

Agriculture de précision

Martine Guérif et Dominique King,
coordinateurs

Agriculture de précision

Martine Guérif, Dominique King,
coordinateurs

Éditions Quæ
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection *Update Sciences & Technologies*

Conceptual Approach to the Study of Snow Avalanches,
Maurice Meunier, Christophe Ancey, Didier Richard,
2005, 262 p.

Qualité de l'eau en milieu rural
Savoirs et pratiques dans les bassins versants
2006, 352 p.

Biodiversity and Domestication of Yams in West Africa
Traditional Practices Leading to *Dioscorea rotundata* Poir.
Alexandre Dansi, Roland Dumont, Philippe Vernier, Jeanne Zoundjihèkpon
2006, 104 p.

Génétiquement indéterminé
Le vivant auto-organisé
Sylvie Pouteau, coordinatrice
2007, 172 p.

L'éthique en friche
Dominique Vermersch
2007, 116 p.

Avant-propos

La mutation de l'agriculture conduit, dans les zones de grande culture, à des surfaces d'exploitation grandissantes et à une difficulté accrue pour l'agriculteur d'appréhender, par ses moyens traditionnels, la variabilité spatio-temporelle des états de ses parcelles. La connaissance de ces états constitue, dans le champ de contraintes défini par le système de production et la réglementation, la base de la prise de décision par l'agriculteur vis-à-vis des choix techniques.

Les développements technologiques des deux dernières décennies appliqués à l'agriculture sont très nombreux : systèmes de positionnement par satellite, capteurs divers embarqués sur satellites ou machines agricoles, agro-équipements permettant des applications à taux variable, technologie de l'information. Ils ont ouvert de nouvelles perspectives et donné naissance au concept d'« agriculture de précision ». Les enjeux finalisés associés à ce concept sont de deux ordres. Le premier est celui de la prise en compte de l'hétérogénéité parcellaire dans la gestion des cultures. Celle-ci permet en effet une optimisation spatialisée des choix techniques des agriculteurs vis-à-vis d'objectifs à la fois de production et de limitation des impacts sur l'environnement, qui sont des composantes essentielles d'une agriculture et d'un développement durables. Le deuxième enjeu est lié au fait que la technologie de mesure mise en œuvre dans ce cadre permet d'acquérir un volume considérable d'informations spatialement structurées sur les parcelles et les exploitations agricoles. Cela ouvre des perspectives très intéressantes de suivi et de qualification à différentes échelles : traçabilité, certification des pratiques agricoles et des exploitations, mise en place d'observatoires des agrosystèmes permettant l'évaluation de l'impact de changements de pratiques agricoles ou d'aménagements ruraux sur le milieu.

Dans ce contexte, la direction scientifique « Environnement, forêt et agronomie » de l'Inra a encouragé au début des années 2000, des recherches au sein d'une action incitative pluridisciplinaire sur le thème de la prise en compte des informations sur la variabilité intra-parcellaire dans la conduite des cultures. Cet ouvrage présente l'essentiel des résultats des travaux menés dans ce cadre.

Dans la chaîne qui conduit du recueil d'informations pertinentes sur les états du système sol-plante jusqu'à l'application spatialisée d'une technique culturale optimale, les travaux de recherche ont porté d'une part, sur la caractérisation spatiale et temporelle des états et d'autre part, sur les concepts et modèles agronomiques qui permettent l'intégration de ces informations dans un système automatisé de diagnostic et de décision.

L'ouvrage est subdivisé en quatre parties qui reprennent les axes de recherche qui ont structuré l'action incitative. Les deux premiers concernent les outils et méthodes développés pour obtenir des informations sur l'organisation spatiale des états du milieu (partie 1) et de la culture (partie 2) au sein d'une parcelle agricole. On y traite à la fois de l'extension d'outils classiques (cartographie pédologique et fonctions de pédotransfert) et de la mise en œuvre de capteurs qui permettent, à partir du satellite ou des engins agricoles, de densifier les mesures et de fournir directement une carte numérique des grandeurs mesurées. Les travaux ont

notamment porté sur l'utilisation : (i) de capteurs de géophysique pour accéder aux propriétés fonctionnelles des sols, (ii) de capteurs de télédétection pour caractériser le couvert et accéder à des variables d'état de ces couverts utilisables dans des schémas classiques d'aide à la décision, (iii) de stéréovision pour décrire les relations entre culture et population d'adventices et (iv) de capteurs de rendement. La partie 3 traite des méthodes de statistiques spatiales auxquelles on a recours pour caractériser la structuration spatiale des propriétés des parcelles : structuration en variogramme, structuration à plus grande échelle par des gradients ou des zones de changements abrupts dans la parcelle qui seront de bonnes candidates pour être des frontières entre zones considérées comme homogènes. La partie 4 aborde la question de l'élaboration de préconisations spatialisées, illustrées dans le cas de la fertilisation azotée, en recourant à des méthodes classiques de règles de décisions utilisant des indicateurs, ou bien en développant des approches nouvelles, fondées sur des modèles de fonctionnement des cultures. Ceux-ci interviennent à différents niveaux de la stratégie : évaluation *a priori* des rendements potentiels, diagnostic, prédiction et évaluation de scénarios en temps réel. La mise en œuvre de méthodes de contrôle du modèle par assimilation de données acquises en cours de culture améliore notamment leurs prédictions. Enfin, des études par simulation permettent de discuter de l'intérêt de la modulation spatiale des apports.

Les travaux rapportés dans cet ouvrage ont pu être engagés grâce à l'impulsion et au soutien apportés par Jean Boiffin, alors directeur scientifique du secteur Environnement, forêts et agronomie et Bernard Seguin alors chef de département adjoint « Environnement et agronomie ». C'est ainsi qu'une communauté de chercheurs a pu se constituer et engager des travaux qui devront se poursuivre avec le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication. L'enjeu est important puisqu'il s'agit de relever le défi d'une agriculture durable à la fois économiquement compétitive et soucieuse de la protection des ressources environnementales.

Martine Guérif et Dominique King

Nous adressons nos remerciements à l'ensemble des personnes qui ont contribué au travail de relecture des articles et tout particulièrement à Odile Duval qui en a supervisé l'harmonisation.

Sommaire

Partie 1. Caractérisation spatialisée du milieu physique

Caractérisation spatialisée du milieu physique pour l'agriculture de précision : enjeux et questions de recherche -----	7
<i>D. King</i>	
Cartographie des sols et agriculture de précision -----	15
<i>B. Nicoullaud, N. Beaudoin, J. Roque, A. Couturier, J. Maucorps, D. King</i>	
Établissement et validation de classes de pédotransfert pour un modèle de culture à l'échelle parcellaire : application au modèle Stics -----	25
<i>N. Beaudoin, B. Nicoullaud, V. Houlès</i>	
Apport des méthodes de géophysique à la connaissance de la variabilité spatiale et du fonctionnement hydrique des sols -----	43
<i>D. Michot, D. King, B. Nicoullaud, A. Dorigny, H. Bourennane, I. Cousin, P. Courtemanche, A. Couturier, C. Pasquier, Y. Benderitter, M. Dabas, A. Tabbagh</i>	
Mesures spatialisées de propriétés physico-chimiques du sol au sein d'une parcelle par sonde Isfet et mesures hyperspectrales -----	59
<i>Y. Fouad, R.A. Viscarra-Rossel, H. Aïchi, C. Walter</i>	

Partie 2. Caractérisation spatialisée de la culture

Caractérisation du niveau de croissance du colza en sortie d'hiver par radiométrie visible-proche infrarouge -----	77
<i>P. Huet, J.-M. Allirand, R. Roche, J.-M. Gilliot, L. Gillot, A. Jullien</i>	
Estimation de variables biophysiques du couvert par ajustement de modèles de transfert radiatif sur des réflectances -----	97
<i>S. Moulin, R. M. Zurita, M. Guérif</i>	
Caractérisation par stéréovision de l'hétérogénéité d'un peuplement adventice dans une culture -----	115
<i>L. Assémat, M. Chapron, R. Stegorean</i>	
Cartographie du rendement du blé et des caractéristiques qualitatives des grains --	131
<i>J.-M. Machet, A. Couturier, N. Beaudoin</i>	

Partie 3. Méthodes mathématiques pour décrire la structuration spatiale des propriétés des parcelles

Analyse statistique de caractéristiques permanentes et non-permanentes du sol d'une parcelle agricole ----- 147
C. Bruchou et B. Mary

Détection de zones de changement abrupt pour des variables non permanentes du sol : vers la définition de zones homogènes ? ----- 165
D. Allard et E. Gabriel

Partie 4. Élaboration de préconisations spatialisées pour la gestion des intrants : application à la fertilisation azotée

Élaboration d'un indicateur de nutrition azotée du blé basé sur l'indice foliaire et la teneur en chlorophylle pour la préconisation de doses d'azote ----- 179
V. Houlès, M. Guérif, B. Mary, P. Gate, J.-M. Machet, S. Moulin

Critères agro-environnementaux fondés sur le modèle de culture Stics pour la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé ----- 199
V. Houlès, B. Mary, M. Guérif, D. Makowski, E. Justes, J.-M. Machet

Modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé fondée sur le modèle de culture Stics. Intérêt de la démarche et méthodes de spatialisation ----- 225
M. Guérif, V. Houlès, B. Mary, N. Beaudoin, J.-M. Machet, S. Moulin, B. Nicoullaud

Intérêt de l'utilisation de modèles de fonctionnement des peuplements végétaux (Ceres et Azodyn) pour raisonner la modulation de la fertilisation azotée ----- 249
A. Jullien, R. Roche, M.-H. Jeuffroy, B. Gabrielle, P. Huet

Résumé des articles ----- 267

Liste des auteurs ----- 275

Partie 1

Caractérisation spatialisée du milieu physique

Caractérisation spatialisée du milieu physique pour l'agriculture de précision : enjeux et questions de recherche

D. KING

Introduction

L'agriculture de précision introduit des possibilités d'intervention culturale à une résolution de quelques m². Toute décision à cette échelle implique dans le même temps un besoin d'information de résolution spatiale équivalente pour caractériser les variables du milieu physique (sol, eau, atmosphère) et celles concernant la biologie (cultures, adventices, parasites...). L'objectif de cet article est d'analyser la nature et la précision des données souhaitées et d'examiner : (1) les recherches méthodologiques (météorologiques ou statistiques) pour atteindre de façon exhaustive cette information et (2) les recherches plus fondamentales pour connaître le fonctionnement du milieu physique en inter-action avec la culture à cette échelle. Dans une dernière partie, quelques travaux réalisés dans le cadre de cet ouvrage sont résumés en soulignant leur apport vis-à-vis des besoins de recherche exprimés.

Cadrage historique

La variabilité spatiale du milieu est le résultat de processus naturels correspondant à des échanges de matière et d'énergie hérités du passé. L'homme a adapté ses activités agricoles à cette variabilité en construisant un maillage de l'espace sous forme de parcelles agricoles. À chaque parcelle, correspond ainsi un mode de conduite agricole spatialement uniforme. Ce maillage du parcellaire a de nombreux déterminants notamment sociologiques avec le partage des terres lors des héritages. Toutefois, les paysages agricoles ont longtemps souligné (et parfois même renforcé) la diversité des conditions du milieu physique. L'introduction du machinisme agricole et les remembrements successifs au cours du XX^e siècle ont bouleversé cet équilibre avec un agrandissement progressif des parcelles. Beaucoup

de techniques agricoles ont alors tenté de « lisser » la variabilité désormais incluse au sein des parcelles. On peut citer le défonçage, l'épierrage, le drainage, l'apport de matériaux (amendements, fumiers), etc. Ces techniques ont toutefois leurs limites et la poursuite de l'agrandissement des parcelles à la fin du XX^e siècle a introduit une sensibilité croissante des agriculteurs à la prise en compte de la variabilité intra-parcellaire des paramètres du milieu physique.

Les différentes méthodes de modulation spatiale intra-parcellaire

L'agriculture de précision offre un nouveau champ d'investigation dans les méthodes de gestion de la variabilité intra-parcellaire (Boisgontier, 1997). La première méthode prenant en compte cette variabilité consiste à réaliser une modulation « continue » des interventions culturales au sein des parcelles (par exemple, apport d'azote, irrigation, densité de semis, etc.). Il reste encore un grand nombre de problèmes à résoudre au niveau des outils et de leur robotisation, mais dans tous les cas, cette méthode génère des besoins en information spatialisée selon une résolution correspondant à la précision technique de ces outils.

Une deuxième méthode consiste à moduler les interventions en « segmentant » la parcelle agricole en sous-parcelles considérées comme homogènes (ou le moins hétérogène possible) vis-à-vis des paramètres pertinents de la conduite d'une culture. La modulation est alors conduite sur des surfaces assez grandes, ce qui est techniquement plus facile à gérer. Cette méthode nécessite surtout une connaissance fine (et pertinente) des limites séparant les sous-parcelles.

Une troisième méthode, implicite dans de nombreux raisonnements agronomiques, tient compte des plus fortes contraintes présentes au sein de la parcelle agricole pour prendre une décision uniforme sur l'ensemble de cette parcelle. C'est notamment le cas pour décider les dates optimales des interventions selon les conditions météorologiques (par exemple, présence d'une zone humide restreinte mais dictant les jours d'accessibilité des machines agricoles sur l'ensemble de la parcelle). Cette méthode sera appelée approche « globale » et se limitera à l'estimation du pourcentage de surface occupée par les zones considérées comme contraignantes vis-à-vis d'une culture.

Quels besoins d'information pour l'agriculture de précision ?

La nature des informations est la même quel que soit le type d'agriculture, et le mot « précision » dans l'expression générique « agriculture de précision » concerne d'abord la localisation spatiale des informations, plutôt que la précision de la mesure elle-même. Il existe donc un besoin nouveau d'identification, de quantification et de représentation de la variabilité spatiale des caractéristiques du milieu selon une résolution spatiale correspondant à celle des outils techniques. En tout premier lieu, l'estimation du degré de variabilité intra-parcellaire est un préalable important pour savoir si un investissement dans les techniques de l'agriculture de précision sera rentable ou non (Mc Bratney, 2001). En effet, des parcelles possédant une très faible variabilité ou, à l'inverse, une très grande variabilité (par exemple, à l'échelle infra-métrique) n'auront certainement pas d'avantage économique à être gérées par les méthodes de l'agriculture de précision.

Les programmes nationaux ou régionaux de cartographie fournissent un grand nombre d'information pour les sols, l'eau et la météorologie. Par exemple, en ce qui concerne les sols, le programme IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, Arrouays *et al.*, 2004) comprend un volet de cartographie systématique du territoire français à l'échelle 1/250 000 et un volet de caractérisation de secteurs de référence à des échelles comprises entre 1/25 000 et 1/5 000 (Favrot, 1989). Pour les besoins de l'agriculture de précision, il faudrait envisager une précision correspondant au moins à l'échelle 1/2 500, soit un facteur d'agrandissement de 100 par rapport à l'inventaire systématique IGCS ! Les secteurs de référence ont pour objectif d'être des sites de démonstration et ils seraient en mesure d'évaluer l'utilité des techniques de l'agriculture de précision sur une région (Lagacherie *et al.*, 2001). Par contre, ils ne pourraient pas répondre à la demande d'informations pour des parcelles hors du secteur étudié. Compte tenu de la résolution exigée par l'agriculture de précision, les méthodes d'inventaire systématique apparaissent irréalistes et de nouvelles méthodes de cartographie sont donc à envisager, générant ainsi de nouvelles questions de recherche (Robert, 2002).

Par ailleurs, le mot « précision » ne doit pas se limiter à l'espace mais s'appliquer également au temps. Les décisions d'interventions culturales sont déterminées par des variables d'état dont il est essentiel de connaître la dynamique au cours du temps. Les besoins théoriques sont donc de connaître les paramètres des cultures selon des cartographies spatiales et multi-temporelles. Le pas de temps minimum est la « journée » afin de décider des dates les plus appropriées pour les interventions techniques.

Enfin, les besoins de caractérisation du milieu sont différents selon les cultures envisagées et les conditions physiques de ce milieu. Comme ils sont aussi dépendants des techniques d'intervention, on peut affirmer qu'il n'existe pas une cartographie unique et « figée » du milieu physique qui permettrait de répondre à toutes les questions. Les besoins s'expriment plutôt sous la forme d'un « continuum d'images » spatio-temporelles figurant l'évolution des variables d'état du milieu physique (fig. 1).

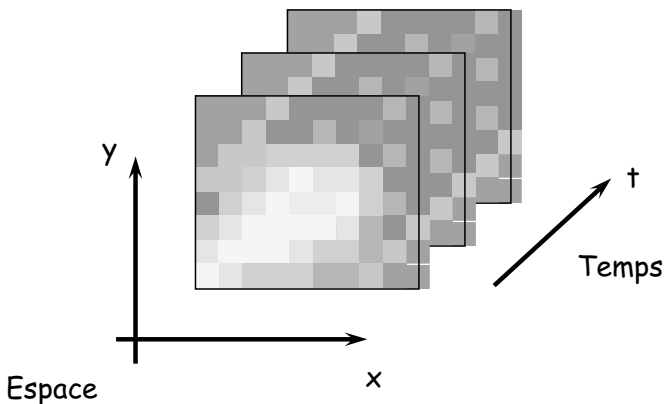


Figure 1. L'information « idéale » pour l'agriculture de précision : (i) un grain des mesures correspondant à celui des outils agricoles et (ii) une exhaustivité des mesures fournissant une information quasi-continue dans l'espace et aussi dans le temps sur l'ensemble du champ d'étude représenté par la parcelle agricole.

Quelles échelles d'approche ?

La caractérisation spatiale du milieu physique est réalisée grâce à des appareils de mesure (l'observation humaine étant considérée comme l'un de ces moyens de mesure, de nature qualitative). Le concept d'échelle rapporté à la notion de mesure peut se décomposer en trois paramètres (Blöschl & Sivapalan, 1995) : le grain, la résolution et le champ (au sens optique du terme). Le grain correspond au volume prospecté par l'appareil de mesure, la résolution est le nombre de mesures réalisées par unité de surface et le champ est l'aire que l'on souhaite caractériser.

Une intervention spatialement modulée nécessite de disposer d'une information dont le grain est dicté par les caractéristiques techniques des outils agricoles. Il faut également prendre en compte le « grain » du fonctionnement de la culture qui dépend, par exemple, du volume occupé par le système racinaire, du travail du sol ou de la distance inter-rangs (Besson *et al.*, 2004). Or, dans la majorité des cas, les mesures réalisées dans le sol, l'atmosphère ou les plantes possèdent un grain extrêmement petit comparé aux grains des outils agricoles ou du fonctionnement des plantes. Par exemple, un prélèvement de sol (1 dm³) ne représente que 1/10 000^e du grain jugé pertinent pour l'agriculture de précision (environ 10 m³). Par exemple, comment estimer la teneur en eau d'un volume de sol de 10 m³ qui prendrait en compte la variabilité de la profondeur des horizons, de leur densité apparente et du système racinaire ? Il est donc essentiel de toujours préciser le facteur d'échelle selon la taille du grain de mesure (Vogel & Cousin, 2002).

Mesures directes ou estimations indirectes ?

Pour disposer d'une information exhaustive sur un espace, deux approches sont possibles : (1) mesurer l'information de façon systématique selon la résolution souhaitée ou (2) réaliser des mesures sur des sites en nombre restreint puis interpoler à l'aide de méthodes statistiques. Toutefois, les modèles de cultures (ou d'aide à la décision) qui ont été développés ces dernières années nécessitent des paramètres et variables d'entrée souvent difficiles à mesurer (i.e. représentant un coût financier important). Des méthodes d'interpolation entre les points de mesure sont alors nécessaires. À l'inverse, les appareils de mesure fournissant des informations exhaustives aisément accessibles ne correspondent pas nécessairement aux besoins exprimés. On utilise alors des méthodes de calibrage ou bien la recherche de relations entre les variables aisément accessibles et les variables cibles souhaitées. L'établissement de fonctions ou de classes de pédotransfert (Wösten *et al.*, 2001 ; Bruand *et al.*, 2003) est un exemple de la formalisation de ces relations à partir d'analyses statistiques. Il est possible de combiner les deux approches en utilisant à la fois les données pertinentes mais rares et les données abondantes et exhaustives mais non directement utilisables (Wackernagel, 1995 ; Bourennane *et al.*, 2000). La connaissance du déterminisme de la variabilité spatiale de la parcelle replacée dans son environnement immédiat, est alors un fil conducteur pour combiner les informations et vérifier *in fine* la cohérence des résultats cartographiques.

Les besoins d'information exprimés en agriculture de précision concernent non seulement l'espace mais également le temps, c'est-à-dire la connaissance de la dynamique de variables d'état comme, par exemple, la température, les précipitations, la teneur en eau du sol, l'indice foliaire, etc. Un certain nombre de méthodes procèdent par destruction de l'échantillon mesuré. Les mesures ne peuvent pas alors être reproduites au cours du temps (par exemple, mesure de l'humidité du sol par une méthode pondérale). Tout changement de

localisation (même très proche) entre des mesures réalisées à deux moments différents, introduit des variations dues à la micro-variabilité spatiale.

Des méthodes d'acquisition non destructives sont, de ce fait, en cours de développement. On privilégie les techniques d'analyse d'un signal, par exemple électromagnétique (Collins & Doolittle, 1987 ; Tabbagh *et al.*, 2000), émis par une source naturelle ou par un appareil émetteur. Ce type de méthode présente l'avantage d'être facilement automatisable et donc de répéter de nombreuses mesures à la fois dans l'espace et le temps. Une autre méthode consiste à utiliser la modélisation des processus étudiés pour estimer en continu, à partir de mesures discrètes, l'évolution des phénomènes au cours du temps. Pour ce faire, on a recours à des variables aisément mesurables et non destructives comme paramètres de forçage de ces modèles (cf. partie 4).

De nouvelles recherches méthodologiques...

En résumé, pour répondre aux besoins de caractérisation du milieu physique aux échelles fines d'espace et de temps, plusieurs pistes de recherche méthodologique sont proposées :

- (1) automatiser les appareils de mesure et réaliser les acquisitions de façon continue ou quasi-continue à partir d'engins agricoles ou de tout autre moyen tracté ou aéroporté, voire de robots télécommandés,
- (2) utiliser ou adapter des méthodes d'interpolation permettant d'estimer les valeurs souhaitées en tout point de l'espace non prospecté à partir d'un petit nombre de mesures initiales localisées,
- (3) établir des moyens de mesure non destructifs afin d'estimer des variables d'état du milieu et de répondre aux exigences de leur répétitivité dans le temps,
- (4) développer des modèles de fonctionnement capables d'exprimer l'évolution des variables d'état de façon continue au cours du temps,
- (5) valoriser les données disponibles en recherchant les relations entre ces données et les données cibles souhaitées (fonctions et classes de pédotransfert).

Les différentes pistes proposées peuvent être utilisées de façon indépendante ou de façon combinée pour aboutir à l'information « idéale » en agriculture de précision, à savoir une série d'images exprimant le continuum espace-temps des caractéristiques ciblées (fig. 2).

Un souci constant est l'estimation des incertitudes attachées aux résultats fournis (Heuvelink & Burrough, 2002). Celles-ci ont pour origine : (i) les appareils de mesure, (ii) les méthodes d'interpolation et (iii) la qualité de la relation entre les variables faciles d'accès et les variables cibles. L'utilisation conjointe de plusieurs méthodes implique alors une analyse plus ou moins complexe de la propagation des incertitudes dans les algorithmes de combinaison de ces méthodes. Cette estimation des incertitudes est primordiale puisqu'elle intervient directement dans les modèles de décision. Dans le cas d'un traitement uniforme de la parcelle, on recherche un choix optimal « moyen » satisfaisant au mieux l'ensemble des sites de la parcelle. Tout écart par rapport à ce choix optimal est alors atténué par les variations présentes au sein de la parcelle. Par contre, dans le cas d'un traitement modulé, la décision concerne chaque m² sans possibilité de compensation ultérieure et nécessite ainsi une très grande rigueur.

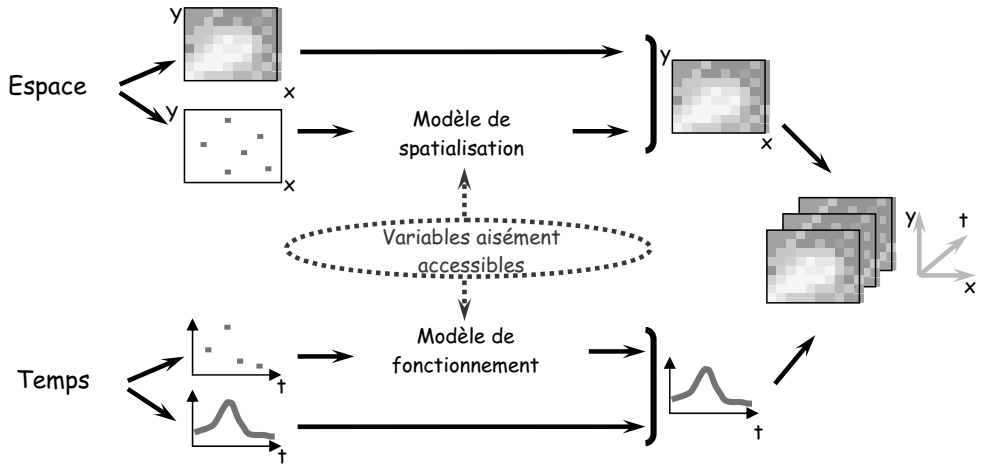


Figure 2. Différentes approches pour obtenir l'information « idéale », exhaustive dans l'espace et dans le temps. Les mesures discrètes sont généralisées (i) dans l'espace grâce des modèles de spatialisation et (ii) dans le temps grâce à des modèles de fonctionnement. Des données aisément accessibles peuvent être utilisées pour améliorer les estimations. Enfin, les données spatiales et temporelles sont combinées pour aboutir à une matrice de données utilisables par les modèles de fonctionnement ou décision.

... mais aussi des recherches plus fondamentales

Le développement des nouvelles méthodes d'acquisition de mesures spatiales et temporelles conduit parfois à une surabondance d'information. Il ne sert à rien de disposer d'une grande quantité de données si l'on a ni les modèles de fonctionnement, ni les modèles de décision adaptés. En effet, beaucoup de modèles ont été élaborés dans un objectif de gestion uniforme des parcelles sans prendre en compte les inter-actions spatiales et temporelles de courte portée. En complément des recherches méthodologiques, trois axes de recherches impliquant la connaissance des processus sont proposés :

- (1) la connaissance de la variabilité du milieu physique aux échelles fines :
 la décision d'une intervention spatialement modulée sur une parcelle est prise à partir d'une information obtenue sur un grain de l'ordre de quelques m^2 . La taille de ce grain n'est pas nécessairement adaptée à la variabilité « naturelle » du milieu physique. La connaissance de structures spatiales fines (à l'origine, par exemple, de transferts préférentiels dans les sols) est nécessaire avant toute décision d'intervention. Cela pose la question du « Volume élémentaire représentatif » (Vogel & Roth, 2003) vis-à-vis du fonctionnement du milieu et des effets d'une technique culturale appliquée sur un milieu hétérogène. L'agriculture de précision offre une réelle opportunité d'approfondir une analyse des structures à une échelle relativement peu étudiée.
- (2) le développement d'une modélisation spatio-temporelle du fonctionnement du milieu physique aux échelles fines :

la cartographie ne doit plus apparaître comme une étape statique et déconnectée de la modélisation temporelle du fonctionnement des cultures. Elle doit être intégrée pour représenter la dynamique spatiotemporelle des flux d'énergie et de masse. Cela implique le développement de modèles de fonctionnement prenant en compte les structures spatiales du milieu et des plantes aux échelles indiquées précédemment.

- (3) l'élargissement du thème dit « agriculture de précision » vers celui d'une « gestion spatialisée des agro-systèmes » :

Le concept d'« agriculture de précision » est resté centré sur la variabilité intra-parcellaire. Pourtant, la connaissance des facteurs de la variabilité est souvent plus facile à mettre en évidence sur un champ d'étude plus large que celui de la parcelle agricole. Cette connaissance est essentielle pour le choix des variables à mesurer ou pour la constitution de références qui seront capitalisées au plan régional (Bouma *et al.*, 1999). De même, les modèles de décision ne peuvent réduire leur raisonnement aux seules caractéristiques locales des « grains » élémentaires qui seraient examinés de façon indépendante. Ils doivent nécessairement intégrer les interactions spatiales aux différentes échelles. L'objectif général s'inscrit ainsi dans une gestion spatialisée des agro-écosystèmes combinant les approches intra-parcellaires avec des études inter-parcellaires, voire régionales. Cet objectif renvoie à la question générique du transfert d'échelle.

Travaux menés à l'Inra

Les travaux menés dans le cadre de l'Aip Inra ont été réalisés sur un site pilote commun situé dans le Laonnois ainsi que sur des sites secondaires pour des mises au point méthodologiques. La caractérisation pédologique de ces sites a fait l'objet d'une cartographie préalable par expertise. Cela a permis, entre autres, de mettre en évidence l'opérationnalité d'une telle approche mais aussi ses limites pour les besoins en information sur les sols à l'échelle parcellaire (Nicoullaud *et al.*, cet ouvrage).

Afin de disposer de données quantitatives spatialisées, plus précises et plus nombreuses, d'autres approches ont été envisagées, d'une part, en utilisant des moyens d'automatisation et de multiplication des mesures (ex. cartographie du pH et de la teneur en carbone organique du sol ; Fouad *et al.*, cet ouvrage) et d'autre part, en estimant des variables difficiles à mesurer (ex. densité apparente, profondeur maximum d'enracinement, teneur en eau au point de flétrissement) à l'aide d'indicateurs aisément accessibles sur le terrain (ex. classes texturales). Cette dernière approche a permis d'établir des fonctions et classes de pédotransfert et elle a montré la nécessité d'acquérir des mesures sur les parcelles en complément des données disponibles à l'échelle régionale (Beaudoin *et al.*, cet ouvrage).

Les travaux se sont également orientés vers la caractérisation de la variabilité temporelle des structures spatiales. Les outils géophysiques et de télédétection ont ainsi permis de caractériser les flux hydriques préférentiels et de déterminer des limites de fonctionnement, limites très importantes pour orienter une décision de modulation spatiale (Michot *et al.*, cet ouvrage). La géophysique montre ainsi de nombreux avantages pour répondre aux besoins exprimés : mesures non destructives, exhaustivité spatiale à moindre coût avec une résolution et un grain ajustables. Différentes méthodes de statistiques spatiales ont été utilisées soit pour l'interpolation de données ponctuelles, soit pour la recherche de limites pédologiques nécessaires à la segmentation optimum de l'espace. Ces résultats sont présentés dans la partie 3.

Conclusion

Les progrès dans la caractérisation à la fois spatiale et temporelle des variables du milieu physique sont fortement dépendants de l'innovation technologique en métrologie spatiale. Ces techniques apportent des informations nouvelles directement exploitables par l'agriculture de précision et même, de façon plus large, par toute agriculture soucieuse de prendre en compte l'organisation spatiale des contraintes du milieu physique et de valoriser ses potentiels. Toutefois, cette abondance de nouvelles données spatialisées ne doit pas masquer la nécessité d'une compréhension et d'une modélisation du fonctionnement spatialisé du milieu physique et des cultures aux échelles intra-parcellaires mais aussi inter-parcellaires.

Références bibliographiques

- ARROUAYS D., HARDY R., SCHNEBELEN N., LE BAS C., EIMBERCK M., ROQUE J., GROLLEAU E., PELLETIER A., DOUX J., LEHMANN S., SABY N., KING D., JAMAGNE M., RAT D., STENGEL P., 2004. Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols de France. *Étude et Gestion des Sols* 11 (3), 187-197.
- BESSON A., COUSIN I., SAMOÛÉLIAN A., BOIZARD H., RICHARD G., 2004. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil & Tillage Research* 79, 239-249.
- BLÖSCHL G. & SIVAPALAN M., 1995. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes* 9, 251-290.
- BOISGONTIER D., 1997. L'agriculture du vingt et unième siècle : l'agriculture de précision. *CR Acad. Agri. Fr.* 83 (7), 17-26.
- BOUMA J., STOOBVOGEL J., VAN ALPHEN B.J., BOOLTINK H.W.G., 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1763-1768.
- BOURENNANE H., KING D., COUTURIER A., 2000. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geoderma* 97, 255-271.
- BRUAND A., PEREZ FERNANDEZ P., DUVAL O., 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management* 19 (2) 232-242.
- COLLINS M.E. & DOOLITTLE J.A., 1987. Using ground-penetrating radar to study soil microvariability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 491-493.
- FAVROT J.C., 1989. Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle : la méthode des secteurs de référence. *Science du Sol* 27, 351-368.
- HEUVELINK G.B.M. & BURROUGH P.A., 2002. Developments in statistical approaches to spatial uncertainty and its propagation. *Int. J. of Geographical Information Science* 16, 111-113.
- LAGACHERIE P., ROBBEZ-MASSON J.M., NGUYEN-THE N., BARTHES J.P., 2001. Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscape distance. *Geoderma* 101, 105-118.
- MC BRATNEY, 2001. Environmental economics and precision agriculture: a simple nitrogen fertilisation example. In: "Third European conference on precision agriculture" (Grenier G. & Blackmore S., eds). 539-543.
- ROBERT P.C., 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil* 247, 143-149.
- TABBAGH A., DABAS M., HESSE A. & PANISSOD C., 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horization. *Geoderma* 97 (3-4), 393-404.
- VOGEL H.J. & COUSIN I., 2002. Quantification of pore structure and gas diffusion as a function of scale. *European Journal of Soil Science* 54, 465-473.
- VOGEL H.J. & ROTH K., 2003. Moving through scales of flow and transport in soil. *Journal of Hydrology*, 272, 95-106.
- WACKERNAGEL H., 1995. *Multivariate Geostatistics*. Springer, Berlin.
- WOSTEN J.H.M., PACHEPSKY Y.A., RAWLS W.J., 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251, 123-150.

Cartographie des sols et agriculture de précision

B. NICOULLAUD, N. BEAUDOIN, J. ROQUE, A. COUTURIER, J. MAUCORPS, D. KING
Avec la collaboration technique de E. Venet, P. Devaux, J.-B. Delerue et J. Duval.

Introduction

Afin de limiter les pertes d'azote sous formes solubles ou gazeuses dans l'environnement, des améliorations des pratiques ont été demandées aux agriculteurs (UE, 1991 ; Corpen, 2001). Cependant, une gestion raisonnée de l'azote à l'échelle de la parcelle agricole montre des limites en raison de la variabilité du milieu (Power *et al.*, 2000). Dans le cadre de l'Action structurante Inra « Agriculture de Précision », deux parcelles de 10 ha environ chacune situées près de Laon (Aisne) ont été choisies pour servir de support à de nombreuses expérimentations menées par des équipes pluridisciplinaires (Guérif *et al.*, 2001). L'objectif général de ce travail expérimental est d'évaluer l'intérêt d'un ajustement intra parcellaire de la fertilisation azotée tant du point de vue de la production végétale qu'environnemental. C'est dans ce but que des suivis des cultures à l'aide d'images de télédétection réalisées par voies aériennes, des mesures de quantité d'eau et d'azote dans le sol et des cartographies de rendement ont été réalisées (Guérif *et al.*, 2001).

La mise en œuvre de l'agriculture de précision à la parcelle nécessite une connaissance des sols cohérente avec les possibilités de segmentation de l'espace offertes par le matériel agricole. Le département de l'Aisne est un département français entièrement cartographié à l'échelle du 1/25 000. Cependant ces inventaires généraux s'avèrent insuffisants pour répondre aux besoins de l'agriculture de précision (Robert, 2002). Le travail qui est présenté dans cet article montre, à l'aide d'exemples, les méthodes successives mises en œuvre pour réaliser une caractérisation à grande échelle des sols des deux parcelles. L'objectif recherché est de caractériser la variabilité spatiale des sols afin de déterminer des unités de fonctionnement considérées comme homogènes et de fournir les paramètres nécessaires à l'utilisation de différents modèles de décision. Nous présenterons les méthodologies successives utilisées pour comprendre les lois de répartition des sols dans le paysage et définir les différentes unités cartographiques de sols. Les avantages et les inconvénients des méthodes utilisées seront abordés ainsi que les méthodologies complémentaires à mettre en œuvre.

Méthodes mises en œuvre sur les parcelles du site expérimental de Laon

Phase de recueil des données existantes

Afin de mettre en œuvre une prospection par échantillonnage effectuée à l'aide de sondages à la tarière, nous avons utilisé les données initiales suivantes :

- plan des parcelles à l'échelle du 1/2 000,
- relevé topographique (Modèle numérique d'altitude) réalisé à l'aide d'un tachéomètre (fig. 1),
- mission photographique aérienne noir et blanc réalisée par l'Institut Géographique National en 1963 à l'échelle du 1/25 000,
- images réalisées avec le radiomètre Casi (Compact Airborne Spectrographic Imager) lors de missions aéroportées (fig. 2, planche couleur 1),
- carte géologique de Laon à 1/50 000,
- carte des sols de l'Aisne à l'échelle du 1/25 000.

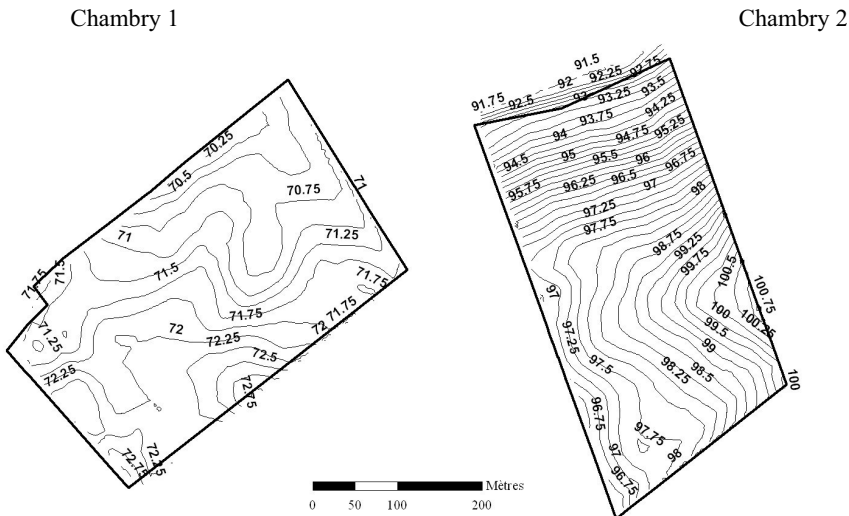


Figure 1. Relevés topographiques des 2 parcelles étudiées.

Les données décrivant la géologie du secteur ont été obtenues à l'aide de la carte géologique de Laon à 1/50 000 (Pomerol *et al.*, 1968) et les premiers éléments de connaissance des sols sont issus de la carte des sols de l'Aisne à l'échelle du 1/25 000 et des notices explicatives jointes (Chambre d'Agriculture de l'Aisne, 1963).

Phase de prospection par observations ponctuelles

Les sondages ont été réalisés manuellement à la tarière (jusqu'à 1,2 m) ou mécaniquement à l'aide d'un carottier (jusqu'à une profondeur de 1,5 m). Un premier échantillonnage a été effectué selon le réseau régulier (maille à 36 m, soit 82 sondages)