

GPS et SIG pour l'aide à la gestion d'un domaine expérimental

André Gavaland¹

Résumé. Les outils de géolocalisation et la géomatique constituent les outils de base de l'agriculture de précision. Les applications pour la gestion d'un domaine agricole qui a vocation à accueillir des expérimentations agronomiques sont nombreuses. Elles relèvent de deux acceptions de l'agriculture de précision qui se complètent 1) la précision dans l'agriculture : les GPS (global positioning system) piéton ou embarqués servent au positionnement précis de prélèvements ou de capteurs, ou encore au guidage des machines agricoles 2) l'agriculture de précision au sens propre : elle s'appuie sur la prise en compte de l'hétérogénéité intraparcellaire à travers la mesure de divers indicateurs spatialisés sur les plantes ou sur le milieu pour ajuster les préconisations culturales et moduler les apports d'intrants. La mise en œuvre des outils de guidage et de déclenchement par GPS permet de réduire les zones de recoupement et de tassement par les engins agricoles. Ils facilitent les interventions, en particulier en condition de moindre visibilité (nuit, brouillard). Ces outils permettent d'améliorer la précision des appareils et des machines et donc l'efficacité des interventions culturales. La modulation permet d'ajuster les apports d'intrants au plus près des besoins des cultures. Les économies d'énergie et d'intrants générées par l'utilisation de ces outils vont dans le sens d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement. Les outils de géolocalisation et la géomatique sont également précieux pour la gestion d'essais au champ : ils réduisent de manière significative les travaux de jalonnement et permettent d'optimiser le positionnement en prenant en compte les hétérogénéités du terrain dues à la fertilité du sol ou à des passés culturels variés. Les SIG (système d'information géographique) permettent de prendre en compte les hétérogénéités spatiales dans les analyses statistiques des résultats expérimentaux et d'améliorer la compréhension des effets des facteurs étudiés.

Mots clés : GPS, SIG, agriculture de précision, autoguidage, modulation

Introduction

Le métier de gestionnaire de Domaine expérimental présente une grande diversité de facettes qui relèvent de deux métiers, celui d'agriculteur et celui d'expérimentateur. L'agriculteur doit gérer dans le temps long un espace agricole et/ou forestier et satisfaire l'ensemble des contraintes réglementaires. L'expérimentateur doit implanter sur le domaine des dispositifs expérimentaux, les suivre et en valoriser les résultats.

La mise en œuvre des opérations culturales dans les parcelles agricoles ou dans les dispositifs expérimentaux requiert des interventions, le plus souvent mécaniques, précises. Le suivi agronomique et environnemental et l'évaluation d'un Domaine expérimental nécessitent des approches à plusieurs échelles spatiales, plante, micro-parcelle ou placette, parcelle agricole, domaine, paysage. De même, les déclarations requises par les mesures de soutien à l'agriculture (PAC) et de respect des contraintes environnementales font appel à des données spatialisées à l'échelle du domaine ou de l'espace environnant.

Les outils de géolocalisation, GPS (global positioning system), et de cartographie numérique, SIG (système d'information géographique), se révèlent très précieux pour mener à bien l'ensemble de ces activités. Ils enrichissent les données manipulées des valeurs de positionnement géographique et permettent de ce fait de réaliser des cartes thématiques et des analyses spatiales. Ces outils constituent la base de l'agriculture de précision.

Après avoir rappelé ce que couvre le concept d'agriculture de précision et résumé son historique, nous présenterons successivement les applications des GPS, puis des SIG dans la gestion d'un Domaine agricole et le pilotage d'expérimentations. Nous aborderons ensuite l'intérêt et la mise en œuvre du couplage entre GPS et SIG. Enfin, nous concluons en présentant les plus-values qu'apportent ces outils au gestionnaire de Domaine expérimental et à ses partenaires dans les Unités de Recherche.

¹ INRA, UE0802, Unité expérimentale Grandes cultures Auzeville, 24 Chemin de Borde Rouge, F-31326 Castanet-Tolosan, France ;
Andre.Gavaland@toulouse.inra.fr

L'agriculture de précision

Le concept d'agriculture de précision (AP) est né aux États-Unis dans les années 1980 en réponse à une problématique conséquente de la modernisation de l'agriculture. Le recours croissant aux intrants (engrais, produits phytosanitaires, eau) impose de mieux gérer et d'optimiser leur utilisation afin de minimiser les risques pour l'homme et pour l'environnement (Zwaenepoel et Le Bars, 1997).

L'agriculture de précision consiste dans l'appréhension des variabilités intraparcellaires. Elle conduit à la recherche d'informations sur ces dernières, principalement sous la forme d'analyses des caractéristiques physico-chimiques des sols, des composantes du rendement et de leur évolution (Zwaenepoel, 2000). Historiquement, l'homme a réagi à la variabilité spatiale des milieux en construisant un maillage de l'espace sous la forme de parcelles agricoles : une parcelle correspond à une conduite de culture spécifique (Guérif et King, 2007). L'agriculture de précision introduit cette même logique à une résolution de quelques mètres carrés. La connaissance des hétérogénéités intraparcellaires permet d'envisager une modulation des techniques culturales (travail du sol, dose de semis, fertilisation, traitements phytosanitaires) à des fins d'économie, d'amélioration du rendement ou encore de réduction des impacts sur l'environnement.

Le concept s'est largement diffusé dans les années 1990 grâce aux innovations technologiques, notamment à travers les capteurs de rendement installés sur les moissonneuses-batteuses et couplés à des systèmes de positionnement GPS. Ces outils permettaient dès lors de réaliser une cartographie spatialement précise des hétérogénéités de rendement intraparcellaires. D'une manière générale, l'agriculture de précision s'appuie fortement sur la technologie, de ce fait, elle couvre l'ensemble des applications des technologies utilisées pour la géolocalisation et par la géomatique. On peut les regrouper en deux grandes catégories, qui correspondent aux deux facettes de l'agriculture de précision :

- 1) la précision dans l'agriculture : on utilise les GPS pour géolocaliser tout point remarquable ou toute action dans la parcelle et/ou pour guider les engins agricoles, voire on enregistre sous SIG ces positions et ces trajectoires ;
- 2) l'agriculture de précision au sens propre, soit l'analyse des hétérogénéités intraparcellaires et leur prise en compte dans la conduite des itinéraires culturaux : on procède à de la modulation, c'est-à-dire qu'on fait varier ces itinéraires pour coller en tout point de la parcelle, ou dans chaque zone considérée comme homogène, au plus près des caractéristiques du milieu et des besoins de la culture : les anglo-saxons résument l'agriculture de précision à la règle des 5 R : « the Right input at the Right time, the Right place, the Right amount, the Right manner ».

Les applications des GPS dans un Domaine expérimental

Les GPS ont trois catégories d'applications : la géolocalisation, l'assistance à la conduite des machines agricoles et, lorsqu'ils sont couplés à des capteurs, la cartographie de paramètres révélateurs de la variation du milieu cultivé (végétation, rendement ou paramètres du sol). Les GPS permettent d'enregistrer la position géographique d'objets : des points, des lignes (trajectoires) des périmètres (contours de parcelles), on parle de « levé GPS ». Ils permettent aussi de retrouver ultérieurement ces mêmes objets et de pouvoir les réimplanter au même endroit. On imagine par conséquent toutes les déclinaisons possibles à l'échelle d'un Domaine expérimental (Legalle, 2009) :

- ✓ à l'échelle de la parcelle agricole :
l'enregistrement des contours parcellaires est un élément essentiel de la gestion d'un domaine agricole. Il est nécessaire pour effectuer les demandes de subventions (déclaration PAC). Il permet également de répondre aux contraintes réglementaires qui s'appliquent à l'agriculture, surfaces d'épandage d'effluents organiques, cahiers de fertilisation ou de traitements phytosanitaires, et de respecter les règles de distances par rapport aux cours d'eau (ZNT : zones non traitées, implantation des bandes enherbées protectrices du milieu) ;
- ✓ à l'échelle intraparcellaire :
la géolocalisation de points de prélèvement, de sol ou de plantes, ou encore de points remarquables, obstacles à éviter dans les parcelles, capteurs qu'il sera facile de retrouver, même s'ils ne sont pas visibles (capteurs d'humidité du sol enterrés) ;

- ✓ à l'échelle d'un dispositif expérimental :
les GPS constituent une aide à l'implantation sur le terrain des dispositifs expérimentaux. Ils permettent de positionner l'essai dans la parcelle agricole, et plus largement dans l'environnement, et d'enregistrer cette position. Ceci permet de reconstituer l'historique des essais et leur succession dans le temps sur l'ensemble d'un Domaine expérimental. On peut également enregistrer la position des capteurs en cas d'instrumentation de l'essai (capteurs dans le sol ou sur les plantes).

Les GPS embarqués sur machines agricoles ou d'expérimentation constituent une aide à la réalisation des interventions techniques

Les barres de guidage sont apparues pour assister le chauffeur dans la conduite de son engin : des diodes alignées devant le volant du tracteur s'allument en rouge (diodes en position extérieure), orange (diodes en position distale), ou vert (diodes en position médiane), suivant que le tracteur est respectivement éloigné, rapproché, ou sur une ligne de référence qui matérialise la trajectoire souhaitée pour le tracteur. Cette première version de l'aide au guidage a ensuite été améliorée avec l'apparition de l'autoguidage : le tracteur est guidé automatiquement par le GPS qui intervient sur la direction du tracteur via une molette électrique qui commande le volant ou via un asservissement sur l'hydraulique du tracteur qui commande directement la direction assistée. Certains systèmes de commande d'autoguidage sont constitués d'un volant dit « volant universel » incluant un moteur électrique que l'on monte en remplacement du volant du tracteur. Avec ces équipements, le tractoriste peut effectuer des passages parallèles (lignes droites ou courbes) à espacement réguliers (largeur de travail) ou encore adopter à partir de son point de départ un cap en enregistrant un azimut (angle avec la direction du nord géographique).

La précision du guidage dépend évidemment de la précision du signal GPS capté, allant de quelques dizaines de cm avec la correction différentielle EGNOS (gratuite) à quelques cm avec le GPS-RTK, celui-ci nécessitant un abonnement GSM aux fournisseurs de signal RTK (Orphéon®, Sat Info® ou encore Téria®) ou l'acquisition d'une station de base à installer sur la ferme qui retransmet par signal radio les positions GPS corrigées aux engins à guider.

Les coupures de tronçons par GPS sur pulvérisateurs, et plus récemment sur épandeurs d'engrais : lors du traitement ou de l'épandage, le GPS embarqué enregistre les zones traitées. Ensuite, en cas de recoupement (fourrières, pointes, écart du chauffeur involontaire ou pour éviter un obstacle) le GPS reconnaît la zone traitée et ferme le tronçon de rampe correspondant. Cet équipement permet de réduire les zones de recoupement et facilite les interventions : si le chauffeur a traité ou fertilisé en premier les fourrières, il n'a plus ensuite à se préoccuper de fermer l'appareil en bout de champ, cette fermeture est commandée automatiquement par le GPS qui reconnaît la fourrière déjà traitée ou fertilisée. Le signal GPS nécessaire pour cette application n'a pas besoin d'être très précis puisque la résolution sur le terrain correspond à la dimension du tronçon de rampe, soit quelques mètres.

Le déclenchement des semoirs à microparcelles utilisés en expérimentation peut être réalisé par GPS (Bataillon et Gavaland, 2014). Cette application nécessite une précision centimétrique (RTK) du signal GPS en cohérence avec la précision recherchée dans l'implantation des essais.

La modulation des apports d'intrants, dose d'engrais ou encore de semis, peut être réalisée avec des épandeurs (pulvérisateurs pour l'engrais liquide) ou semoirs conçus pour l'agriculture de précision, c'est-à-dire sur lesquels il est possible de charger une carte de préconisation (carte de la parcelle avec pour chaque zone considérée comme homogène la dose à appliquer). Le niveau de résolution auquel il est possible de faire de la modulation dépend de l'asservissement installé sur le matériel : la variation de dose peut être faite par tronçon de rampe, élément de semoir ou sur l'ensemble de la largeur travaillée.

A ce jour, la modulation des intrants est possible à une résolution de quelques mètres (dimension d'un tronçon ou d'une largeur de rampe). La précision du signal GPS corrigé Egnos suffit compte tenu de ce niveau de résolution.



Les GPS embarqués couplés à des capteurs permettent d'enregistrer des variables révélatrices de l'hétérogénéité du milieu

La réalisation des cartes de rendement est basée sur le couplage d'un GPS avec un capteur de rendement sur la moissonneuse-batteuse : à chaque mesure instantanée de quantité de grain arrivant dans la trémie (traduite en rendement instantané en enregistrant un poids spécifique sur la console de gestion du capteur) est associée une position (longitude, latitude, altitude). Les capteurs de rendement sont le plus souvent associés à des capteurs d'humidité du grain qui permettent de suivre en continu la variation de ce paramètre pendant la moisson. Plus récemment des capteurs NIRS² se développent pour la mesure instantanée de la teneur en azote des grains, ils sont pour l'instant très peu répandus.

Les capteurs de réflectance du couvert végétal utilisés en agriculture se diversifient. Ils peuvent être manuels (GPN) ou embarqués sur tracteur (greenseeker[®], N-sensor[®]) mais sont toujours couplés à un récepteur GPS qui enregistre la position géographique de chaque point de mesure. Ce couplage permet de reconstituer les cartes de végétation (quantité de biomasse, teneur en chlorophylle) qui sont utilisées pour établir les cartes de préconisation et moduler les intrants.

La cartographie de l'hétérogénéité du sol passe par la mesure de paramètres qui révèlent les variations d'état physique ou chimique du sol. Ces appareils de mesure utilisés en mode piéton ou embarqués sur machines derrière tracteur sont couplés à un GPS qui enregistre la position de chaque point de mesure.

La cartographie de la résistivité électrique du sol (Seger et al., 2014) est l'application la plus répandue concernant la cartographie des paramètres du sol. Elle est utilisée sur les domaines INRA pour améliorer la caractérisation des sites expérimentaux et faciliter la cartographie pédologique de ces sites (projet CAREX³).

De nouveaux capteurs pas encore vulgarisés en agriculture sont au stade recherche :

- des capteurs d'effort sur outil de travail du sol permettent de caractériser la variation de dureté du sol révélatrice de l'état de compaction ou de la texture ;
- des spectromètres proche infra-rouge embarqués sur ces mêmes outils sont également à l'étude pour une caractérisation en continu de paramètres physiques, voire chimiques (teneur en carbone, phosphore ...) du sol.

SIG : outil de l'écologie du paysage, quelles utilisations dans un domaine expérimental ?

Les systèmes d'information géographiques (SIG) permettent de coupler des données de positionnement (vecteurs : points, lignes ou polygones) à des données alphanumériques enregistrées sous forme de tables dites « attributaires », et d'analyser ces données vectorielles pour en tirer des informations statistiques (géo statistique) ou des cartes thématiques (analyses thématiques).

Ils permettent aussi de visualiser des cartes ou des images, de les géo-référencer, c'est-à-dire d'attribuer des coordonnées géographiques à tout point de ces cartes ou de ces images, et de superposer plusieurs couches d'information géographique pour tenter d'en déduire des relations.

Les SIG ont été en premier utilisés par les géographes pour cartographier des territoires, étudier leur aménagement et analyser des phénomènes naturels à l'échelle du paysage : répartition des espèces, biodiversité, etc. Leurs applications s'est étendue à de très nombreux domaines professionnels.

A l'échelle d'une exploitation agricole ou d'un Domaine expérimental, différents supports (référentiels) cartographiques sont utilisés régulièrement : plan cadastral, carte topographique, carte pédologique, photographie aérienne, etc. **Les SIG permettent d'utiliser ces cartes au format numérique et de croiser ces couches d'information.** Il faut bien entendu que celles-ci soient projetées dans le même système de coordonnées (Lambert 2 étendu, Lambert 93, ...) (Bernier et al., 2014)).

2 NIRS : Near-Infrared Spectroscopy (spectrométrie proche infra-rouge).

3 CAREX : CARactérisation environnementale des essais conduits dans les Unités Expérimentales, projet piloté par Marie-Noël Mistou (UMR Agronomie Grignon). Il émane du Réseau IGEC (Interaction Génotype X Environnement X Conduite des cultures) soutenu par les Départements BAP, EA et MIA.

De même, **les données GPS enregistrées lors des arpentages ou lors de la circulation des machines agricoles** (trajectoire des machines et données associées telles que rendement instantané sur la moissonneuse, résistivité électrique, etc.) **peuvent être projetées dans le SIG sous forme de couches** (fichiers .shp et données attributaires associées). On peut ensuite aisément visualiser ces couches, les renseigner plus en détail en complétant les tables attributaires, les analyser et éditer des cartes.

Une application très courante est l'édition de la carte d'assolement : à chaque parcelle représentée dans le SIG par un polygone on affecte une espèce cultivée. Cette démarche est utile pour préparer la déclaration PAC obligatoire et indispensable pour obtenir les subventions à la production agricole : la couche parcellaire mise à jour (en cas de changement de limite de parcelle ou de découpage des îlots) et renseignée avec l'assolement de l'année peut être extraite du SIG et importée depuis l'application télépac⁴ sur le site du ministère de l'Agriculture. On peut également sous télépac qui a les fonctionnalités d'un SIG renseigner les cultures et modifier si nécessaire les contours ou les découpages de parcelles ou d'îlots ; c'est assez simple lorsque le parcellaire est stable d'une année sur l'autre mais ça peut devenir complexe dans le cas contraire et surtout lorsqu'il s'agit de renseigner le positionnement d'expérimentations avec différentes espèces dans une même parcelle agricole. Si la position des essais a été relevée par GPS sur le terrain (par arpentage ou automatiquement par le semoir (Bataillon et Gavaland, 2014), il est ensuite facile de la projeter sur le plan cadastral et de préparer le plan détaillé de l'assolement.

Les SIG présentent des modules d'analyse spatiale qui servent à analyser les données, créer ou analyser des « rasters ». Une application courante est l'édition de cartes de rendement. Les données de rendement instantané et d'humidité du grain enregistrées en continu à la moisson par le capteur de rendement et d'humidité embarqués sur la machine de récolte sont interpolées pour estimer ces variables en tout point de la parcelle. On en tire une carte qui présente la variation des variables enregistrées en lui appliquant une « symbologie » (variantes de couleurs ou de symboles).

De nombreuses autres informations géolocalisées (indice de végétation, résistivité) évoquées en début d'article dans les applications des SIG peuvent être analysées et cartographiées suivant le même principe. Le choix de la méthode d'analyse spatiale dépend de la nature des données et de leur densité de répartition ; il requiert un minimum de compétences en géostatistique.

L'analyse de l'hétérogénéité spatiale intraparcellaire est le préalable à la mise en œuvre de l'agriculture de précision : cette hétérogénéité tirée de l'analyse des rendements des cultures précédentes ou d'un indice de végétation une année donnée (ou d'autres paramètres qui traduisent la variation intraparcellaire du potentiel de rendement) est traduite en carte de préconisation des intrants.

Généralement, les agriculteurs utilisent les cartes de préconisation fournies par des sociétés (Astrium, Géosys) qui ont développé en lien avec des organismes de recherche ou des instituts techniques des outils d'aide à la décision (Farmstar, Cérélia, principalement issus des analyses d'images satellitaires). Il est cependant possible avec un SIG de préparer ces cartes à partir des données disponibles au niveau de l'exploitation agricole : certains agriculteurs valorisent ainsi les cartes de rendement.

Le transfert des cartes de préconisation (données géoréférencées de type SIG) vers les appareils d'épandage ou de traitement sur les matériels récents permettant la modulation est réalisée de manière automatisée.

Conclusion : intérêt de la géolocalisation et de la géomatique

Les systèmes de guidage des machines agricoles par GPS constituent une aide à la conduite et au pilotage des interventions. Ils permettent de gagner en efficacité et d'améliorer les niveaux de précision. Ces outils s'avèrent particulièrement précieux lorsque les conditions de visibilité sont réduites et augmentent les plages d'intervention possible sur le terrain. Les systèmes RTK de précision centimétrique permettent d'envisager des applications difficilement réalisables autrement (binage à vitesse rapide de cultures à faible interligne telles que le blé). Leur déploiement constitue pour les agriculteurs un moyen de mieux répondre aux exigences environnementales d'une agriculture durable : l'acquisition des systèmes de guidage est éligible aux aides à l'investissement accordées par le ministère de l'Agriculture dans le cadre du plan végétal pour l'environnement (PVE⁵).

4 www.telepac.agriculture.gouv.fr

5 Le PVE concerne certains investissements pour les productions végétales qui contribuent à réduire l'impact des produits phytosanitaires et à favoriser les économies d'énergie : <http://agriculture.gouv.fr/Plan-vegetal-et-environnement>

Les GPS embarqués sur les matériels utilisés en expérimentation constituent également une aide précieuse à l'implantation, au suivi des essais et à l'analyse des résultats.

L'utilisation des GPS couplée à celle d'un SIG permettent d'appréhender l'échelle spatiale sur un domaine expérimental et contribuent à l'amélioration de la traçabilité des données et des itinéraires techniques et de la fiabilité des résultats : la spatialisation des données, agricoles ou expérimentales, et des trajectoires des machines rendent possibles de nombreuses représentations cartographiques et la confrontation entre les différentes couches d'informations géographiques disponibles dans le SIG.

Les SIG constituent des supports précieux d'aide à la décision : Ils facilitent la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale due à des variations de milieu ou d'histoire culturelle lors du positionnement d'un essai dans une parcelle agricole. Ils sont également à la base de l'analyse des données intraparcellaires, de sol ou de végétation, pour la modulation des intrants dans une démarche d'agriculture de précision.

Enfin les SIG constituent pour un responsable de site ou de Domaine expérimental un support précieux de communication avec les partenaires, scientifiques ou financeurs des essais. Ils permettent d'améliorer la lisibilité des activités sur le site et des résultats expérimentaux.

A l'avenir, les outils de géolocalisation et la géomatique vont devenir des outils incontournables à la gestion des plateformes d'expérimentation, en particulier pour préparer et programmer l'intervention de drones ou de robots d'entretien des essais ou de phénotypage et pour interpréter les données enregistrées par tous les capteurs, fixes ou mobiles, dont l'usage va se multiplier dans les Domaines expérimentaux.

Références bibliographiques

Bataillon P, Gavaland A (2014) Gestion des données d'un semoir d'expérimentation à déclenchement par GPS. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé, pp. 94-99.

Bernier S, Duthoit S, Ladet S, Baudet D (2014) Les concepts de base des systèmes d'Information géographique (SIG) : les données et les fonctions générales. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé, pp. 19-26.

Guérif M, King D (2007) *Agriculture de précision*. Editions Quae, Versailles.

Legalle M (2009) *Mise en place d'un SIG au Domaine expérimental d'Auzeville*, Centre INRA de Toulouse. Université de Toulouse le Mirail, Master 2 professionnel géomatique « Science de l'information géoréférencée pour la maîtrise de l'environnement et l'aménagement des territoires (SIGMA), mémoire soutenu le 16 septembre 2009. INRA, Domaine expérimental grandes cultures Auzeville.

Séger M, Giot G, Pasquier C, Courtemanche P, Bourennane H, Ubertosi M, Nicoullaud B, Cousin I (2014) La mesure de résistivité électrique : un outil d'aide à la cartographie des sols. L'exemple de L'Unité expérimentale d'Epoisses. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé, pp. 117-122.

Zwaenepoel P (2000) *Agriculture de précision : avancées de la recherche technologique et industrielle* : Educagri Editions.

Zwaenepoel P, Le Bars JM (1997) L'agriculture de précision. *Ingénieries-EAT*. N° 12.