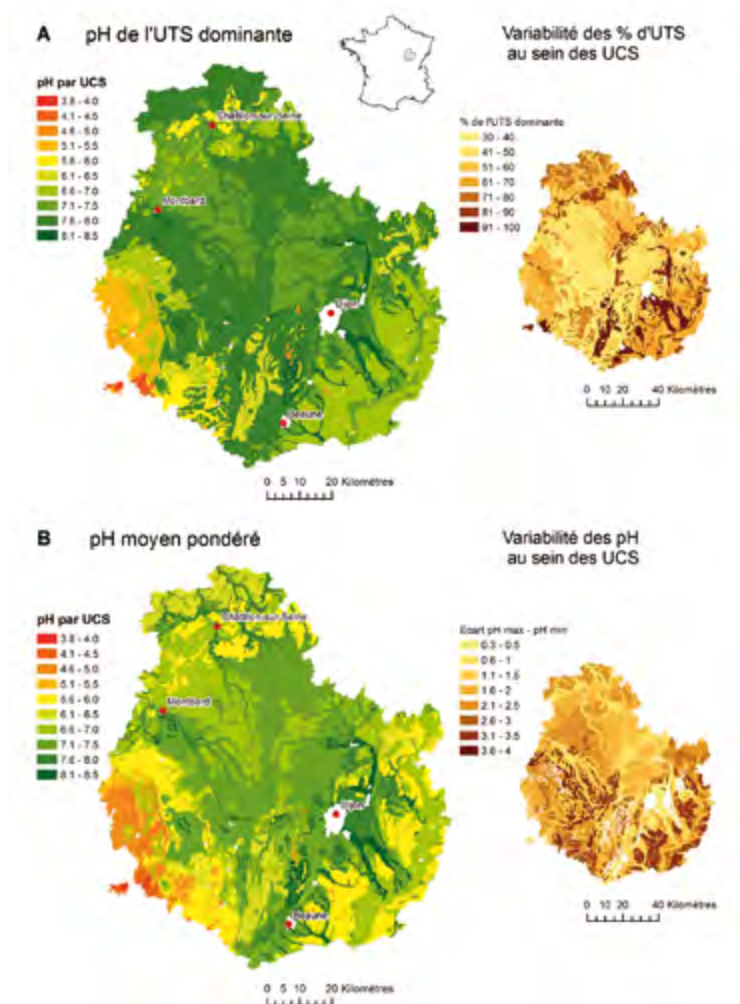
Etape 3 : cartographie du pH et de sa variabilité intra-UCS

Il suffit alors de procéder à une jointure tabulaire sous SIG avec la couche des sols pour cartographier les modalités de représentation du pH.

Résultats

Deux cartes d'estimation du pH de surface par UCS sont produites : estimé à partir de l'UTS dominante (carte A) et à partir de la moyenne pondérée (carte B) accompagnées de cartes de la variabilité intra-UCS de l'information.

Les deux cartes du pH montrent des structures spatiales globalement similaires, mais aussi des différences notables : dans le Sud-Est notamment où la carte du pH moyen pondéré met en évidence des sols nettement plus acides que la carte du pH de l'UTS dominante. Une part importante des sols du département ont des pH inférieurs à 6.



F1-5 - Cartographie du pH moyen selon les deux méthodes retenues

La variabilité des pourcentages d'UTS au sein des UCS (carte A) permet de connaître le niveau de pureté d'une UCS. Plus le pourcentage est élevé et plus l'UTS est représentative de l'UCS. Lorsque ce pourcentage est faible, cela signifie que l'UCS est hétérogène.

La variabilité de pH au sein des UCS (carte B) exprime l'écart maximum calculé entre la valeur du pH min et du pH max des strates relatives à une UCS. Elle rend compte de l'étendue de la gamme de pH possible au sein d'une UCS.

Discussion

Les cartes de l'estimation du pH de surface sont issues d'un processus d'agrégation. Il faut donc garder à l'esprit qu'elles dissimulent des variabilités locales où le pH peut être inférieur ou supérieure à la valeur cartographiée.

Les méthodes d'agrégation peuvent produire des résultats différents et donc prêter à discussion. Il est nécessaire de les sélectionner en fonction des données sources et du résultat recherché. Dans le cas du pH, qui est basé sur une échelle logarithmique, calculer des moyennes est une démarche qui n'est pas mathématiquement juste.

Quelles communes du Lot-et-Garonne ont des sols argileux ?

Thématique : Agronomie, environnement, aménagement

Zone d'étude : Nouvelle Aquitaine, Lot-et-Garonne (47)

Base de données : RRP* 47, IGN BD GEOFLA® (communes)

Echelle de restitution : 1/250 000

Contact : stephanie.jalabert@agro-bordeaux.fr

Objectifs et enjeux

En application de la Directive Nitrates (Conseil des Communautés européennes, 1991), des programmes d'actions et de mesures réglementaires sont mis en place en France, sur les zones dites « vulnérables » aux pollutions par les nitrates. Une bonne maîtrise des fertilisants et une gestion adaptée des terres agricoles permettront de limiter les fuites de nitrates dans l'environnement. L'application de la Directive Nitrates se décline de manière proportionnée et adaptée en Programmes d'Actions Régionaux (PAR), ces derniers fixant des mesures et actions supplémentaires nécessaires à l'atteinte des objectifs de qualité des eaux. Dans certaines régions, une dérogation à la mesure de couverture végétale obligatoire des sols en période hivernale est prévue pour les exploitations agricoles ayant des sols argileux. Cependant, les instances décisionnaires assermentées pour fournir ces dérogations manquent d'informations sur le caractère argileux des sols. Dans ce contexte, les bases de données pédologiques existantes telles que les Référentiels Régionaux Pédologiques constituent des outils cartographiques intéressants pour disposer d'une première approche cartographique à l'échelle d'un large territoire. L'exemple d'application thématique décrit ici propose de répondre à l'objectif suivant : disposer d'une carte des communes aux sols argileux d'un département aquitain : le Lot-et-Garonne.

Matériel et méthodes

Le Référentiel Régional Pédologique (RRP) du Lot-et-Garonne est mobilisé pour cet exemple. La variable d'intérêt est le taux d'argile des strates* des UTS*. Cette variable n'est pas directement rattachée aux UCS* qui représentent le seul découpage cartographique disponible au niveau de la couche SIG* du RRP. Pour faire « remonter » cette information depuis les strates vers les UCS, deux méthodes d'agrégation vont être explicitées dans cette fiche : une agrégation par l'UTS dominante et une représentation des pourcentages des classes de taux d'argile.

Pour mieux appréhender le problème posé, le but est de répondre à la question suivante :

Quelles sont les communes du département qui présentent des sols argileux sur plus de 70 % de leur surface ?

Plusieurs étapes sont nécessaires pour conduire cette application thématique :

1. Définition des sols argileux ;
2. Sélection des strates d'intérêt des UTS (entre 0 et 25 cm) et extraction de la variable recherchée : le taux d'argile (valeur modale) ;
3. Calcul du taux d'argile par UTS ;
4. Agrégation de l'information au niveau des UCS selon 2 méthodes : par la dominante ou en représentant le pourcentage de chaque classe de taux d'argile ;

5. Cartographie du taux d'argile et de sa variabilité intra-UCS ;
6. Croisement entre UCS et communes ;
7. Cartographie des communes qui possèdent des sols argileux sur plus de 70 % de leur surface.

Variable à extraire	Nom du champ	Table
Identification des strates	id_strate, id_uts, no_strate	STRATE
Profondeurs d'apparition moyennes des strates	prof_appar_moy	STRATE
Epaisseurs moyennes des strates	epais_moy	STRATE
Profondeurs inférieures des strates	prof_appar_moy, epais_moy	STRATE
Extraction des teneurs en argile des strates nom_var = « taux argile »	nom_var, val_mod	STRATE_QUANT
Proportion en % des UTS dans les UCS	Pourcent, id_uts, id_ucs	L_UTS_UCS
Le numéro des UCS = lien avec la table attributaire de la couche géographique	id_ucs, no_ucs	UCS

Quelles informations extraire de la base de données du RRP ?

Etape 1 : Définition des sols argileux

Un sol argileux est un sol dont la teneur en argile est assez élevée, engendrant des particularités physiques facilement reconnaissables. Les sols argileux sont souvent qualifiés de « sols lourds » ou de « sols froids » ; ce sont des sols compacts, à texture collante, qui se réchauffent lentement, engendrant parfois des retards végétatifs conséquents pour l'agriculteur. Ces sols sont généralement difficiles à travailler, ils ont tendance à se craqueler et à durcir en période sèche, ils présentent très souvent un drainage de l'eau défavorable. Dans un contexte de zones vulnérables aux pollutions azotées d'origine agricole, les agriculteurs doivent implanter des cultures intermédiaires pièges à nitrates dans leur parcellaire (CIPAN), pour éviter au maximum des fuites d'azote dans le milieu. Ce dispositif prévu pour répondre aux objectifs de la Directive Nitrates nécessite un travail du sol en inter-culture, pendant la période pluvieuse de l'automne ou l'hiver. Travailler des sols argileux dans ces conditions peut engendrer le compactage du sol par les engins, la formation de semelles imperméables, de l'érosion aratoire, etc. Dans ce contexte, une dérogation à l'implantation de CIPAN sur les sols argileux peut se justifier.

Un sol est considéré comme argileux quand le sol contient 35 % d'argile ou plus (Soil Taxonomy *in* Lozet et Mathieu, 1986), voire plus de 37% d'argile selon Justes *et al.* (2012). Ici, afin de prendre en compte les sols aux classes texturales argileuses, selon le triangle de Jamagne, nous considérons un sol argileux avec un taux d'argile supérieur ou égal à 30 %.

Etape 2 : Sélection des strates d'intérêt des UTS (entre 0 et 25 cm) et extraction de la variable recherchée : le taux d'argile (valeur modale)

Dans cette étude, les strates des UTS sélectionnées doivent représenter la couche de sol travaillée, entre 0 et 25 cm. Pour ce faire, à l'aide de l'outil de requête d'Access®, nous choisirons :

- les strates de surface (no_strate = 1) ET
- les strates sous-jacentes (no_strate = 2), si la strate 1 a une épaisseur inférieure à 25 cm et si la strate 2 se termine à moins de 50 cm de la surface du sol.

La Figure ci-dessous illustre sous Access® la requête de sélection afin d'obtenir une table permettant d'afficher tous les champs nécessaires au calcul du taux d'argile par UTS.



F2-1 – Requête d'extraction de la variable taux d'argile des strates sous Access

Etape 3 : Calcul du taux d'argile par UTS

Le résultat prend la forme d'une table (F2-2).

L'objectif suivant est d'obtenir par UTS une valeur de taux d'argile. Le résultat de l'extraction (F2-2) génère plusieurs cas :

- Si l'UTS ne comprend qu'une seule strate, la valeur du taux d'argile est la valeur modale du taux d'argile de la strate 1,
- si l'UTS est composé de deux strates :

- b.1. si la différence absolue entre le taux d'argile de la strate 1 et celui de la strate 2 est > 5 %, la valeur du taux d'argile de l'UTS est la valeur modale du taux d'argile de la strate 1 ;
- b.2. si la différence absolue entre le taux d'argile de la strate 1 et celui de la strate 2 est <= 5 %, la valeur du taux d'argile de l'UTS est la moyenne des taux d'argile des strates 1 et 2, pondérée par l'épaisseur des strates.

En prenant l'exemple de la Figure 35, la valeur du taux d'argile des UTS 2 et 4 correspondra à la valeur modale du taux d'argile de leur strate 1. La valeur du taux d'argile de l'UTS 3 sera la valeur modale du taux d'argile de la strate 1, car la différence absolue des taux d'argile est supérieure à 5%. Enfin, la valeur du taux d'argile de l'UTS 64 sera la moyenne des taux d'argile des strates, pondérée par l'épaisseur de chaque strate, soit 47,6 %.

id_uts	no_uts	no_strate	prof_appar_moy	prof_inf	arg_mod	
13236	2	1	1	0	20	33,7
10874	3	1	1	0	20	32,6
10874	3	2	2	20	43	38,6
13894	4	1	1	0	25	9,8
12064	64	1	1	0	15	47
12064	64	2	2	15	40	48

F2-2 - Résultat de l'extraction de la variable taux d'argile des strates (extrait de 4 UTS)

Au final, une table avec une valeur de taux d'argile par UTS est obtenue (F2-3).

id_uts	no_uts	val_arg_uts
13236	2	33,7
10874	3	32,6
13894	4	9,8
12064	64	47,625

F2-3 – Valeurs d'argile par UTS (exemples des 4 UTS précédentes)

Avant d'aborder l'étape d'agrégation au niveau des UCS, à partir de la table précédente, il est nécessaire de générer une requête permettant d'extraire les UCS, les pourcentages des UTS au sein des UCS, et les valeurs de taux d'argile par UTS (F2-4).

Champ	no_ucs	pourcent	no_uts	val_arg_uts
Table	ucs	l_ucs_uts	Valeur_argile_par_UTS	Valeur_argile_par_UTS
Tri	Croissant	Décroissant		
Afficher	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Critères				
Ou				

F2-4 – Requête d'extraction des variables nécessaires pour l'agrégation au niveau des UCS

Etape 4 : agrégation de l'information au niveau des UCS selon 2 méthodes : par la dominante ou en représentant le pourcentage de chaque classe d'argile

Méthode d'agrégation par la dominante : le taux d'argile de l'UTS dominante est extrait en sélectionnant pour chaque UCS, l'UTS la plus représentée et la valeur du taux d'argile qui lui est associée.

Dans le choix de l'UTS dominante, plusieurs cas peuvent se présenter (F2-5) :

- si l'UCS est complexe (plus de 2 UTS) et si une des UTS représente plus de 50 % de l'UCS :
taux argile UCS = taux argile UTS dominante
- si l'UCS est composée de 2 UTS représentant chacune 50 % de l'UCS,
 - si la différence absolue des taux d'argile des 2 UTS est $\leq 5\%$: taux argile UCS = moyenne taux argile des UTS
 - si la différence absolue des taux d'argile des 2 UTS est $> 5\%$: taux argile UCS = taux d'argile le plus faible
- si l'UCS est complexe (plus de 2 UTS) et si les UTS représentent chacune moins de 50 %

de l'UCS : taux argile UCS = moyenne pondérée des taux d'argile de la classe de taux d'argile la plus représentée dans l'UCS. L'amplitude maximale des classes d'argile est de 5 %. Prenons pour exemple l'UCS 5 (F2-5) : l'UCS 5 contient six UTS. La classe de taux d'argile la plus représentée dans l'UCS est la classe [31-36] % d'argile, avec 3 valeurs de taux d'argile. La valeur du taux d'argile de l'UCS est égale à la moyenne des ces 3 valeurs d'argile pondérée par le pourcentage des UTS correspondantes, soit : $(31.4 * 40 + 31.9 * 1 + 35.9 * 40) / 81 = 33.6 \%$.

no_ucs	pourcent	no_uts	val_arg_uts
1	60	4	9.5
1	5	6	15
1	10	5	15.1
1	20	190	17.4
2	40	178	23.7
2	4	12	24.9
2	50	9	32.7
2	2	13	35.7
5	1	175	15.3
5	15	191	26
5	40	18	31.4
5	1	175	31.9
5	40	17	35.9
5	3	174	42
7	10	189	14.3
7	2	190	17.4
7	20	179	17.7
7	30	224	21.7
7	15	184	23.3
7	5	12	24.9
7	8	55	26.7
7	8	188	35.2
7	1	189	40
7	1	187	56.6

no_ucs	pourcent	val_arg_ucs
1	60	9.5
2	50	32.7
5	81	33.6
7	50	22.5

F2-5 – Exemples d'agrégation du taux d'argile par UCS : méthode par la dominante

Méthode de représentation des pourcentages des classes de taux d'argile :

La première étape est de définir les classes de taux d'argile que l'on souhaite représenter. Dans cet exemple, 2 classes de taux d'argile sont suffisantes :

- classe 1 : taux d'argile < 30 % (sols non argileux),
- classe 2 : taux d'argile >= 30 % (sols argileux).

Les valeurs de taux d'argile des UTS sont reclassées. A l'aide d'une requête de regroupement, on obtient une table récapitulant, par UCS, la somme des pourcentages de chaque classe d'argile.

La dernière étape est d'obtenir une table avec, par ligne (no_ucs), la somme des pourcentages de la classe 1 (Champ «classe1») et de la classe 2 (champ «classe2») (F2-6).

no_ucs	pourcent	no_uts	val_arg_uts	classe_arg
1	60	4	9.5	1
1	20	190	17.4	1
1	10	5	15.1	1
1	5	6	15	1
2	50	9	32.7	2
2	40	178	23.7	1
2	4	12	24.9	1
2	2	13	35.7	2
5	40	18	31.4	2
5	40	17	35.9	2
5	15	191	26	1
5	3	174	42	2
5	1	175	31.9	1
5	1	175	31.9	2
7	30	224	21.7	1
7	20	179	17.7	1
7	15	184	23.3	1
7	10	189	14.3	1
7	8	59	26.7	1
7	8	188	35.2	2
7	5	12	24.9	1
7	2	190	17.4	1
7	1	189	40	2
7	1	187	56.6	2

no_ucs	sum_pourcent	classe_arg
1	95	1
2	52	2
2	44	1
5	84	2
5	16	1
7	90	1
7	10	2

no_ucs	classe1	classe2
1	95	0
2	44	52
5	16	84
7	90	10

F2-6– Exemples de représentation du pourcentage de chaque classe d'argile par UCS

Etape 5 : cartographie du taux d'argile et de sa variabilité intra-UCS

Méthode d'agrégation par la dominante : dans un premier temps, il faut procéder à l'extraction de la table finale comprenant le numéro de l'UCS (lien indispensable avec la couche géographique), le taux d'argile de l'UTS dominante et le pourcentage de représentativité de l'UTS au sein de l'UCS. Ensuite, il suffit de procéder à une jointure attributaire sous SIG avec la couche graphique des UCS pour cartographier le taux d'argile et la variabilité intra-UCS.

Méthode d'agrégation par la représentation des pourcentages de chaque classe d'argile : dans un premier temps, il faut procéder à l'extraction de la table finale comprenant le numéro de l'UCS (lien indispensable avec la couche géographique), le pourcentage de représentativité de chaque classe d'argile. Ensuite, il suffit de procéder à une jointure attributaire sous SIG avec la couche graphique des UCS pour cartographier la variabilité des pourcentages des classes d'argile.

Etape 6 : croisement entre UCS et communes du Lot-et-Garonne

Les opérations à ce niveau sont similaires, quelle que soit la méthode d'agrégation mise en oeuvre.

Le croisement des communes du Lot-et-Garonne et des UCS permet de pouvoir agréger et visualiser l'information au niveau communal. L'opération d'analyse spatiale utilisée est ici l'outil de superposition «intersection».

Suite à cette opération, il est important de créer un champ «surface» pour calculer la superficie des polygones nouvellement créés par l'opération d'intersection.

Etape 7 : cartographie des communes qui possèdent sur plus de 70% de leur surface des sols argileux

Deux conditions se cumulent pour répondre à l'objectif :

- les communes dites «argileuses» ont au moins 70% de leur surface avec des UCS de sols argileux
- les représentativités cartographiques (ou puretés cartographiques) de ces UCS de sols argileux doivent être supérieures ou égales à 70 %.

La table attributaire de la couche issue de l'intersection peut être exportée et retravaillée sous Excel® (F2-7 - table de gauche). L'outil de Tableau croisé dynamique permet de synthétiser l'information par commune. L'intérêt ici est d'obtenir par commune, le pourcentage surfacique des sols argileux, pour des puretés cartographiques des UCS supérieures ou égales à 70%.

Premièrement, les valeurs de taux d'argile sont mises en classe (classe1 <30% argile et classe2 >=30% argile). Pour chaque valeur de pureté cartographique et pour chaque classe d'argile, le pourcentage surfacique est reporté par commune (F2-7).

Les derniers champs du tableau récapitulatif représentent les sommes des pourcentages surfaciques pour chaque classe d'argile et pour des puretés cartographiques supérieures ou égales à 70 %. C'est à partir du résultat pour la classe 2 que l'on identifiera les communes avec plus de 70 % de leur surface en sols argileux.

Dans l'exemple de la Figure ci-après, les communes n°47003 et n°47254 présentent des UCS de sols non argileux avec une pureté cartographique >=70%, respectivement sur 12.8 % et 52% de leur surface communale. Il n'y a aucune UCS de sols argileux avec des puretés >=70 % pour ces deux communes. Des UCS de sols argileux avec des puretés entre 40 et 50% couvrent respectivement 35.7 % de la surface de la commune n°47003 et 16.3 % de la surface de la commune n°47254.

zone_comm	no_ucs	surface	pourcent	val_arg_ucs	classe_arg
47063	29	325412	73	8,4	1
47063	29	842617	20	8,4	1
47063	80	4400442	40	26,7	1
47063	80	3487350	40	26,7	1
47063	14	2781737	45	24,0	2
47063	14	29111	45	24,0	2
47063	81	377079	40	24,8	2
47254	58	1768881	90	2,0	1
47254	58	680333	50	2,0	1
47254	58	395488	90	2,0	1
47254	58	358739	50	2,0	1
47254	59	13088426	55	6,7	1
47254	53	664278	100	14,9	1
47254	53	482007	100	14,9	1
47254	52	888043	100	14,9	1
47254	81	218807	40	24,8	2
47254	81	2411200	40	24,8	2
47254	48	4971757	50	26,2	2

		pourcent = pureté cartographique								sup70
zone_comm	classe1	classe2	classe3	classe4	classe5	classe6	classe7	classe8	classe9	classe10
47063	31,9%	31,3%	24,6%	0,0%	0,0%	12,8%	0,0%	0,0%	12,8%	8,0%
47254	8,0%	6,4%	0,0%	5,9%	31,7%	0,0%	48,3%	3,7%	52,0%	8,0%

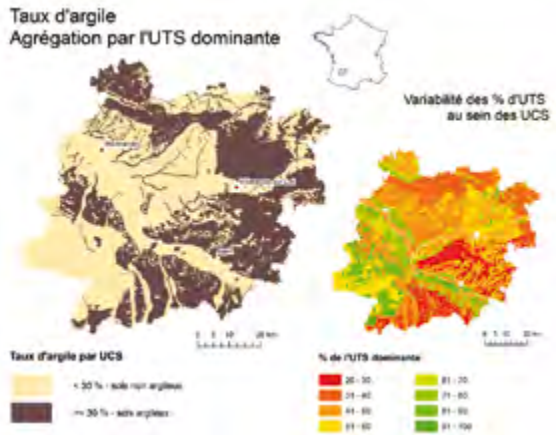
F2-7 – Exemple de tableau récapitulatif pour 2 communes (méthode uts dominante)

Résultats

La production de la carte des sols argileux par la méthode d'agrégation par l'UTS dominante (Carte A, F2-8) doit systématiquement s'accompagner d'une carte de pureté cartographique (Carte B, F2-8). Cette dernière permet de connaître la variabilité des pourcentages d'UTS au sein des UCS, et ainsi le degré de complexité de l'UCS. Plus le pourcentage de pureté est faible, plus l'UCS est hétérogène (nombreuses UTS).

L'agrégation par la dominante révèle des sols argileux sur la moitié du territoire. Cependant, il faut modérer ce propos en observant en association la carte de pureté de l'information. Nous remarquons qu'en grande majorité les UCS de sols argileux sont associées à des puretés cartographiques moyennes à faibles. Ces UCS possèdent plusieurs UTS dont seule la dominante est visualisée sur la carte avec sa proportion relative dans l'UCS.

La méthode de représentation des pourcentages de chaque classe d'argile génère deux cartes : une carte par classe d'argile (Cartes C et D, F2-9). Pour chaque classe, une échelle commune de variabilité des pourcentages a été construite pour les deux cartes, afin de faciliter la comparaison. Pour cet exemple, 2 classes de taux d'argile ont été définies en fonction de l'objectif fixé. Dans ce cas, la carte C est l'inverse de la carte D. Ces cartes permettent de visualiser la présence plus ou moins forte de sols non argileux au sein des UCS d'une part (Carte C) et des sols argileux d'autre part (Carte D).

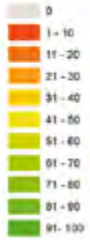


F2-8 – Cartographie des sols argileux dans le Lot-et-Garonne selon la méthode de l'UTS dominante

En comparant les cartes A et D, le zonage* des sols argileux est très semblable. La carte D révèle des sols argileux avec des pourcentages de représentativité au sein des UCS de plus de 50 %. La carte A, quant à elle, montre des UCS de sols argileux avec des représentativités bien plus faibles. La mise en classe sur la seconde méthode évite de perdre de l'information au sein de l'UCS.

Soils non argileux Moins de 30 % d'argile

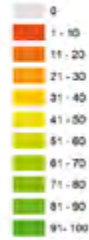
% de chaque
classe d'argile



0 5 10 20 km

Soils argileux Plus de 30 % d'argile

% de chaque
classe d'argile



0 5 10 20 km

F2-9 – Représentation des pourcentages de chaque classe d'argile : classe 1 - sols non argileux et classe 2 - sols argileux.

Dans cet exemple, deux conditions se cumulent pour identifier les communes dites «argileuses» : (1) au moins 70 % de la surface de la commune doit être couverte par des sols argileux ET (2) la pureté cartographique de ces unités de sols argileux doit être au moins de 70%. De plus, la pureté cartographique de ces sols argileux doit être supérieure ou égale à 70 %. Ainsi, avec la méthode par l'UTS dominante, aucune commune ne ressort et n'est considérée «argileuse». Par la méthode de mise en classe et de représentation des pourcentages des classes, 53 communes «argileuses» sont identifiées (F2-10).

Représentation par commune
Méthode UTS dominante
0 communes "argileuses"



% de surface communale
avec des sols argileux
Moins de 70 %
Plus de 70 %

Représentation par commune
Méthode des pourcentages par classe
53 communes "argileuses"



% de surface communale
avec des sols argileux
Moins de 70 %
Plus de 70 %

Discussion

Les cartes des communes «argileuses» du Lot-et-Garonne sont issues d'un processus d'agrégation à une large échelle (1/250 000) et ne peuvent donc pas retranscrire certaines variabilités locales. Cet étude montre que le choix des méthodes d'agrégation impacte les résultats. Il est nécessaire de tester ces méthodes et de les sélectionner en fonction des données et des objectifs, mais aussi de les confronter à une expertise

pédologique. Ici, la représentation des pourcentages des classes de taux d'argile semble la plus pertinente. Deux conditions ont été fixées pour établir une cartographie communale des sols argileux : un seuil minimal de 70 % de la surface communale couverte par des unités de sols argileux, avec pour ces dernières, un niveau de pureté cartographique supérieur ou égal à 70 %. Ces seuils, établis à dire d'experts, pourraient être modifiés et les résultats en seraient différents. De plus, seul le taux d'argile des strates de surface est pris en considération, pour la création de 2 classes : sols argileux / sols non argileux. Les sols à comportement argileux (à texture limono-argileuse) auraient pu être considérés. Ainsi, il aurait fallu prendre le taux de sable en compte dans le traitement des données. Par souci de simplification, le choix s'est porté sur la manipulation d'un seul paramètre de la base de données, le taux d'argile, variable primaire principale pour répondre à la question. L'exemple avait pour but aussi d'illustrer le croisement simple entre une donnée primaire et une donnée non pédologique (commune).

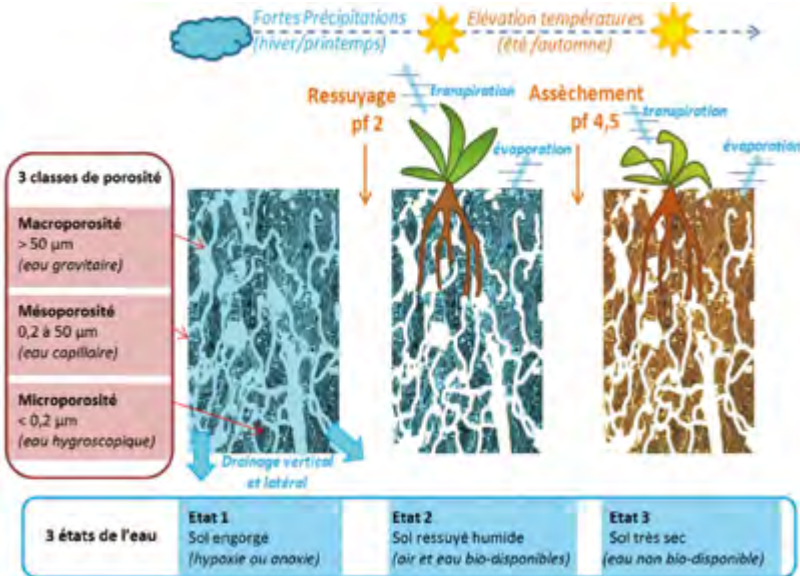
Estimation du réservoir utile en eau des sols en Bretagne

Thématiques : Agronomie, environnement
Zone d'étude : région Bretagne
Echelle de restitution : 1/250 000
Base de données utilisée : RRP* de la Bretagne
Contact : blandine.lemercier@agrocampus-ouest.fr

Objectifs et enjeux

L'estimation du Réservoir Utile en eau des sols (RU) présente un enjeu très important pour la gestion des systèmes agricoles mais aussi de l'environnement. La capacité du sol à retenir puis à restituer l'eau aux plantes est déterminante pour le rendement des cultures. Connaître le RU permet notamment d'élaborer des objectifs de rendement, d'estimer le bilan hydrique et de piloter l'irrigation. D'un point de vue environnemental, les molécules en solution et potentiellement polluantes comme les pesticides peuvent être dégradées par les microorganismes du sol et les réactions physico-chimiques et permettent ainsi l'épuration de l'eau. Ces processus sont possibles quand l'eau est retenue dans le sol, donc quand le RU est assez élevé (F3-1). La capacité de stockage en eau du sol permet également au sol de jouer le rôle de tampon dans la régulation des flux d'eaux dans les paysages en période hivernale. Une carte régionale du RU est donc un document précieux d'aide à la décision pour la gestion des territoires.

Le RU est la différence entre la quantité d'eau qui reste dans le sol une fois que l'eau gravitaire s'est écoulée (à la capacité au champ) et la quantité d'eau retenue dans les plus petits pores, liée au sol avec une force supérieure à la force de succion des racines (point de flétrissement permanent). Le RU est mesurable au laboratoire, mais la procédure étant lourde et coûteuse, il est estimé par une fonction de pédotransfert*.



F3-1 – Étapes du dessèchement des sols au cours des saisons (Ducommun C., com.pers.)

En Bretagne, l'estimation du Réservoir Utile en eau des sols (RU) à différentes profondeurs a été réalisée en appliquant une fonction de pédotransfert* locale (Walter, 1992). Le choix de cette fonction de pédotransfert est justifié par le fait qu'elle est adaptée au contexte local et que tous les paramètres nécessaires à l'estimation du RU sont présents dans le RRP.

Cette étude a été menée en plusieurs étapes successives :

- Sélection des UTS* et des strates* considérées dans l'étude
- Estimation du RU de la terre fine de chaque strate
- Estimation du RU de chaque UTS
- Agrégation par UCS* (moyenne pondérée)
- Estimation de la variabilité intra-UCS (écart-type pondéré)
- Cartographie

Quelles informations extraire de la base de données ?

- Pour chaque UTS : teneur en carbone organique, en argile, en limons fins, en limons grossiers, et charge en éléments grossiers de chacune des strates (table STRATE-QUANT) ainsi que leur épaisseur (table STRATE) ;
- Répartition des UTS au sein des UCS (table L_UTS_UCS).

Variable à extraire	Nom du champ	Table
Propriétés des strates (valeurs modales) : TAUX ARGILE, TAUX LIMON, CARBONE, BONDANCE_EG, LIM_FIN_TOT (limons fins sur limons totaux)	nom_var	STRATE_QUANT
Profondeur d'apparition des strates	prof_appar_moy, prof_apar_min	STRATE
Épaisseur des strates	epais_moy	STRATE
Identification des strates de surface des UTS	no_strate, id_strate, id_uts	STRATE
Identification des UTS pour sélectionner celles qui sont considérées	No_uts, id_uts	UTS
Vérification des valeurs par UTS	id_uts, no_uts	UTS
Pourcentage pour l'étape d'agrégation	Pourcent, id_ucs	L_UTS_UCS
Cartographie - Lien entre les bases sémantique et graphique	id_ucs, no_ucs	UCS

Etape 1 : sélection des UTS et des strates considérées dans l'étude

Le RU des sols de fonds de vallées et des sols tourbeux n'a pas été calculé, car leur RU est rarement limitant avec risque de biaiser les résultats.

De même, les strates O, C, M, R et D n'ont pas été incluses dans l'estimation du RU, ces strates ayant des propriétés de rétention en eau très faibles ou étant situées hors d'atteinte des racines.

Le RU a été estimé sur une épaisseur maximale de 100 cm, qui correspond à la profondeur maximale de prospection des racines des plantes cultivées. Ainsi, les strates dont la profondeur d'apparition est inférieure ou égale à 100 cm et supérieure ou égale à 0 ont été sélectionnées.

Des requêtes en langage SQL permettent de réaliser cette sélection des UTS et des strates.

Etape 2 : estimation du RU de chaque strate

Le RU est estimé sous Access par l'application des formules suivantes :

$RU_{strate} \text{ (mm/cm de sol)} = 0,1 \times (\% \text{argile}/9,5 + \% \text{MO}/2,8 + \% \text{Limons fins}/1,8 + \% \text{limons grossiers}/4,45)$

$RU_{strate} \text{ (mm)} = RU_{strate} \text{ (mm/cm de sol)} \times \text{épaisseur (cm)} \times (100 - \% \text{ éléments grossiers}) / 100$

Dans ce cas, le RU des éléments grossiers est considéré comme nul. Pour les UTS dont la somme des strates est supérieure à 120 cm, l'épaisseur de la dernière strate est recalculée par une requête simple de façon à ce que l'épaisseur totale de l'UTS ne dépasse pas 120 cm.

Etape 3 : estimation du RU de chaque UTS

Cette étape consiste à sommer, toujours sous access en langage SQL, les RU des strates (de 1 à n) qui composent les UTS :

$RU_{UTS} \text{ (mm)} = \sum_{(i=1)}^n RU_{strate} i \text{ (mm)}$

Etape 4 : agrégation par UCS (moyenne pondérée)

Les valeurs RU calculées par UTS sont ensuite agrégées par UCS selon la méthode de la moyenne pondérée. Dans un premier temps, la somme des pourcentages des UTS dans chaque UCS est calculée. Comme toutes les UTS n'ont pas été considérées dans cette étude, cette valeur sera généralement inférieure à 100. Les valeurs de RU des UTS sont ainsi multipliées par le pourcentage occupé par l'UTS dans l'UCS, sommées, et divisées par la somme des pourcentages des UTS dans l'UCS :

$RU_{UCS} \text{ (mm)} = 1/POURCENT \times (\sum_{(i=1)}^n (RU_{UTS} i \times POURCENT_{UTS} i))$

Etape 5 : estimation de la variabilité intra-UCS (écart-type pondéré)

Une information sur la dispersion des valeurs au sein des UCS est donnée par l'écart-type pondéré, calculé pour chaque UCS.

Au final, on obtient une table qui comporte ici le numéro de l'étude (F3-2).

no_etude	no_ucs	SdP	RU_UC_EPSMAX100_mmm	EC_RU_mmm
25022	105	80	116,675147784223	15,79106537
25022	106	86	117,018511081309	17,23339703
25022	202	85	121,024090962665	20,99548303
25022	307	90	131,911418887164	17,98789946
25022	308	85	145,352014693238	8,743094272
25022	304	90	156,578567966325	14,20766486
25022	401	80	135,812858717404	25,51354042
25022	402	80	146,168586752762	19,86934730
25022	409	85	135,867867051291	17,39159642
25022	501	85	98,8565838702889	14,13610214
25022	502	90	135,479924715966	14,75175810
25022	503	85	141,87055959769	17,16600008
25022	504	75	129,003977516491	22,53100622
25022	505	83	105,136514654433	14,87904081
25022	506	83	142,400019857483	18,52514178
25022	706	85	106,458926283145	9,278980510
25022	707	90	138,349057963038	21,73401182
25022	709	80	117,056126799581	6,956457969
25022	710	75	84,2163204009671	12,53836950
25022	802	90	98,9239240419586	9,269434235
25022	906	100	91,3559020920556	8,48327537
25022	907	95	103,129889100966	6,341997638
25022	908	85	131,179633808926	28,29751974
25022	909	85	163,238079481612	30,43042987
25022	1000	88	97,2961225141137	11,71832327

F3-2 – Résultat de l'agrégation des valeurs de RU des UTS au niveau des UCS

Etape 6 : cartographie

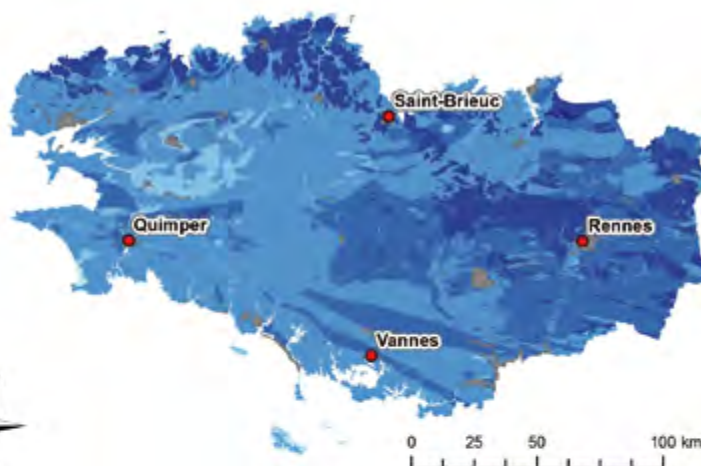
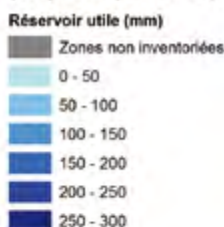
La dernière étape consiste à réaliser une jointure attributaire entre la table de résultats ci-dessus et la couche graphique des UCS.

Résultats

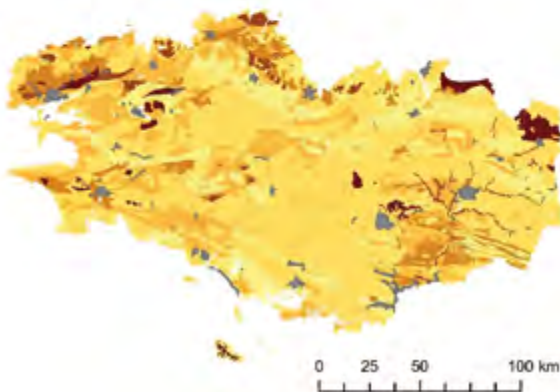
Les résultats se présentent sous la forme de deux cartes, l'une donne la valeur de la moyenne des RU des UTS, pondérée par leur surface, l'autre donne une information sur la dispersion des valeurs à partir de l'écart-type pondéré.

Les sols dont les réserves utiles sont les plus faibles se rencontrent près des côtes sud, où les sols ont des textures sableuses et des épaisseurs faibles, et sur les reliefs les plus accentués où les sols ont de fortes charges en éléments grossiers et sont plutôt minces. Les sols épais et limoneux du nord et de l'est de la région présentent des RU élevés. Les côtes nord de la région notamment ont des RU fréquemment supérieurs à 250 mm (F3-3). La présence de ces sols à fort potentiel agricole et le climat doux près des côtes sont très favorables aux cultures légumières de plein champ qui marquent très fortement le paysage du nord de la Bretagne.

a - Réservoir utile par UCS (moyenne pondérée)



b- Ecart-type des valeurs de réservoir utile par UCS



F3-3 – Réservoir Utile en eau des sols en Bretagne représenté par Unités Cartographiques de Sol

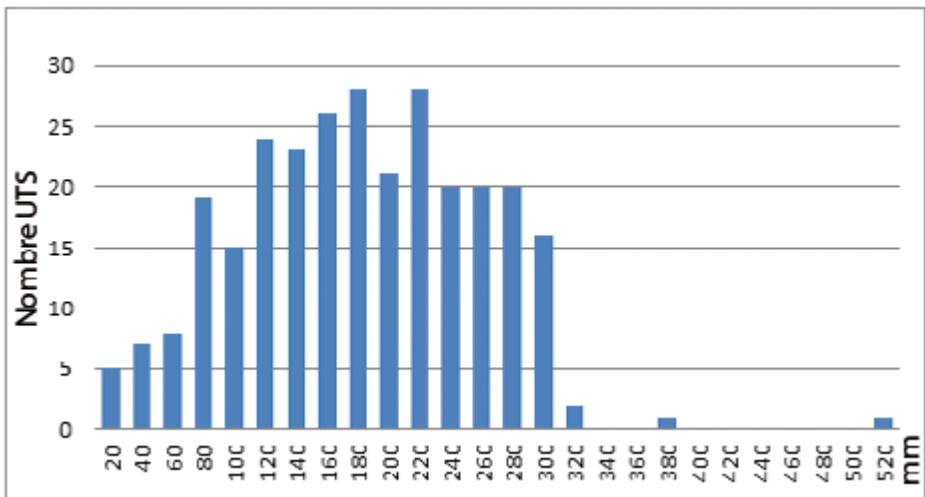
La carte des écart-types montre que ceux-ci sont majoritairement compris entre 20 et 40 mm. Ils sont plus élevés dans le nord de la région où les sols sont assez variables et dans le sud-est de la région. Les UCS dont les écarts-types sont les plus élevés correspondent à des unités qui se composent de sols très différents les uns des autres.

Dans le nord de la région, la couverture de limons éoliens est épaisse, mais discontinue et influencée notamment par les variations rapides du relief. Ainsi, des sols au sein d'une même UTS peuvent avoir des caractéristiques très différentes.

Discussion

Dans cette étude, les sols de fonds de vallées et les sols tourbeux ont été exclus, leur réserve utile étant considérée comme non limitante. De même les horizons* qui ne sont pas accessibles aux racines ou qui retiennent très peu d'eau ont été écartés et la profondeur sur laquelle le calcul est réalisé a été limitée à la profondeur de prospection des racines. Ces choix découlent du fait que le RU a été estimé dans ce cas pour répondre à une problématique agronomique, permettant de localiser les zones où le risque de stress hydrique sera le plus important. Pour d'autres applications comme la recharge des nappes phréatiques ou l'estimation du risque de lixiviation des nitrates, il serait préférable d'inclure tous les horizons.

Le RU utile est une propriété pédologique éminemment difficile à estimer avec justesse*, de nombreux paramètres intervenant. Les FPT* existantes fournissent souvent des valeurs assez variables d'une FPT* à l'autre. La variabilité inhérente aux RRP renforce les incertitudes liées à cette thématique spatialisée. Elle doit donc être utilisée avec précaution, uniquement pour donner des indications globales. Pour un pilotage des pratiques agricoles, les RU estimés par UTS pourront également être utilisés sous forme d'un référentiel, et même s'avérer plus pertinents qu'une carte pour répondre à cet objectif. Cela nécessite au préalable de rattacher le sol étudié à une UTS caractérisée dans le RRP. La Figure ci-dessous montre que les UTS de Bretagne couvrent une large gamme de RU, centrée autour de 120 à 220 mm.



F3-4 – Nombre d'UTS par classe de réservoir utile en eau

Pour en savoir plus :

Moussa I. (2011) - Spatialisation régionale de propriétés des sols à partir de la base de données Sols de Bretagne. Exemple de la teneur en argile et de la réserve utile des sols. Mémoire Master 2, AGROCAMPUS OUEST, 59 pages + annexes

Guide de vocation des Territoires agricoles et forestiers du Rhône

Thématiques : Agronomie, environnement

Zone d'étude : Auvergne-Rhône-Alpes, Département du Rhône (69)

Echelle de restitution : 1/100 000

Base de données utilisée : RRP* du Rhône

Contact : ahmed.chafchafi@aura.chambagri.fr

Objectifs et enjeux

La nécessité de disposer de données physiques et d'une cartographie départementale permettant d'apprécier avec objectivité les aptitudes des territoires ruraux, et de les gérer de façon cohérente et raisonnée, s'est imposée dans un contexte de transformation progressive de l'utilisation de ces territoires, au début des années 1990.

Différents facteurs contribuaient, et risquaient de contribuer davantage encore, à accélérer un processus difficilement contrôlable de mutation des terres agricoles vers d'autres utilisations, parmi lesquelles :

- l'incitation au boisement des terres agricoles en déprise ;
- la forte pression foncière dans les zones d'urbanisation, qui pousse au changement d'affectation des sols agricoles.

L'objectif immédiat est de maîtriser de façon cohérente, sur l'ensemble du département du Rhône, le boisement des terres agricoles laissées à l'abandon.

Au-delà, il s'agit de disposer d'un document de référence offrant une connaissance la plus objective possible des espaces agricoles et forestiers et de leurs potentialités, afin de mieux préserver l'avenir des activités agricoles.

Ce document vise à délimiter :

- une zone agricole «prioritaire», dont cette vocation est à maintenir ;
- une zone agricole «intermédiaire», dont la vocation est susceptible d'évoluer ;
- une zone forestière.

Méthodologie

L'élaboration de ce document de référence, à l'échelle de 1/100 000, a nécessité la réalisation préalable de cartes thématiques susceptibles d'apporter différentes informations caractérisant aussi bien les aptitudes des terres agricoles, que leur vulnérabilité en matière environnementale (érosion, lessivage des nitrates). Ces cartes ont été produites à partir de données physiques réalisées par ailleurs (climat, relief...) ou constituées et validées dans le cadre de ce projet (données pédologiques...).

Les étapes de réalisation

La réalisation de ces cartes thématiques impose un « itinéraire cartographique », constitué de différentes étapes citées au paragraphe 4.2.2.4, à savoir :

- définition précise de l'emprise géographique de l'aire d'étude. Il s'agit de délimiter géographiquement au sein de l'espace départemental, les terres agricoles qui feront effectivement l'objet d'une analyse de leurs aptitudes et de leurs vulnérabilités ;
- constitution du Système d'Information Géographique qui rassemble l'ensemble des données de base nécessaires à l'élaboration des cartes thématiques ;

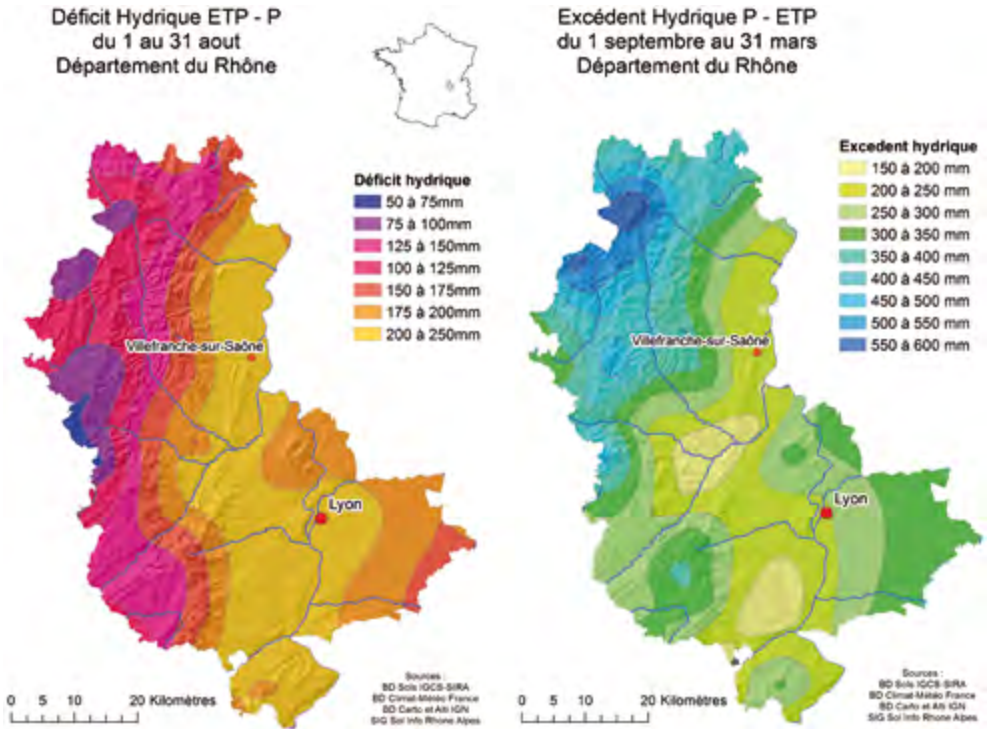
- recherche des critères d'analyse par thématique. Il s'agit de sélectionner parmi les paramètres du milieu (sols, climat, occupation des sols, relief), les critères ou données de base susceptibles d'approcher au mieux l'aptitude culturale, la potentialité forestière et les vulnérabilités environnementales des terres. Cette étape se fait en partenariat étroit avec les experts de terrain ;
- traitement de données et conception de modèles d'analyse. Il s'agit de hiérarchiser l'influence des critères définis dans l'étape 3, puis de déterminer les modèles de classification et de combinaison, les mieux à même de fournir de façon automatique des représentations cartographiques pertinentes. Ce travail de modélisation est réalisé en partenariat étroit avec les experts locaux ;
- édition des cartes thématiques finales.

Les données géographiques mobilisées

- la carte de l'occupation des sols
- la carte des zones d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC)
- la carte des réseaux d'irrigation
- la carte des sols et la base de données associée (texture, capacité de stockage en eau, hydromorphie, battance...)
- la carte du climat et la base de données associée (déficit hydrique estival, excédent hydrique hivernal)
- le modèle numérique de terrain (cartes de pente et cartes d'exposition)

Base de données	Origine	Modalités et densité d'observation	Nb unités carto	Nb variables totales	Variabiles utilisées	Rôle des variables
AOC (Appellation d'Origine Contrôlée)	INAO / SIRA (Institut national de l'origine et de la qualité/Sol Info Rhône-Alpes)	agrégation du cadastre (cartes source 1/25 000 et 1/100 000)	14	1	- présence AOC	exclusion zone AOC
Irrigation	DDAF / SMHAR/SIRA	agrégation du cadastre (carte source 1/50 000)	1	1	- périmètre irrigué	exclusion zone irriguées
Agropaysages	INAPG (Institut national agronomique Paris-Grignon) / SIRA / CDA 69 (Chambre Départementale d'Agriculture)	interprétation images SPOT 25 Ha	72	56	- occupation des sols - morphologie	premier critère de tri
Sols	CRA RA / CDA 69 RRP	prospection terrain 1 sondage pour 150 ha	91	70	- texture - RU (CSE) - hydromorphie - pH	en général 2 ^{ème} grand critère de tri
Climat	METEO FR / SIRA	modèle AURHELY 1 donnée pour 400 ha	9	2	- P - ETP	déficit ou excédent hydrique potentiel
BD ALTI	IGN	1 mesure par ha		3	- X - Y - Z	- classes de pente - exposition
BD CARTO	IGN	8 à 25 ha		4	- routes - hydro - lieu-dit - urbain	habillage

SIRA : Sol Info Rhône-Alpes ; CRA RA : Chambre d'Agriculture Rhône-Alpes ; INAO : Institut National de l'Origine et de la Qualité ; IGN : Institut Géographique National ; SMHAR : Syndicat Mixte d'Hydraulique Agricole du Rhône ; DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt



F4-1 - Déficit hydrique (gauche), excédent hydrique (droite)

Les modèles d'évaluation et d'analyse spatiale

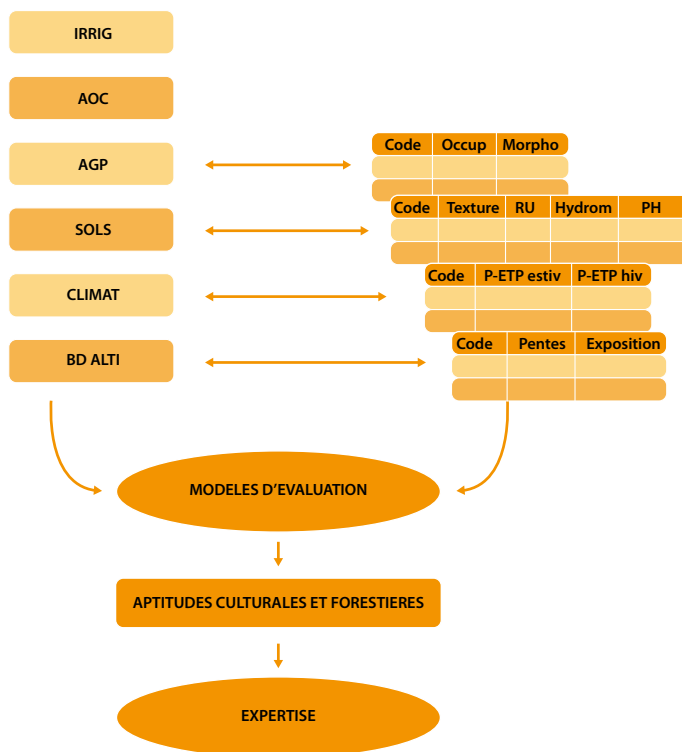
Quatre modèles d'analyse ont été construits pour la cartographie de l'aptitude culturelle des terres. Chaque modèle est spécifique à un ensemble « occupation du sol-morphologie », et combine des critères qui lui sont propres, sous la forme d'algorithmes. Il en résulte une proposition de classement de l'aptitude culturelle des terres (F4-3).

Dans la pratique, il s'agit de combiner les différentes couches d'informations utilisées (F4-2) et de procéder à des sélections de variables caractérisant un niveau d'aptitude donné.

Les modèles tiennent compte de toutes les possibilités quant à l'association des variables physiques, climatiques et de pratiques agricoles (F4-3).

Ainsi, pour un même ensemble « occupation du sol- morphologie », la modification d'une variable physique ou climatique entraîne un déplacement du niveau d'aptitude en question. Pour exemple, sur fond de vallée, non hydromorphe, en prairie, un stress hydrique faible engendre une aptitude culturelle élevée ; un stress hydrique moyen, une aptitude culturelle bonne ; et un stress hydrique élevé, une aptitude culturelle moyenne.

Selon ces modèles, un sol donné peut avoir une aptitude culturelle élevée pour certains systèmes de cultures et une aptitude culturelle faible pour d'autres. Ainsi, un sol superficiel caillouteux en pente sera considéré comme favorable en zone viticole s'il est correctement exposé, alors qu'il aura une aptitude culturelle faible en polyculture. De la même manière un sol sableux superficiel sera favorable à du maraîchage si l'irrigation est possible, alors qu'il aura une très faible aptitude pour les grandes cultures.



F4-2 - Démarche de croisement de données en entrée et d'analyse spatiale

Par application de ces modèles aux différentes zones d'expertise, chaque petite région ou zone d'expertise est découpée en quatre classes d'aptitudes culturelles. Les cartes d'aptitude agricole ainsi obtenues ont été validées par les ingénieurs et techniciens de secteur de la Chambre d'Agriculture du Rhône, zone par zone.

Ces cartes ont ensuite été assemblées pour l'établissement de la carte départementale d'aptitude des terres agricoles.

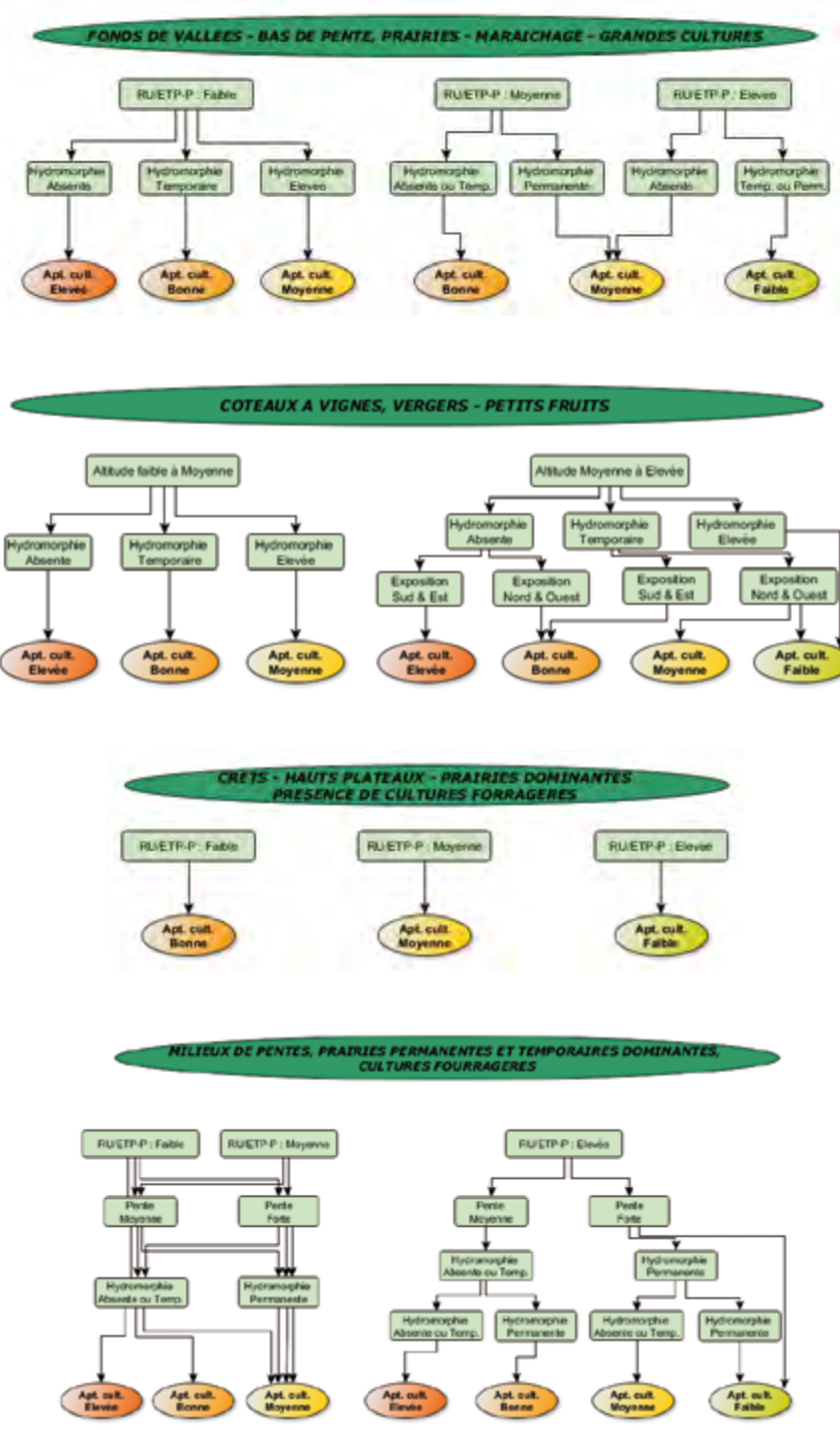
Résultats : Un outil pour élaborer les réglementations

Ce Guide de Vocation des Territoires Agricoles et Forestiers du Rhône (Boutefoy *et al.*, 1999) n'a pas de valeur réglementaire, mais il constitue un document de référence qui sera pris en compte dans l'élaboration des réglementations forestières et des documents d'urbanisme.

Ce guide est constitué de trois cartes (F4-4) établies au moyen d'un Système d'Information Géographique (SIG*), à partir notamment de la carte et de la base de données «sols» :

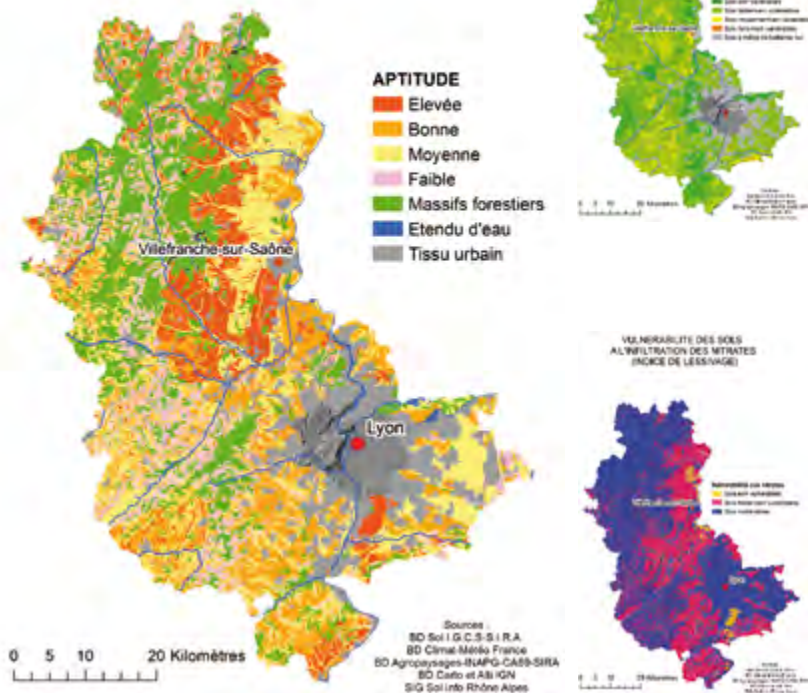
- carte d'aptitude culturelle des sols ;
- carte de vulnérabilité des sols à l'érosion (non explicité dans ce texte) ;
- carte de l'indice de lessivage des nitrates (non explicité dans ce texte).

De par la précision des données de base utilisées, ces cartes sont descriptives du comportement dominant du milieu, non de son fonctionnement à la parcelle. Elles constituent des outils d'aide à la décision adaptés à la problématique qui leur est assignée.



F4-3 - Modèles d'estimation de l'aptitude culturelle élaborés pour les quatre contextes « occupation du sol – morphologie »

APPROCHE DE L'APTITUDE CULTURALE DES TERRES EN FONCTION DES AGROPAYSAGES DEPARTEMENT DU RHONE



F4-4 - Cartes d'aptitude culturelle des sols, de vulnérabilité des sols à l'érosion et de l'indice de lessivage des nitrates

Discussion

L'élaboration de la carte des aptitudes culturales est accompagnée de la carte de la potentialité forestière dont l'objectif était d'approcher la potentialité forestière des terres agricoles du département, ceci en terme de potentialité de production.

Cette approche est notamment censée fournir un critère supplémentaire d'appréciation quant aux utilisations possibles des terres dont l'aptitude agricole est estimée faible.

L'échelle moyenne des documents cartographiques (1/100 000 à 1/50 000) a permis de s'affranchir des limites parcellaires et d'avoir une vision supra-communale avec un degré de précision assez élevé malgré l'échelle des plans. Ils ont rendu possible une vision d'ensemble du territoire nécessaire à des démarches d'aménagement global.

Ce travail très positif a un intérêt largement souligné par les élus locaux et qui souvent fait défaut dans les procédures conduites jusqu'à présent (POS, réglementation des boisements) :

- il apporte aux différents acteurs (élus, agriculteurs, propriétaires forestiers...) la connaissance de leur territoire avec une vision d'ensemble ;
- il permet de raisonner l'urbanisation des terrains agricoles et ruraux aussi bien que l'extension de la forêt avec une démarche d'aménagement global.

Le témoignage du Président de la Chambre d'Agriculture du Rhône abonde dans le même sens : «On dispose d'un outil nouveau, intéressant, pour essayer de mieux maîtriser les évolutions de l'agriculture face à la forêt et à l'urbanisation.»

Chapitre 5 - Disponibilité des données

Dans ce chapitre, la disponibilité des données pédologiques est abordée, mais également celle des données avec lesquelles elles pourraient être croisées. Sans être exhaustive, la liste des données et de leurs sources regroupe la plupart des informations d'intérêt. Les variables dérivées de MNT (pentes, courbures, indices topographiques divers), utilisées en cartographie numérique des sols, ne sont pas présentées ici.

Le tableau suivant indique la disponibilité et le format (ponctuel ou surfacique) des données pédologiques élaborées dans le cadre des différents programmes du Gis Sol.

	Support géographique	inventaire / surveillance	Base de données	Disponibilité des données
RMQS*	Grille régulière	Surveillance	DoneSol, données ponctuelles	Web : Indiquasol[3]
IGCS*	UCS : unité pédologiquement pertinente	Inventaire	DoneSol, données ponctuelles et surfaciques	Variable selon les partenaires régionaux[4]
BDAT*	Unité administrative	Inventaire, surveillance	Table de données unique	Web : statistiques cantonales[5]

Les données présentées dans les tableaux suivants peuvent être croisées avec les données sols présentées ci-dessus à condition de respecter *a minima* la résolution* des couches utilisées. La notion de résolution en géomatique* est comparable à la notion d'échelle pour des cartes papier (voir chapitre 2). Il s'agit du seuil en dessous duquel deux objets sont confondus. A titre, d'exemple, La BDAT* qui a une résolution cantonale ne pourra pas être croisée avec un parcellaire agricole dont l'échelle est proche du 1/10 000. Il est important de comparer ou de croiser des jeux de données qui ont des échelles de réalisation similaires. A ce titre les RRP* (Référentiels Régionaux Pédologiques du programme IGCS) dont l'échelle de référence est le 1/250 000 ne devraient pas être couplés à des jeux de données produits au 1/25 000 ou 1/10 000. La facilité avec laquelle on peut superposer les données dans un SIG* rend cette aberration possible. Les données présentées ici sont des données thématiques observées ou mesurées par différents organismes. La plupart sont gratuites et quelquefois payantes (généralement le prix de l'extraction reste modique).

Ces données sont disponibles sous différents formats :

- fichiers SIG
- données vecteur* : le fichier est composé de point, de lignes ou de polygones.
- données raster* : le fichier est une image composée de pixels*. Certains rasters sont associés à une table de données qui permet de faire des requêtes ou des calculs

(raster « valeur »). Si le fichier n'est pas pourvu d'une table attributaire, il servira de fond de carte (raster « image »).

- Carte ou photo scannée : l'image est issue d'un document papier qui a été numérisé. Ce document pourra servir de fond de carte. Généralement, le fichier n'est pas localisé dans l'espace, il faut donc le géoréférencer manuellement dans un logiciel de SIG.

- Flux de données SIG : le logiciel de SIG est connecté à un serveur diffusant des données SIG en permanence. Ces données sont alors superposées à vos autres couches. Les fonctionnalités des flux de données SIG varient en fonction des serveurs : a minima les couches peuvent être visualisées, certaines peuvent être interrogées ou requêtées.

- WMS/WMTS : le flux diffusé est un raster

- WFS : le flux diffusé est composé d'entités (points, lignes ou polygones)

- Tableau : le fichier est composé de lignes et de colonnes. Si des coordonnées géographiques sont indiquées (XY), un fichier de type point pourra être généré et affiché dans un SIG.

- Données XYZ : il s'agit d'un fichier texte contenant des coordonnées XY et des altitudes (Z). Il pourra être converti en raster pour être utilisé dans un SIG.

Concernant l'accès aux données environnementales spatialisées, la plupart des régions ont mis en place une IDG ou IDS (Infrastructure de Données Géographiques, ou Spatiales) qui permettent de mutualiser, d'échanger et de diffuser des données géographiques à l'échelle d'un territoire, au bénéfice d'acteurs publics, et indirectement des citoyens. Ils fonctionnent comme des portails de l'information géographique en région.

Voici les principales IDG actuellement opérationnelles :

- Alsace : <http://sigrs-gisor.org/>
- Aquitaine : <http://www.pigma.org/>
- Auvergne : <http://www.craig.fr/>
- Basse Normandie : <http://www.geonormandie.fr/accueil>
- Bourgogne : <http://www.geobourgogne.fr/accueil>
- Bretagne : <http://cms.geobretagne.fr/>
- Centre : <http://www.geo-centre.fr/accueil>
- Champagne-Ardenne : non opérationnel
- Corse : <http://www.corse.fr/infogeo/>
- Franche-Comté (Jura) : <http://www.geojura.fr/>
- Haute Normandie : <http://www.prodige-hn.fr/PRRA/> (non fonctionnel)
- Ile-de-France : pas de structure régionale
- Languedoc-Roussillon : <http://www.siglr.org/>
- Limousin : <http://www.geolimousin.fr/accueil>
- Lorraine : non opérationnel
- Midi Pyrénées : <http://www.mipygeo.fr/accueil>
- Nord pas de Calais : <http://www.ppige-npdc.fr/portail/>
- Pays de la Loire : <http://www.geopal.org/accueil>
- Picardie : <https://www.geopicardie.fr/portail/>
- Poitou-Charente : <http://www.pegase-poitou-charentes.fr/accueil>
- PACA : <http://www.crige-paca.org/>
- Rhône Alpes : <http://www.georhonealpes.fr/accueil>

DOM-TOM :

- Guadeloupe : <http://www.karugeo.fr/accueil>
- Guyane : <http://www.cries-guyane.fr/index.php4>

- Martinique : non fonctionnel
- Réunion : <http://www.peigeo.re/accueil>
- Nouvelle Calédonie : <http://georep.nc/>

Plateformes thématiques :

- Nature paysage et biodiversité : <http://www.naturefrance.fr/>
- Système d'information sur l'eau : <http://www.eaufrance.fr/>
- Système d'information sur le littoral :
<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/>

Les tableaux ci-dessous présentent les sources de données thématiques suivantes : topographie, géologie, hydrogéologie, occupation du sol, pratiques agricoles, climat, pédologie, cartes anciennes, cadastres, photos aériennes. Ils en détaillent le contenu, l'échelle ou la résolution* spatiale, la nature des données (vecteur ou raster) et leur disponibilité.

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
BD CARTO®	Réseaux (routier, ferré, hydrographique, etc.), limites administratives, toponymes, équipements, hydrographie, etc.	1/50 000	Données vecteurs	Payant ou sous licence, IGN : http://professionnels.ign.fr/bdcarto
BD TOPO®	Composantes topographiques, orographiques, hydrographie, (et autres) du Référentiel à Grande Echelle (RGE)	< 1/25 000 Résolution métrique	Données vecteur	Payant ou sous licence, IGN http://professionnels.ign.fr/bdtopo
BD ALTI®	Gamme de MNT (25m à 1000m)	De 1/50 000 à 1/1 000 000	Données au format XYZ ou ASC	Payant ou sous licence pour 25m et 50m, IGN : http://professionnels.ign.fr/bdalti Libre pour BDALTI au pas de 75m, 250m 500m ou 1000m
RGE Alti	Gamme de MNT (1m ou 5m)		Données raster	Payant ou sous licence, IGN : http://professionnels.ign.fr/rgealti
SCANS 25®	Scans des cartes au 1/25 000	1/25 000	Cartes scannées	Payant ou sous licence, IGN : http://professionnels.ign.fr/scan25
Autres Scan®	Scans des cartes	1/50 000, 1/100 000	Cartes scannées	Payant ou sous licence, IGN : http://professionnels.ign.fr/cartes
MNE ASTER	Modèles numériques d'élévation mondiaux produits par la NASA	30 m	Données raster	Gratuit : http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp
MNE SRTM		90m	Données raster	Gratuit : http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/
API du Geoportail Géoservices IGN pour SIG	Données IGN issues du Référentiel à Grande Echelle (RGE®) : orthophotographique, topographique et altimétrique, parcellaire, adresse et altimétrique.	Parcellaire	Flux WMS et WMTS	Payant ou sous licence, IGN: http://professionnels.ign.fr/api-sig

Données géologiques

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
Bases de données du BRGM : cartes géologiques de France	Formations géologiques, contours, éléments structuraux	1/50 000	Cartes scannées et données vecteur	Payant, BRGM http://www.brgm.fr/ Consultation libre : http://infoterre.brgm.fr/ Accès Géoportail : http://geoportail.gouv.fr
		1/250 000	Cartes scannées	
		1/1 000 000	Carte scannée	
		1/1 000 000	Données vecteur	http://onegeology-europe.brgm.fr/geoportal/viewer.jsp
spectrométrie gamma aéroportée	Données géophysiques		raster	Consulter le BRGM Non disponible sur toutes les régions
Géoservices OGC du BRGM	Géologie, risques naturels, observatoire des matériaux	Toutes les échelles	Service OGC WMS et WFS	http://infoterre.brgm.fr/geoservices-ogc

Hydrologie souterraine et de surface

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
BD RHF	Référentiel Hydrogéologique Français	1/100 000	Données vecteur	Libre sous condition http://sandre.eaufrance.fr/
Masse d'eau souterraine		1/100 000	Données vecteur	Libre sous condition http://sandre.eaufrance.fr/
Base de données gérée par le BRGM	Remontées de nappe PPRI	Echelle départementale	Données raster ou vecteur	Libre ou DDT http://www.inondationsnappes.fr
IDPR	Indice de développement et de persistance des réseaux	1/50000	Raster ou WMS	http://infoterre.brgm.fr/geoservices-ogc
BD Carthage®	Cours d'eau et plans d'eau en France	1/50 000	Données vecteur	Gratuit : http://sandre.eaufrance.fr/

Occupation des sols

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
BD ORTHO®	Photographies aériennes	Résolution de 50 cm	Raster, mise à jour tous les 5 ans Historique depuis la fin des années 1990 Panchromatique, (disponibilité ?)	Payant ou sous licence, IGN http://professionnels.ign.fr/orthoimages Consultation libre : http://www.geoportail.fr/ ou API pour SIG
BD PARCELLE®	Parcelles cadastrales	Résolution métrique	Données raster et vecteur	Payant ou sous licence, IGN http://professionnels.ign.fr/parcellaire-cadastral
Images aériennes ou satellites gratuites autres que IGN	Photographies aériennes	Résolution de 50 cm ou inférieur	Données raster, et WMS	Sous QGIS via OpenLayers plugin : Google satellite, Bing Aerial, Map Quest Sous ArcGIS : World Imagery de ArcGisOnline Sous Mapinfo : Bing Aerial Plate-forme géomatique* départementale ou régionale
Corine Land Cover	Inventaire biophysique de l'occupation des terres (3 années : 1990, 2000, 2006)	1/100 000	Données vecteur et données raster	Gratuite : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/li/1825.html

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
MODIS	Scènes de 2330 km x 10 km	Résolution de 250 à 1 000 m	Données raster Nécessitent des compétences en traitement d'image	Gratuit : http://earthexplorer.usgs.gov/
		Résolution de 15 à 60 m		
Landsat		Résolution de 15 à 60 m		Payant http://earthexplorer.usgs.gov/
Spot	Scènes de 60 x 60 km	Résolution de 2,5 à 20 m	d'image	Payant http://www.intelligence-airbusds.com/fr/
BD Forêt® IGN	Types de formations végétales	Résolution de 2,25 ha (V1) à 50 ares (V2)	Vecteurs	Payant ou sous licence, IGN http://professionnels.ign.fr/bdforet
Carte de la Végétation du CNRS	Séries de végétation et végétation potentielle	1/200 000	Vecteurs	Payant : http://carteveget.obs-mip.fr/informations

Pratiques agricoles

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
RGA	Recensements agricoles 2000, 1988, 1979	Echelle communale	Tableaux et cartes interactives	Libre à payant. Consulter votre DRAF et SCEES, Agreste ; Cartes interactives : https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/
Données PAC	Statistiques annuelles sur les cultures	Echelle communale	Tableaux	Agreste : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne
TERUTI - LUCAS	Statistiques pluriannuelles sur l'occupation du sol	Régions agricoles	Tableaux	Agreste : http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/territoire-prix-des-terres/teruti-lucas-utilisation-du/
RPG (îlots PAC graphique)	Déclaration annuelle des cultures	Résolution +/- métrique	Données vecteurs	Niveau 4 payant (frais de mise à disposition) ASP : http://www.asp-public.fr/?q=node/856 Flux WMS : Niveau 2 : www.data.gouv.fr
Recensement général agricole	Structure des exploitations : Emploi, Cultures, Elevage, Zonages	Echelle Communale	Carte interactive et tableaux	Gratuit : https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/

Climatologie

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
Bases de données climatiques METEO FRANCE	Données par poste météo ou données spatialisées avec méthode AURELHY	maille km ²	Données rasters et tableaux	Payant Abonnement, Météo-France : https://professionnel.meteofrance.com/professionnels/produits/relevés-statistiques
	Données publiques et gratuites d'observations <i>in situ</i> + radar	ponctuelles	Tableaux	https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=caracteristique&caracteristique=1&caracdisp=28
Base de données libres	Températures min. et max., précipitations (statistiques de 1950 à 2000)	maille km ²	Données rasters	Gratuit : http://www.worldclim.org/current
	Températures, précipitations, vent, humidité (depuis 1995)	Ponctuelles (42 stations)	Tableaux	Gratuit : http://www.infoclimat.fr

Localisation et limites administratives

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
API du Geoportail Géoservices IGN pour SIG	Tous éléments d'habillage de cartes à toutes les échelles	De la parcelle à la région	Cartes scannées et données vecteurs	Payant ou sous licence, IGN: http://professionnels.ign.fr/api-sig
OpenStreetMap	Fond de cartes à toutes les échelles	De la parcelle au monde	Site propre ou WMS pour SIG	http://openstreetmap.fr/ Sous QGIS avec OpenLayers plugin : OpenStreetMap
Geofla	Limites administratives des communes, cantons, départements et régions	1/1 000 000	Données vecteurs	Gratuit : http://professionnels.ign.fr/geofla

Pédologie

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
REFERSOLS	Répertoire national des études de sols	1/10 000 à 1/1 000 000	Données vecteurs ou rasters	http://refersols.gissol.fr/
IGCS*	Secteurs de Référence	1/10 000 à 1/25 000	Données vecteurs	Disponibilité variable selon les régions. En général, consultation libre sur place ou sous convention de mise à disposition : https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/inventaire-gestion-et-conservation-des-sols-igcs-67
	Connaissance Pédologique de la France	1/25 000 à 1/100 000		
	Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP)	1/250 000		
	RRP d'Alsace en ligne	1/250 000		
	RRP Rhône Alpes en ligne	1/250 000		
BDGSF*	RRP de Bourgogne	1/250 000	Site internet dédié	http://alsace.websol.fr/carto
	RRP de Bretagne	1/250 000	Site internet dédié	http://rhone-alpes.websol.fr/carto
	Base de Données Géographique des Sols de France	1/1 000 000	Données vecteurs	http://www.sols-de-bretagne.fr/ Extraction payante http://acklins.oreans.inra.fr/programme/bdgsf/tarifs.php
BDAT*	Base de Données des Analyses de Terres	Statistiques par canton sur 4 périodes : 1990-94, 1995-99, 2000-04, 2005-09	Site internet dédié	Gratuit http://bdatt.gissol.fr

Données historiques

Source	Contenu	Echelle, résolution	Nature des données	Disponibilité
Cadastré	BD du cadastre en multicouches, dont élément géographique (hydrographie)	Résolution métrique	Données vecteurs	https://www.cadaastre.gouv.fr/spc/accueil.do ou http://www.geoportail.gouv.fr/accueil
Cartes de Cassini	Scan de carte (XVIIIème siècle)	Echelle 1/86 400	Carte scannée non géoréférencée	http://cassini.ehess.fr/cassini/fr/html/1_navigation.php ou disponible en consultation et téléchargement sur www.geoportail.gouv.fr
Cadastré Napoléonten	XIXème siècle	échelles inférieures au 1/5000	Carte scannée généralement non géoréférencée	Disponible auprès des archives départementales
Cartes d'Etat-Major	Cartes d'État-Major du XIXème siècle.	1/10 000 et 1/40 000	Carte scannée (géoréférencement* possible)	Gratuit : Image consultable et téléchargeable sur www.geoportail.gouv.fr Payant : raster sur le site de l'IGN : http://professionnels.ign.fr/scanhisto
Prises de vues aériennes historiques	De 1919 à 2003 (images en noir et blanc, couleurs ou infra-rouge)	Résolution variant en fonction des années	Photo scannée ou image	Gratuit : Document non géoréférencé consultable et téléchargeable sur www.geoportail.gouv.fr

Définitions et acronymes

Agrosystème (agroécosystème) : système généré par l'activité agricole, défini par les interactions entre les organismes vivants (peuplements végétaux, microorganismes, faune) et leur environnement physique (sol, climat), sous l'influence des techniques culturales.

Bassin versant (bassin hydrographique) : portion de territoire délimitée par des lignes de crête, dont les eaux alimentent un exutoire commun : cours d'eau ou lac. La ligne séparant deux bassins adjacents est une ligne de partage des eaux. Chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal.

BDAT : Base de Données des Analyses de Terres

BDGSF : Base de Données Géographique des Sols de France

Couverture pédologique : couche continue formée par les sols existant dans un territoire donné.

CPF : Connaissance Pédologique de la France

Echelle : rapport entre une distance sur la carte et la distance correspondante sur le terrain. En cartographie des territoires, on distingue les grandes ($\leq 1/25\ 000$), les moyennes ($1/25\ 000$ à $1/100\ 000$) et les petites ($\geq 1/100\ 000$) échelles.

Fonctions de pédotransfert (FPT) : outils, basés sur des relations statistiques, qui permettent d'estimer et de prédire des propriétés ou des comportements du sol difficiles à mesurer directement et en de nombreux points (déterminations lourdes et coûteuses), à partir d'autres caractéristiques du sol aisément observables sur le terrain ou déterminées en routine sur échantillons de sols.

Géomatique : discipline ayant pour objet la gestion des données à référence spatiale et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion.

Géoréférencement : procédé permettant de positionner un objet (une personne, etc) sur un plan, une carte, dans un logiciel SIG*, à l'aide de ses coordonnées géographiques.

Gis Sol : Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols

GVTAF : Guide de Vocation des Territoires Agricoles et Forestiers

Horizon : couche de sol plus ou moins parallèle à la surface du sol, d'aspect relativement homogène par la nature et l'organisation de ses constituants (couleur, texture, structure, effervescence, etc.) différenciée selon l'évolution du sol et/ou selon la nature des dépôts géologiques.

IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols

Incertitude : paramètre qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à la grandeur que l'on veut mesurer, à partir des informations utilisées.

Justesse : synonyme d'exactitude, degré de conformité d'une valeur mesurée ou calculée à sa vraie valeur.

Métadonnées : données servant à définir ou décrire une autre donnée quel que soit son support (papier ou électronique).

Pédogenèse : ensemble des processus, physiques, chimiques et biologiques, qui conduisent, à partir de matériaux minéraux et organiques, à la formation des sols au cours du temps, sous l'influence du milieu (climat, roche, relief, organismes).

Pédopaysage : ensemble des plages cartographiques semblables par les caractéristiques de la couverture pédologique* et des éléments paysagiques. Un pédopaysage est ainsi constitué d'unités typologiques de Sol (UTS) regroupés sur des éléments paysagiques tels que la géomorphologie, l'hydrologie, le matériau parental, le substrat, et éventuellement l'occupation du sol.

Pixel (ou maille, cellule) : élément d'un jeu de données matriciel (raster). La position géographique d'un pixel se déduit des coordonnées des pixels extrêmes du raster et de ses numéros de ligne et de colonne.

Plage cartographique (ou polygone) : portion d'une carte représentant la même information de façon continue.

Précision : degré de répétitivité ou de reproductibilité de la mesure ou du calcul d'une valeur.

Raster : Données images où l'espace est divisé de manière régulière (pixel) ; à chaque pixel sont associées une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace. Exemple : sur un modèle numérique de terrain (MNT), chaque pixel est associé à une altitude.

Résolution : plus petite variation d'une valeur qui puisse être détectée ou représentée. Il s'agit d'une indication de la précision d'un type d'information recueillie sur un territoire. En mode **raster**, la résolution spatiale correspond à la taille de la cellule de la grille. En mode **vecteur** polygonal ou linéaire, la résolution spatiale est la surface ou la longueur de la plus petite entité réelle que l'on est supposé trouver dans la base de données. Elle correspond au niveau de détail d'un jeu de données.

RMQS : Réseau de Mesures de la Qualité des Sols

RRP : Référentiel Régional Pédologique, volet 1/250 000 du programme IGCS

SIG (Système d'Information Géographique) : ensemble organisé rassemblant matériels et logiciels informatiques, données géographiques, techniciens et compétences en vue d'optimiser la gestion (capture, stockage, mise à jour, manipulation, analyse et

affichage) de toutes les formes d'informations référencées selon les critères géographiques pour contribuer notamment à la gestion de l'espace.

SR : Secteur de Référence, étude pédologique plus précise permettant de traiter des questions agricoles ou environnementales avec une meilleure précision à l'échelle locale.

Strate : description de la variabilité dans l'espace d'un horizon ou d'un regroupement de plusieurs horizons de sol (lorsque ceux-ci présentent entre eux des variations très faibles de leurs caractéristiques).

Typologie pédologique : inventaire ou répertoire des types de sols présents sur une portion d'espace donnée.

UCS (Unité Cartographique de Sol) : regroupement d'une ou plusieurs unités typologiques de sol (UTS) de façon à pouvoir en faire une représentation cartographique à une échelle choisie. On considère qu'une UCS est simple lorsqu'elle est constituée d'une UTS ; on la définit comme complexe lorsqu'elle en contient plusieurs. Pour les échelles moyennes et petites (1/50 000 à 1/250 000), les notions de pédopaysage et d'UCS sont souvent équivalentes.

UTS (Unité Typologique de Sol) : portion de la couverture pédologique* constituée par la superposition de strates aux caractéristiques bien définies et présentant une certaine extension spatiale. Sa définition repose sur le rattachement à une taxonomie de type classification ou référentiel de sols.

Vecteur : Données où l'espace est décrit par des objets de type point, ligne ou surface. Ces objets peuvent être décrits par un ou plusieurs attributs (périmètre, surface, champs thématiques divers).

Zonage : document cartographique réalisé selon des normes moins exigeantes et avec des moyens plus limités qu'une carte des sols « classique » : peu de sondages et d'analyses, pas d'ouverture de fosses pédologiques, etc.). Il peut correspondre à une estimation de la superficie des différents types de sols, permettant ainsi des estimations de risques à l'échelle du territoire.

Ressources documentaires

Bibliographie

AFNOR (1985) - NF U44-041. Matières fertilisantes - Boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines - Dénominations et spécifications, remplacée le 04/08/2012.

AFNOR (2007) – NF X 31-560. Qualité des sols. Cartographie des sols appliquée à toutes les échelles. Acquisition et gestion informatique des données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols, 15 p.

Agreste (2011) - L'utilisation du territoire en 2010. Collection Primeur, N° 260. 4 p.

Al Majou H., Bruand A., Duval O., Cousin I. (2007) - Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Étude et Gestion des Sols* 14 (2), pp. 103-116.

Baize D., Jabiol B. (2011) - Guide pour la description des sols. Editions Quae, 430 p.

Baize D., Girard M.C. (2009) - Référentiel Pédologique 2008. Association Française pour l'Étude des Sols, Editions Quae, 405 p.

Beaudou A., Le Martret H. (2004) - Miruram/valsol : Un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements - 2004, *Étude et gestion des sols* 11 (3), pp. 271-284.

Béguin M., Pumain D. (1994) - La représentation des données géographiques ; statistique et cartographie. Editions Armand Colin (Paris), 192 p.

Bell, J.C., Cunningham, R.L., Havens, M.W., 1992 - Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class. *Soil Science Society of America Journal* 56, pp. 1860-1866.

Bertin J. 1967 - *Sémiologie graphique*. Mouton-Gauthier-Villars-Bordas, Paris, 1^{re} Edition. 431p. (2^{ème} Edition 1973)

Blin E. Bord J.P. (1993) - *Initiation géographique ou comment visualiser son information*. Editions SEDES (Paris), 284 p.

Boulaine J, 1980 - *Pédologie Appliquée*, édition Masson, 220 p.

Boutefoy I., Vinatier J-M, Chafchafi A. (1999) - *Schéma de vocation des territoires agricoles et forestiers sur le département du Rhône- Etude*, 89 p.

Bruckert S. (1989) - Désignation et classement des sols agricoles d'après des critères de situation et d'organisation : application aux terres franc-comtoises du domaine climatique tempéré semi-continentale. *Agronomie*, 9 (4), pp. 353-361.

Commission des Communautés Européennes (2000) - Directive établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. 2000/60/CE.

Commission des Communautés Européennes (2002) - Vers une stratégie thématique pour la protection des sols. Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2002) 179. Bruxelles. 39 p. http://www.eurosfairer.prd.fr/7pc/doc/1125296433_com2002_0179fr01.pdf - consulté le 06/03/2017.

Chrétien J. (1995) – Carte pédologique de France à 1/100 000 : Beaune. Paris, FRA: INRA Editions, 286 p.

Commission des Communautés Européenne (2002) - COM(2002) 179, Vers une stratégie thématique pour la protection des sols.

Conseil des Communautés européennes (1991) - Directive concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. 91/676/CEE.

Courtoux A., Clavairole C. (2015) - La bonne gestion des sols agricoles : un enjeu de société. Avis du Conseil économique, social et environnemental, 5p + annexes. (<http://www.lecese.fr/travaux-publies/la-bonne-gestion-des-sols-agricoles-un-enjeu-de-soci-t> : vérifié le 06/03/2017).

Duigou N., Baize D., Bispo A. (2011) - Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en élément traces métalliques. Cas de la région Centre, Étude et Gestion des Sols 1, pp. 91-108.

Girard M.C., Schwartz C., Jabiol B. (2011) - Etude des sols. Description, cartographie, utilisation. Editions Dunod (Paris, France), 404 p.

Gis Sol (2011) - L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188p. http://www.gissol.fr/rapports/Rapport_HD.pdf - consulté le 06/03/2017.

Grolleau, E. Bargeot, L. Chafchafi, A. Hardy R. Doux, J. Beaudou, A. Le Martret, H. Lacassin J-C. Fort, J-L. Falipou, P. et Arrouays, D. (2004) - Le système d'information national sur les données pédologiques spatialisées : DONESOL et les outils associés. Etude et Gestion des Sols 11(3), pp. 255-269.

Hempel J.W., McBratney A.B., Mckenzie N.J., Hartemink A.E., MacMillan R., Lagacherie P. Arrouays D. (2013) - Vers une cartographie numérique des propriétés des sols du monde : le projet GlobalSoilMap. Etude et Gestion des sols 20 (1), pp. 7-14.

Hengl T. (2006) - Finding the right pixel size. Computers and Geosciences 32 (9), pp. 1283-1298.

Horemans P.(1961) - Contribution à l'étude pédologique des terrasses alluviales de la Loire moyenne. Thèse 3ème cycle, Fac. des Sciences, Paris.

INRA, Unité InfoSol (2015) – Dictionnaire des données DoneSol 3, Version du 1er novembre 2015, 470 p.

INRA, Unité InfoSol (2014) - Référentiel Régional Pédologique : Cahier des Clauses Techniques Général, 21 p.

Jamagne M. (1967) - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales Agronomiques, vol. 18, n° hors série - en collaboration avec Maucorps J., Hébert J., Bliet L., Bouttemy R., Rivière J.-M. et Mathieu C. - Paris - INRA- Station agronomique, 02, Laon. 142 p.

Jamagne M., Hardy R., King D., Bornand M. (1995) - La base de données géographique des sols de France. Etude et gestion des Sols 2 (3), pp. 153-172.

Jenny H. (1941) - Factors of soil formation. Mac Graw hill C, New York, 281 p.

Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. (2006a) - Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). Edition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p. (Téléchargeable sur le site du Gis Sol, www.gissol.fr)

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

Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Réchauchère O. (2012) - Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 60 p.

Lagacherie P., Arrouays D., Walter C. (2013) - Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. Etude et Gestion des Sols 20 (1), pp. 83-98.

Lagacherie P., Depaetere C. (1989) - Analyse des relations sol-paysage au sein d'un secteur de référence en vue d'un zonage pédologique semi-automatisé d'une petite région naturelle. Le zonage agropédoclimatique, séminaire Paris, 23 et 24 mars 1989, pp. 116-138.

Lagacherie P., McBratney A.B. (2007) - Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective. Developments in Soil Science, vol. 31. Elsevier, Amsterdam, pp. 389-399.

Laroche B., Richer de Forges A.C., Leménager S., Arrouays D., Schnebelen N., Eimberck M., Toutain B., Lehmann S., Tientcheu Nguenkam M.-E., Héliès F., Chenu J.-P., Parot S., Desbourdes S., Girot G., Voltz M., Bardy M. (2014) - Le programme Inventaire Gestion Conservation des Sols de France : volet Référentiel Régional Pédologique. Etude et Gestion des Sols, 21 (1) : pp. 125-140.

Le Bas C., Schnebelen N. (2006) - Utilisation des données sols d'IGCS en France. Etude et Gestion des Sols, 11 (3), pp. 237-246.

Legros J.P. (1996) – Cartographie des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Coll. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes, 370 p.

Legros J.P. (2007) – Les grands sols du monde. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.

Lemercier B., Walter C., Schwartz C., Saby N., Arrouays D., Follain S. (2006) - Suivi des teneurs en carbone organique et phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises : analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. Etude et gestion des sols, 13 (3), pp. 149-164.

Lozet J., Mathieu C. (1986) - Dictionnaire de science du sol. Editions Lavoisier (Paris), 269 p.

McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. (2003) - On digital soil mapping. Geoderma 117, pp. 3-52.

McKenzie N.J., Austin M.P. (1993) - A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation. Geoderma 57, pp. 329–355.

Merot P., Ezzahar B., Walter C., Arousseau P. (1995) - Mapping waterlogging of soils using Digital Terrain Models. Hydrological Processes 9 (1), pp. 27-34.

Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, et le ministre de l'agriculture et de la pêche (2008) - Arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000019151510&dateTexte=20160909> - consulté le 06/03/2017.

Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, et le ministre de l'agriculture et de la pêche (2009) - Arrêté du 1er octobre 2009 modifiant l'arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021309378> - consulté le 06/03/2017.

Moussa I. (2011) - Spatialisation régionale de propriétés des sols à partir de la base de données Sols de Bretagne. Exemple de la teneur en argile et de la réserve utile des sols. Mémoire Master 2, AGROCAMPUS OUEST, 59 p.

Poidevin D. (1999) - La carte moyen d'action, guide pratique pour la conception et la réalisation de cartes. Ellipses, 199 p.

Rémy J.C., Marin-Lafèche A. (1974) - L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Annales Agronomiques 25 (4), pp. 607-632.

Richer de Forges A.C., Baffet M., Berger C., Coste S., Courbe C., Jalabert S., Lacassin J.-C., Maillant S., Michel F., Moulin J., Party J.-P., Renouard C., Sauter J., Scheurer O., Verbèque B., Desbourdes S., Héliès F., Lehmann S., Saby N.P.A., Tientcheu E., Jamagne M., Laroche B., Bardy M., Voltz M. (2014) - La cartographie des sols à moyennes échelles en France métropolitaine. Etude et Gestion des sols 21 (1), pp. 25-36.

Rivière J.M., Tico S., Dupont C. (1992) - Méthode tarière. Massif armoricain. Caractérisation des sols. Rennes, chambre régionale d'agriculture de Bretagne, Institut Nationale de la Recherche Agronomique, 20 p.

Rouleau B. (1991) - Méthodes de la cartographie. Presses du CNRS, 213 p.

Saby, N.P.A., Lemercier, B., Arrouays, D., Leménager, S., Louis, B.P., Millet, F., Paroissien, J.B., Schellenberger, E., Squividant, H., Swiderski, C., Toutain, B., Walter, C., Bardy, M. (2014) - Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Etude et Gestion des Sols* 21 (1), pp. 25-36.

Servant J., Dupont J., Berthet M. (2005) – Carte des sols d'argent sur Sauldre (carte et notice).

Studer R., Dupont J., Lafrechoux M., Nicoullaud B., Servant J. (1982) - La carte des sols de la Région Centre. *Bulletin d'information de l'IGN*, numéro, 45. pp 41 - 43

Swiderski C., Saby N.P.A., Party J.P., Sauter J., Köller R., Vandijk P., Lemercier B., Arrouays D. (2012) - Evolution des teneurs en carbone organique dans les horizons de surface des sols cultivés en Alsace : analyse à partir de la BDAT. *Étude et Gestion des sols*, 19 (3), pp. 179-192.

Walter C. (1992) - Estimation de la réserve utile à partir des caractéristiques granulométriques d'un échantillon. ENSA-INRA Laboratoire de Science du Sol, Rennes, 7p.

Walter C., Bispo A., Chenu C., Langlais-Hesse A., Schwartz C. (2014) - Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cahier Demeter* 15, 51-68.

Webographie

Sites consultés le 06/03/2017

AFES : <http://www.afes.fr/>

Applicasol : <https://www.gissol.fr/outils/applicasol-342>

GisSol : <http://www.gissol.fr/>

Refersols : <https://www.gissol.fr/outils/refersols-340>

Repedo : <https://www.gissol.fr/outils/repedo-338>

Sols de Bretagne : <http://www.sols-de-bretagne.fr/>

Formations DoneSol

L'unité InfoSol de l'Inra propose des formations technique sur la saisie et l'exploitation des données sous format DoneSol.

<https://www.gissol.fr/outils/formation>

ISBN : 2-7380-1408-9
EAN : 978 273 801 4085

Dépôt légal : Mars 2017

Editeur : INRA, Unité InfoSol, Centre Val-de-Loire, Site d'Orléans, 2163 Avenue de la
Pomme de Pin, CS 40001 Ardon, 45075 ORLEANS Cedex 2
© INRA InfoSol, 2017

Conception et réalisation : Sacha Desbourdes • Sacha.Desbourdes@inra.fr

Achévé d'imprimer en Mars 2017
par SAS Corbet, Zac des provinces, 21 rue de Picardie, 45160 Olivet
<http://www.corbet-com.fr/>

Imprimé en France



