



N CARTOGRAPHIE

Les méthodes de cartographie des sols ont connu une forte évolution ces dernières années.

N ANALYSES DE TERRE

La BDAT est une source d'information unique renseignant sur l'état des propriétés agronomiques des sols.

N MESURES GÉOPHYSIQUES

Une mesure indirecte de certaines propriétés physiques du sol est possible grâce à des capteurs embarqués.

CONNAISSANCE DES SOLS



Quelle que soit la qualité des modèles sur lesquels s'appuient les outils de conseil, leur précision est fortement conditionnée par le paramétrage des propriétés du sol, qui doit être aussi fidèle que possible.

© ARVALIS - Institut du végétal

OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION ET DE DIAGNOSTIC

BIEN RENSEIGNER LE SOL pour avoir un conseil précis

La qualité des conseils à la parcelle délivrés par des outils d'aide à la décision agronomique nécessite une information de plus en plus complète et précise sur la nature et l'état de son sol. Plus de dix paramètres sol peuvent être requis par certains outils gérant la fertilisation. Des exemples concrets illustrent l'enjeu de leur bon renseignement.

Une étude réalisée en 2011 par le Réseau mixte technologique « Sols et Territoires »⁽¹⁾ a recensé les outils de diagnostic et de conseil en agronomie « sols-dépendants », c'est-à-dire mobilisant plusieurs paramètres portant sur le sol pour produire un résultat. Deux types d'outils ont été distingués : les outils d'aide à la décision (OAD) qui fournissent un conseil opérationnel, comme une dose de fertilisant azoté, et les outils d'évaluation agro-environnementale (OEAE), dont la finalité est de produire un diagnostic sur l'impact de pratiques culturales sur la qualité de l'air, de l'eau ou des sols. Au total vingt-et-un OAD et dix-huit OEAE ont été recensés dans cette enquête réalisée auprès des instituts techniques, de l'Inra, des universités, des chambres d'Agriculture et des organismes privés diffuseurs d'outils. Ces outils fonctionnent, dans

la grande majorité, à l'échelle de la parcelle et dix pourcents à l'échelle de l'exploitation. Les OAD, dont les utilisateurs sont principalement les agriculteurs et les conseillers agricoles, concernent assez souvent la fertilisation et l'irrigation. Les OEAE, utilisés principalement par des conseillers et des agronomes experts, fournissent pour la plupart un diagnostic d'impact d'apports d'engrais ou de produits phytopharmaceutiques sur la qualité des aquifères. En moyenne les OAD et les OEAE recensés mobilisent respectivement 9 et 7 paramètres du sol.

Quels sont les paramètres du sol les plus utilisés ?

Ces paramètres sont de deux types bruts, ou calculés (à partir des paramètres bruts). Parmi les paramètres bruts, on distingue les paramètres stables,

En savoir plus

La définition et le mode d'obtention des principaux paramètres décrivant un sol sont fournis sur <http://arvalis.info/1fk>

PARAMÈTRES DU SOL : ils concernent des horizons précis ou l'ensemble du sol

Types de paramètres	Stabilité dans le temps	Horizons concernés	Exemples
Bruts	Stables, liés au sol	Horizon de surface	<ul style="list-style-type: none"> • Granulométrie ou texture, • Teneur en CaCO₃ • CEC Metson • Teneur en cailloux et type de cailloux • Humidités caractéristiques pour le calcul de la RU
		Horizons de profondeur colonisés par racines	<ul style="list-style-type: none"> • Granulométrie ou texture • Teneur en CaCO₃ • CEC Metson • Teneur en cailloux et type de cailloux • Densité apparente • Humidités caractéristiques pour le calcul de la RU
		Ensemble du sol	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur accessible aux racines • Profondeur du sol • Type de substrat géologique
	Variables, liées à l'histoire culturale	Horizon de surface	<ul style="list-style-type: none"> • pH • Teneurs en MO, N total, P₂O₅, K₂O, MgO • État structural (tassement, compacité) • Densité apparente
Calculés		Horizon de surface	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité à la battance, à l'érosion, au compactage • Vitesse de ressuyage
		Ensemble du sol	<ul style="list-style-type: none"> • Réserve en eau utilisable • Sensibilité à la lixiviation du nitrate (lessivage) • Sensibilité à l'excès d'eau • Vitesse d'infiltration de l'eau

Tableau 1 : Typologie des paramètres sols mobilisés par les OAD et les OEAE. La définition et le mode d'obtention et d'utilisation de ces différents paramètres sont précisés en complément web (voir En savoir plus).

liés au sol, des paramètres variables dans le temps, qui sont liés à l'histoire culturale de la parcelle. L'essentiel des outils utilise des paramètres bruts concernant la couche travaillée (en général, entre 0 et 20-25 cm), notamment les OAD de fertilisation. Cependant certains outils mobilisent également des paramètres bruts stables concernant la totalité du sol prospecté par les racines, voire au-delà (tableau 1).

L'enquête du RMT a classé les différents paramètres de sol selon leur pourcentage d'utilisation dans les OAD et OEAE (figure 1). La RU (réserve en eau utilisable) est le principal paramètre sol utilisé par les outils. Quand elle n'est pas directement fournie par l'outil, elle est calculée par des modèles dits de pédotransfert à partir de paramètres bruts stables tels que la composition granulométrique, la teneur en cailloux pour les différents horizons et la profondeur prospectée par les racines ; c'est parce qu'ils servent à estimer la RU que ces trois paramètres bruts sont les plus utilisés. Les paramètres bruts et variables de l'horizon de surface sont à saisir par les utilisateurs à partir des résultats d'analyses de terre et d'observations

sur la parcelle. En revanche, les paramètres bruts et stables sont, dans la plupart des cas, déjà renseignés dans les outils. Dans l'enquête réalisée en 2011, les deux tiers des outils disposent de listes de sols internes où ces paramètres bruts, ainsi que les paramètres calculés, sont renseignés par type de sol. Dans ce cas, la seule chose que l'utilisateur doit renseigner est son type de sol. L'identifier correctement est donc crucial. Parmi les outils disposant de listes de sols, certains proposent une

« La RU est l'un des paramètres les plus utilisés par les outils, dont la précision est la plus cruciale, mais aussi l'un des plus difficiles à déterminer. »

aide au choix du sol. Mais plus de 50 % des outils recensés ne possèdent pas de module d'aide au choix du sol ; le risque de mal choisir son sol est donc plus important. Les listes de sols ne sont malheureusement pas identiques entre outils, voire incomplètes, et le plus souvent renseignées à dire d'expert car l'accès aux bases de données sur les sols de l'Inra pour des usages agronomiques reste encore difficile (voir l'article suivant).

Pour les besoins de ses outils, Arvalis a constitué un catalogue des principaux types de sols français

FRÉQUENCE D'UTILISATION : la réserve en eau utilisable ressort comme un paramètre crucial

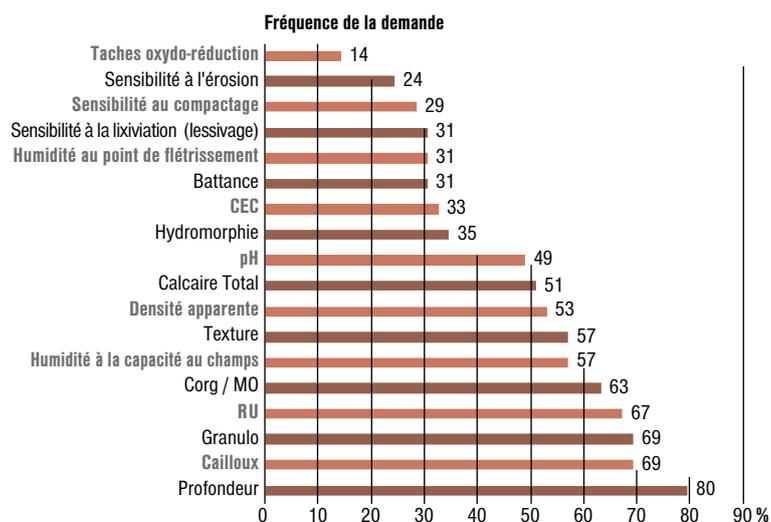


Figure 1 : Fréquence d'utilisation des paramètres de sol dans les OAD et OEAE recensés par l'enquête du RMT « Sols et Territoires » en 2011. La définition et le mode d'obtention de ces différents paramètres sont précisés en complément web (voir En savoir plus). Source : Mémoire de fin d'études de Marie-Luce Soudière, 2011.

des régions de grande culture et de polyculture élevage encadré au moyen d'une compilation des typologies et cartes de sols disponibles. Cette base de données est connectée à l'ensemble de ses outils depuis 2010. Bien que n'ayant pas l'exhaustivité et la représentation spatiale du référentiel sol de l'Inra, elle constitue un bon compromis - en attendant un accès facilité à ce référentiel via les typologies Typterres.



Observations de surface et de tranchées, analyses de terre, sondages, tarière... : autant de moyens de bien identifier son sol pour l'agriculteur utilisateur d'OAD.

Le conseil en fertilisation azotée requiert de nombreux paramètres du sol

Dans les outils de calcul de la dose d'azote prévisionnelle, les paramètres du sol interviennent à plusieurs niveaux (figure 3). Ainsi, le choix de la profondeur de mesure du reliquat d'azote minéral en sortie d'hiver (on dit aussi à l'entrée du bilan) dépend de la profondeur d'enracinement de la culture. Cette profondeur est la conjonction d'une profondeur maximale permise par le sol et de l'extension racinaire propre à la culture. Le calcul de ce stock d'azote minéral, à partir du dosage

La base « sols » d'Arvalis

Chaque sol est défini par plus de 30 paramètres bruts, soit à l'échelle du sol (comme la profondeur d'enracinement), soit pour chacun des horizons colonisés par les racines. Plusieurs paramètres calculés (comme la RU) sont estimés par des fonctions de pédotransfert qui prennent en compte, en sols caillouteux, la contribution hydrique de certains types de cailloux. En revanche, les sols ne sont pas géoréférencés : l'utilisateur de la base de données ne peut pas obtenir le type de son sol en entrant, par exemple, le code postal ; aussi, l'identification du type de sol est-elle faite à l'aide de cinq critères : la pierrosité, la teneur en calcaire, la texture de l'horizon de surface, la profondeur de blocage d'une tarière et la sensibilité à l'excès d'eau.

BASE « SOLS » : 553 types de sols référencés fin 2018 en France métropolitaine

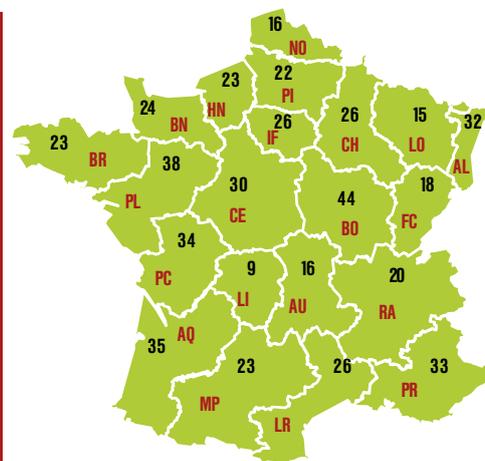


Figure 2 : État des lieux de la base de données d'Arvalis en octobre 2018. Dans chaque « région » figure le nombre de types de sol distincts qui s'y rencontrent.

DOSE D'AZOTE : de nombreux paramètres de sol interviennent dans son estimation

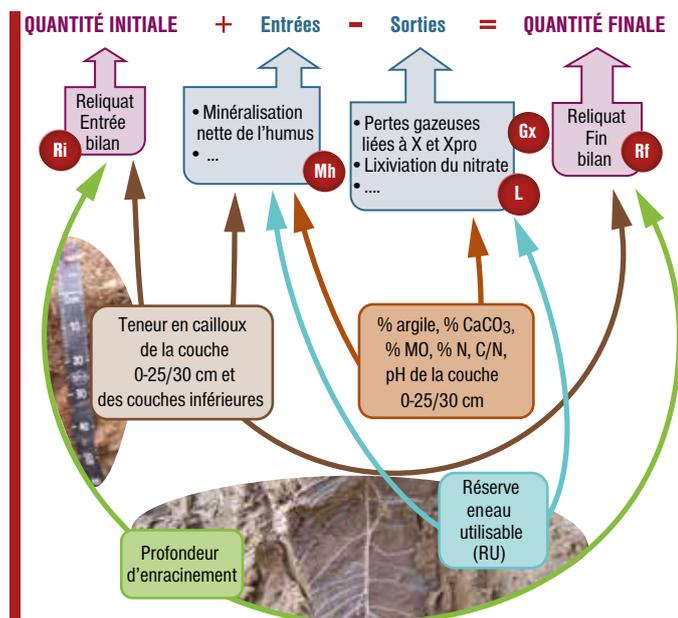


Figure 3 : Schéma illustrant les utilisations des paramètres de sol dans le calcul de la dose d'azote prévisionnelle par la méthode du bilan. X désigne la dose d'azote prévisionnelle et Xpro, la dose d'azote minéral apportée par un produit résiduaire organique.

des teneurs en azote nitrique et ammoniacal de chaque horizon échantillonné, est fonction de la masse de terre fine qui dépend elle-même de la densité apparente du sol et de sa charge en cailloux. La densité apparente, paramètre très difficile à mesurer, est estimée le plus souvent forfaitairement à 1,4 en surface et à 1,5 en profondeur, alors qu'elle peut varier de 1,3 à 1,7 selon les types de sols ; dans certains outils, elle est estimée par des modèles de pédotransfert à partir de la granulométrie. La teneur en cailloux des différents horizons prospectés par les racines, difficile à estimer, est négligée si l'utilisateur ne mentionne pas que son sol est caillouteux, sinon elle est fournie par le référentiel « sols » de l'outil, s'il existe.

L'estimation de la fraction du reliquat d'azote minéral en sortie d'hiver susceptible d'être lixiviée en fin d'hiver, avant la période d'absorption active des cultures, nécessite le calcul de la RU et de la profondeur du sol colonisée par les racines. Plus la RU et la profondeur du sol sont faibles, plus le risque de lixiviation hivernale (lessivage) de l'azote nitrique est important.

Le reliquat d'azote minéral après récolte, qui est toujours estimé, dépend aussi de la profondeur d'enracinement de la culture, ainsi que du pourcentage de matière organique, du pourcentage de CaCO_3 , de la composition granulométrique et du taux de cailloux.



Lors d'une analyse de terre, il est important de fournir des informations aussi précises que possibles pour aider le laboratoire à identifier le type de sol sans risque d'erreur.

© Nicole Cornec

Comment améliorer l'interprétation de l'analyse de terre

Pour gérer la fertilisation en phosphore, potassium et magnésium et celle des oligo-éléments et des amendements basiques et organiques, l'interprétation des analyses de terre s'appuie sur un référentiel de sols. Le plus utilisé pour l'interprétation des teneurs en phosphore et potassium biodisponibles est le référentiel COMIFER. La plupart des outils utilisant cette méthode proposent donc une liste de sols aux utilisateurs.

Les paramètres de sol couramment mesurés à l'analyse de terre, tels que la CEC Metson et la teneur en CaCO_3 du sol, sont utilisés pour aider le laboratoire à identifier le type de sol, mais dans certains cas, la connaissance de ces deux paramètres n'est pas suffisante. L'analyse granulométrique permet un choix plus précis mais, le plus souvent, elle n'est pas effectuée ; pourtant, il suffit de la mesurer une seule fois car elle n'évolue pas au cours du temps. En l'absence d'analyse granulométrique, le risque de confusion entre certains sols est encore important, et la précision de l'analyse peut s'en trouver diminuée.

Le calcul de la fourniture du sol par minéralisation nette de l'humus de la couche 0 à 25-30 cm fait intervenir les teneurs en matière (ou carbone) organique et en azote organique (données par l'analyse de terre de la parcelle) et la masse de terre fine de cette couche, pour fournir le stock d'azote organique total. La masse de terre fine nécessite l'estimation de la charge en cailloux ; en effet, dans les sols caillouteux, cette masse peut être très réduite, et la non prise en compte de la charge en cailloux conduit à une surestimation de la fourniture du sol en azote. La teneur en cailloux est un paramètre stable parfois renseigné dans les outils disposant de listes de sols, mais il est plus précis d'effectuer une estimation visuelle à la surface du sol de la parcelle. Le taux de minéralisation

nette de l'humus dépend de plusieurs paramètres qui diffèrent selon le modèle de prévision utilisé ; pour que la précision de ce taux soit correcte, l'utilisateur aura intérêt à renseigner ces paramètres à partir de son analyse de terre : teneur en argile, pH_{eau} et rapport C/N de la matière organique. Dans certains OAD, le paramètre RU est aussi utilisé pour calculer le nombre de jours normalisés^[2] pour la minéralisation au cours de la période de végétation d'une culture ; le calcul des jours normalisés nécessite un calcul de bilan hydrique journalier pour estimer l'humidité de la couche 0-25/30 cm. Les paramètres sols les plus importants pour la précision du calcul diffèrent selon le type de sol, la culture concernée et le climat de la campagne. Toutefois ceux fournis par l'analyse de terre de la parcelle s'avèrent déterminants.

Affiner le pilotage de l'irrigation par bilan hydrique

Les outils d'aide au pilotage de l'irrigation s'appuient sur le calcul journalier d'un bilan hydrique. Celui-ci indique l'évolution au fil du temps du déficit hydrique du sol. Le déclenchement d'un apport d'eau est conseillé lors d'un déficit hydrique du sol, qui dépend du niveau de la réserve en eau utilisable.

L'estimation de la RU est difficile. Selon les outils, ce paramètre doit être estimé par l'utilisateur, ou bien il est proposé par l'outil après que l'utilisateur ait choisi un type de sol, ou encore il est calculé à partir d'autres paramètres saisis par l'utilisateur (compositions granulométriques des différents horizons, teneur en cailloux et profondeur d'enracinement). Il est préférable que les choix de l'utilisateur soient guidés par un technicien qui connaît le référentiel sol régional.

L'enjeu d'une connaissance précise de la RU est d'obtenir une meilleure efficacité de l'irrigation. Une estimation plus précise permettra une économie d'eau si la RU était sous-estimée, et un gain de rendement si la RU était surestimée.

[1] Ce RMT est présenté sur le site <https://sols-et-territoires.org>.

[2] Un jour normalisé est un jour à 15 °C (température de l'air à 2 mètres) et avec une humidité du sol à la capacité au champ.

Alain Bouthier - a.bouthier@arvalis.fr
ARVALIS - Institut du végétal



Dans la base « sols » d'Arvalis, le type d'un sol est établi à partir de sa pierrosité, sa teneur en calcaire, la texture de l'horizon de surface, la profondeur de blocage d'une tarière, et sa sensibilité à l'excès d'eau.

Une cartographie systématique des sols de la France a été effectuée au 1/250 000. Une telle échelle convient à un pilotage départemental, régional ou sur de grands bassins versants.

50 ANS DE CARTOGRAPHIE DES SOLS

OÙ TROUVER

les informations sur son sol ?

Un immense travail de cartographie des sols français à différentes échelles a débuté en 1968 et s'est intensifié avec le programme IGCS. La base de données DoneSol organise les informations et les met à la disposition des pédologues. En parallèle, la démarche TypTerres fournit une typologie plus adaptée aux utilisateurs agricoles - agronomes, techniciens et exploitants. Tour d'horizon.

La cartographie des sols en France a débuté dans les années soixante avec celle du département de l'Aisne au 1/25 000. En 1968, un programme de cartographie des sols à moyennes échelles est mis en place sur l'ensemble du territoire français par l'Inra. Les deux échelles principales de ce programme sont le 1/50 000, avec entre autres la cartographie des terres agricoles, et le 1/100 000.

Les besoins en informations sur les sols étant fortement croissants, un programme de cartographie des sols au 1/250 000 a été mis en place en 1993 afin de couvrir l'ensemble du territoire dans un délai moins long que ceux nécessaires pour obtenir les cartes au 1/50 000 et au 1/100 000.

Le programme IGCS

Toutes ces cartographies de sols ont été regroupées dans le programme « Inventaire, gestion et conservation des sols » (IGCS). Ce programme

est piloté depuis 2000 par le groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol), dont la mission principale est de constituer et de gérer un système d'information national sur les sols de France. La coordination du programme est assurée par l'unité InfoSol de l'Inra, et sa mise en œuvre, par un réseau de partenaires locaux. L'ensemble des données acquises dans ce programme est capitalisé dans une base de données nationale unique appelée DoneSol.

Le programme IGCS comporte actuellement trois volets, définis selon l'échelle de représentation (*tableau 1*). Le Référentiel régional pédologique (RRP) fournit une information sur la connaissance des sols restituée à une échelle 1/250 000. La collecte des données y est régie par un cahier des charges et par le dictionnaire de DoneSol. Ce volet est bien avancé (*figure 1*).

L'objectif du volet « Connaissance pédologique de la France » (CPF) est d'améliorer la connaissance de la diversité des sols et de leurs lois de répartition sur la base de leurs facteurs de formation. Il est

IGCS : un programme en trois échelles géographiques

Volet	Échelle	Densité des observations	Applications	Pourcentage du territoire national couvert
Référentiel régional pédologique (RRP)		<ul style="list-style-type: none"> • 1 sondage pour 200 à 600 ha • 1 profil pour 2000 à 4000 ha 	Aide à la décision au niveau national, régional et départemental	94 %
Connaissance pédologique de la France (CPF)	1/100 000 à 1/50 000 (moyenne échelle)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 sondage pour 10 à 60 ha • 1 profil pour 50 à 1000 ha 	Utilisation sur des communes, sur des bassins versants. Délimitation de terroirs	18 % (1/50 000) 24 % (1/100 000)
Secteur de référence (SR)	env. 1/10 000 (grande échelle)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 sondage pour 2 à 3 ha • 1 profil pour 10 à 50 ha 	Utilisation directe au niveau de la parcelle (drainage, agriculture de précision, choix de variétés...)	< 0,1 %

Tableau 1 : Tableau de synthèse pour chaque volet du programme IGCS.

l'héritier des premières cartographies des sols en France.

Le volet « Secteur de référence » (SR) vise à réaliser des études pédologiques à l'échelle de l'ordre du 1/10 000. Il permet de traiter des questions agricoles ou environnementales à l'échelle locale qu'il sera possible d'extrapoler sur une région plus vaste avec les mêmes caractéristiques physiques. Généralement, les secteurs de référence répondent à un besoin de connaissances sur une thématique

précise (drainage, irrigation, terroirs viticoles, biodiversité...) et correspondent à des territoires de quelques milliers d'hectares.

La base de données DoneSol capitalisant l'ensemble des données acquises, ponctuelles ou surfaciques, dans le programme IGCS (figure 2) a été conçue de façon à gérer et à stocker toutes les informations liées aux cartes avec un modèle commun. DoneSol est devenue la référence française.

Pour accompagner les utilisateurs professionnels de DoneSol, de nombreux outils d'aide à la saisie, de validation, de consultation, de formation ou d'échanges de données ont été développés par l'unité InfoSol et les partenaires régionaux. Des mises à disposition des données sont en cours de développement (production de cartes de propriétés de sols, export simplifié de DoneSol à l'aide du

RÉFÉRENTIELS RÉGIONAUX PÉDOLOGIQUES : peu de départements restent à cartographier

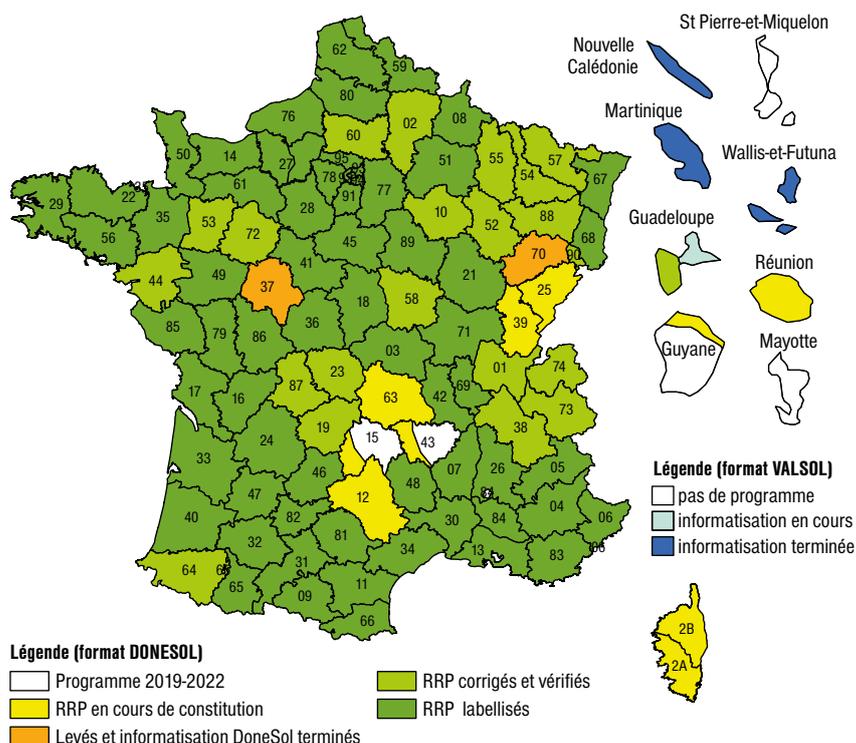


Figure 1 : État d'avancement des RRP en janvier 2019, départements d'Outremer inclus. Échelle 1/250 000.

À qui servent les RRP ?

Les données des RRP au 1/250 000 sont parfaitement adaptées à un pilotage départemental, régional ou sur de grands bassins versants. Les RRP doivent être perçus comme une première étape dans la connaissance des sols sur un territoire.

Une cartographie plus précise est possible, s'appuyant sur les données déjà collectées dans le cadre du RRP, mais elle nécessite un budget plus important. Aussi une cartographie systématique plus précise sur l'ensemble du territoire apparaît utopique aujourd'hui. Sa mise en œuvre se limite actuellement à des zones restreintes mais à fort enjeu (environnemental, agronomique, d'aménagement du territoire...) nécessitant d'aller plus finement dans la compréhension de l'organisation des sols.

18%

du territoire français est couvert par une cartographie des sols au 1/50 000, et environ 24 % au 1/100 000 - deux échelles utiles aux exploitations agricoles.

« magasin de données » Datamart] afin de faciliter son accès aux non-pédologues.

Vers une typologie commune aux OAD agronomiques avec TypTerres

Les informations sur les sols associées à une cartographie au 1/250 000 issues des Référentiels régionaux pédologiques restent difficilement exploitables par les non-pédologues. Ainsi, le nombre important de types de sols décrits dans les RRP n'est pas adapté aux besoins des agronomes. Ces derniers estiment que moins de cinquante types de sol par département constituent un compromis entre une précision suffisante et une complexité acceptable pour référencer du conseil agronomique. Toutefois ces types de sols « agrégés » ne peuvent être extraits directement de la base DoneSol.

Par conséquent, les données IGCS ne sont pas ou peu intégrées dans les OAD agronomiques. À leur place, des listes de sols très diverses sont aujourd'hui utilisées, certaines partielles, voire sommaires, et souvent obtenues à partir de typologies existantes ou, à défaut, par expertise. Ces listes sont difficiles à mettre en correspondance au sein d'une même région et entre outils, et ne permettent pas une identification correcte des sols sur le terrain par les utilisateurs des outils.

Face à ce constat, un groupe de travail du Réseau mixte technologique « Sols et Territoires »^[1] associant des pédologues et des agronomes a été constitué en 2012 pour valoriser les RRP, dont les informations sont normalisées et validées, dans des typologies régionales orientées vers le conseil en agronomie. Cette typologie agronomique, appelée TypTerres, représente bien la diversité des sols à l'échelle d'un territoire mais à l'aide d'un nombre limité de types. Les caractéristiques et les principales propriétés agronomiques de chaque type de sol sont présentées sous une forme abordable et exploitable par les acteurs des territoires (techniciens, agriculteurs...).

Les paramètres principaux disponibles dans les fichiers TypTerres sont, tout d'abord, le matériau géologique parental, la dynamique de l'eau, la profondeur du sol et de l'obstacle aux racines, et la réserve en eau. Puis, pour chaque horizon de sol identifié, sont précisées les valeurs moyennes de son épaisseur, sa texture et sa composition granulométrique, de sa teneur en éléments grossiers ainsi que leur taille et nature, de sa teneur en matière organique et en calcaire total, de sa capacité d'échanges cationiques^[2] (CEC) et de son pH. TypTerres fournit aussi la gamme de variation de certains paramètres.

La typologie TypTerres a été mise en œuvre sur deux territoires français : quatre départements du

BASE DE DONNÉES DONESOL : la capitalisation de la connaissance sur les sols

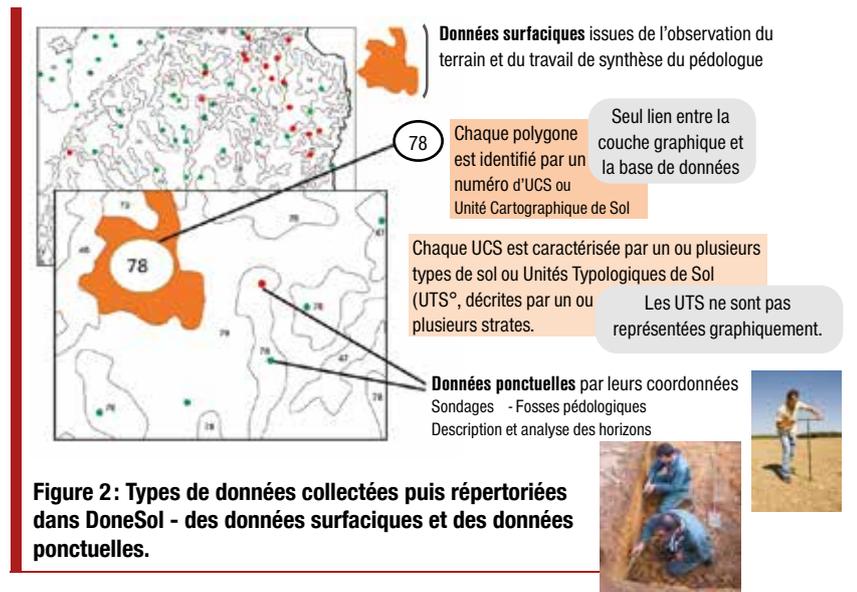


Figure 2: Types de données collectées puis répertoriées dans DoneSol - des données surfaciques et des données ponctuelles.

Centre-Ouest (85, 79, 86 et 36) et l'Alsace (67 et 68) entre 2016 et 2018. Les « typterres » proposés (tableau 2) répondent aux attentes des agronomes. Ainsi, dans la Vienne, on est passé de 212 unités typologiques de sol référencées par les RRP à seulement 33 typterres - une simplification bienvenue pour les agriculteurs qui doivent renseigner le type de sol de leurs parcelles dans leurs OAD. D'autres déclinaisons de TypTerres sont en cours de réalisation pour d'autres territoires (Lorraine, Isère, Loire-Atlantique et Drôme) pour aboutir, dans quelques années, à une couverture de toute la surface agricole utile française.

La modélisation statistique pour une cartographie à grande échelle plus rapide

Face aux besoins en connaissance des sols, toujours plus importants, les méthodes de cartographie des sols ont connu une forte évolution ces dernières années. Des systèmes d'informations



TYP TERRES : un référencement des types de sols plus adapté à l'usage agricole

	RRP 36 (Indre)	RRP 86 (Vienne)	RRP 79 (Deux-Sèvres)	RRP 85 (Vendée)
Surface du département	688 000 ha	699 000 ha	700 800 ha	672 000 ha
Nombre d'UTS	389	212	141	171
Taille moyenne d'une UTS	1 760 ha	4 970 ha	2 850 ha	3 000 ha
Nombre de typterres	48	33	39	36
Taille du typterres	700 ha à 56 000 ha	60 ha à 70 000 ha	40 ha à 75 000 ha	60 ha à 61 000 ha

UTS: unité typologique de sol telle que référencée par les RRP typterres : type de sol selon la typologie TypTerres (agrégé à partir de plusieurs UTS)

Tableau 2 : Résultats de la démarche TypTerres mise en œuvre dans le Centre-Ouest.

En savoir plus

Il est possible de consulter actuellement la liste des études pédologiques existantes en France avec l'outil REFERSOLS*. Les Référentiels régionaux pédologiques simplifiés seront visualisables sur le Géoportail avant la fin du 1^{er} semestre 2019. Les fonds de cartes seront ainsi accessibles, associés à une légende avec les noms des unités cartographiques de sol.
(*) Disponible sur <http://webapps.gissol.fr/georefersols/>

géographiques^[3] se sont développés, les temps de calcul diminuent et les sources d'informations géographiques se multiplient : modèles numériques de terrain^[4], télédétection...

L'ensemble de ces techniques est exploité par la cartographie des sols par modélisation statistique ou CSMS (en anglais, DSM pour *Digital Soil Mapping*). La CSMS produit des estimations de types de sol ou de propriétés des sols (comme leur pH ou leur teneur en carbone organique) obtenues par des modèles statistiques. Ces modèles sont alimentés par des données environnementales spatialisées et sont calibrés avec les données de sol disponibles sur la zone d'étude. Les cartes produites sont associées à une carte d'incertitude.

Les essais récents de CSMS montrent bien le potentiel de ces approches pour aider à cartographier les propriétés des sols, voire pour améliorer la précision des cartes de sol typologiques. La CSMS contribue ainsi de manière importante à l'enrichissement des techniques de cartographie pédologique en usage.

Au plan international, le développement de la CSMS sur la décennie écoulée a débouché sur le programme *GlobalSoilMap*, qui vise à produire une base de données numérique harmonisée et mondiale de plusieurs propriétés des sols à des profondeurs fixes (0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 et 100-200 cm). L'accès aux cartes est libre et gratuit tandis que les données sources restent gérées par leur propriétaire initial. Notons que l'objectif de *GlobalSoilMap* est repris dans d'autres initiatives internationales comme celles issues du partenariat mondial sur les sols, ONU-FAO.

Des informations à des résolutions différentes sont d'ores et déjà disponibles. Ainsi l'Inra a fourni une carte française du stock de carbone organique entre 0 et 30 cm de profondeur, préparée selon les spécifications de ce programme, ou encore des cartes de la réserve utile des sols français. D'autres productions viendront enrichir le catalogue des propriétés disponibles sur le territoire national.

[1] Ce RMT est présenté sur <https://sols-et-territoires.org>.

[2] La CEC d'un sol est la quantité d'ions positifs (cations) que celui-ci peut retenir (à pH donné) grâce à des charges négatives portées par l'argile, par l'humus, etc., qu'il contient. C'est un indicateur de sa fertilité.

[3] Un SIG est un logiciel capable d'acquérir, d'organiser, de traiter et de restituer des données géographiques sous forme de plans et de cartes.

[4] Un modèle numérique de terrain est une représentation de la topographie d'un terrain sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur.



Une cartographie des sols au 1/10 000 exige un sondage pour 2-3 hectares et un profil pour 10 à 50 hectares - une mise en œuvre complexe et coûteuse à l'échelle de la France entière.

Bertrand Laroche - bertrand.laroche@inra.fr
Anne Richer de Forges, Antonio Bispo
INRA - Unité Infosol

Joëlle Sauter - joelle.sauter@grandest.chambagri.fr
Chambre d'agriculture Grand Est

Alain Bouthier - a.bouthier@arvalis.fr
ARVALIS - Institut du végétal

FERTILITÉ DES SOLS AGRICOLES

UNE BASE DE DONNÉES

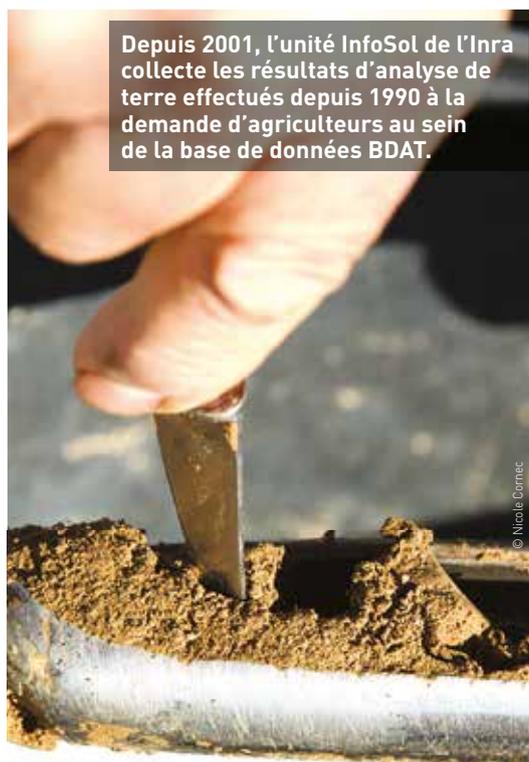
pour suivre les évolutions

Sur une exploitation, connaître la qualité des sols est un outil indispensable à la gestion des cultures. Les analyses de terre et leur référencement dans la base de données BDAT sont une importante source d'informations pour suivre l'évolution de cette qualité à l'échelle cantonale.

Depuis la création du groupement d'intérêt scientifique GIS Sol en 2001, le programme de surveillance « Base de données des analyses de terre » (BDAT) mutualise, au sein d'une banque de données, 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 de l'Agriculture *(encadré)*. Ce programme, unique en Europe, regroupe plus de 31,8 millions de résultats analytiques provenant de 2,6 millions d'échantillons prélevés entre 1990 et 2014. Les résultats obtenus après 2014 n'ont pas encore été capitalisés. La collecte des résultats d'analyses de terre, auprès des laboratoires, a été confiée à l'unité InfoSol de l'Inra. Le programme BDAT représente une source d'informations essentielle et unique renseignant sur l'état et l'évolution des propriétés agronomiques des sols agricoles de France métropolitaine.

Une répartition hétérogène des prélèvements

Chaque échantillon de terre offre la possibilité d'effectuer une grande diversité de déterminations physico-chimiques. Les échantillons ne sont pourtant que très rarement analysés pour l'ensemble des paramètres. Carbone organique,



phosphore, pH et cations échangeables (calcium, magnésium, potassium, sodium) sont majoritairement demandés par les opérateurs; les oligo-éléments ou la granulométrie ne représentent qu'un tiers des demandes. Pour respecter l'anonymat des analyses réalisées, la localisation se limite à l'indication du code INSEE de la commune de la parcelle prélevée.

La répartition spatiale de ces résultats montre que, malgré un très grand nombre de données récoltées, la couverture du territoire reste

Contribuez à promouvoir et enrichir la base de données BDAT !

La BDAT est un outil précieux soutenu par le ministère de l'Agriculture, mais elle risque de ne plus être alimentée en nouvelles données avec l'évolution de la réglementation sur la protection des données personnelles, qui exige l'accord explicite de celui qui a demandé l'analyse. Assurez sa pérennité en autorisant les laboratoires commerciaux d'analyse de terre et les organismes économiques qui organisent des campagnes de prélèvements à transmettre vos données de sol à la BDAT.

BDAT : jusqu'à 140 000 analyses de terre et deux millions de mesures collectées par an

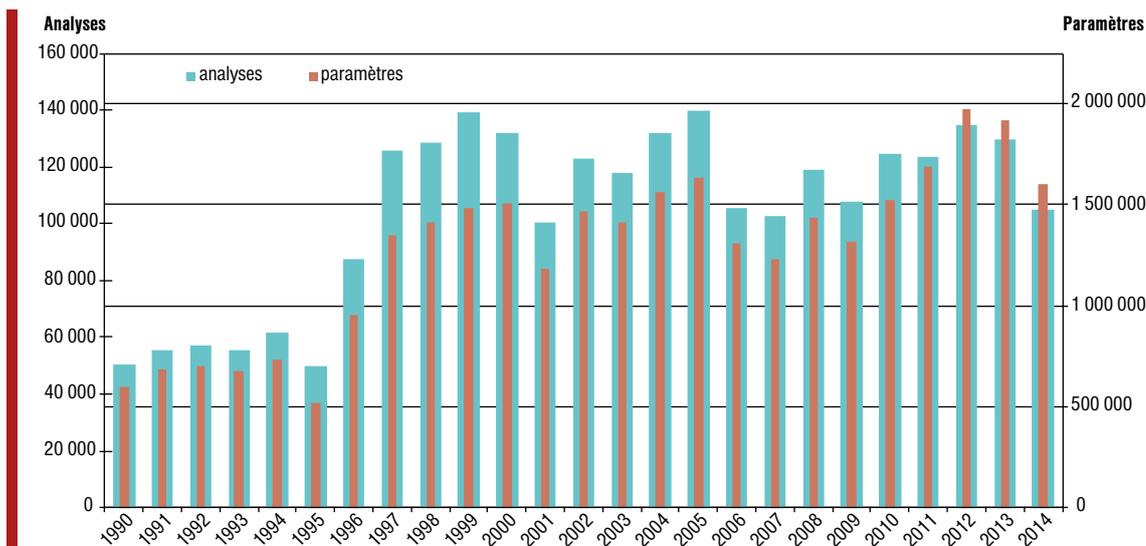


Figure 1 : Nombre d'analyses de terre et nombre de paramètres du sol référencés dans la base BDAT chaque année.

hétérogène. Ainsi, la façade atlantique, la moitié nord et l'est de la France présentent une densité d'échantillons élevée. En revanche, la moitié sud-est est beaucoup moins échantillonnée - peut-être en raison d'une moindre demande mais surtout d'une plus faible transmission des résultats par les laboratoires. De même, le nombre d'échantillons récoltés est très fluctuant selon les années (figure 1). La période 1995-2005 est la plus riche, avec en moyenne 110 000 échantillons par an.

Les sols non calcaires deviennent moins acides

Les sols non calcaires présentent une tendance naturelle à l'acidification, qui peut être accentuée par des actions humaines (dépôts atmosphériques, fertilisation...). Le pH des sols est la mesure la plus répandue pour évaluer cette acidité. Des pH trop faibles (acidité) peuvent avoir des conséquences très néfastes sur la fertilité.

Cependant une tendance à l'augmentation générale des pH a été mise en évidence dans les sols non calcaires référencés dans la base : l'évolution moyenne observée est de 0,025 point de pH par an. Les ventes d'amendements minéraux basiques n'ayant pas augmenté au cours de cette période, cette évolution est probablement due aux effets combinés d'une baisse des dépôts atmosphériques acides et d'une meilleure gestion de la fertilisation azotée minérale et organique, associée à la mise en place de cultures intermédiaires pièges à nitrate.

Suivre l'évolution des teneurs en nutriments

L'analyse de la teneur en potassium échangeable (c'est-à-dire disponible pour les cultures) montre des situations bien différentes selon les régions. Ainsi la disponibilité du potassium diminue au fil des ans dans les régions du centre et de l'ouest de la France. Cependant ces évolutions sont limitées, et une large partie des sols conserve une disponibilité du potassium satisfaisante pour la plupart des cultures.

Pour une grande partie des sols, la disponibilité du magnésium est satisfaisante pour la plupart des cultures. On note une augmentation du magnésium échangeable dans les régions du nord-est de la France, mais les évolutions sont également limitées, avec des contrastes inter-régionaux forts.

En France, la mesure de la teneur en phosphore biodisponible s'effectue selon trois méthodes : Dyer, Joret-Hebert et Olsen. L'utilisation de ces trois méthodes a varié au fil du temps, ce que reflètent les données de la BDAT ; la méthode Olsen, qui constitue un indicateur plus pertinent de la biodisponibilité du phosphore, s'est



Les 25 ans d'analyses de terre référencées dans la base BDAT offrent un recul précieux pour observer l'évolution des sols français.

© Nicole Dornec

substituée peu à peu aux deux autres. Or les résultats des différentes méthodes ne peuvent pas être directement comparés. Afin de disposer de résultats en nombre suffisant tout en contournant cette difficulté, l'évaluation de ce paramètre important de fertilité a été menée en construisant un indicateur appelé « Phosphore équivalent Olsen », basé sur l'établissement d'une fonction de pédotransfert. Celle-ci utilise le pH et la valeur en phosphore mesurée par la méthode Joret-Hebert ou la méthode Dyer afin d'estimer la teneur en phosphore qu'aurait eu le même échantillon analysé par la méthode Olsen.

Le suivi de l'indicateur P_2O_5 éq Olsen révèle des diminutions assez marquées de la disponibilité du phosphore dans beaucoup de régions françaises, les contrastes inter-régionaux restant très marqués. Les zones à très forte disponibilité

diminuent au profit de la classe de disponibilité intermédiaire, ce qui n'est pas un problème si cette disponibilité est surveillée. L'augmentation des surfaces de faible disponibilité du phosphore, probablement liée à une réduction importante des apports via les engrais minéraux, est plus préoccupante.

La teneur en matière organique a diversement évolué

Les matières organiques participent à la fertilité du sol en libérant des éléments nutritifs (azote, phosphore, soufre, potassium) lors de leur minéralisation. Elles augmentent la résistance du sol à la battance, à la prise en masse et au compactage, améliorent son aération et sa réserve en eau, et elles favorisent l'activité biologique et la biodiversité du sol. Elles protègent le sol en limitant

FERTILITÉ : la teneur en phosphore a tendance à diminuer presque partout en France

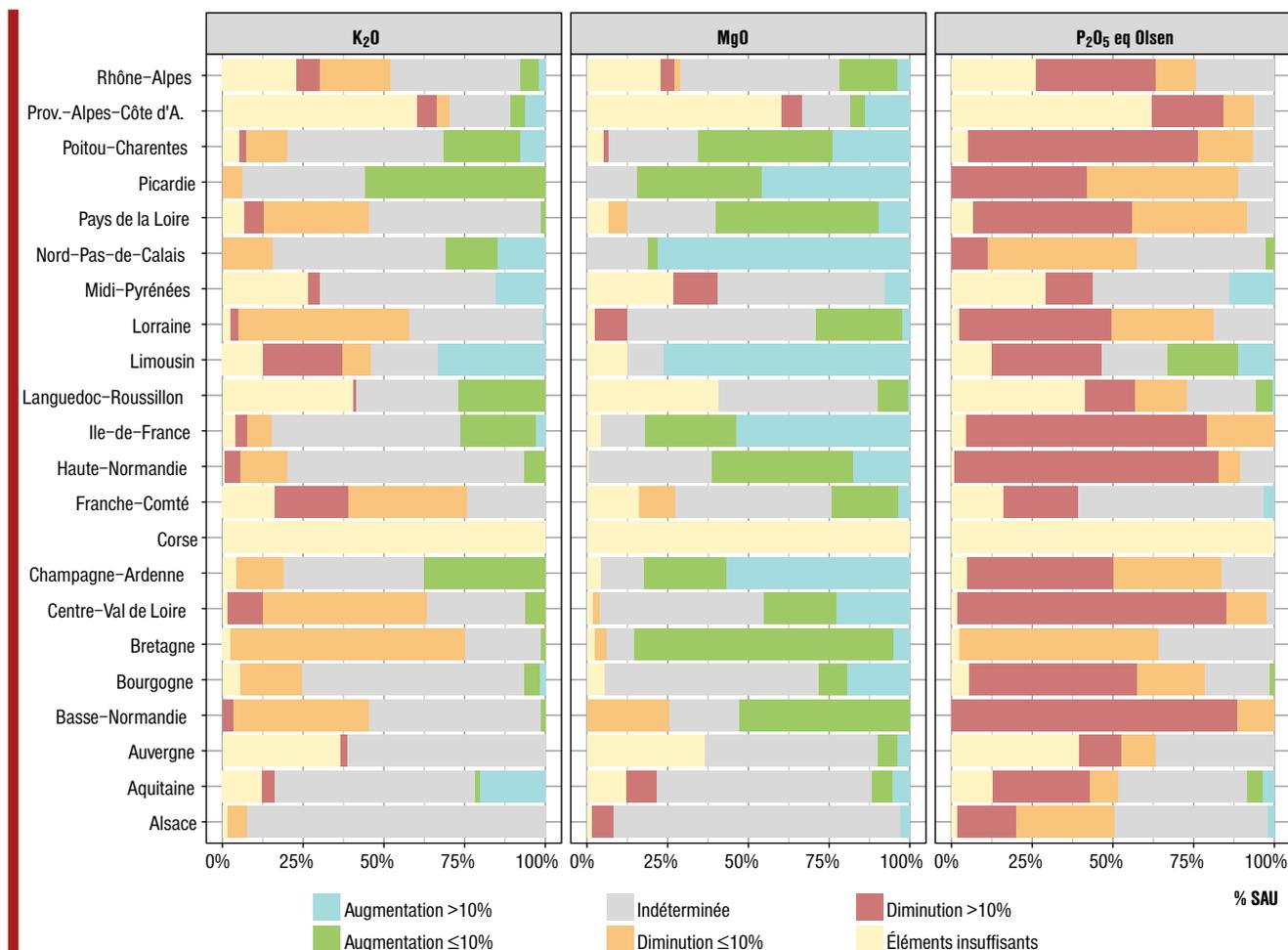
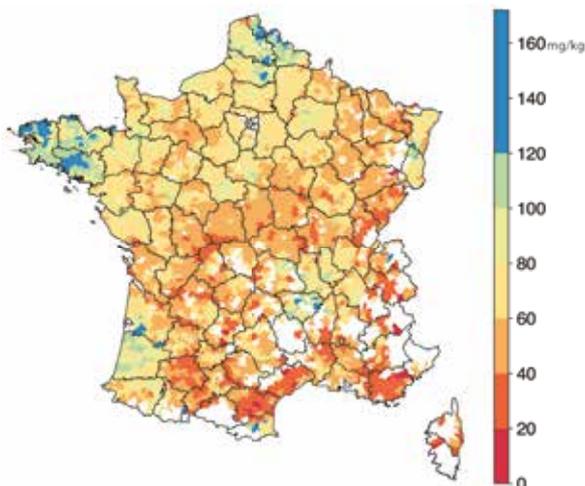


Figure 2 : Évolution des teneurs en potassium échangeable (K₂O), magnésium échangeable (MgO) et phosphore (P₂O₅ éq Olsen) entre les périodes 1996-2004 et 2005-2014. Cette évolution est exprimée en pourcentage de la surface agricole utile concernée pour chaque région française. Les couleurs bleu et vert signalent une augmentation des teneurs, les couleurs orange et rouge une diminution. Par exemple, en Aquitaine, près de 25 % de la SAU a enregistré une augmentation de la teneur en potassium échangeable supérieure à 10 % et moins de 10 % de la SAU, une diminution inférieure à 10 % de la teneur initiale, mais 50 % de la SAU a enregistré une diminution de la teneur en phosphore. « Éléments insuffisants » : test statistique de comparaison des teneurs entre les deux périodes non faisable (Étude soutenue par l'UNIFA.)



La BDAT montre, par exemple, qu'une part significative du territoire français présente de faibles teneurs en phosphore (P_2O_5 eq Olsen) sur 2010-2014.

notamment l'érosion hydrique. Enfin elles atténuent les pollutions en retenant fortement certains métaux toxiques (cadmium, mercure, plomb) ou micropolluants organiques ; leur présence renforce ainsi le rôle de tampon assuré par le sol.

L'analyse des données de BDAT à l'échelle cantonale montre une évolution non linéaire des teneurs en carbone organique : entre 1995 et 2009, cette teneur a diminué d'environ 0,3 % par an puis, entre 2000 et 2014, elle a augmenté de 0,4 % par an.

Les résultats de modélisation montrent que la teneur en carbone organique des sols agricoles est principalement contrôlée par des paramètres pédoclimatiques, puis par l'occupation du sol et notamment la présence d'élevage (prairies et surfaces fourragères). À ce titre, les zones à dominante élevage (de polyculture-élevage ou spécialisées herbivores) semblent enregistrer les plus fortes baisses. Ces évolutions pourraient principalement s'expliquer par le retournement des prairies en raison du changement de réglementation de la PAC au début des années 1990.

L'augmentation des teneurs en carbone organique après 2000 se concentre dans les zones de grandes cultures. L'évolution des pratiques culturales favorables au stockage de carbone, comme le retour au sol des résidus de culture ou la mise en place de couverts végétaux en interculture associés ou non à des itinéraires techniques sans labour, peut contribuer à ces résultats. Cette évolution est probablement favorisée par les teneurs plutôt faibles avant 2000.

Des travaux supplémentaires ciblant des territoires en diminution ou en augmentation permettraient d'intégrer de nouvelles données à une échelle spatiale plus fine.

Des données accessibles à tous et utiles à tout le secteur agricole

Les données statistiques sur l'état et l'évolution des paramètres du sol, agrégées par canton,

petite région agricole, département ou région, sont disponibles librement sur le site du GIS Sol (*voir En savoir plus*). La BDAT permet également de réaliser des cartographies interactives en choisissant soi-même les paramètres des cartes produites. Plus de 3500 cartes sont disponibles, incluant les statistiques des paramètres agronomiques calculés selon plusieurs périodes de mesures et l'accès à des cartes de comparaison entre périodes. Il est possible d'imprimer les cartes ou de les télécharger sous forme de fichiers pdf.

Les informations produites par la BDAT sont très précieuses. Elles peuvent être valorisées par de nombreux acteurs à différentes échelles. Ainsi, à l'échelle de son exploitation, l'agriculteur peut plus facilement situer son sol et sa fertilité par rapport aux indicateurs de son canton et surtout, par rapport à leur évolution : autrement dit, voir si les indicateurs de ses parcelles évoluent dans la tendance du canton ou montrent une différence marquée, qui doit interroger ou rassurer.

À l'échelle d'un territoire, qui regroupe en général plusieurs cantons, un technicien d'organisme économique a la possibilité de mieux adapter sa stratégie commerciale de vente d'engrais et de produits organiques sur la base de ces données. Pour le conseiller agricole, la BDAT constitue un outil d'animation et de formation des agriculteurs pour leur faire percevoir les principaux problèmes agronomiques de leur secteur et établir des priorités.

Pour les acteurs des territoires où cohabitent élevage, polyculture-élevage et grandes cultures, la question de la gestion et de la valorisation de gisements de proximité en matières organiques doit être traitée et connectée avec l'ensemble des enjeux auxquels sont confrontés les agriculteurs. L'exploitation de la BDAT peut aider à piloter ces politiques de territoire.

Pour l'agronome et le chercheur, le statut et les évolutions de fertilité mises en évidence avec cette base de données sont à mettre en relation avec les indicateurs calculés à partir des pratiques agricoles pour mieux expliquer les évolutions constatées. Par ailleurs, ces évolutions peuvent permettre de tester des modèles agronomiques à l'échelle de territoires.

Pour l'enseignant, ces données permettent aux étudiants d'appréhender toute la variabilité spatiale et temporelle des propriétés agronomiques des sols agricoles.

Nicolas Saby - nicolas.saby@inra.fr

Antonio Bispo - antonio.bispo@inra.fr

INRA - Infosol

Alain Bouthier - a.bouthier@arvalis.fr

ARVALIS - Institut du végétal

En savoir plus

Consultez librement la base BDAT sur <http://bdat.gissol.fr/> Sélectionnez dans les menus déroulants à gauche, tout d'abord le paramètre de sol qui vous intéresse (teneur en argile, en calcaire, CEC...), puis l'échelle géographique (canton, région...), la période d'observation (et, facultatif, la comparaison avec une autre période) et l'information statistique recherchée : valeur moyenne, effectif (nombre de mesures), etc. Les données sous forme de tableaux sont disponibles sur le site data.inra.fr (mot-clé BDAT).

HÉTÉROGÉNÉITÉ DES SOLS

CARACTÉRISER

la variabilité intraparcellaire



Les sols présentent des hétérogénéités dont la nature doit être précisée.

Les propriétés des sols peuvent fortement varier au sein d'une même parcelle. Qu'elle se situe au niveau de la profondeur du sol, de la texture ou d'autres propriétés pédologiques, cette variabilité peut être à l'origine de potentiels agronomiques différenciés. Il convient de la zoner et de la qualifier afin d'optimiser les conduites de cultures.

Les sols et leur organisation spatiale sont caractérisés de façon directe grâce à l'observation, lors de sondages et de profils pédologiques associés à des analyses physico-chimiques de terre. Cependant, le coût et la pénibilité de ces observations limitent leur multiplication, et leur caractère localisé fait obstacle à la réalisation de cartes haute résolution. En effet, une étude réalisée par Arvalis sur dix parcelles à travers la France a mis en évidence la nécessité d'effectuer cinq prélèvements par hectare au minimum pour avoir une caractérisation physique et chimique représentative de la parcelle.

Des technologies de mesure indirectes utilisant des capteurs embarqués, fonctionnant à proximité (méthodes géophysiques) ou à distance de la surface à étudier (télédétection), produisent des cartes haute résolution de certaines propriétés physiques du sol.

CARACTÉRISATION DU SOL : l'observation directe n'est pas la seule méthode

Méthode	Principe	Avantages	Limites
Électrique	Mesure de la résistivité électrique du sol grâce à des électrodes en contact avec le sol	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs profondeurs d'investigation (0-50, 0-100 et 0-170 cm pour le matériel de Geocarta) • Mesure absolue et robuste 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures indirectes • Coût • Résistance de contact sur sols très secs et/ou caillouteux • Ne mesure pas la teneur du sol en éléments minéraux (P, K...)
Électromagnétique	Mesure de la conductivité électrique du sol à partir d'un champ magnétique émis à proximité de la surface (sans contact)	<ul style="list-style-type: none"> • Coût • Pas de contact avec le sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures indirectes • Généralement une seule profondeur d'investigation • Sensible aux perturbations locales • Ne mesure pas la teneur du sol en éléments minéraux (P, K...)
Observations pédologiques	Description de sondages et profils pédologiques et analyses physico-chimiques (granulométrie, pH, CEC...) à partir d'échantillons de sols prélevés	<ul style="list-style-type: none"> • Observations et mesures directes, réelles • Expertise humaine (pédologue) avec apports de connaissances sur le milieu (topographie, contexte morpho-géologique...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût, pénibilité • Information très localisée faisant obstacle à la réalisation de cartographie haute résolution sur une grande échelle

Tableau 1 : Comparaison de méthodes de caractérisation de la variabilité intraparcellaire du sol.

Les mesures géophysiques du sol sont rapides et simples à mettre en œuvre

Les méthodes géophysiques, électrique et électromagnétique, figurent parmi les plus employées en agriculture (tableau 1). En effet, elles investiguent des profondeurs comparables à la profondeur de colonisation des racines et sont sensibles à des paramètres pédologiques d'intérêt. Leur principe est de générer un courant électrique qui traverse le sol. La capacité du sol à s'opposer (résistivité) ou à laisser passer (conductivité) ce courant dépend de ses propriétés intrinsèques.

Dans la méthode électrique, deux électrodes enfoncées dans le sol y injectent un courant d'intensité donnée tandis que deux autres électrodes mesurent la différence de potentiel résultant du passage du courant. Cette

technique a été commercialisée au milieu des années quatre-vingt-dix par Geocarta et n'a cessé d'évoluer. Elle est à présent utilisée par Stratéos d'Axéreal et Fertilio e-RM de Terrena. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter de calibration. En revanche, dans certains contextes (sols très secs, caillouteux), des problèmes de contact entre le sol et les électrodes peuvent produire des artefacts de mesure.

Autre alternative, un champ magnétique est émis par une bobine qui induit un courant électrique dans le sol. Celui-ci génère un champ magnétique secondaire, que l'on mesure grâce à une seconde

bobine et qui est proportionnel à la conductivité électrique du sol.

La méthode électromagnétique présente l'avantage d'être sans contact ; il est donc possible d'effectuer des mesures sur sol gelé ou sec. Sa sensibilité est adaptée à la plupart des conductivités des sols français. En revanche, elle est sensible aux perturbations électromagnétiques (lignes électriques, clôtures, bâtiments métalliques...). Elle est utilisée par le service BeApi des coopératives In Vivo et par AgExtent (Partenariat Geoprospector - CNH Industries).

À l'origine conçues pour des prospections de grandes profondeurs (applications minières et

pétrolières), les techniques de géophysique appliquée ont été adaptées aux profondeurs d'investigations convenant à l'étude des sols. Le principal

dispositif de mesure de résistivité prospecte le sol sur trois profondeurs en un seul passage, tandis que les conductivimètres prospectent sur deux profondeurs simultanément au maximum.

À quels paramètres ces méthodes donnent-elles accès ?

La résistivité et la conductivité électriques dépendent de paramètres du sol que l'on peut classer en deux familles : les caractéristiques liées à la nature pérenne du sol (texture, taux en éléments grossiers et profondeur d'apparition du matériau parental) et les paramètres liés à l'état

« La cartographie du sol par des mesures géophysiques définit des zones homogènes qui seront gérées comme autant de mini parcelles. »

du sol au moment de la mesure (humidité, température, compacité et concentration ionique du sol). L'obtention de cartes de résistivité ou de conductivité ne donne pas directement accès à une carte des propriétés du sol : il est nécessaire de mettre en lien la propriété géophysique mesurée et les propriétés du sol. En effet, les méthodes électriques et électromagnétiques réalisent des mesures intégratives, c'est-à-dire qu'une valeur de résistivité mesurée est la résultante d'un volume de sol prospecté ; aussi deux sols très différents peuvent donner des mesures de résistivité comparables et, à l'inverse, deux sols similaires d'un point de vue pédologique peuvent générer des signaux électriques très différents – par exemple, parce qu'il existe une fine couche conductrice ou résistante dans le profil exploré.

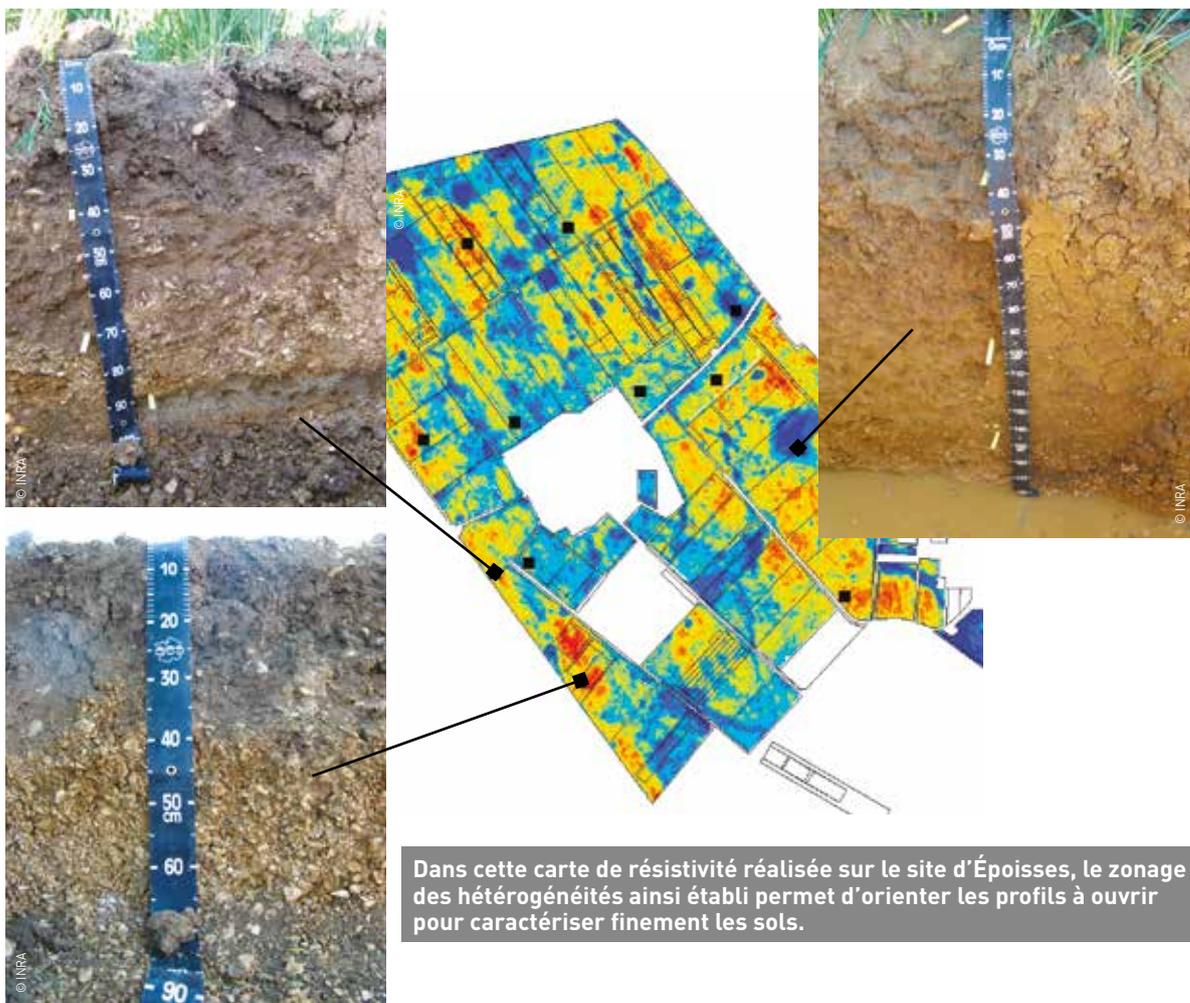
Ces techniques ne donnent pas non plus facilement accès à la répartition des éléments chimiques tels que le phosphore et le potassium, car il n'existe pas de lien direct entre la caractérisation de la variabilité par ces méthodes indirectes et les éléments chimiques. Par ailleurs, les variations de la teneur du sol en ces deux éléments ne sont pas liées : leur répartition dans le sol dépend de l'historique de la parcelle et, dans certains sols, la biodisponibilité du potassium dépend du type de sol (argileux ou pas). De plus, il est rarement possible d'établir une structure spatiale commune à ces deux éléments. L'analyse de terre est donc indispensable, en laboratoire après des prélèvements sur la parcelle, et/ou *in situ*, par des mesures infrarouge.

Obtenir une carte précise de la variabilité d'une propriété du sol

Une première stratégie de traitement consiste à utiliser une cartographie géophysique pour optimiser un plan d'échantillonnage, puis à affiner les

Lors des mesures de la résistivité du sol, trois jeux d'électrodes réceptrices prospectent trois profondeurs différentes.





Dans cette carte de résistivité réalisée sur le site d'Époisses, le zonage des hétérogénéités ainsi établi permet d'orienter les profils à ouvrir pour caractériser finement les sols.

contours des zones de sol par l'approche classique (sondages, etc.). C'est la stratégie suivie sur le site expérimental de l'Inra d'Époisses.

Ce site a fait l'objet d'une prospection électrique puis d'observations pédologiques. Le sol argileux est conducteur mais repose sur un cailloutis calcaire résistant ; la réponse électrique est donc fortement corrélée à la profondeur d'apparition du cailloutis calcaire. L'association des observations pédologiques et de la carte de résistivité électrique a produit une carte des types de sol aux contours plus précis. Une cartographie de la réserve en eau utilisable en a été déduite grâce à des mesures complémentaires des propriétés de rétention en eau des unités de sol.

Des stratégies basées sur des analyses statistiques ou géostatistiques peuvent également être mises en œuvre pour proposer des cartes de modélisation des propriétés du sol. Par exemple, une méthode géostatistique d'interpolation a été appliquée sur les données du site d'Époisses. Elle a fourni une carte de l'épaisseur estimée du sol en tous points de la parcelle à partir d'un nombre limité de sondages à la tarière. L'avantage des méthodes statistiques et géostatistiques est de pouvoir associer des incertitudes aux résultats de modélisation.

À quoi sert de connaître les hétérogénéités de sa parcelle ?

Cette double prospection est la plus utilisée en agriculture. La cartographie du sol obtenue par conductivité ou résistivité définit des zones au comportement homogène. Chaque zone est ensuite considérée comme une mini parcelle ayant ses caractéristiques propres.

Ce « zonage » peut être ensuite transformé, par exemple, en une carte de préconisation de doses (azote, densité de semis...) exploitable par le matériel de l'agriculteur. Sur blé tendre, l'enjeu de la modulation intraparcélaire de la dose d'azote lors de l'apport tardif est de 3 q/ha sur les parcelles les plus hétérogènes (doses apportées très différentes) et les mieux structurées (zones de grandes tailles où la dose est homogène).

Concernant le phosphore et le potassium, l'enjeu de la modulation intraparcélaire dépend de l'exigence de la culture, de la durée d'amortissement de la caractérisation de la variabilité intraparcélaire et de la durée nécessaire pour homogénéiser les teneurs du sol. Selon l'étude menée par Arvalis sur sept sites différents, lorsque le coût de la caractérisation de la variabilité est amorti sur le nombre d'années permettant de remonter les teneurs les plus faibles et de baisser les

plus élevées, la modulation intraparcellaire sur cultures à faible exigence présente un intérêt pour seulement trois parcelles (+9 à +17 €/ha), les quatre autres affichant une perte (-4 à -28 €/ha). En revanche, sur cultures à forte exigence et sur cinq ans, la modulation a présenté un intérêt sur l'ensemble des parcelles (+7 à + 86 €/ha).

D'autres méthodes de caractérisations, pour d'autres applications

D'autres méthodes indirectes pour caractériser les sols ont été testées. C'est le cas des cartes de rendement, qui existent depuis plus de vingt ans sur certaines exploitations. Toutefois le rendement intègre ce qui s'est passé sur toute l'année (maladies, ravageurs, stress...). Or le facteur limitant d'une année à l'autre n'est pas toujours le même, notamment ces dernières années. Il est donc très délicat d'utiliser les cartes de rendement pour obtenir une information sur la variabilité du sol.

Des techniques aéroportées (prise d'images par drone, ULM...) sont également à l'étude car elles présentent l'avantage de couvrir rapidement des zones importantes. Cependant, les profondeurs



Les matériels de mesure de la conductivité disponibles en France peuvent être installés à l'avant d'un tracteur et explorent une seule profondeur.

© D. Brun, Arvalis - Institut du végétal

d'investigation sont superficielles, au contraire des méthodes géophysiques. La mise à disposition des images du satellite Sentinel 2 fera peut-être surgir de nouvelles méthodes.

Maud Seger - maud.seger@inra.fr
INRA - URSOLS

Caroline Desbourdes - c.desbourdes@arvalis.fr

Thibaud Deschamps
ARVALIS - Institut du végétal