



HAL
open science

GPS&SIG. Pour la conduite de dispositifs expérimentaux. Vers l'émergence de la communauté métier " Géoexpé "

André Gavaland, Laurent Burnel

► **To cite this version:**

André Gavaland, Laurent Burnel. GPS&SIG. Pour la conduite de dispositifs expérimentaux. Vers l'émergence de la communauté métier " Géoexpé ". Cahier des Techniques de l'INRA, 2014, N° Spécial: GPS&SIG. hal-04792241

HAL Id: hal-04792241

<https://hal.inrae.fr/hal-04792241v1>

Submitted on 20 Nov 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

LE CAHIER DES TECHNIQUES DE L'INRA



GPS & SIG

Pour la conduite de dispositifs expérimentaux
Vers l'émergence de la communauté métier
« GéoExpé »



GPS & SIG

Pour la conduite de dispositifs expérimentaux
Vers l'émergence de la communauté métier
« GéoExpé »

Numéro spécial 2014

Responsable thématique : André Gavaland
Coordonnateurs : André Gavaland et Laurent Burnel

CAHIER DES TECHNIQUES DE L'INRA / SPÉCIAL GéoExpé



Directeur de la publication : Gérard Jacquin ; Rédacteur en chef : Michel Bariteau ;
Responsable thématique : André Gavaland ;
Coordonnateurs : André Gavaland, Laurent Burnel ;
Rédacteurs associés : Denis Baudet, Vladimir Goutiers, Priscilla Note
Secrétaire de rédaction : Dominique Montagu-Ledoux
Maquette : MBA, 6 place Sainte Croix, 86000 F-Poitiers
Mise en page et impression : Bialec, 95 bld d'Austrasie, 54001 F-Nancy cedex
© Inra, 2014 - ISSN 0762 7339 - https://www6.inra.fr/cahier_des_techniques

En couverture : © F. Decuq ; A. Pédemay ; J. Deere ; A. Gavaland.



Avant-propos

L'ambition de l'INRA est de contribuer au développement d'une agriculture à la fois compétitive, respectueuse de l'environnement, des territoires et des ressources naturelles. L'agro-écologie, à la croisée de l'agronomie et de l'écologie, est aujourd'hui une orientation scientifique privilégiée pour développer une vision systémique des agro-écosystèmes en s'intéressant à la complexité des interactions entre le vivant et l'environnement. Plus largement, l'agro-écologie peut être considérée comme un cadre d'action et d'innovation qui s'appuie sur des concepts et des démarches facilitant la transition vers des systèmes agricoles et alimentaires plus durables. Dans ce domaine, les activités de recherche accordent désormais une place majeure aux sciences et techniques de l'observation et de l'information. L'intégration des échelles de temps (profondeur historique), d'espace et d'organisation (de la parcelle au bassin versant ou au territoire) est essentielle pour assurer le suivi et/ou le pilotage des systèmes végétaux (agricoles et forestiers) et animaux (domestiques ou sauvages), ou encore la gestion des ressources (biodiversité, eau, sol, cycle d'azote, etc.). Les technologies d'observation et de traitement des informations spatialisées (satellite, drone) deviennent des outils précieux pour réduire les incertitudes liées aux changements climatiques.

La grande diversité des auteurs réunis dans ce numéro spécial du Cahier des Techniques nous montre bien comment des chercheurs, des ingénieurs, des expérimentateurs, des modélisateurs et des équipementiers travaillent collectivement au renouvellement des dispositifs expérimentaux et des compétences pour relever ce défi. Ils nous invitent par des présentations très pédagogiques, fruits des réflexions conduites dans le cadre d'écoles techniques, à découvrir les connaissances et les avancées technologiques dans le domaine des outils de géolocalisation et de cartographie appliqués à l'agriculture, l'élevage, la forêt et la gestion des ressources naturelles. On y apprend que l'agriculture dite de précision, après avoir franchi les étapes de la mécanisation et de l'automatisation, intègre de plus en plus celle de la robotisation. La géomatique est désormais présente à tous les stades de l'expérimentation au champ (gestion de la semence et des intrants, phénotypage), participant ainsi au déluge de données. Les exemples traités dans ce Cahier permettent également de souligner la contribution de ces développements technologiques à une diversité de missions, de la production et la diffusion de nouvelles connaissances, à la conception d'innovation ou encore à l'éclairage des politiques publiques et des acteurs économiques.

Ce document apporte une belle illustration de la recherche en action, basée sur une mutualisation des compétences, qui propose ici de faire émerger de nouveaux métiers au travers de la communauté GéoExpé¹. Je tiens à féliciter l'ensemble des auteurs pour ce formidable travail, avec une mention spéciale pour André Gavaland qui a un rôle moteur dans cette aventure technologique. Il me revient également de remercier très chaleureusement l'équipe de formation permanente du centre INRA de Toulouse Midi-Pyrénées et la mission nationale pour avoir permis une telle richesse d'expression que je vous invite à découvrir sans attendre.

Michèle Marin
Présidente du Centre INRA Toulouse Midi-Pyrénées

¹ « GéoExpé est un dispositif d'information, de formation et d'accompagnement des Unités expérimentales de l'INRA pour l'acquisition de compétences et l'utilisation en expérimentation des outils de géolocalisation et de cartographies (GPS et SIG). »

L'apport des GPS et SIG à la conduite de dispositifs expérimentaux : vers l'émergence de la communauté métier GéoExpé

André Gavaland¹, Patrick Bertuzzi², Michel Renard³, Patrick Pastuszka⁴

Introduction générale

L'utilisation des outils de géolocalisation et de cartographie se multiplie dans le domaine de la recherche agronomique.

Ces outils présentent indéniablement un grand intérêt pour la gestion et la caractérisation des sites ainsi que pour la conduite de programmes expérimentaux de recherche. Les Départements Environnement-Agronomie et Biologie et Amélioration des plantes ont ainsi inscrit une animation sur les outils de spatialisation dans leur *schéma stratégique 2011-2015*. Cette préoccupation est partagée par plusieurs autres Départements de recherche des domaines végétal ou animal et par la Commission nationale des unités expérimentales (CNUE).

Les deux écoles techniques GPS-SIG organisées à Auzeville en mars 2012 et mars 2013 s'inscrivent dans une démarche de mutualisation et de renforcement des compétences sur ces outils. Elles ont permis de former une cinquantaine d'agents INRA, principalement des Unités expérimentales, impliqués dans la gestion de sites expérimentaux ou de sites observatoires pour la recherche.

Ces écoles participent à la préoccupation de l'INRA d'animation des Unités expérimentales et à l'émergence de réseaux métiers, tels que la communauté de pratiques CNUE GéoExpé (outils de géolocalisation et de cartographie pour l'expérimentation). Voir le portail de la CNUE : <https://cnue.pierroton.inra.fr/cnue/spip.php?rubrique21>

Contenu du numéro spécial du Cahier des Techniques de l'INRA

Ce numéro spécial a pour objectif de réunir l'essentiel des présentations et des réflexions de ces deux écoles techniques. Il est organisé en six chapitres, chacun reprenant le contenu d'une séquence de l'école technique.

Au travers des articles proposés sont traités :

- ✓ les principes généraux des outils de positionnement (GPS) et des systèmes d'information géographiques (SIG), ainsi que les fondements de l'agriculture de précision ;
- ✓ les principales utilisations de ces outils et concepts pour la gestion d'un domaine agricole ou d'un site expérimental, de même que dans des approches territoriales.

Ces articles fondamentaux sont complétés par des articles techniques qui illustrent les matériels disponibles et leurs utilisations : GPS mobiles pour l'arpentage, GPS embarqués pour le guidage ou l'autoguidage de tracteurs, ou encore pour le phénotypage.

Les méthodes de gestion et de transfert de données GPS vers les SIG et la cartographie de ces données géolocalisées sont également présentées dans plusieurs articles.

Enfin, une séquence est consacrée au témoignage des organisateurs sur la conduite des écoles techniques et au retour d'expérience des participants sur les outils abordés.


Cet investissement collectif doit permettre de renforcer le positionnement des Unités expérimentales au niveau national et international en tant que plates-formes d'expérimentation partenaires de la recherche et contribuer à

1 INRA, Unité expérimentale Grande Cultures Auzeville, F-31326 Castanet-Tolosan

2 INRA, animateur des Unités expérimentales du Département Environnement-Agronomie

3 INRA, Chef-adjoint et animateur des Unités expérimentales du Département de Biologie et Amélioration des Plantes

4 INRA, Directeur de la Commission nationale des Unités expérimentales

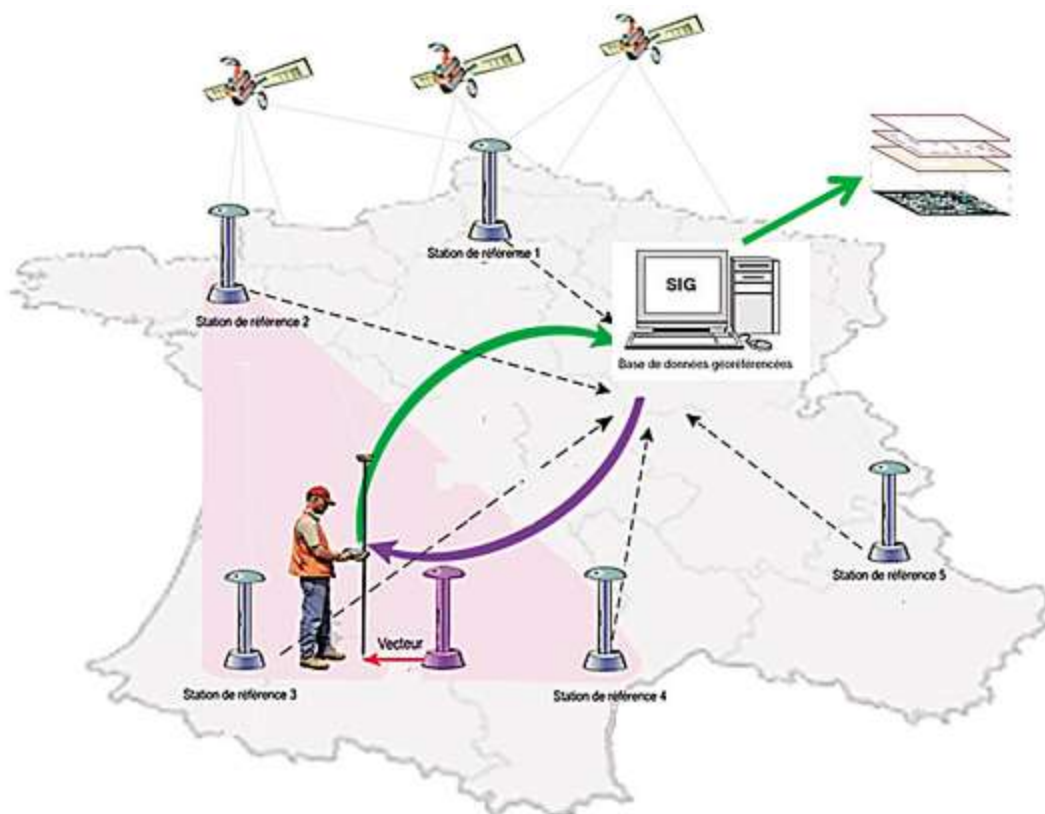


la production de données de qualité dans une logique d'Open Science. Il va de pair entre autres avec une meilleure caractérisation pédo-climatique des Domaines expérimentaux, le développement des technologies de phénotypage robotisé, la structuration de réseaux d'expérimentation, l'intégration d'interventions spatialement modulées dans la conduite de systèmes de culture innovants et ainsi une consolidation de l'offre diversifiée de nos sites d'expérimentation en réponse aux questions de recherche des partenaires internes et externes de la recherche.

En terme de management interne, l'émergence et l'animation de telles communautés de pratiques doivent être promues ; elles favorisent les échanges et la mutualisation des connaissances entre les opérateurs et constituent une brique essentielle pour le développement et l'évolution des compétences au sein du dispositif expérimental de l'INRA.



/ Chapitre 1 / GPS et SIG Concepts de base



Source : <http://www.sat-info.fr>

Les principes du positionnement par satellite : GNSS

Renaud Lahaye¹, Sylvie Ladet²

Résumé. Les GNSS (global navigation satellite system) parmi lesquels le système américain GPS (global positioning system) ont tous pour principal objectif de donner la position et la vitesse d'un mobile à tout instant, en tout lieu et dans un référentiel global. Comme tout système basé sur des satellites, il est structuré en trois composantes qui seront détaillées afin de mieux appréhender les principes de la géolocalisation : le segment spatial (les satellites), le segment de contrôle (les stations au sol) et le segment utilisateur (le récepteur mobile). Le calcul du géopositionnement peut être basé sur deux mesures : (1) soit la mesure du temps qu'ont mis les signaux émis par au moins quatre satellites pour parcourir la distance les séparant du mobile, (2) soit le décalage de phase des signaux auquel cas un appareillage très sophistiqué doit lever des ambiguïtés (nombre des oscillations entre l'émission du signal par le satellite et la réception par le mobile). Théoriquement (1) doit donner une précision décimétrique et (2) millimétrique mais des sources d'erreur viennent la parasiter. Pour améliorer la qualité du géopositionnement il existe d'autres systèmes satellitaires (SBAS - satellite based augmentation system) et également des réseaux de stations au sol (GBAS - ground based augmentation system) pour transmettre des corrections de positionnement. Les algorithmes de repositionnement peuvent être utilisés en direct (correction différentielle en temps réel « DGPS ») ou en différé (post-traitement) pour atteindre une précision centimétrique à condition d'avoir le matériel approprié. Sur la base des principes de la géolocalisation il sera présenté les bonnes pratiques à adopter sur le terrain : bien choisir son matériel, préparer ses levées et bien mesurer les géopositionnements.

Mots clés : positionnement par satellite, GNSS, GPS, précision, géonavigateur

Introduction

Le sigle GNSS (global navigation satellite system) est le nom générique des systèmes de navigation satellitaires fournissant une couverture globale de géopositionnement (Duquenne et al., 2005). L'objectif de ce système est de donner la géolocalisation d'un mobile ainsi que sa vitesse en tout lieu du globe et dans un référentiel global. Les premiers créateurs d'un tel système sont les militaires américains (GPS : global positioning system) suivis de très près par les russes (GLONASS : GLObal nAvigation satellite system). Depuis 2000, le système GPS est devenu accessible aux populations civiles avec une précision métrique, ce qui a permis à la géolocalisation GPS de se démocratiser. A l'heure actuelle les services utilisant ces systèmes sont très nombreux et variés avec parmi les exemples les plus connus la géonavigation automobile et la randonnée.

Cette technologie est également largement utilisée dans les dispositifs expérimentaux à différents niveaux, nécessitant diverses échelles de précision et devant répondre à différentes contraintes :

- géolocalisation d'habitats, d'espèces patrimoniales, d'essences de fruitiers (précision métrique) ;
- définition du contour d'un dispositif expérimental (précision centimétrique) ;
- géonavigation appliquée à l'agriculture de précision... (précision centimétrique d'un objet en mouvement).

Il est possible de donner ici deux sens au mot précision : (1) le détail de la mesure qui dépend de l'objet à localiser. On peut estimer utile d'avoir une précision décimétrique lorsqu'il s'agit de décrire, mesurer, une parcelle mais cette précision devient sans doute inutile lorsqu'il s'agit de décrire le territoire de l'exploitation agricole (2) la justesse de la mesure, en terme d'exactitude du positionnement. Dans ce cas il s'agit de se raccorder à un système géodésique reconnu et décrit.

1 Institut de Développement de la Géomatique (IDGEO) ; 42, avenue du Général de Croutte, F-31100 Toulouse, France ; renaud.lahaye@idgeo.fr
2 UMR 1201 DYNAFOR, INRA ; 24 Chemin de Borde Rouge-Auzeville, CS 52627, F-31326 Castanet -Tolosan cedex ; France

Description du matériel et/ou méthodes

Les trois segments du système GPS

Le GNSS, comme tous les systèmes basés sur des satellites, se compose de trois segments : le segment spatial (les satellites à proprement parlé), le segment contrôle (les stations au sol qui contrôlent le bon état de marche des satellites) et le segment utilisateur (l'opérateur qui cherche à se géolocaliser avec son matériel). Nous allons ci-après détailler le système GPS.

✓ Segment spatial

Il est constitué d'une constellation de satellites transmettant des signaux radios aux utilisateurs. L'Air Force gère la constellation de manière à assurer la disponibilité d'au moins 24 satellites 95 % du temps. Le premier satellite a été lancé en 1975 et le système n'est pleinement opérationnel que depuis 1995. A l'heure actuelle 32 satellites constituent la constellation appelée NAVSTAR plus quelques-uns de déclassés pouvant être réactivés si nécessaire. Les satellites naviguent dans l'Orbite terrestre moyenne (MOE) à une altitude d'environ 20 200 km et effectuent chaque jour 2 fois le tour de la terre. La configuration des trajectoires des satellites permet de capter les signaux d'au moins quatre satellites n'importe où à la surface du globe et à n'importe quel moment. Les satellites sont équipés d'une horloge atomique et émettent en permanence sur deux fréquences L1 (1 575,42 MHz) et L2 (1 227,60 MHz) modulées par des codes et par un message de navigation (éphémérides permettant le calcul de la position des satellites) (**Figure 1**). Parmi les codes « portés » par la fréquence L1 (on parle également de Porteuse L1) on retrouve le code C/A (Coarse Acquisition, acquisition brute en français) entièrement ouvert aux civils depuis l'année 2000 et le code P (Précis) réservé aux utilisateurs autorisés par le gouvernement américain. Les récepteurs (ou « géonavigateurs », un GPS pour désigner le récepteur est un abus de langage) commercialisés dans le domaine civil utilisent le code C/A. Quelques récepteurs pour des applications de haute précision, comme la géodésie, mettent en œuvre des techniques permettant d'utiliser le code P (malgré son cryptage).

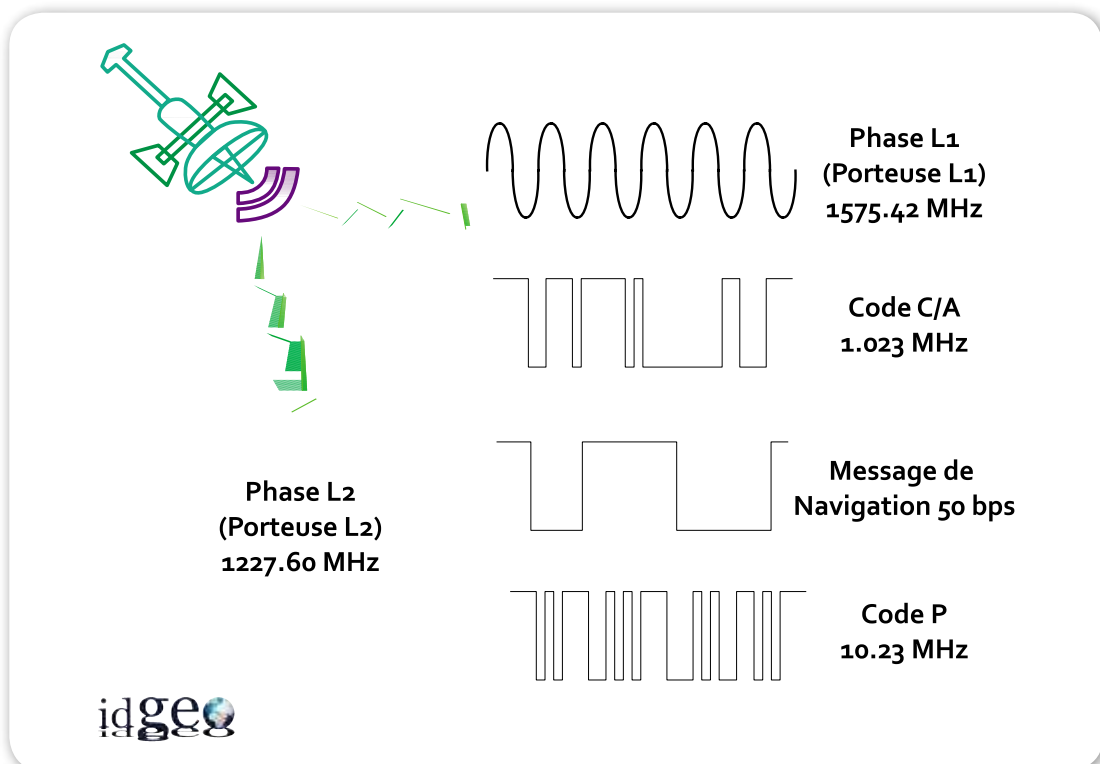


Figure 1. Structure du signal d'un satellite GPS. Deux fréquences porteuses L1 et L2 modulées sur des codes C/A, des codes P et des codes de navigation.

✓ Segment contrôle

Il s'agit d'un réseau global de stations au sol qui suivent les satellites de la constellation GPS, vérifient leurs transmissions, réalisent des analyses et leur envoient des commandes et des données (resynchronisation des horloges, rectification des orbites, ...). A l'heure actuelle le segment de contrôle comprend une station de contrôle principale, une alternative, 12 antennes de contrôle et de commande et 16 sites de suivi.

✓ Segment utilisateur

C'est l'opérateur et son matériel de réception qui « écoute » les signaux et récupère les données de chaque satellite. Le récepteur calcule la géolocalisation de son antenne. Le matériel sera plus ou moins sophistiqué selon la précision désirée et selon les contraintes du projet (mobilité de l'opérateur, fermeture du milieu, données à saisir sur le terrain...). L'utilisateur de son côté devra être sensibilisé aux bonnes pratiques du matériel et de la géolocalisation : faire attention aux masques, aux surfaces réfléchissantes, prendre en compte la géométrie des satellites...

Comment fonctionne la géolocalisation ?

La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la position d'un point à la surface du globe repose sur le principe de la triangulation. La triangulation permet par exemple de localiser un objet en connaissant la distance qui le sépare de 3 points de référence (**Figure 2**). En 3D il est nécessaire de rajouter une quatrième distance reliant l'objet à un autre point de référence pour connaître l'altitude, on parle alors de multilatération. Extrapolée à la géolocalisation d'un récepteur à la surface du globe, il est possible de définir les coordonnées X, Y et Z d'un point si l'on connaît les distances qui le séparent de quatre satellites. Les coordonnées du point d'intersection des sphères représentant les signaux émis par les différents satellites seront d'autant plus précises que le nombre de satellites captés sera important.

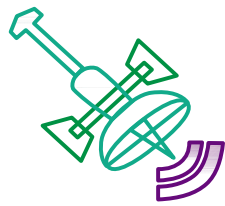


Figure 2. Principe de la triangulation pour géolocaliser un récepteur à la surface du globe. Un quatrième satellite permettra de définir l'altitude (Source : <http://www.anr-prodige.com/index.php?n=Technologies.Geolocalisation>)

✓ Calcul des pseudo-distances satellites-récepteur

Le principe du calcul des distances séparant le récepteur d'au moins quatre satellites repose sur le temps que mettent les signaux du code C/A pour parcourir la distance séparant l'opérateur des satellites (**Figure 3**). Le temps est multiplié par la vitesse de propagation du signal (vitesse de la lumière) pour obtenir la distance satellite - opérateur. Le calcul des quatre distances permettra par multilatération de définir les coordonnées X, Y et Z de l'opérateur. La précision de cette méthode peut atteindre au mieux 1 mètre si on lui associe des corrections de positionnement (correction différentielle, cf. Lahaye et Ladet, 2014b). Des méthodes utilisant la phase de la porteuse et non le code ont été développées pour de nombreuses applications nécessitant des résolutions plus importantes.





Calcul de la distance satellite – Récepteur :
= $dt * \text{vitesse de la lumière}$

Résolution du système de 4 équations à 4
inconnues : Coordonnées X et Y, Altitude, dt



Comparaison signal réceptionné du satellite et signal du récepteur



dt

Temps pour
parcourir le trajet
satellite - récepteur



idgeo

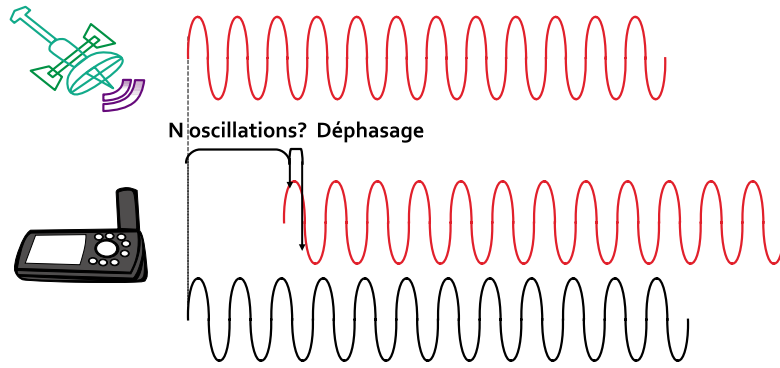
Figure 3. Géolocalisation et mesure des pseudo-distances.

✓ Utilisation des phases et levée des ambiguïtés

Le calcul de la position se base ici sur la phase de la porteuse L1 (ou L2) et non sur le code C/A comme vu précédemment. En comparant le signal émis et le signal réceptionné le récepteur peut mesurer le décalage de phase, une mesure que permet de calculer la distance séparant l'opérateur du satellite en théorie au millimètre près. La difficulté de cette méthode est liée à l'inconnue, dite « ambiguïté », du nombre d'oscillations qu'il y a eu entre l'émission et la réception du signal (**Figure 4a**). Pour lever cette ambiguïté il existe des méthodes liées à des dispositifs très longs à mettre en œuvre et qui nécessitent un matériel sophistiqué capable de gérer de lourds algorithmes. Une des méthodes couramment utilisées (**Figure 4b**) consiste à regarder les intersections des fronts d'ondes émis par les satellites avec une surface discoïdale (2D) représentant la position possible de l'opérateur, surface obtenue rapidement à partir d'une géolocalisation classique basée sur les pseudo-distances. Les intersections entre cette surface et les fronts d'ondes des signaux émis par les satellites vont représenter un maillage. Les satellites étant mobiles dans l'espace, la direction des fronts d'ondes va varier dans le temps et le maillage avec. Seule la maille où se situe l'opérateur ne varie pas, c'est là que se situe sa position précise. Devant suivre le mouvement des satellites un certain temps, l'initialisation d'un tel dispositif est très longue à mettre en œuvre. Le dispositif est également très coûteux car il fait appel à du matériel très lourd et onéreux mais il permet d'obtenir une géolocalisation millimétrique (en théorie).

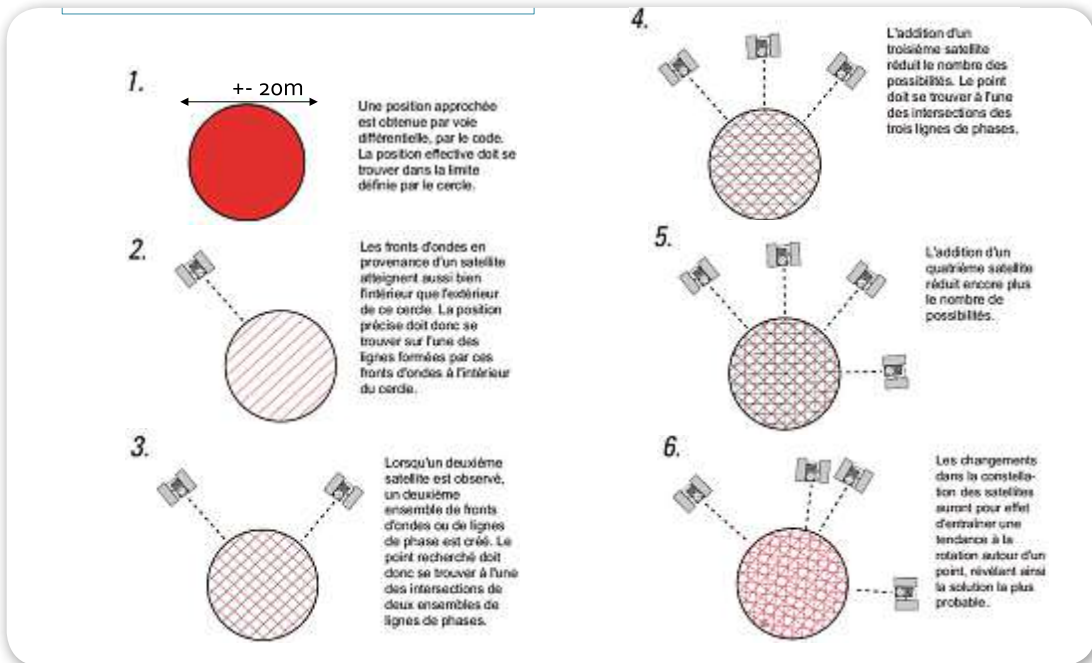
Calcul de la distance satellite – Récepteur :
 = longueur d'onde x (Déphasage + nombre d'oscillation)

Déphasage : mesure possible
 Nombre d'oscillations ? Ambiguïtés



idgeo

a)



b)

Figure 4. Géolocalisation et mesure des phases (d'après LEICA www.geoplane.com/gpsbasics.pdf)

✓ Système géodésique de référence : le WGS 84

Les coordonnées X, Y et Z sont converties par défaut par le récepteur dans un référentiel global largement utilisé sur terre, le WGS84. Les coordonnées « géographiques » ainsi converties sont mieux connues sous les termes « longitude, latitude et altitude ». La plupart des récepteurs peuvent également convertir les coordonnées vers d'autres référentiels comme le RGF93, le système géodésique officiel français. Concernant l'altitude donnée par le récepteur, il faut prendre en compte que celle-ci est calculée par rapport à l'ellipsoïde du système géodésique et non par rapport au géoïde. Certains récepteurs incluent des modèles de géoïde qui permettent de corriger l'altitude selon la position du récepteur.



Sources d'erreur

La précision de la géolocalisation d'un récepteur est en théorie métrique si on utilise les pseudo-distances (code C/A) et millimétrique si la phase est utilisée (porteuse L1 ou L2). En pratique les précisions observées sont généralement comprises entre 3 et 50 mètres et quelques centimètres, respectivement. De nombreuses erreurs peuvent venir entacher le calcul de la géolocalisation (**Figure 5**). Certaines de ces erreurs pourront être corrigées par des modèles et algorithmes et d'autres pourront être évitées par des bonnes pratiques.

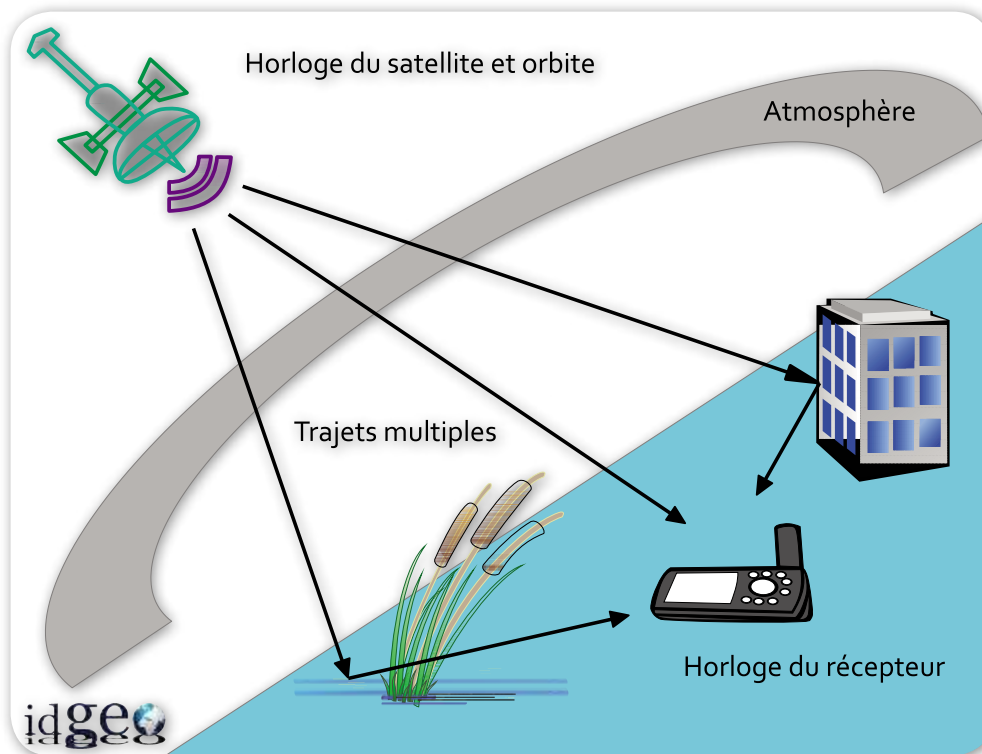


Figure 5. Principales sources d'erreur impactant la précision du calcul de la géolocalisation.

✓ Synchronisation des horloges

Bien que les horloges embarquées à bord des satellites soient extrêmement précises et que les stations de contrôle surveillent leur synchronisation, elles peuvent être sujettes à de légères dérives et entraîner des erreurs affectant la précision de la position (1 ns = 30 cm). L'horloge du récepteur a rarement la même précision que celle des satellites. Seules les différences de temps entre satellites sont donc précises. Ce problème est résolu s'il y a suffisamment d'émetteurs (quatre satellites au minimum).

✓ Troposphère et ionosphère

Les ondes ont des vitesses variables selon le milieu qu'elles traversent. Émises des satellites les ondes auront à traverser des couches de l'atmosphère plus ou moins humides, plus ou moins ionisées. La présence d'humidité et les modifications de pression de la troposphère modifient la vitesse et la direction de propagation des ondes radios. Certains récepteurs intègrent des modèles de correction.

Une autre couche traversée par les signaux : l'ionosphère. Cette couche ionisée par le rayonnement solaire va modifier la vitesse de propagation du signal. La plupart des récepteurs intègrent là aussi des modèles de correction, mais en période de forte activité solaire cette correction n'est pas assez précise. Pour corriger plus finement cet effet, certains récepteurs bi-fréquences utilisent les deux fréquences L1 et L2 qui ne sont pas affectées de la même manière pour recalculer plus précisément la position.

✓ Géométrie de la distribution des satellites dans l'espace : dilution de la précision (DOP)

Si les satellites visibles sont très proches dans l'espace, la précision sera moins bonne que s'ils sont répartis régulièrement sur une large étendue au-dessus de l'utilisateur. Les distances utilisées pour le calcul doivent en

quelques sortes être le plus hétérogènes possible afin d'échantillonner au mieux l'espace au-dessus du récepteur. Les effets de la géométrie du système peuvent être appréciés par un paramètre : le DOP (dilution of precision). La précision attendue est d'autant plus importante que le DOP est petit (**Figure 6**). Certains dispositifs permettent de filtrer des positions calculées en dessous d'un certain DOP. Ce coefficient DOP peut se décliner horizontalement (HDOP) et verticalement (VDOP).

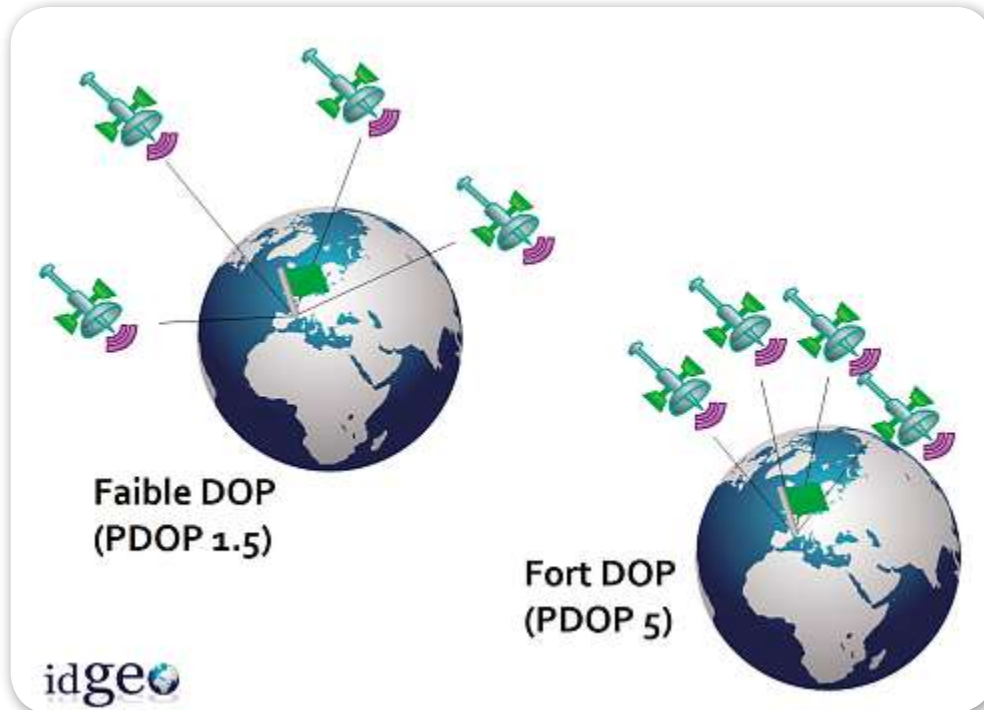


Figure 6. DOP et signification des valeurs forte et faible.

✓ Cryptage

Le GPS étant conçu par et pour les militaires américains, un certain nombre de moyens ont été mis en place pour empêcher l'utilisation du système par un hostile. Ce but est atteint par deux brouillages : la dégradation volontaire de la précision du positionnement et le cryptage du code P. L'accès sélectif ou « selective availability » (SA) est une dégradation de la précision des horloges embarquées à bord des satellites. Cette dégradation volontaire a fonctionné de manière permanente jusqu'en mai 2000. L'anti-leurrage ou « anti spoofing » (AS) est le cryptage du code P (précis) transformé en code dit « Y ». Ce cryptage rend impossible la mesure directe des pseudo-distances basée sur le code P.

✓ Réflexion et perte des signaux : trajets multiples et effets « canyons »

La topographie du milieu et sa structuration peuvent influencer sur la qualité de la géolocalisation. Le relief ou des bâtiments peuvent occulter des satellites et influencer directement sur la précision du positionnement. Ce phénomène de « canyon » se rencontre particulièrement en zone urbaine et en zone montagneuse. Les signaux de satellites peuvent également être réfléchis par des surfaces d'eau voire même des murs : c'est le problème des multi-trajets. Dans ce cas le géonavigateur ne réceptionne que des échos des signaux et la géolocalisation calculée tarde à se stabiliser.

Les systèmes d'optimisation de la précision de la géolocalisation

Il existe des systèmes dont l'objectif principal est de réduire l'imprécision de la géolocalisation induite par les sources d'erreur précédemment citées. Les erreurs ionosphériques ou troposphériques peuvent être corrigées par des stations d'observation. Ces stations, dont les coordonnées X, Y et Z sont précisément connues, vont mesurer en permanence les erreurs pour ensuite transmettre le signal de correction aux utilisateurs. La diffusion des



corrections peut se faire indirectement via des satellites, on parle alors de système SBAS (satellite based augmentation system) ou directement au récepteur par d'autres moyens de communication (téléphone, radio, internet, ...), on parle alors de LBAS (local based augmentation system).

✓ SBAS (WAAS / EGNOS)

Principe : des satellites géostationnaires délivrent en temps réel des corrections permettant d'accroître la précision ainsi que des informations permettant de garantir l'intégrité de ces corrections. Les erreurs sont observées sur un réseau de stations au sol.

Exemple : EGNOS (european geostationary navigation overlay service).

Ce système prend en compte les satellites des constellations GPS et GLONASS (et prochainement Galileo). Trois satellites géostationnaires transmettent en Europe des corrections de positionnement. L'activation de l'utilisation de ce système d'optimisation sur le géonavigateur peut permettre d'atteindre une précision comprise entre 1 et 3 mètres. Le système équivalent dont la couverture est principalement américaine se nomme le WAAS (wide area augmentation system).

✓ LBAS (DGPS, RTK)

Principe : ce système est un processus de différenciation qui supprime les sources d'erreurs de positionnement du GPS et améliore son intégrité. Les corrections sont calculées à partir d'une station de référence qui peut être paramétrée par l'opérateur ou faire partie d'un réseau (par exemple le RGP, réseau GNSS permanent). Les corrections sont appliquées au GPS mobile en temps réel ou dans un logiciel de post-traitement. On parle alors de correction différentielle ou DGPS (Lahaye et Ladet, 2014b). Si le récepteur est en mouvement et que la précision souhaitée est centimétrique en temps réel, la méthode de géolocalisation utilisera la phase plutôt que le code et des algorithmes permettant de répondre aux contraintes de la mobilité.

Les bonnes pratiques

Une fois que l'opérateur a pris connaissance des principes et des contraintes de la géolocalisation par GPS, des bonnes pratiques s'imposent.

✓ Reconnaissance terrain (identification des masques)

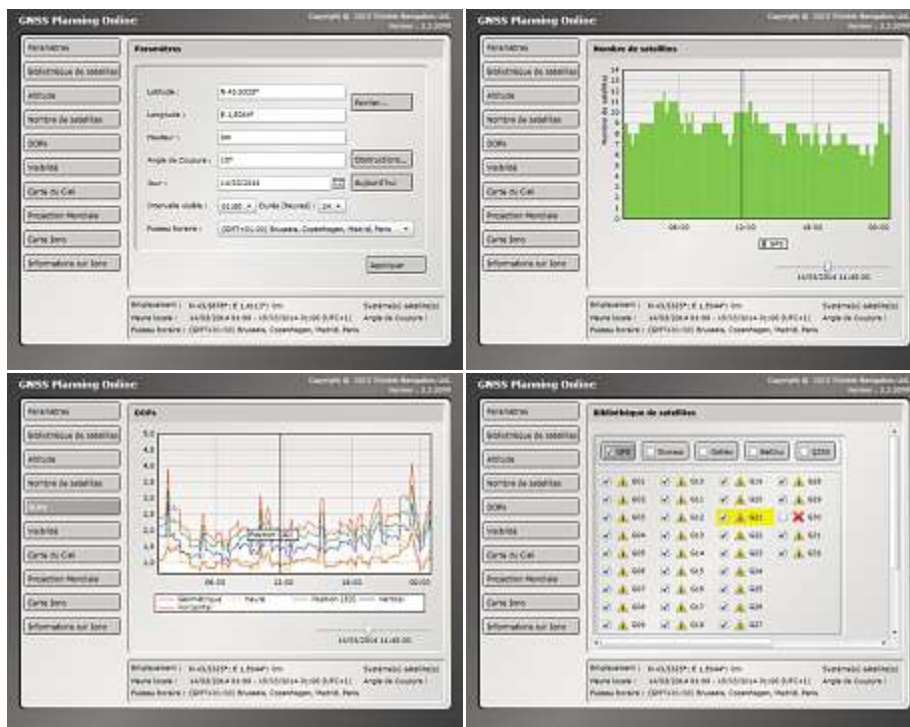
Cette première étape a pour objectif d'identifier des éléments du milieu d'expérimentation qui pourront impacter la précision de la géolocalisation. La présence de « masques » comme des bâtiments imposants, une pente importante et une exposition sur un versant par exemple Sud qui empêchera le matériel de capter les signaux des satellites venant du Nord, ces éléments devront être notés et pris en compte dans l'étape suivante. Cette reconnaissance peut s'effectuer à partir de logiciels cartographiques comme Google Earth mais il est préférable d'aller directement sur le terrain, cela permettra notamment d'avoir une idée du temps d'accès à la zone.

✓ Utilisation des éphémérides et modélisation de la journée de relevés

Les satellites ayant une périodicité de 12 h avec des trajectoires orbitales connues, il est possible de modéliser leur évolution durant les différentes heures de la journée. Ces données sont également disponibles via une éphéméride que des applications peuvent utiliser pour représenter graphiquement le nombre de satellites disponibles durant la journée, l'évolution des DOPs, pour matérialiser des obstacles (masques) et visualiser l'impact sur la visibilité des satellites (**Figure 7**).

✓ Fiches terrain / notes papier

Avant d'aller sur le terrain il est plus sûr de dédoubler sa prise de notes sur des fiches terrain ou un carnet. Si l'appareillage tombe en panne, on dispose d'une sauvegarde papier. Ces fiches pourront également stocker des informations non saisissables dans un simple géonavigateur qui lui est limité à deux types d'information, l'identifiant du point ou de la trajectoire et des commentaires (255 caractères).



http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/



Figure 7. Préparation de la sortie terrain. Selon les coordonnées du lieu de relevés, la date envisagée pour les relevés, sont matérialisées les obstructions, les choix des constellations et des satellites, la visibilité des satellites, l'évolution des DOP (et autres cartes). Source : <http://www.gnssplanningonline.com/#/Settings>

✓ Choix du matériel

Il existe une grande gamme de matériels de géolocalisation dont les prix augmenteront avec la précision et la diversité des fonctionnalités proposées. Un simple GPS géonavigateur de randonnée permettra une géolocalisation de l'ordre d'une dizaine de mètre et une saisie d'informations limitée. Un carnet de note avec un système d'exploitation couplé à un système de géolocalisation utilisant les phases, dont le prix sera jusqu'à 100 fois supérieur au précédent matériel, permettra d'atteindre une précision centimétrique et une saisie personnalisée d'informations (Lahaye et Ladet, 2014a).

Résultats et exemples d'applications

Dans cet exemple, notre but est de relever des waypoints ou points de cheminement pour des objets (coins de parcelles expérimentales de l'Unité Grande Culture de l'INRA de Toulouse) que nous voyons en même temps sur la photo aérienne et sur le terrain. Nous pensons que la précision métrique est alors suffisante pour notre objectif. Cette précision est atteinte par une multitude de modèles de GPS basiques. Nous avons opté pour un GPS Garmin 62st (Figure 8, encart A) car il satisfait quelques besoins spécifiques :

- précision GPS : < 10 mètres ;
- présence d'une antenne satellite « haute sensibilité » pour une bonne réception sous couvert ;
- espace de stockage de données (sous forme de point de cheminement (waypoint), trace (track) ou itinéraire (route)) disponible : 500 Mo ;
- portabilité et autonomie : jusqu'à 20 h pour une utilisation normale ;
- existence de BaseCamp : interface logicielle simple permettant de gérer ces données géographiques acquises sur le terrain et de les importer dans un logiciel SIG. A noter que le fichier .GPX (GPS eXchange Format) est le format standard d'échange de données « GPS », ouvert, permettant l'échange de coordonnées GPS entre BaseCamp et ArcGis ou Quantum Gis, par exemple ;



- bonnes pratiques sur le terrain : attente de l'initialisation de l'appareil (capture de tous les satellites disponibles), prises de notes, saisie des points quand les coordonnées X et Y sont stabilisées, si nécessaire (et si possible selon l'appareillage utilisé) rester immobile et faire des points moyens pour augmenter la précision. En d'autres termes quand un opérateur cherche à se géolocaliser en un point fixe, le calcul de sa position variera selon les signaux des satellites captés. En restant au même endroit et en relevant les géolocalisations à intervalles de temps réguliers, il est possible de calculer un point moyen qui s'approchera d'une géolocalisation précise au mètre près.



Figure 8. Résultat d'un relevé GPS et coordonnées correspondantes sur le Géoportail IGN. L'encart A (photo : S. Ladet) illustre la page satellite du GPS Garmin 62 ST lors de la relève avec 7 satellites captés et les coordonnées métriques renvoyés en UTM zone 31 (à savoir X=378846 et Y=4820613). La partie B illustre la lecture des coordonnées de ce coin de parcelle (croix rouge) sur le Géoportail sur un fond de carte composite construit à partir de la photo aérienne et de la carte topographique. Cet ensemble de données est en accord, à un mètre près, avec les données de notre GPS Garmin 62st.

Ces appareils basiques peuvent enregistrer les coordonnées de centaines de points, soit relevées directement sur le terrain (fonction de création de waypoints), soit téléchargées à partir d'un projet SIG décrivant un plan d'échantillonnage (fonction voir et rallier un waypoint). Dans ce dernier cas, on peut connaître, pour atteindre un point donné, le cap à suivre, la distance et le temps restant à parcourir.

Conclusions et perspectives

Les GNSS sont des systèmes complexes nécessitant d'avoir des connaissances minimales sur le vocabulaire des systèmes de navigation satellitaire et sur les bonnes pratiques à adopter sur le choix du matériel GPS, les étapes de préparation de la mission d'acquisition de relevés sur le terrain. Si votre expérimentation nécessite une précision plus importante reportez-vous à l'article de Lahaye et Ladet (2014b) pour en savoir plus sur le DGPS et le RTK. Si l'expérimentation nécessite la saisie de nombreuses informations il peut être envisagé de déployer un SIG nomade (Bernier et al., 2014 ; Lahaye et Ladet, 2014a).

Références bibliographiques

- 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.
- Duquenne F, Botton S, Peyret F, Bétaille D, Willis P (2005) Localisation et navigation par satellites. Edition Hermès Lavoisier, 2^e édition revue et augmentée, ISBN : 2-7462-1090-8, 330 p.
- Lahaye R, Ladet S (2014a) Les concepts de base des SIG nomades. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp. 28-35.
- Lahaye R, Ladet S (2014b) Les réseaux de correction différentielle. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp. 36-43.

Les concepts de base des systèmes d'information géographique (SIG) : les données et les fonctions générales

Sylvie Bernier¹, Sylvie Duthoit², Sylvie Ladet³, Denis Baudet⁴

Résumé. La géomatique regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer les informations à référence spatiale issues de sources hétérogènes. Cette discipline, déjà largement développée au sein des Unités de recherche devient de plus en plus couramment utilisée par les Unités expérimentales de l'INRA, notamment par l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG). Dans cet article, nous revenons sur les bases nécessaires pour comprendre et utiliser un SIG. Un SIG permet de visualiser et d'analyser des données géographiques de deux formats principaux : le format raster (images satellites, photographies aériennes, cartes scannées, etc.) et le format vecteur qui correspond à une simplification du monde réel en objets graphiques auxquels sont reliées des informations descriptives plus ou moins complexes. Afin que toutes ces données soient superposables pour être analysées ensemble, elles doivent appartenir à un système de coordonnées ; c'est un système de référence permettant d'exprimer la position d'un objet dans ses deux ou trois dimensions. Toutes les données géographiques peuvent être regroupées en base des données spatialisées contenant toutes les informations essentielles pour une bonne utilisation (types de données utilisées, structure des données descriptives, source, date de création, etc.). Les fonctionnalités des SIG permettant l'exploitation des données géolocalisées (données issues de GPS, d'imageries satellitaires, de photographies aériennes, de données d'expérimentation...) sont nombreuses. Les principales sont présentées à travers des exemples issus de problématiques rencontrées à l'INRA et sur le logiciels SIG Quantum Gis (QGis : logiciel libre et gratuit). L'utilisation des SIG ne serait pas optimisée sans une bonne qualité des données de référence. Nous dressons ainsi un panorama des données géographiques des grands producteurs de données français, accessibles gratuitement ou à faible coût au monde de la recherche publique depuis ces dernières années. La politique de l'Europe et de la France est de développer le partage de l'information géographique à l'aide des nouvelles technologies sur Internet, sur mobiles et lié au GPS. L'ensemble de ces éléments permet d'envisager une facilité d'accès et de partage à l'information spatialisée que l'on peut également mettre en place à l'INRA.

Mots clés : géomatique, fonctionnalités des SIG, couches, raster/vecteur, système de projection, données géographiques

Introduction

Le terme géomatique - issu de la contraction des termes « géographie » et « informatique » - regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer les informations à référence spatiale issues de sources diverses : images satellitaires, photographies aériennes ou issues de drones, données cadastrales, données topographiques, relevés effectués sur le terrain ou issus d'observations sur des sites expérimentaux...). Cette information géographique est exploitée à l'aide de l'outil informatique système d'informations géographiques (SIG) qui permet de constituer des bases de données spatialisées (Collet, 2005).

L'utilisation des SIG, déjà largement développée au sein des Unités de recherche, devient de plus en plus courante dans une très grande variété d'applications (agriculture, écologie, environnement, aménagement...) notamment grâce à l'accessibilité de plus en plus importante des données géographiques et des logiciels (facilité d'accès aux données et coût d'utilisation des logiciels) .

Dans cet article nous allons revenir sur des concepts clés pour une utilisation optimale des SIG. Les fonctionnalités des SIG permettant l'exploitation des données géolocalisées seront présentées à travers des exemples issus de problématiques rencontrées à l'INRA, et traités avec les logiciel SIG : Quantum Gis (QGis, <http://www.qgis.org/fr/site/>),

1 Institut de Développement de la Géomatique (IDGEO), 42, Avenue du Général de Crouette, F-31100 Toulouse, France ; sylvie.bernier@idgeo.fr
2 UMR 1201 DYNAFOR, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, 75 Voie du TOEC, BP57611, F-31076 Toulouse cedex 3, France
3 UMR 1201 DYNAFOR, INRA, 24 Chemin de Borde Rouge- Auzeville, CS 52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex, France
4 UMR 1248 AGIR, INRA, 24 Chemin de Borde Rouge- Auzeville, CS 52627, 31326 F-Castanet-Tolosan cedex, France

logiciel libre et open source, et le logiciel ArcGis for Desktop (<http://www.esrfrance.fr/bureautique.aspx>), logiciel commercial édité par ESRI, est également communément utilisé et des tarifs préférentiels sont accordés pour l'achat de licences dans le cadre de travaux de recherche et d'enseignement.

Nous dresserons aussi un panorama des données géographiques des grands producteurs de données français, accessibles gratuitement au monde de la recherche depuis ces dernières années. La politique de l'Europe et de la France est en effet de développer le partage de l'information géographique à l'aide des nouvelles technologies sur Internet, sur des appareils mobiles en lien avec le matériel GPS (Lahaye et Ladet, 2014 ; Lahaye et Ladet, 2014a ; Lahaye et Ladet, 2014b⁵). L'ensemble de ces éléments permet d'envisager une facilité d'accès et de partage de l'information spatialisée que l'on peut également mettre en place à l'INRA.

Les données dans un SIG : organisation et formats de l'information géographique

Organisation des données spatiales

Un SIG s'appuie sur un modèle d'informations géographiques basé sur des couches organisées de façon cohérente pour caractériser et décrire le monde. Par exemple, un SIG peut contenir des couches de données pour les éléments suivants : bâtiments, réseau hydrographique, parcelles agricoles, image satellite représentant la zone d'intérêt (**Figure 1**). L'information géographique contenue dans ces couches peut provenir de sources diverses ayant des formats différents, mais qu'un SIG peut gérer ensemble. Deux formats permettent de stocker les données spatiales : le format raster et le format vecteur.

Données au format raster

Les données raster correspondent aux images issues des satellites, des photographies aériennes, des images scannées (anciennes cartes papier) ou à des données continues représentant des phénomènes tels que la température ou l'altitude. Le mode raster permet de stocker l'information géographique dans des cellules contiguës généralement carrées. Ces cellules des images numériques sont donc l'unité élémentaire appelée pixel (contraction de *picture element*). Chaque pixel possède une valeur qui traduit une couleur (photographies ou scan), ou une énergie électromagnétique captée dans un domaine de longueur d'onde à partir d'un satellite (**Figure 1**). Par exemple les images du satellite SPOT5 peuvent proposer des images dans le domaine de longueur d'onde du proche infrarouge qui permettent de bien différencier la végétation active. Pour les données raster stockant des valeurs thématiques comme l'altitude, la température, le mode d'occupation du sol, etc., on ne parlera plus de pixel mais plutôt de cellules.

Une des propriétés des données raster qu'il est particulièrement important de connaître est la résolution spatiale c'est-à-dire la taille des pixels. Elle conditionne le niveau de détail qu'il est possible de discerner sur une image. Une image satellite à haute résolution spatiale (10 m de résolution pour SPOT5) permettra de repérer par exemple les grandes classes d'occupation du sol (cultures d'été, cultures d'hiver, forêts de feuillus, etc.) alors qu'une image à très haute résolution spatiale (autour de 1 m de résolution) permettra de distinguer finement les haies, les rangs de certaines cultures et même les arbres de façon individuelle. Les photographies aériennes proposées par l'IGN (BD ORTHO[®]) d'une résolution spatiale de 50 cm sont une composante du référentiel à grande échelle (RGE[®]) accessible gratuitement pour la recherche. Ces données sont très utilisées à l'INRA comme fond de référence pour une carte thématique ou comme support de vectorisation car il est possible de créer des données au format vecteur à partir d'images raster.

5 Par ces citations, nous faisons référence à d'autres articles de ce numéro spécial



Figure 1. Photographie aérienne issue de la BD ORTHO® 2010 de l'IGN au-dessus de l'Unité expérimentale de l'INRA d'Auzeville. Sur le zoom, les pixels qui caractérisent les images raster sont bien distinguables.

Données au format vecteur

Chaque couche au format vecteur est modélisée sous forme d'une double composante (**Figure 2**).

- ✓ **une composante graphique** : chaque thème du territoire (réseau hydrographique, réseau routier, villes, parcelles agricoles, etc.) est représenté sous forme d'une couche thématique au format vecteur. Par exemple, une couche représentant des parcelles agricoles contient un ensemble d'objets graphiques qui définissent les contours de chaque parcelle. Le type de forme qui représente en général une parcelle (et tous les objets surfaciques) est un polygone, mais il est aussi possible de représenter les objets géographiques sous forme ponctuelle (points de prélèvements, arbres, bâtiments ...) ou linéaire (réseau routier, réseau hydrographique, système d'irrigation, haie, ...). Les types de représentations graphiques (point/ligne/polygone) ne sont jamais mélangés dans une même couche.

Les objets graphiques sont ainsi enregistrés sous forme de liste de sommets avec pour chacun leurs coordonnées X,Y, dans un fichier « de forme » ou « shape » (par exemple .shp pour les couches au format QGIS ou ArcGIS).

- ✓ **une composante descriptive dite attributaire** : à chaque objet graphique d'une couche thématique sont reliées des informations descriptives stockées dans une table attributaire. Pour une couche « parcelles agricoles », ces informations peuvent être par exemple : l'identifiant (unique par parcelle), la surface, le type de culture implantée, la quantité d'intrants, la date de récolte, etc. L'ajout de champs dans la table attributaire ou leur modification se fait de façon aisée. La table attributaire peut être stockée dans un simple tableur ou liée à une base de données plus ou moins complexe stockée sous un système de gestion de base de données (SGBD) liée au SIG, comme PostgreSQL ou ACCESS. Par exemple on veut pouvoir stocker dans une base de données externe toutes les interventions (itinéraires techniques, produits utilisés, temps d'intervention, ...) ou bien les mesures et observations effectuées sur chaque parcelle de la couche de parcelles sans complexifier le modèle géographique de notre domaine expérimental.



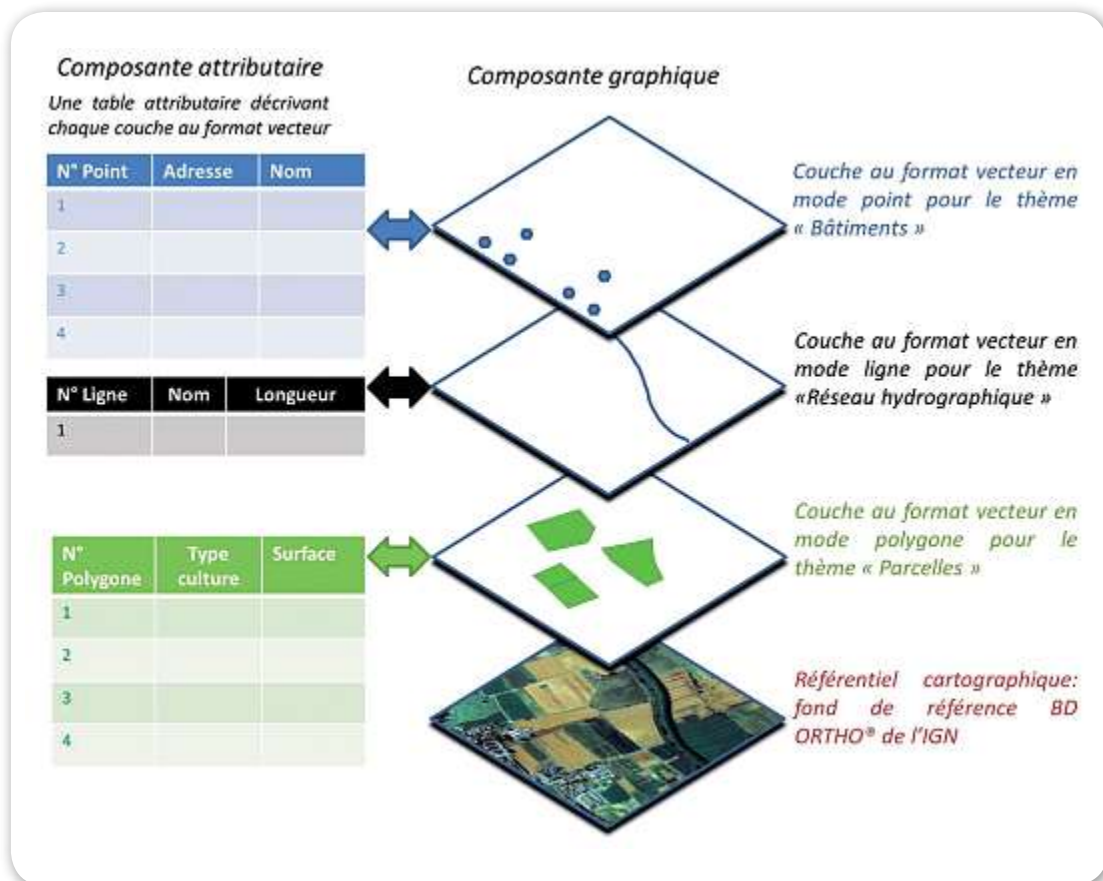


Figure 2. Organisation en couches de l'information géographique utilisée dans un système d'Information géographique. On distingue les deux principales composantes (graphique et attributaire) de l'information géographique au format vecteur.

Importance du système de coordonnées

Afin que toutes les données provenant de sources différentes puissent être superposées et exploitées dans un SIG, elles doivent appartenir à un système de coordonnées. Il existe deux types de systèmes de coordonnées utilisés dans les SIG :

- un système de coordonnées géographiques. Un point est référencé d'après ses valeurs de longitude et de latitude qui correspondent aux angles mesurés depuis le centre de la Terre vers un point de surface ; ses coordonnées sont exprimées en degrés, minutes, secondes ;
- un système de coordonnées projetées ou système de projection. Il existe diverses méthodes de projection représentant la surface sphérique de la Terre sur une surface de coordonnées cartésienne bidimensionnelle. L'EPSG (European Petroleum Survey Group) référence plus de 3 000 systèmes de projection différents variant sur leur paramétrage. Le choix du système de projection est conduit par l'usage qui sera fait de la carte mais aussi de la position de la région à cartographier sur le globe, chaque système étant adapté à une zone particulière afin d'éviter au maximum les déformations (Lahaye et al., 2014). Le système de repère cartographique officiel utilisé en France métropole est le Lambert93⁶ ; une fois appliquée, un repère cartographique XLambert93 et YLambert93 est défini et utilisé sur un plan à deux dimensions ; les coordonnées cartographiques (X, Y) d'un point sont alors exprimées en mètres et non plus en degrés comme dans le système de coordonnées géographiques.

6 Site IGN Lambert-93 : http://geodesie.ign.fr/?p=71&page=site_Lambert93

Lorsque des données de source variée sont utilisées, elles sont souvent dans des systèmes de coordonnées différents. Il faudra donc les transformer pour les rendre superposables. Les logiciels comme QGIS ou ArcGIS proposent des boîtes à outils pour ce type d'opération mais d'autres logiciels spécialisés sont également disponibles pour effectuer ces calculs lourds (citons le logiciel gratuit IGNmap : <http://ignmap.ign.fr/>).

La base de données spatialisées

La base de données (BdD) spatialisées est constituée de couches qui représentent l'information géographique sous les trois modes de représentation graphique précédemment présentés (point/ligne/polygone) et sous forme raster.

Dans une BdD spatialisée, il est primordial de suivre les deux règles suivantes :

- dans une même couche, la cohérence topologique entre les différents objets géographiques doit être respectée : par exemple, les contours de deux polygones « parcelles » adjacents ne doivent surtout pas être superposés l'un sur l'autre, leur limite doit être unique et donc partager les mêmes sommets ;
- entre deux couches, la cohérence spatiale relative entre objets géographiques doit être respectée : les systèmes d'irrigation, les lignes de semis ou de plantation d'une parcelle doivent être bien localisés à l'intérieur des parcelles. Autre exemple : les bâtiments d'exploitation sont représentés dans une couche et sont localisés dans une ou plusieurs parcelles cadastrales qui sont représentées dans une autre couche. Si la limite du bâtiment partage une partie de la limite d'une parcelle, les sommets constituant ces deux limites communes (sur ces deux couches différentes) doivent avoir les mêmes coordonnées (X, Y).

Ces deux obligations attestent d'une bonne qualité de la base de données spatiales, sachant que celle-ci peut être constituée d'une infinité de couches vecteurs sur un même territoire.

L'information géographique est décrite par son dictionnaire de données et ses métadonnées. Le dictionnaire de données fait l'inventaire des différents types de données utilisées ou la description de la structure des tables attributaires qui composent la BdD. Les métadonnées contiennent les informations sur la source, la date de création, les méthodes utilisées pour les mesures, les unités de mesure, etc. Toutes ces informations sont essentielles pour toute utilisation de cette base par quelqu'un n'ayant pas participé au travail de conception de la BdD, mais aussi pour faciliter une réutilisation ultérieure. La plupart des logiciels SIG offre des outils pour renseigner ces métadonnées.

Les principales fonctionnalités des SIG

Nous venons de voir que les SIG permettent d'intégrer des données de différents formats et provenance. Quelques-unes des autres principales fonctionnalités des SIG sont décrites ci-dessous en prenant comme exemple le cas de l'Unité expérimentale grandes cultures d'Auzeville de l'INRA de Toulouse (alias UE0802), domaine composé notamment de parcelles agricoles, de dispositifs expérimentaux, de points de prélèvement, de points d'irrigation (**Figures 3, 4, 5 et 6**). Sur les cas concrets pris en exemples, l'ensemble des objets géographiques constituant les différents thèmes sont représentés et localisés par rapport à une photographie aérienne datant de 2010.

Représentation cartographique des données attributaires et mise en page : les analyses thématiques

La **Figure 3** présente une capture d'écran du SIG QGIS dans lequel une analyse thématique sur la couche vecteur des parcelles de l'UE0802 a été effectuée. La vidéo permet de visualiser les étapes nécessaires à cette analyse thématique et à sa mise en page : au départ, toutes les parcelles sont représentées de la même couleur. En fonction du type de culture renseigné dans la table attributaire, une couleur différente est ensuite associée à chaque type de culture. La dernière étape de mise en page permet de préparer une composition cartographique comprenant



légende, titre, échelle, source. Une fois l'édition de la carte terminée on pourra l'exporter au format JPEG ou PDF par exemple.

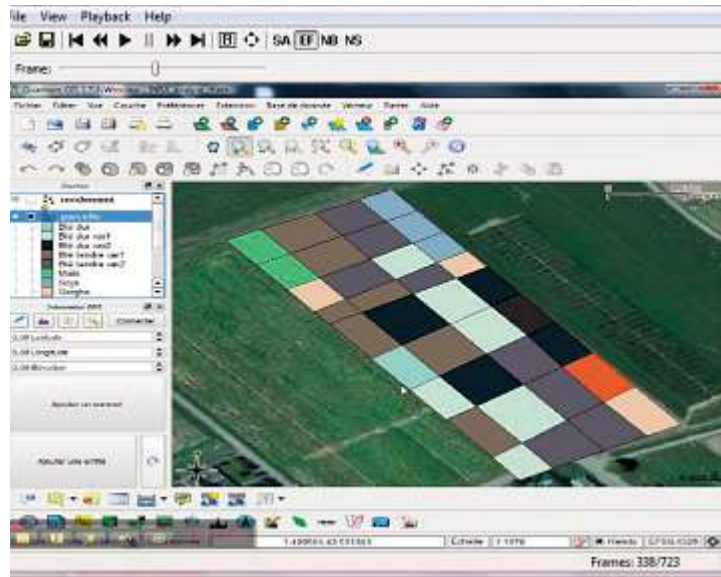


Figure 3. Capture d'écran de la vidéo (http://www.idgeo.fr/inra/demos/analyse_thematique_mise_page.swf) illustrant l'analyse thématique et la mise en page effectuées sur les parcelles de l'UE0802 dans le SIG QGis.

Requêtes attributaires : sélection des objets géographiques en fonction de critères sur les données attributaires

La Figure 4 présente un exemple de résultat de requête attributaire où les parcelles sont sélectionnées automatiquement en fonction de leur appartenance à la culture de blé tendre variété 2 et apparaissent en jaune. Une fois que les parcelles sont sélectionnées, d'autres opérations peuvent être effectuées spécifiquement sur ces parcelles. La vidéo associée montre les étapes nécessaires à cette requête attributaire.

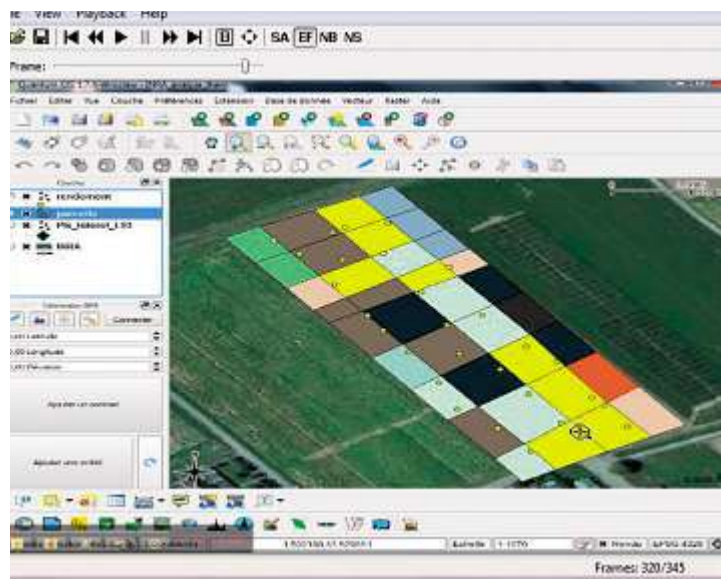


Figure 4. Capture d'écran de la vidéo (http://www.idgeo.fr/inra/demos/requete_attributaire.swf) illustrant une requête attributaire effectuée sur les parcelles de l'UE0802 dans le SIG QGis.

Requêtes spatiales : sélection des objets géographiques en fonction de leur localisation par rapport à d'autres objets graphiques (dans deux couches différentes)

La **Figure 5** présente le résultat d'une requête spatiale (étapes visibles sur la vidéo) où seules les parcelles à l'intérieur desquelles une mesure de rendement est disponible sont représentées en jaune.



Figure 5. Capture d'écran de la vidéo (http://www.idgeo.fr/inra/demos/Requete_spatiale.swf) illustrant une requête spatiale effectuée sur les parcelles de l'UE0802 dans QGIS.

Analyse spatiale : création de zone tampon, croisement entre deux couches et calcul de superficie

Nous cherchons à connaître les superficies des zones réellement irriguées au sein de parcelles de l'UE802 en fonction des points d'eau disponibles. La capture d'écran de la **Figure 6** présente le résultat de la première étape qui a permis de créer une zone d'impact circulaire (appelée zone tampon) de 20 m autour de chaque point d'eau. La vidéo associée montre les étapes suivantes qui permettent (1) de croiser ces zones tampon avec les parcelles afin de visualiser les zones réellement irriguées au sein des parcelles (en rose), et (2) de calculer les superficies de ces zones.

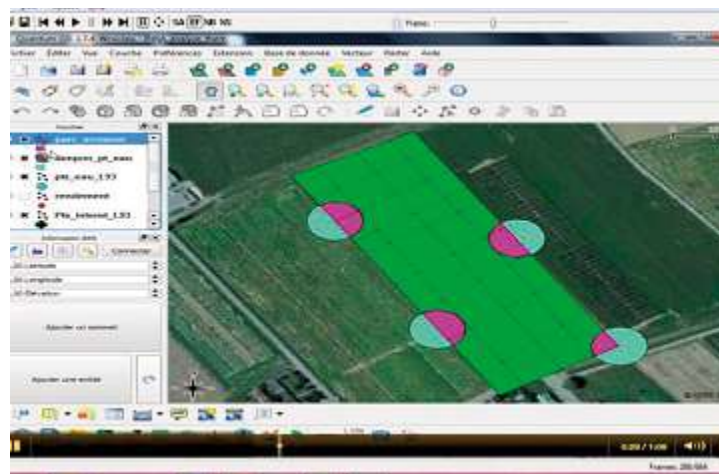


Figure 6. Capture d'écran de la vidéo (<http://www.idgeo.fr/inra/demos/Croisement.swf>) illustrant le croisement entre la couche parcelles de l'UE0802 et les zones arrosées autour des points d'eau dans QGIS.



L'ensemble des fonctionnalités des logiciels SIG décrites précédemment ne sont possibles que si l'intégration des données (données issues de GPS (Lahaye et al., 2014), images satellitaires, photographies aériennes, données de terrains géolocalisées, données descriptives, etc.) se fait de manière cohérente par une modélisation de l'information en fonction de l'objectif de l'utilisation de la base de données spatiales. Le système de repère cartographique défini doit être commun entre les différentes composantes de la base de données afin de rendre possible leur superposition.

Panel de quelques données géographiques disponibles gratuitement ou à faible coût pour la Recherche publique

Revenons sur quelques données externes souvent utilisées par les UE et UR de l'INRA :

- les données du RGE® (référentiel à grande échelle, <http://professionnels.ign.fr/rge>) fournies par l'IGN avec notamment la BD PARCELLAIRE® (information cadastrale numérique), la BD TOPO® (description des éléments du paysage), RGE®ALTI (composante altimétrique du RGE®) et la BD ORTHO® (composante orthophotographique). La BD ORTHO® à 50 cm de résolution est utilisable gratuitement pour tout usage d'enseignement initial ou de recherche publiable et celle à 5 m de résolution est maintenant utilisable gratuitement quel que soit l'usage ;
- les données du registre parcellaire graphique (RPG) administré par l'Agence de services et de paiement (ASP) fournissent des informations détaillées sur l'occupation du sol issues des déclarations politique agricole commune (PAC) (Cantelaube et Carles, 2014) ;
- certaines données satellitaires fournies par SPOTImage avec notamment le programme *ISIS* qui vise à promouvoir l'utilisation de l'imagerie spatiale SPOT auprès de la communauté scientifique en lui permettant d'acquérir ces données satellitaires à un tarif préférentiel (<http://www.isis-cnes.fr/>) ;
- les données disponibles via le projet EQUIPEX GEOSUD (<http://geosud.teledetection.fr/>) qui vise à développer une infrastructure nationale de données satellitaires accessible gratuitement par la communauté scientifique et les acteurs publics. Il permet notamment d'assurer pendant 5 années l'acquisition et la mise à disposition de couvertures satellitaires annuelles d'été, haute résolution de la France, et d'assurer la mise en réseau de la communauté scientifique et de la communauté des acteurs de la gestion autour de sa valorisation ;
- données CORINE de l'Institut français de l'environnement concernant l'occupation du sol en Europe (<http://www.ifen.fr>). La mise à jour de ces données pour 2012 sera accessible courant 2014.

Références bibliographiques

Cantelaube P, Carles M (2014) Le registre parcellaire graphique : des données géographiques pour décrire la couverture du sol agricole. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° Spécial GéoExpé. pp. 58-64.

Collet C (2005) Analyse spatiale, géomatique et systèmes d'information géographique. *Rev Int. Géomatique*, 15, n° 4, pp. 393-414.

Lahaye R, Ladet S (2014a) Les concepts de base des SIG nomades. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp 28-35.

Lahaye R, Ladet S (2014b) Les réseaux de correction différentielle. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp 36-43.

Lahaye R, Ladet S (2014) Les principes du positionnement par satellite : GNSS. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp 9-18.

Pour en savoir plus...

- Le portail francophone de la géomatique : <http://georezo.net/> C'est un portail francophone destiné à vous aider au travers de forums thématiques et techniques. Vous trouverez une foule d'informations dont des liens vers des glossaires sur le vocabulaire géomatique employé dans cet article : <http://georezo.net/annuaire/glossaires-c-72.html>.
- Liste de diffusion géomatique INRA : cette liste de diffusion par courriel, créée en 2011 à l'initiative de deux ingénieurs de l'INRA Mickael Rabotin (UMR LISAH, Montpellier) et Joël Daroussin (UR USS, Orléans), s'adresse à toute personne de l'INRA souhaitant communiquer sur tous les aspects de cette discipline : concepts, technologies, logiciels, données, etc. soit pour poser des questions, soit pour y répondre, soit pour communiquer des informations à la communauté des abonnés à la liste.

Pour s'abonner à cette liste : <https://listes.inra.fr/sympa/info/geomatique-inra>.

Pour envoyer un message à cette liste (abonnés seulement) : geomatique-inra@listes.inra.fr.

- Géoportail : vous permet de visualiser non seulement des cartes et des photographies aériennes, mais aussi de nombreuses autres données géolocalisées liées à l'environnement, à l'aménagement, au service public : <http://www.geoportail.gouv.fr/donnees>.
- Le portail d'information sur la géodésie : <http://geodesie.ign.fr/index.php>.
- Liste des références spatiales dans différents formats (EPSG, ESRI,...) : <http://spatialreference.org/>.



Les concepts de base des SIG nomades

Renaud Lahaye¹, Sylvie Ladet²

Résumé. Dans le domaine de la géomatique on assiste actuellement à une véritable révolution au niveau de la production des données avec l'apparition de nombreuses « Big Data ». Cette révolution est directement liée aux évolutions matérielles et technologiques qui permettent d'embarquer un logiciel SIG (système d'information géographique) sur un smartphone ou une tablette, de saisir une multitude d'informations géolocalisées qui seront directement stockées dans des serveurs via une connexion Internet. Théoriquement un chercheur peut maintenant voir en temps réel les données relevées sur un domaine expérimental. Du côté de l'utilisateur sur le terrain il peut visualiser plusieurs couches géographiques sur sa tablette et saisir des informations descriptives ou vectorielles avec les options de navigation sur les données d'un SIG couplées aux fonctionnalités du géonavigateur qui facilitent sa prise de relevés. Ces SIG nomades sont avant tout des SIG qui doivent répondre aux contraintes liées à la mobilité. Les concepts clés déterminant la fonctionnalité de votre SIG nomade sont principalement l'accessibilité (communication entre les appareils mobiles, à la base de données depuis le mobile ou depuis le bureau), la synchronisation (mise à jour des mêmes données par plusieurs personnes sur le terrain, sauvegardes) et l'interopérabilité (communication / exploitation entre différents SIG). Ces concepts seront illustrés à partir de deux exemples : un exemple simple où une personne fait ses propres relevés et un exemple plus complexe où plusieurs personnes travaillent sur la même donnée (un agent sur le terrain avec QGIS en mode mobile, données stockées dans PostgreSQL avec l'extension PostGIS et hébergées dans alwaysdata.com, et un utilisateur dans son bureau observant l'avancée des relevés en direct sur ArcMap).

Mots clés : géolocalisation, accessibilité, synchronisation, interopérabilité, nomadisme

Introduction

Les SIG (systèmes d'information géographique) nomades (appelés aussi SIG mobiles) appartiennent à la famille des outils de la mobilité ou du nomadisme. Ils reprennent les principaux concepts des SIG dits « bureautiques » auxquels viennent s'ajouter des concepts propres à la mobilité comme l'accessibilité. En parallèle à la suspension du brouillage du signal GPS début 2000, de nouveaux terminaux ont été commercialisés, de plus en plus performants, accompagnés de nouvelles fonctionnalités et destinés au fil des ans à un public qui s'élargit. On assiste ainsi à l'heure actuelle à une véritable démocratisation de la mobilité et de la géolocalisation : l'opérateur peut maintenant utiliser des informations géographiques sur le terrain, informations qu'il peut consulter et éditer grâce à un matériel informatique léger, puissant et performant, couplé à des dispositifs de géolocalisation et d'accès à des serveurs de données distants. Cette démocratisation s'accompagne d'une simplification de la disponibilité à la donnée pour le monde de la Recherche via la mise en place de licences enseignement-recherche (Bernier *et al.*, 2014) permettant un accès gratuit au RGE (référentiel à grande échelle) de l'IGN. Il en va de même pour tout citoyen dans la vie de tous les jours avec la libération croissante de la donnée (par exemple à Toulouse via le portail <http://data.toulouse-metropole.fr/les-donnees>). Les matériels informatiques mobiles permettant d'exploiter cette donnée sur le terrain évoluent également avec l'utilisation croissante des tablettes tactiles et des smartphones.

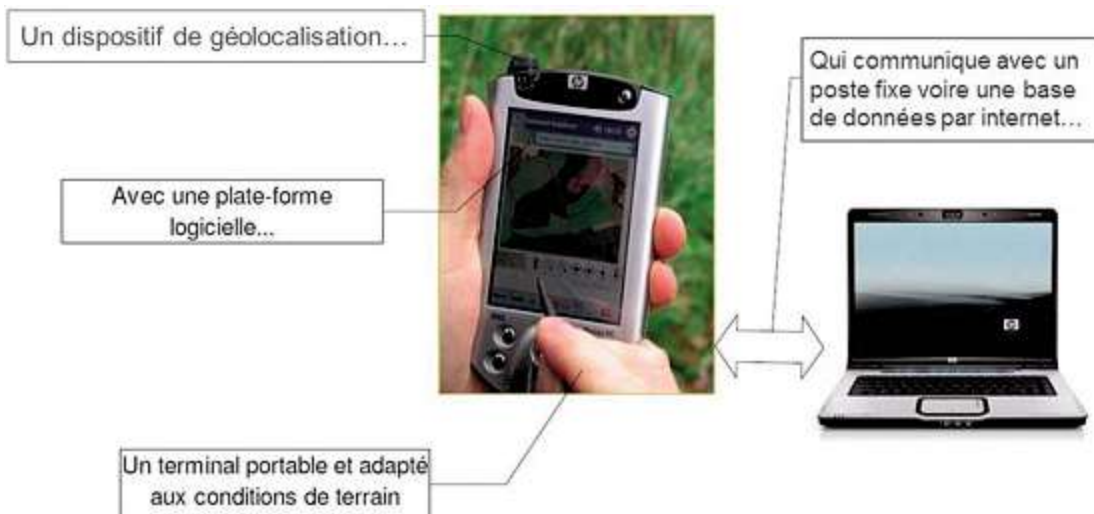
L'utilisation des SIG sur le terrain devient ainsi accessible, permettant l'élargissement des domaines d'applications : consultation de données, saisie ou mise à jour d'informations géolocalisées relevées sur le terrain grâce au couplage avec un matériel de positionnement. Il est possible de synchroniser les modifications avec des bases de données distantes (Quinquenel, 2010). A l'heure actuelle les informations spatiales sont encore couramment embarquées et éditées sur le terrain en utilisant des cartes papier du type atlas cartographiques. Les informations recueillies sur le terrain sont alors reportées par des notes manuscrites saisies dans le SIG bureautique de retour au bureau. Cette série de manipulations est fastidieuse et génératrice d'erreurs : préparation des cartes papiers et mauvais calage des données, impression et perte de l'échelle, perte des prises de note papier, hétérogénéité des informations relevées, possibilité de perte de données lors du transfert « papier » vers SIG, etc.

1 Institut de Développement de la Géomatique (IDGEO), 42 Avenue du Général de Croutte, 31100 Toulouse, France ; renaud.lahaye@idgeo.fr
2 INRA, UMR DYNAFOR 1201, 24 Chemin de Borde Rouge, Auzeville, CS 52627, F- 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France

Depuis quelques années, les professionnels de la géomatique constatent une recrudescence du besoin de mettre en place des SIG nomades pour géolocaliser rapidement, efficacement et simplement des éléments patrimoniaux (d'intérêt et suivis régulièrement) en vue de mettre en place des dispositifs de gestion de ces patrimoines. Un exemple qui *a priori* peut sembler sans importance : le géoréférencement des lampadaires d'une ville apporte de nombreuses améliorations : économiser l'énergie, gérer les dysfonctionnements, adapter le réseau électrique, identifier des zones mal éclairées, etc. Du côté de l'INRA, les géomaticiens constatent que l'offre en SIG nomade a précédé la demande, créant des besoins nouveaux et justifiant le développement et l'usage de ces SIG nomades. Les SIG mobiles peuvent effectivement permettre des prises de notes complètes et uniformes d'un agent à l'autre, prises de notes que va faciliter un applicatif informatique. Comme le souligne Quinquenel (2010), le nomadisme du SIG implique différentes contraintes à prendre en compte lors de l'analyse et la définition du besoin :

- ✓ **les limitations techniques de l'appareil utilisé** : taille de l'affichage, tactilité de l'écran, mémoire disponible, système d'exploitation, résistance aux conditions de terrain, qualité du calcul de la géolocalisation, connectique et communication ;
- ✓ **le positionnement** : qualité de la réception satellitaire, bonne pratique, possibilité de corriger la précision des données en différé ou en temps réel ;
- ✓ **la mobilité** : toute solution matérielle utilisée doit être facilement transportable, la notion d'ergonomie prenant ici tout son sens ;
- ✓ **l'interopérabilité** : données en entrée et en sortie doivent être utilisables d'une application à l'autre ;
- ✓ **la personnalisation et l'automatisation des outils et applications** permettant une meilleure appropriation de l'outil par les utilisateurs.

La **Figure 1** résume les principales fonctions recherchées dans un outil nomade pour notre utilisation.



*Figure 1. Particularités d'un outil nomade
(adapté de Giaume, 2009 cité par Prud'homme, 2011 ; photo : M. Giaume)*

Description du matériel et/ou méthodes

Un SIG nomade intègre plusieurs technologies et compétences

Utiliser ou développer un SIG mobile sur un projet spécifique requiert au minimum la maîtrise des concepts de base des SIG (Bernier *et al.*, 2014) et des principes de la géolocalisation par GPS (Lahaye et Ladet., 2014a). Des compétences complémentaires en informatique et en bases de données vous permettront de personnaliser votre SIG nomade, de paramétrer un serveur de bases de données distant et de répondre aux éventuels problèmes de connexions entre appareils (radio, téléphone, bluetooth, Internet, etc).



Les concepts clés déterminant la fonctionnalité de votre SIG mobile

Les SIG nomades sont avant tout des SIG à part entière qui doivent répondre aux contraintes liées à la mobilité. Les concepts clés déterminant la fonctionnalité de votre SIG nomade sont principalement :

- ✓ **les matériels utilisés** : tablettes, smartphones (ou ordiphones en français) ou PC durci ont des performances différentes dépendant principalement de la mémoire, de la puissance des processeurs et du système d'exploitation. L'ergonomie de votre matériel déterminera le niveau de mobilité de votre dispositif : un PC portable sera pratique et puissant pour des dispositifs embarqués dans des véhicules mais limitera les déplacements pédestres par exemple. Le système d'exploitation de votre matériel (Windows Mobile, Android, iOS, etc) limitera votre choix parmi les logiciels de SIG nomade disponibles. Le choix de votre matériel devra également répondre aux contraintes budgétaires et de terrain ;
- ✓ **l'accessibilité** : il s'agit ici de prendre en compte le besoin d'accéder à des bases de données distantes, à des flux de données Internet, de communiquer avec d'autres appareils mobiles voire d'autres appareils informatiques fixes. Selon le niveau de précision de géolocalisation souhaitée, il peut être nécessaire de communiquer avec des stations permanentes pour faire de la correction différentielle (Lahaye et Ladet, 2014b). Connexion Internet, téléphone, bluetooth, réception d'ondes radio, autant de moyens de communication que vous devrez considérer dans le choix de votre matériel et la mise en place de votre SIG nomade. Quant à l'accessibilité les questions suivantes doivent être posées :
 - quid de la connexion Internet, téléphone, radio ?
 - a-t-on besoin d'un accès à une station GPS de référence pour faire de la correction différentielle (Lahaye et Ladet, 2014b) ?
 - accès à des données distantes ? Nécessité d'une connexion Internet ?
 - contraintes de terrain : quelles couvertures réseaux (téléphone, Internet, stations GPS) ? Possibilité de rencontrer des problèmes d'interférences avec d'autres sources émettrices ? (on rencontre par exemple ce problème à l'Unité expérimentale de l'INRA de Toulouse les jours où le trafic aéronautique est important) ;
- ✓ **la synchronisation des données et le nombre d'utilisateurs** : partons du cas le plus simple : une personne travaille sur la mise à jour d'un jeu de données de type « fichier » (exemple du « shape »). Le jeu de données peut être embarqué sur le terrain et la personne responsable de l'édition de cette donnée sera à même de gérer les mises à jour. Généralement la donnée est dupliquée, une copie est embarquée sur le terrain et mise à jour, cette copie modifiée écrasera la donnée source. Si la donnée est stockée dans une base de données (géodatabases d'ESRI par exemple) il existe des outils qui permettent de gérer les répliquats des données de manière à garder un historique des modifications. D'autres outils facilitent l'accès à distance à cette donnée. Quand c'est le cas, la perte de l'accès à distance à la donnée une fois sur le terrain peut être résolue par une méthode de travail en mode « non connecté ». L'opération peut se compliquer si plusieurs personnes mettent à jour le même jeu de données simultanément. Dans ce cas le SIG mobile devra utiliser des données stockées dans un système de gestion de bases de données relationnelles multi-utilisateurs (PostgreSQL + PostGIS par exemple) accessible à distance (notions de serveurs et d'hébergement). Cette infrastructure permettra de synchroniser les modifications effectuées sur le terrain avec la donnée source. Il est important ici de définir un protocole d'échange / transfert des données entre les personnes de terrain et le responsable SIG, ces personnes étant le plus souvent différentes ;
- ✓ **l'interopérabilité** : il s'agit ici de la notion de communication entre les différents outils SIG utilisés (bureautique versus mobile). Cette communication est facilitée par l'utilisation de formats de données standards reconnus par l'OGC (Open Geospatial Consortium). Comme pour un SIG bureautique, il faut s'assurer de la compatibilité des logiciels choisis. La plupart des éditeurs de logiciels de SIG bureautiques ont également développé un logiciel mobile. ESRI qui a développé la suite ArcGIS for Desktop a également développé plusieurs applications mobiles regroupées sous l'appellation ArcGIS for Mobile. On y retrouve l'une des premières solutions de SIG mobiles « ArcPAD ». Parmi les logiciels libres, le projet QGIS comprend la solution bureautique « QGIS Desktop » et également une version mobile « QGIS Mobile » installable sur une plateforme Android ;

- ✓ **la personnalisation (outils et formulaires)** : il est important de pouvoir adapter un SIG mobile au projet dans lequel il est utilisé. Les fonctionnalités du SIG nomade dépendent directement du projet. Plus le SIG embarqué sera allégé des fonctionnalités inutiles, plus l'outil sera ergonomique avec un minimum de menus et de boutons et un maximum de place pour l'interface cartographique. La possibilité de pouvoir créer des formulaires de saisie est également une fonctionnalité importante du SIG nomade. Les formulaires de saisie, combinés à l'utilisation de listes de valeurs prédéfinies, de seuils de valeurs minimales et maximales, d'outils de sélection de dates sur des calendriers, permettront de limiter les erreurs de saisie et surtout d'homogénéiser les données ainsi créées. En ce sens l'application ArcGIS for Windows Mobile est intéressante car combinée aux fonctionnalités des géodatabases, elle permet de développer des interfaces très ergonomiques en sélectionnant les tâches présentes dans l'interface (collecter, identifier, rechercher) et en permettant la personnalisation des formulaires de saisie simplement ;
- ✓ **la précision de la géolocalisation** : si l'opérateur souhaite une précision métrique voire inframétrique lors de la géolocalisation d'éléments sur le terrain, le couplage logiciel SIG nomade + dispositif de géolocalisation GPS classique devra également intégrer une application permettant de corriger le positionnement (principe du DGPS, Lahaye et Ladet, 2014b). Les éditeurs de solutions de géolocalisation comme Trimble proposent des applications comme le PathFinder permettant de corriger la géolocalisation en temps réel. Ce point est loin d'être négligeable dans le coût global et la précision du dispositif.

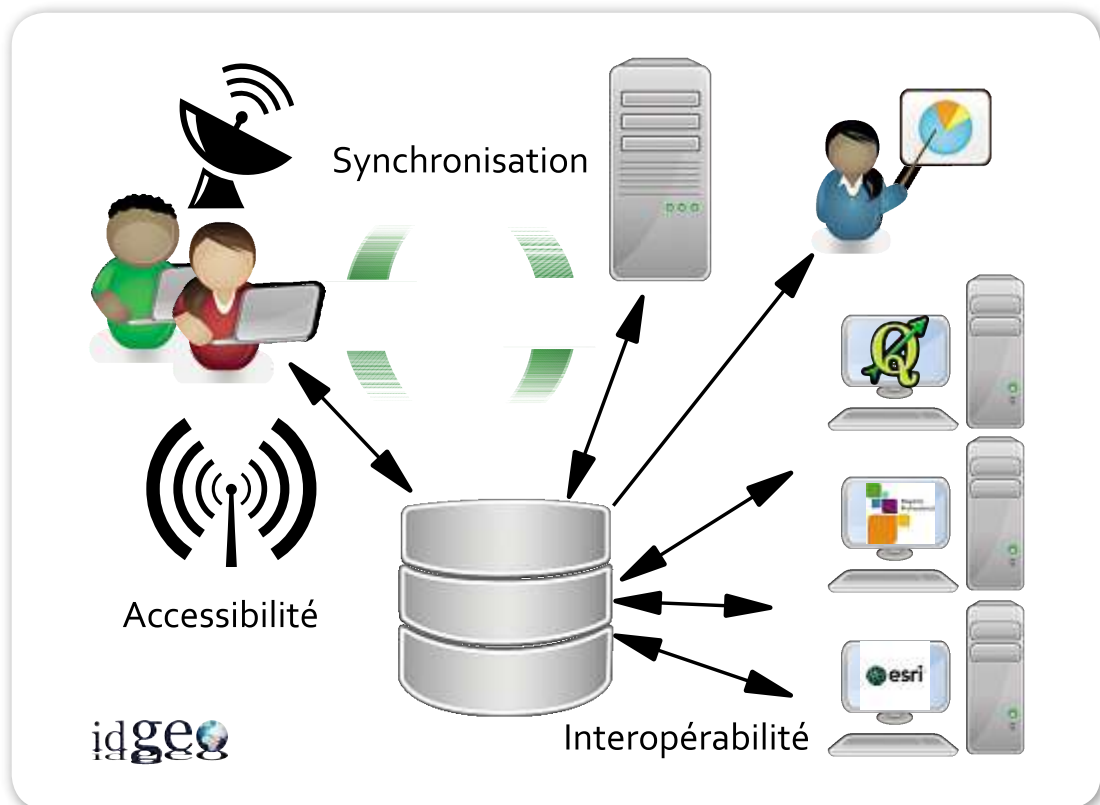


Figure 2. Concepts clés des SIG mobiles : accessibilité, interopérabilité et synchronisation.



Précautions éventuelles

Nous pouvons lister ici quelques précautions d'usage à prendre en compte quand on se lance dans le déploiement d'un SIG nomade. Le dispositif SIG mobile est constitué de modules spécifiques à des besoins techniques, ce qui le rend en principe adaptable à toute problématique. L'élément central n'est pas uniquement le logiciel mais plutôt le couple logiciel/opérateur et ses compétences. Il est effectivement nécessaire d'avoir la compétence technique d'un utilisateur averti lorsque surviennent des problèmes logiciels ou matériels, ainsi qu'une bonne connaissance de la technologie GPS et de ses aléas. Il ne faut pas hésiter à solliciter une communauté d'utilisateurs via l'inscription à un forum (par exemple ArcOrama mobilité d'ESRI). Rappelez-vous, en mode déconnecté, qu'il est possible de perdre tout son travail et ses données au retour d'une journée du terrain si l'appareil mobile chute. Une politique de sauvegarde quotidienne est impérative pour limiter ces risques. Le port USB ou les cartes SD intégrées présents généralement sur ces appareils mobiles permettent de stocker les fichiers mis à jour. Et enfin, dans le choix des briques de son système mobile, il est nécessaire de bien identifier les besoins et les contraintes : couverture réseau du terrain, nombre d'utilisateurs, précision recherchée, etc., pour élaborer une solution adaptée.

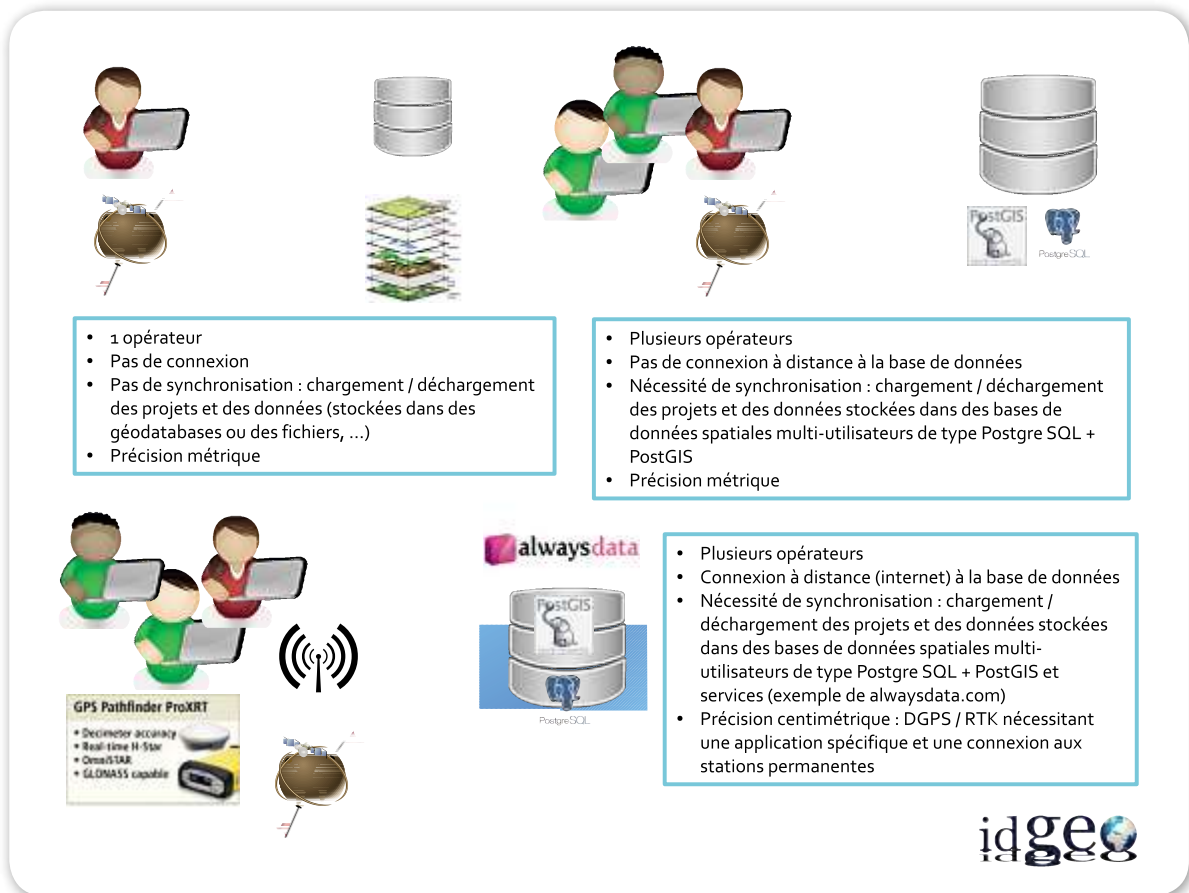


Figure 3. Schématisation des différences entre usage unique versus usage multiple.

Résultats : exemples d'applications

Exemple n°1 d'utilisation dans l'UMR DYNAFOR de Toulouse (Figure 4) :

Appli_ROS2013nomade_DYNAFOR : application nomade permettant de faciliter et de fluidifier la saisie de données de relevé des occupations des sols en été des parcelles agricoles de notre site d'étude à long terme dans les Coteaux de Gascogne.

Spécifications :

- un utilisateur débutant en SIG sur une opération de terrain, annualisée, bien documentée par une fiche qualité ;
- un PC durci avec connexion Bluetooth avec récepteur GPS, système d'exploitation Windows, équipement durci, écran amovible, stylet tactile, autonomie de 2 jours sans recharge ;
- choix de la plateforme logicielle : ArcGis for Mobile lié au SIG bureautique ArcGis for Desktop ;
- pas de connexion Internet sur le terrain pour accéder aux données ;
- pas de synchronisation : écrasement des fichiers sources.

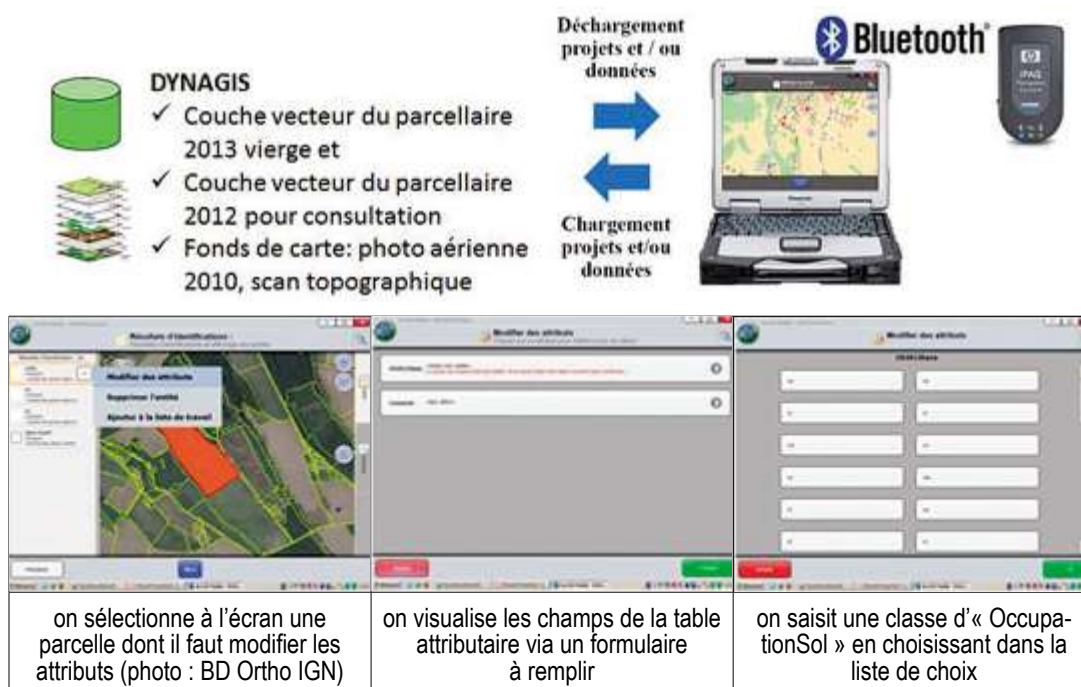


Figure 4. Illustration, en haut, la chaîne de production de l'application Appli_ROS2013nomade_DYNAFOR avec à gauche l'extrait de la base de données géographique du SIG bureautique et à droite la configuration matérielle choisie du SIG nomade. En bas, illustration par trois captures d'écran d'un exemple de collecte d'attributs sur une parcelle existante.

Retour d'expérience : cette application est simple d'utilisation, intuitive et adaptée à l'opération de recherche définie par DYNAFOR (import de la nomenclature spécifique des classes d'occupations des sols et de la symbologie associée). Elle apporte des avantages tels que la consultation de cartes ou photos aériennes, des données antérieures ou encore offre la possibilité d'enregistrer des commentaires libres. Enfin, la synchronisation entre l'appareil nomade et la base de données géographique, DYNAGIS, est simple mais fiable de retour au bureau. Néanmoins la taille et la luminosité de l'écran du matériel choisi sont insuffisantes pour une lecture aisée en temps ensoleillé et la fonction de navigation zoom n'est pas fluide. Ainsi à DYNAFOR cette technologie ne s'est pas encore substituée à la technique traditionnelle de collecte (atlas cartographique) souvent utile en complément.



Exemple n°2 : exemple théorique où l'objectif est de montrer qu'avec une infrastructure simple il est possible de visualiser en direct au bureau des mises à jour réalisées sur le terrain (Figure 5).



Figure 5. Infrastructure d'un SIG nomade permettant l'édition multi-utilisateur sur le terrain et la visualisation des modifications en direct au bureau.

Cet exemple s'appuie sur l'expérience professionnelle d'IDGEO qui a été amené à former des utilisateurs sur la mise en place d'une infrastructure SIG mobile permettant de visualiser en temps réel au bureau des mises à jour effectuées sur le terrain. Le matériel mobile est équipé de QGIS Mobile et d'un simple GPS (QGIS est capable de lire les informations de géolocalisation d'un GPS pouvant communiquer en mode NMEA). La donnée est stockée dans une base de données PostgreSQL à laquelle a été ajouté le cartouche spatiale PostGIS. Cette base est hébergée par Alwaysdata.com, l'ensemble permettant à un ou plusieurs agents de mettre à jour la même donnée en même temps (via une connexion Internet). Au bureau, en se connectant à la même base de données, il est possible de visualiser les modifications de la donnée en temps quasi réel. L'infrastructure est schématisée par la **Figure 5**. Une démonstration vidéo est disponible à l'adresse suivante : http://idgeo.fr/inra/demos/Synchronization_&_interoperability.swf

Conclusions et perspectives

La mobilité est en pleine évolution. S'il y a trois ans la démarche aurait pu faire sourire, aujourd'hui, force est de constater que la rapidité des nouveaux développements sur ce segment et le doublement des capacités et de la puissance de chaque nouvelle génération d'appareils laissent augurer de réelles perspectives professionnelles. Sur le terrain, on peut désormais accéder à l'information disponible habituellement sur un SIG bureautique (référentiels, bases de données métiers, interventions effectuées, etc.) ; il est également possible de contrôler et de la mettre à jour. Au bureau, on dispose ainsi de la réalité terrain et on peut la partager avec plus de dynamisme.

On parle alors d'outils informatiques de terrain avec une utilisation d'informations géographiques combinée à un dispositif de positionnement. C'est grâce aux partages d'expériences menées à l'INRA dans des contextes et avec des choix de chaînes de production différents que nous améliorerons nos connaissances et nos pratiques sur ces outils du nomadisme.

Références bibliographiques

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

Lahaye R, Ladet S (2014a) Les concepts de base des SIG nomades. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé pp. 28-35.

Lahaye R, Ladet S (2014b) Les réseaux de correction différentielle. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé pp. 36-43.

Prud'homme O (2011) Lancement de la démarche outils nomades au Parc national du Mercantour. Rapport SILAT, 60 p.

Quinquenel H (2010) Les SIG nomades, Edition 1.1.1 IGN France-ENSG, Support de cours 1.1.1., 45 p.



Les réseaux de correction différentielle

Renaud Lahaye¹, Sylvie Ladet²

Résumé. Cet article a pour principal objectif de répondre aux questions qui peuvent se poser au moment de la mise en place d'un dispositif de correction différentielle : pourquoi les réseaux de correction différentielle ? Quels sont-ils et où sont-ils ? Quel réseau couvre mon domaine expérimental ? Comment l'utiliser et avec quel matériel adapté ? Les systèmes satellitaires de navigation globaux (GNSS -global navigation satellite system-) présentent des sources d'erreur induisant de l'imprécision sur les calculs de géopositionnement. Ces erreurs de calcul peuvent être particulièrement problématiques pour des dispositifs expérimentaux reposant sur le géopositionnement d'un mobile en temps réel (mode RTK -real time kinematic-) appliqué par exemple à l'agriculture de précision. La solution pour améliorer significativement la précision du calcul consiste à utiliser des algorithmes correcteurs diffusés par des stations de mesure fixes ou faisant partie d'un réseau. Pour utiliser ces informations le mobile doit être capable de se connecter à la station (radio, Internet, téléphone, etc.), de charger et recalculer rapidement la géolocalisation pratiquement en temps réel. Parmi les réseaux de stations disponibles, il en existe des publics (RGP-réseau GNSS permanent-) et des privés (Teria, Sat-info, Orphéon) qui seront détaillés et comparés. Un premier tableau récapitulatif des sites expérimentaux de l'INRA équipés et les couvertures des réseaux est présenté dans cet article pour partager les informations avec les Unités expérimentales.

Mots clés : réseaux de correction différentielle, DGPS, station de référence

Introduction

La géolocalisation globale qui s'appuie sur des systèmes satellitaires (GNSS, global navigation satellite system) peut être entachée d'erreurs pouvant réduire la précision du calcul de la position à une centaine de mètres (Lahaye et Ladet, 2014). A l'origine de ces erreurs peuvent être citées : la désynchronisation des horloges des satellites et

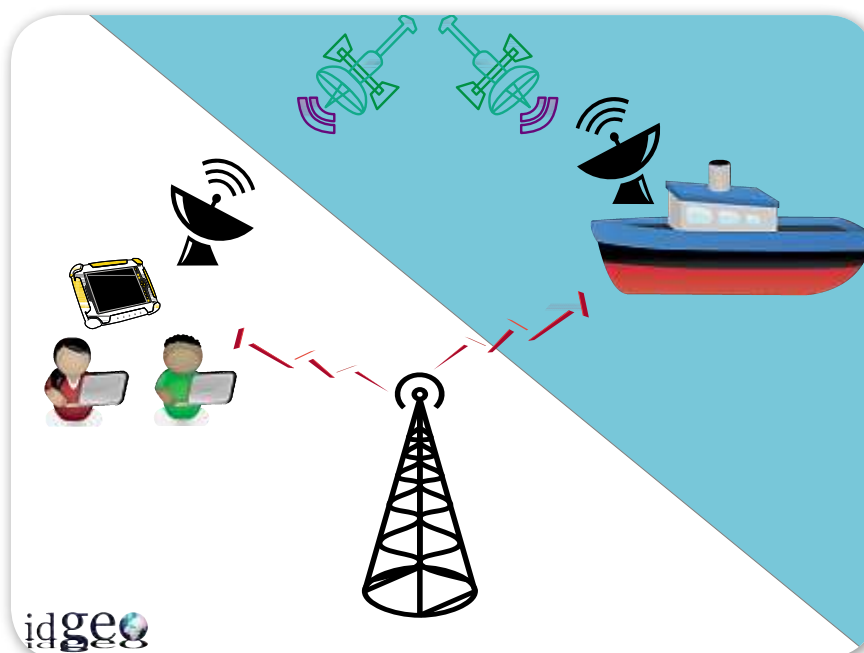


Figure 1. Station de référence DGPS diffusant ses informations aux utilisateurs. DGPS : processus de différenciation qui supprime les sources d'erreur de positionnement et améliore son intégrité. Les corrections sont calculées à partir d'une station de référence et appliquées au GPS mobile en temps réel ou dans un logiciel de post-traitement. On parle alors de correction différentielle.

1 Institut de Développement de la Géomatique (IDGEO) ; 42, avenue du Général de Crouette, F-31100 Toulouse ; France ; renaud.lahaye@idgeo.fr
2 INRA, UMR DYNAFOR 1201, 24 Chemin de Borde Rouge- Auzeville, CS 52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex, France

/ ou des récepteurs, la dégradation du signal volontaire ou non, la déviation des trajectoires des signaux satellitaires en fonction de la structure des couches ionosphériques et troposphériques. Ces erreurs étant identiques au sein d'une même zone de réception, il est possible de mettre en place un dispositif d'observation, de calcul et de transmission des erreurs : une station « relais » ou « base », dont la géolocalisation exacte est connue et qui recalcule constamment sa position en fonction des satellites disponibles. Cette station va observer des erreurs qu'elle va transmettre au récepteur qui va alors appliquer une correction différentielle : c'est le principe du GPS différentiel ou DGPS (**Figure 1**). Cette correction différentielle permet d'obtenir des précisions de géopositionnement métrique voir centimétrique si la station utilisée calcule sa position en utilisant la phase (RTK) et non le code (DGPS).

Description du matériel et/ou méthodes

Le DGPS

Le GPS Différentiel, ou DGPS, a été initialement conçu pour remédier au cryptage volontaire dit SA (selective availability) du signal GPS mis en place par l'armée américaine pour empêcher ses « ennemis » de bénéficier d'une géolocalisation trop précise. Suite à la décision du gouvernement américain de désactiver ce cryptage en 2000, le DGPS a quelque peu perdu de son intérêt. Il présente cependant l'avantage d'offrir une précision métrique là où le géopositionnement « absolu » permet généralement une résolution décamétrique. Cette technologie est encore très utilisée aussi bien en navigation maritime que terrestre.

Utilisé pour corriger sa localisation en temps réel, la clé de ce dispositif est la communication entre le récepteur et la base de référence. Une large gamme de fréquences peut être utilisée selon l'application souhaitée. Plus les relevés se situent dans des lieux confinés (milieu urbain, chantier, etc.), plus la gamme de fréquences utilisée est élevée. La portée des bases de référence peut atteindre quant à elle 300 km, permettant ainsi de répondre aux besoins de la navigation maritime.

Tableau 1. Récapitulatif des fréquences utilisées pour communiquer avec la base³

Type	Fréquence	Portée
UHF	300 MHz à 3000 MHz	Quelques Kilomètres
VHF	30 MHz à 300 MHz	Jusqu'à 20 km en mer
Grandes Ondes	Autour de 300 kHz	Entre 200 et 300 km
GSM	900 MHz, 1800 MHz	Jusqu'à 50 km

Pour s'affranchir de ces problèmes de communication en direct avec la station de référence, une autre solution consiste à corriger les erreurs de géolocalisation de retour au bureau, en « post-traitement ». L'opérateur se connecte via Internet à la station la plus proche du lieu des relevés, télécharge les fichiers nécessaires et corrige les géolocalisations relevées à l'aide d'un logiciel approprié.

3 http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Onde_radio&oldid=99236387

Les systèmes permettant d'augmenter la précision de la géolocalisation en transmettant des corrections erreurs par des satellites géostationnaires (Les SBAS, Lahaye et Ladet, 2014) pourraient être considérés comme des DGPS. Certains de ces systèmes comme le WAAS ou EGNOS sont publics et ne nécessitent généralement pas de matériel particulier pour les utiliser. D'autres sont privés comme les systèmes proposés par John Deere et Omnistar et nécessitent un abonnement ainsi qu'un matériel de géolocalisation adapté. Les corrections émises par les SBAS concernent une vaste zone contrairement au DGPS où la station envoie des corrections d'après ses relevés. Les stations utilisées par le DGPS peuvent être des bases paramétrées par l'opérateur, ce qui nécessite l'emploi simultané de deux récepteurs : un fixe et un mobile. La mise en place de réseaux de stations permanentes privés ou publics permet de s'affranchir de la base fixe habituellement surveillée par une personne afin d'éviter sa « perte », etc.

Il est possible de faire du DGPS en temps réel ou en post-traitement en utilisant des stations permanentes du réseau RGP (réseau GNSS permanent). Le récepteur mobile se base sur les codes des signaux émis par les satellites GPS pour calculer une première position absolue. En temps réel le récepteur se connecte alors à la station la plus proche pour récupérer les erreurs et les appliquer à la géolocalisation pour obtenir une position corrigée. En l'absence de moyens de communication avec la station permanente la plus proche, la correction de la géolocalisation peut s'effectuer en post-traitement de retour au bureau en récupérant les données au format « RINEX » de la station permanente. Un logiciel de post-traitement permettra d'exploiter ce format de données et d'appliquer à la géolocalisation « absolue » la correction appropriée.

Se basant sur le code, le DGPS classique ne permet d'obtenir une précision « que » métrique. Cette précision est souvent suffisante pour rendre plus précise des opérations culturales. Certaines applications, en agriculture de précision notamment, nécessitent une résolution qui est plutôt de l'ordre du centimètre pour un dispositif en mouvement. Ces applications auront recours à une autre méthode : le GPS RTK (real time kinematics ou cinématique temps réel) plus appropriée à la géolocalisation centimétrique d'un mobile. Le RTK se développe aujourd'hui car il rend possible l'autopilotage des machines agricoles.

Le RTK classique

Le GPS RTK utilise le même principe de correction différentielle que le DGPS : un récepteur fixe dont la position est connue (station de l'utilisateur ou station d'un réseau, on parle également de base) transmet des corrections à un récepteur mobile qui se déplace sur des points dont on souhaite déterminer précisément les coordonnées (**Figure 2**). L'avantage du RTK réside dans l'utilisation de la différence de phase utilisée pour la correction, c'est

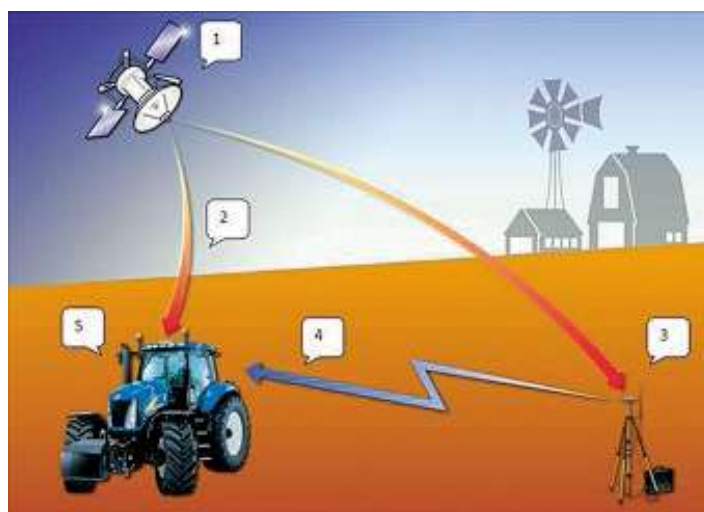


Figure 2. Princes du RTK. 1/ Constellation de satellites GNSS 2/ Signal GNSS 3/ Station de référence RTK 4/ Signal radio de correction RTK 5/ Récepteur GNSS/radio sur le véhicule.

Source : <http://www.geo-pro.fr/aggps-542-rtk.html>

à dire la différence entre l'instant où un signal est émis depuis le satellite et l'instant auquel il est enregistré par le récepteur (Lahaye et Ladet, 2014). Le code C/A étant émis à une fréquence de 1.023 MHz et la phase de la porteuse L1 oscillant à une fréquence de 1575.42 MHz, l'utilisation de la phase permet un positionnement environ 150 fois plus précis que le code, en théorie.

L'emploi de la phase nécessite un dispositif particulier permettant de lever les ambiguïtés, c'est à dire le nombre d'oscillations qu'il y a eu entre les satellites et le récepteur (Lahaye et ladet, 2014). La station fixe a pour objectif de lever cette ambiguïté pour calculer une position au millimètre près. Le récepteur mobile se connecte à cette station pour récupérer les informations de correction de position et atteindre ainsi une résolution centimétrique. Quand la station fixe est mise en place et paramétrée par un opérateur, le récepteur mobile ne peut pas s'éloigner à plus de 10-15 km (limites radio), distance au-delà de laquelle l'incertitude sur la position augmente significativement.

Le RTK Réseau

Pour s'affranchir des problèmes de distance récepteur mobile - récepteur fixe précédemment décrits et surtout pour limiter le coût du dispositif (économie du temps de paramétrage de la station fixe, du matériel et de la personne qui surveille ce matériel), l'idée s'est développée de remplacer la station fixe indispensable par des stations fixes permanentes utiles à la communauté des utilisateurs et de mettre les données à disposition par l'intermédiaire du réseau Internet. Des réseaux publics (RGP) et privés (Teria, SatInfo, Orphéon) ont été ainsi créés pour répondre à un besoin de géolocalisation précise en constante évolution.

L'idée du RTK réseau est de faire supporter différents types de calculs à un serveur distant qui transmet en retour quasi spontanément les corrections. Les réseaux vont différer sur les types de calculs pris en charge par le serveur distant, sur la méthode de transmission des corrections, sur la distribution des stations de référence sur le territoire, sur les couvertures réseaux, etc.

Tableau 2. Comparaison des principales méthodes de géolocalisation GPS avec les précisions généralement observées, le matériel à utiliser et le type de mesure effectuée

Méthode	Précision	Matériel	Mesure
GPS absolu	+/- 10m	1 récepteur	Code (C/A)
GPS + EGNOS / WAAS	+/- 5m	1 récepteur compatible WAAS / EGNOS	Code (C/A)
DGPS	+/- 1m	1 récepteur pouvant communiquer avec une station	Code (C/A)
RTK classique	1 à 10 cm	2 récepteurs	Phase
RTK réseau	1 à 10 cm	1 récepteur pouvant communiquer avec une station d'un réseau	Phase

- ✓ Le Réseau Teria (**Figure 3**) : premier réseau privé mis en place par l'ordre des Géomètres-Experts Français. Le projet initié en 2005 couvre l'ensemble du territoire avec un maillage de stations qui permet de capter les corrections d'une station située à moins de 100 km n'importe où sur le territoire. Les stations prennent en compte les constellations GPS et GLONASS (Lahaye et Ladet, 2014). Elles sont également compatibles avec les satellites Galileo en attente de la mise en fonction officielle de ce système. Les stations font partie intégrantes du réseau RGP de l'IGN. Dans le cas de Teria le serveur distant récupère les données des stations de référence. Il effectue la résolution des ambiguïtés par la méthode FPK (ou paramètre de correction surfacique) permettant



la triangulation du mobile. Le serveur diffuse en permanence les données par onde radio. Le mobile se connecte au serveur qui renvoie les corrections au mobile. Ce dernier génère alors les interpolations nécessaires et obtient ainsi la position.

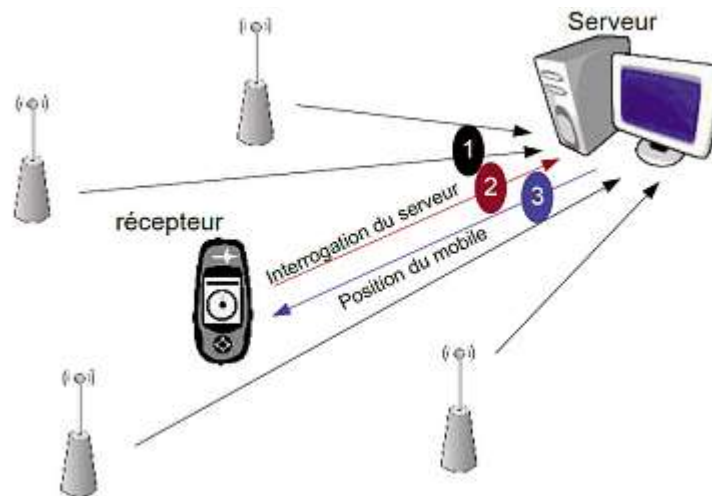


Figure 3. Schéma du fonctionnement du réseau Téria. Plusieurs stations diffusent leurs données au serveur qui procède aux calculs des erreurs et à la géolocalisation du récepteur par triangulation (source : MEDDAT, 2008).

- ✓ Le réseau SATINFO (**Figure 4**) : les stations de ce réseau sont installées sur le territoire et réparties tous les 60 à 70 km les unes des autres. La couverture du territoire n'est pas totale : elle comprend la moitié Nord, les arrondissements de Bordeaux, Toulouse et globalement le pourtour méditerranéen. Les stations sont toutes reliées par ADSL à des serveurs de données et transmettent leurs informations GPS toutes les secondes. Le logiciel GPSNet (Trimble Terrasat GmbH) installé sur les serveurs enregistre alors ces données et effectue des calculs afin de minimiser les erreurs systématiques (ionosphère, troposphère, orbites des satellites, multipath, centre de phase de l'antenne, etc.). Lorsqu'un utilisateur vient se connecter sur le réseau, le logiciel modélise les différentes sources d'erreurs en s'appuyant sur les données des stations de référence. Il interpole l'influence de ces erreurs à proximité de l'utilisateur en créant une station virtuelle de référence (VRS). L'utilisateur utilise ainsi des algorithmes RTK classiques à partir de cette station virtuelle (VRS).

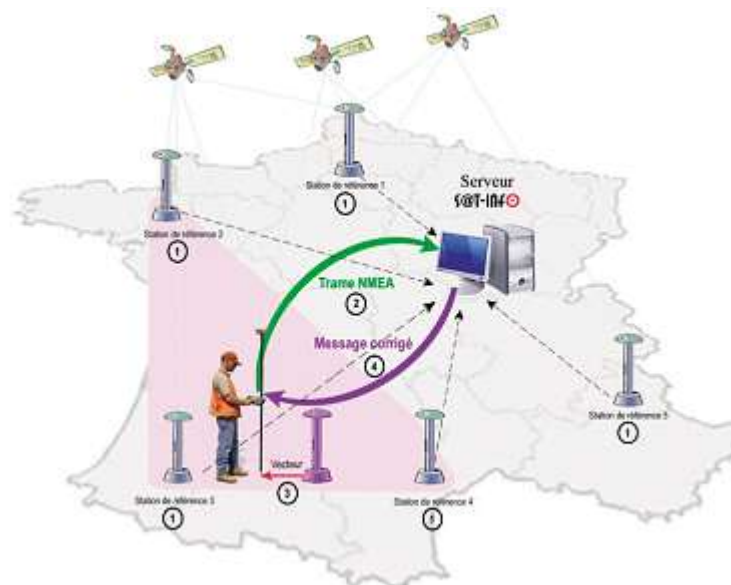


Figure 4. Schéma du fonctionnement du réseau Sat-info (source : <http://www.sat-info.fr>).

- ✓ Le réseau Orphéon (**Figure 5**) : avec 160 stations en France continentale, toutes compatibles GPS et GLONASS, Orphéon est le premier réseau Français multi-constellation. Il propose des abonnements différents pour les applications agricoles et le génie civil. La couverture du réseau est nationale. Ce réseau repose sur le concept de Maître-auxiliaire (MAC) : les stations de référence d'une même zone ont un certain nombre de corrections en commun (correction satellite, atmosphérique, etc.). Le système s'appuie sur ces informations pour envoyer au serveur les données communes. La station de référence la plus proche de l'opérateur est désignée comme maître, elle possède un certain nombre de corrections transmises au serveur de calcul. Les autres stations alentours sont désignées auxiliaires. Le serveur calcule alors des corrections différentielles entre les stations et envoie les corrections relatives à la station maîtresse. Cette dernière envoie les données brutes issues de ces observations. Cet arrangement des données génère des messages compacts, peu consommateurs de bande passante. Le mobile récupère les informations auprès du serveur Internet et de la station maîtresse puis effectue les interpolations.

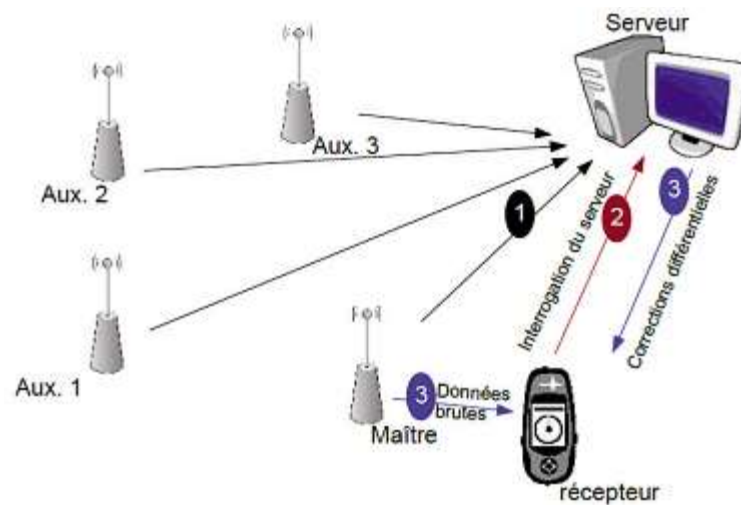


Figure 5. Schéma du fonctionnement du réseau Orphéon (source : MEDDAT, 2008).

Le concept MAC délègue certes au mobile une part importante de calcul de position (ce qui est pris en charge par le serveur pour VRS (SatInfo) et FPK (Teria)) mais il apporte plus de latitude dans les déplacements et les renouvellements de correction.

Tableau 3. Comparaison des principaux réseaux RTK

Réseau RTK	Particularité	Couverture	Calculs position
SATINFO	VRS	Moitié Nord, Bordeaux, Toulouse et pourtour méditerranée	Serveur distant
TERIA	FPK	Nationale	Serveur distant
ORPHEON	MAC	Nationale	Mobile

Précautions : avant d'envisager une méthode de géolocalisation centimétrique en temps réel (et le matériel associé), il est nécessaire de pouvoir répondre aux questions suivantes :

- localisation de l'étude : elle déterminera les réseaux RTK auxquels vous aurez accès ;






- mobilité du dispositif à géolocaliser et instantanéité du calcul de repositionnement : si le mobile est en mouvement rapide il sera certainement plus opportun de dédier les calculs à un serveur distant. Le réseau Orphéon peut proposer d'autres méthodes de calcul ;
- la précision souhaitée : métrique ou centimétrique ? Des commerciaux peu scrupuleux ont pour habitude de vendre des matériels très coûteux qui offrent une précision centimétrique là où vous auriez simplement besoin d'une précision métrique dix fois moins coûteuse, etc. ;
- la transmission GSM des corrections : des pertes de signal de correction peuvent être constatées à cause de l'encombrement du réseau téléphonique. Pour y remédier Orphéon propose son propre réseau de télécommunication.

Résultats et exemple d'application

Couvertures des principaux réseaux et des UE INRA équipées

Les données relatives aux couvertures des réseaux ont été facilement obtenues à partir des sites Internet des réseaux (**Tableau 4**).

Tableau 4. Rappel des couvertures des trois réseaux Teria, Sat-info et Orphéon avec le lien vers les webmaps qui permettent d'interroger les caractéristiques des stations les plus proches de votre site

TERIA	SATINFO	ORPHEON
		
<p>http://www.reseau-teria.com/dossiers_carto_teria.aspx</p>	<p>SAT-INFO réseau GPS RTK / "NORD" : https://maps.google.fr/maps/ms?msid=207056217822984798906.0004b78531435847a92d4&msa=0</p> <p>SAT-INFO réseau RTK / SUD - SUD OUEST : https://maps.google.fr/maps/ms?msid=207056217822984798906.0004d573617813f31876a&msa=0</p>	<p>http://reseau-orpheon.fr/le-reseau-orpheon#couverture</p>

Concernant la géolocalisation des Unités expérimentales équipées le travail aurait nécessité une enquête longue et approfondie auprès de chaque Unité pour avoir l'exhaustivité. La centralisation de ce genre d'information est à l'étude à l'heure actuelle. Cependant vous pouvez vous rapprocher d'Unités déjà équipées et recensées (**Tableau 5**).

Tableau 5. Coordonnées de quelques UE de l'INRA équipées en GPS RTK

Unité	Nom du Directeur d'unité	Contact
UE_DOMAINE EXP. D'AUZEVILLE	GAVALAND André	05 61 28 54 19
UE DIASCOPE_DOMAINE EXP. DE MELGUEIL	DESCLAUX Dominique	04 67 29 06 09
UE_DOMAINE EXP. DE LA MOTTE AU VICOMTE	NEDELEC Gabriel	02 23 48 51 47
UE GRANDES CULTURES INNOV. ENVIRONNEMENT PICARDIE	STREHL Nathalie	03 22 85 75 14
ORE THEIX LAQUEVILLE	LOUAULT Frédérique	04 73 62 44 30

Conclusions et perspectives

La géolocalisation différentielle comme le DGPS permet d'atteindre des précisions métriques avec du matériel peu coûteux. Le développement du RTK et des réseaux privés rendent possible la géolocalisation centimétrique d'un mobile en temps réel. Cette technologie autorise maintenant l'autoguidage d'engins motorisés, une technologie en pleine expansion dans l'agriculture de précision. Ces technologies restent cependant très coûteuses, aussi nous vous conseillons fortement de vous rapprocher d'unités expérimentales déjà équipées pour bénéficier de leur expérience et faire des choix appropriés parmi l'éventail des possibilités disponibles sur le marché de la géolocalisation centimétrique en temps réel également en plein essor. Les tarifs ont tendance à baisser et des baisses importantes semblent se profiler dans un avenir proche avec la « massification » de ce type de service. On peut aujourd'hui avoir un équipement RTK complet pour 8 000 euros environ. Des fabricants annoncent des systèmes à moins de 1 000 \$ (Piksi, <http://swift-nav.com/piksi.html>). Dans le secteur agricole, l'autopilotage des engins est en train de devenir le standard aux USA et en Australie où les surfaces sont très vastes et homogènes.

Références bibliographiques

Wiki : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS_diff%C3%A9rentiel&oldid=97372762

Lahaye R, Ladet S (2014) Les concepts de base des SIG nomades. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp. 28-35.



/ Chapitre 2 /
GPS et SIG
**Pour l'aide à la gestion
d'un domaine expérimental**



Source : International Plant Nutrition Institute

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.

Satellites et agriculture de précision

Lénaïc Grignard¹, Chloé Romier¹

Résumé. L'agriculture de précision offre un nouveau regard sur la parcelle pour une meilleure gestion des intrants. Les images satellite ont ouvert un angle inédit d'observation du comportement de la biomasse verte à l'échelle inter et intraparcellaire. Elles permettent la prise en compte de sa variabilité dans les décisions culturales et d'ajuster ainsi la bonne dose, au bon moment, au bon endroit, avec pour résultat une amélioration des bilans économiques, agronomiques et environnementaux. Cet article présente de manière succincte la démarche de l'agriculture de précision, de l'analyse des hétérogénéités intraparcellaires à partir d'images satellite ou de cartes de rendement à la modulation des intrants, à travers un exemple de service en agriculture de précision proposé par la société GEOSYS aux agriculteurs en France et à l'étranger.

Mots clés : agriculture de précision, gestion des intrants, aide à la décision, images satellite, agronomie

Introduction

Le concept d'agriculture de précision repose sur le constat qu'une parcelle n'est pas homogène. La prise en compte de cette variabilité intraparcellaire et du contexte agro-climatique local associé permet d'optimiser les différentes étapes de la conduite d'une parcelle pour apporter la bonne dose, au bon endroit, au bon moment. Les objectifs intrinsèques sont d'améliorer les résultats agronomiques, économiques et environnementaux. On considère en général quatre étapes dans les approches d'agriculture de précision : 1) l'acquisition de données pour mieux comprendre le fonctionnement de la parcelle : la mesure ; 2) le traitement des données pour les transformer en information pertinente et analysable ; 3) l'analyse de ces données pour la prise de décision, parfois via l'utilisation de modèles agronomiques ; 4) la mise en œuvre : adaptation de la conduite agronomique. Cette approche peut se décliner à plusieurs échelles : l'interparcellaire qui permet de comparer les parcelles entre elles, d'adapter la conduite parcelle par parcelle, et de déterminer entre autres celles qui sont les plus variables ; la parcelle, notamment pour améliorer la connaissance de son comportement agronomique via la compilation d'informations historiques ; l'intraparcellaire, avec une modulation des intrants au semis ou en cours de saison en fonction du contexte spatio-temporel. Depuis une dizaine d'années, des entreprises proposent aux agriculteurs des services d'agriculture de précision. D'abord marginale, l'adoption de ces pratiques est en pleine expansion. Ainsi, parmi les services existants, GEOSYS propose FarmSat[®], un service d'agriculture de précision pour les grandes cultures, en France (sous la marque Cerelia[®]) et à l'étranger (Etats-Unis, Canada, Brésil, Australie, Royaume Uni, Ukraine, Russie). GEOSYS est la filiale d'un groupe coopératif américain, Land O'Lakes. Avec plus de cinquante employés en France, aux Etats Unis, au Brésil et en Australie, GEOSYS contribue depuis plus de 25 ans à développer les performances de l'agriculture sur les cinq continents, en fournissant aux acteurs des filières agro-industrielles des solutions innovantes pour optimiser l'utilisation des ressources, améliorer les rendements et réduire l'impact des aléas.

Des images satellite comme outil de mesure

Il y a une quarantaine d'années, des scientifiques ont commencé à utiliser des capteurs embarqués dans des satellites pour observer la terre et quantifier la densité de végétation verte. Des mesures du rayonnement solaire réfléchi dans le rouge et le proche infrarouge permettent de suivre l'activité photosynthétique et la surface foliaire ou la biomasse verte. En effet, une caractéristique des plantes chlorophylliennes est d'absorber les longueurs d'onde du rouge pour alimenter la photosynthèse tandis que les structures cellulaires des parois réfléchissent fortement le proche infrarouge. Une modification de surface foliaire verte d'un couvert affectera sa réflectance dans ces longueurs d'onde (Breda, 2003). La combinaison de ces longueurs d'onde (et d'autres) produit divers indices de végétation. Le plus couramment utilisé est le NDVI (normalized difference vegetation index), défini par Tucker (1979). C'est la différence normalisée entre les réflectances dans le proche infrarouge et le rouge : $NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$.

¹ GEOSYS, 5 rue Vidailhan, F-31130 Balma, France ; www.geosys.fr
Auteur pour correspondance : lenaic.grignard@geosys.com

L'analyse du NDVI tout au long du cycle végétatif des plantes permet de faire des diagnostics sur la croissance de la biomasse intraparcellaire (Jonckheere et al., 2004).

Il existe de nombreux satellites d'observation de la terre. Ils se différencient en particulier par le type des capteurs qu'ils embarquent (longueurs d'onde enregistrées notamment), la fréquence de revisite au-dessus d'une zone, et la résolution spatiale c'est-à-dire la dimension d'un pixel au sol. Des résolutions spatiales entre 5 et 30 m (Rapid Eye : 5 m, Deimos : 20 m, LS8 : 30 m) sont utilisées en agriculture de précision, résolutions compatibles avec la variabilité intraparcellaire qu'il est pertinent d'analyser et les largeurs d'épandage des épandeurs d'engrais.

Mieux connaître ses parcelles

L'adaptation de la conduite de la parcelle à son contexte géographique et temporel peut se faire grâce à un meilleur diagnostic du comportement de la biomasse verte de la parcelle. Ce diagnostic peut être alimenté en amont de la saison agricole, par une compilation et une analyse des informations historiques, ou en cours de saison, avant une opération culturale.

Mesurer la variabilité

Deux parcelles voisines peuvent avoir des caractéristiques agronomiques très différentes. Il est alors intéressant d'adopter une conduite différente en fonction de leurs caractéristiques. De même, à l'intérieur de la parcelle, toutes les parcelles sont loin d'être homogènes. Moduler les apports d'intrants à l'intérieur de la parcelle prend alors tout son sens. Un point d'entrée dans l'agriculture de précision est donc la définition d'indicateurs de variabilité entre parcelles et à l'intérieur de la parcelle. Cela peut être fait sur un jeu d'images acquises lors de rotations précédentes ou l'année en cours, et à des moments clé du cycle de culture.

Les images présentées en **Figure 1** illustrent cette problématique. Elles représentent la cartographie d'un indicateur de biomasse verte dérivé du NDVI, sur des parcelles de maïs. Son analyse visuelle met en évidence une hétérogénéité de développement pendant la saison culturale, entre les parcelles (à gauche) et à l'intérieur de la parcelle (à droite).

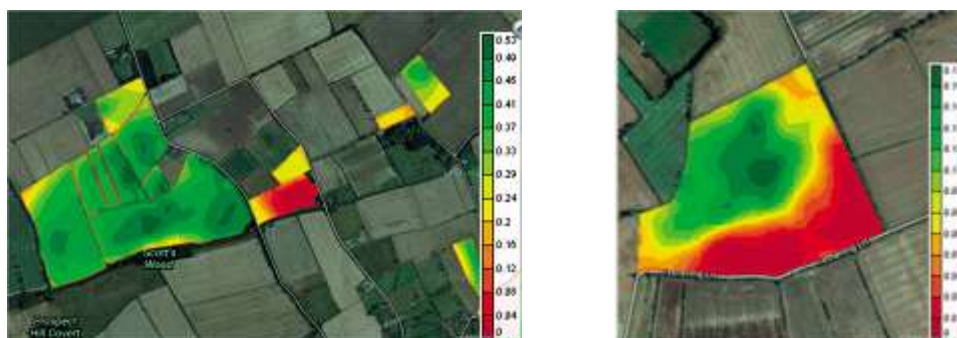


Figure 1. Carte d'indicateur normalisé de biomasse verte dérivé du NDVI mettant en évidence une variabilité interparcelle et intraparcelle.

Pour mieux prendre en compte cette hétérogénéité intraparcellaire, une approche peut consister à découper la parcelle en zones de fonctionnement homogène.

Délimiter des zones de fonctionnement homogène

L'objectif du zonage est de raisonner en sous-unité de comportement homogène (McBratney et al., 2005). Pour générer ce zonage, une technique consiste à cibler des images historiques à des dates clé (conditions climatiques extrêmes, dates clé du cycle cultural) et à appliquer des algorithmes qui permettent d'isoler des zones homogènes ou de tracer des zones de transition.

A GEOSYS, un outil de zonage a été développé suite à des travaux menés avec la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et l'USDA (United States Department of Agriculture) au début des années 2000. Cet outil, nommé SaMZ, est utilisé dans la première étape de l'agriculture de précision qui consiste, en fonction des hétérogénéités identifiées sur les images satellite, à définir des zones qui vont être retenues et exploitées comme unité d'analyse, comme support pour optimiser les placements des échantillonnages de sol, et comme unité de gestion des intrants (semences, fertilisants). La deuxième étape consistera à effectuer la modulation des intrants, c'est-à-dire à les appliquer de manière variable dans la parcelle en fonction du zonage et du raisonnement des intrants effectué dans la première étape. L'agriculteur pourra le faire de manière automatisée s'il dispose d'un matériel (semoir, épandeur) équipé pour faire de la modulation.

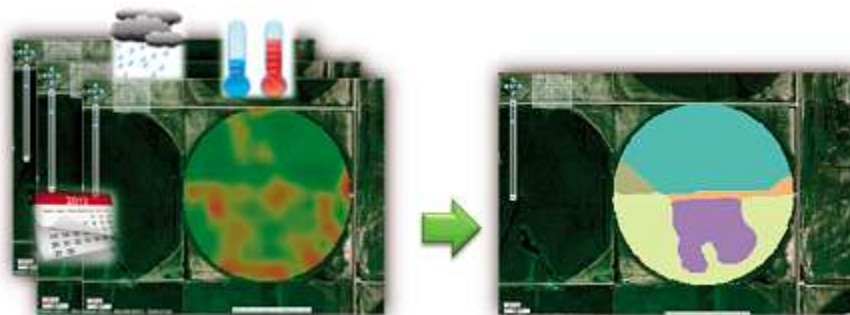


Figure 2. Exemple de résultat de zonage : à gauche : image brute de NDVI ; à droite : résultat du zonage sur une série historique d'images, sur la même parcelle.

Mieux comprendre sa parcelle en compilant des informations annexes

Se limiter aux images satellite n'a de sens que si aucune autre donnée n'est disponible sur la parcelle. Une autre entrée classique de l'agriculture de précision est l'enregistrement sur plusieurs années et l'analyse de cartes de rendement. Elles permettent de comprendre l'impact de la variabilité de la parcelle sur l'expression de son potentiel dans les différentes zones et dans diverses conditions agro climatiques (Bachmaier et al., 2009). Pour pouvoir faire cette analyse correctement, il faut disposer d'outils simples, interopérables et compatibles avec les différents formats de fichier enregistrés par les moissonneuses batteuses et éviter les interprétations erronées qui découlent souvent d'un mauvais traitement des données. GEOSYS a breveté une méthode performante basée sur une approche scientifique originale pour les cartes de rendement en intégrant l'ensemble des corrections nécessaires pour obtenir des données fiables et interprétables. Les principaux types d'erreurs et leur correction sont illustrés par les **Figures 3 et 4**.

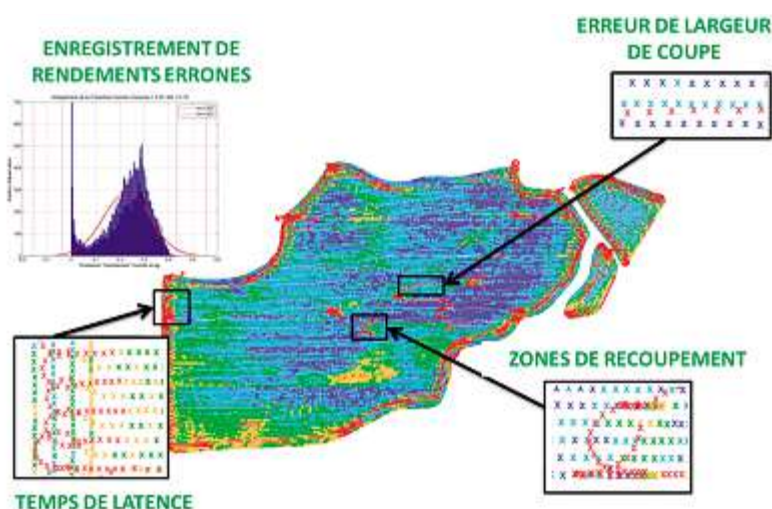


Figure 3. Carte de flux de grain enregistrée par une moissonneuse batteuse – mise en évidence des sources d'erreur (temps de latence = délai entre la coupe d'une tige de blé et le passage des grains battus devant le capteur de flux de grain).



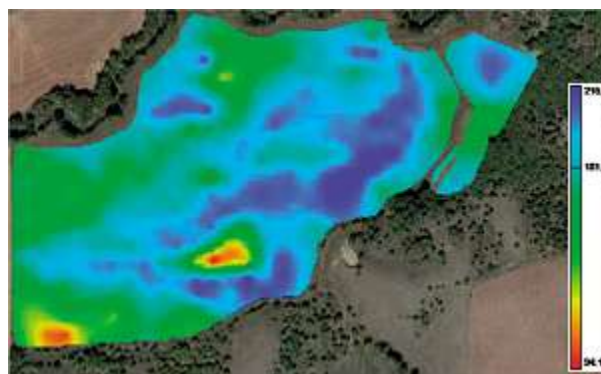


Figure 4. Carte de rendement GEOSYS après traitement des données brutes présentées en Figure 3.

Améliorer la conduite de la parcelle : la bonne dose, au bon moment, au bon endroit ; modulation des intrants

La valorisation la plus fine de l'agriculture de précision consiste à moduler les apports d'intrants en fonction du sol, de l'expression du potentiel de la parcelle, des objectifs de l'agriculteur, et de ses contraintes techniques (Plant, 2001 ; Godwin et al., 2003).

En amont du semis, un redécoupage de la parcelle peut être opéré pour gérer les zones de façon indépendante. Le choix de la variété et/ou de la densité de semis peut être adapté lorsque les contraintes techniques le permettent. Ainsi, faire varier la densité des rangs de maïs au sein d'une parcelle de maïs dans le Sud-Ouest de la France ne sera pas possible du fait de l'absence d'équipement adéquat. En fonction de la stratégie de fertilisation, dans le cas d'un apport d'engrais en même temps que le semis, les doses pourront être modulées par zone ou de façon plus fine tous les 5 ou 20 m en fonction de l'expression du potentiel de la parcelle dans l'historique. En cours de saison, la fertilisation pourra être adaptée en fonction du niveau de développement de la biomasse, ou de la surface foliaire verte, estimé via des images satellite acquises quelques jours auparavant.

Un exemple de préconisation d'application est illustré par les **Figures 5 et 6**. Il s'agit d'un cas réel d'utilisation en Angleterre, sur une parcelle de blé, pour le deuxième apport d'azote de la campagne 2013/2014. La méthode de préconisation a été mise au point par la HGCA (Home Grown Cereals Authority, Institut technique des céréales de Grande Bretagne). Elle relie un couple de valeurs de LAI (leaf area index, ratio entre la surface de feuilles et la surface au sol en m^2 par m^2) et de stade à une dose d'azote. Cette méthode vise à homogénéiser la biomasse de la parcelle en appliquant plus d'azote là où la biomasse est plus faible.

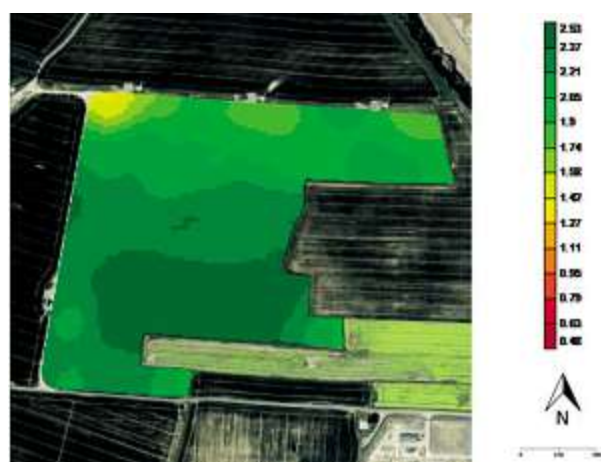


Figure 5. Carte de LAI sur une parcelle de blé en Angleterre - au 28/04/2014.

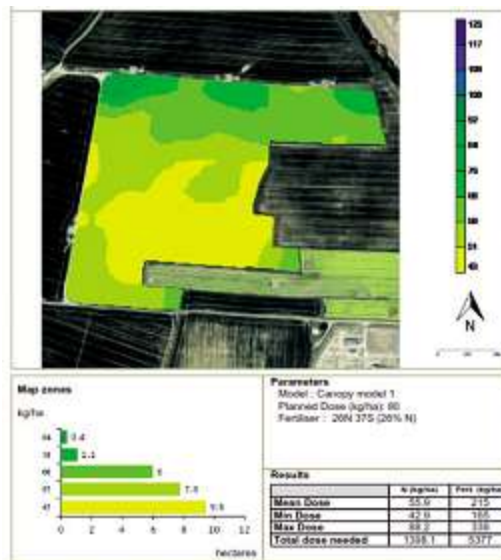


Figure 6. Carte GEOSYS de préconisation d'azote sur la parcelle de la Figure 5, en utilisant la méthode HGCA.

Les résultats de cette démarche d'agriculture de précision se traduisent par une meilleure efficacité des intrants : des gains de rendement et/ou des baisses d'intrants. D'un point de vue agronomique, ces gains découlent du bon sens. D'un point de vue économique les gains doivent dégager une marge supplémentaire après amortissement de l'investissement en matériel et en logiciel. Ces gains varient en fonction de la culture, du contexte agro-climatique et de la typologie de l'exploitation. A titre d'exemple, sur des essais sur maïs dans le Sud- Ouest en 2013, le gain moyen a varié entre 15 et 60 € par hectare.

Conclusions

La démarche d'agriculture de précision est de plus en plus adoptée par les agriculteurs en grande culture. L'Amérique du Nord et l'Australie sont très en avance par rapport à l'Europe. En Europe, les pays du Nord, l'Allemagne et l'Angleterre font figure de pionniers. La technologie est mature, les services associés se déploient. Il reste une large place pour l'innovation, mais l'expérience de ces dernières années montre que l'agriculture de précision sera un des piliers de l'agriculture de demain.

Références bibliographiques

- Bachmaier M, Gandorfer M (2009) A conceptual framework for judging the precision agriculture hypothesis with regard to site-specific nitrogen application. *Precis Agric* **10** : 95-110.
- Breda NJJ (2003) Ground-based measurements of leaf area index : A review of methods, instruments and current controversies. *J Experiment Bot* **54** : 2403-2417.
- Godwin R, Wood G, Taylor J, Knight S, Welsh J (2003) Precision farming of cereal crops : A review of a six year experiment to develop management guidelines. *Biosyst Eng* **84** : 375-391.
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F (2004) Review of methods for in situ leaf area index determination. *Agric Forest Meteorol* **121** : 19-35.
- McBratney A, Whelan B, Ancev T, Bouma J (2005) Future directions of precision agriculture. *Precis Agric* **6** : 7-23.
- Plant RE (2001) Site-specific management : the application of information technology to crop production. *Comput Electron Agric* **30** : 9-29.
- Tucker CJ (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ* **8** : 127-150.



Le registre parcellaire graphique : des données géographiques pour décrire la couverture du sol agricole

Pierre Cantelaube¹, Marie Carles¹

Résumé. Le registre parcellaire graphique (RPG), un système de déclaration graphique utilisé par les agriculteurs, fournit une représentation géo-localisée fine et annuelle de l'occupation du sol agricole français. Cette base de données est accessible à l'ensemble de l'INRA grâce à une convention que l'Institut a signé avec ses propriétaires. L'unité de service Observatoire du développement rural est dépositaire de ces données pour l'INRA et est en charge de leur diffusion auprès des ayants droits. Différentes versions du RPG sont proposées, construites notamment en complétant et enrichissant ces données par d'autres sources d'informations géographiques sur la couverture du sol.

Mots clés : registre parcellaire graphique, parcellaire agricole, couverture/occupation du sol

Introduction

Le registre parcellaire graphique (RPG) est un système de déclaration graphique des surfaces agricoles, mis en place suite au règlement communautaire CE 1593/2000 qui demande aux Etats-membres de l'Union européenne (UE) de localiser et d'identifier les surfaces agricoles (Kay and Milenov, 2007). Les exploitants dessinent sur des photos aériennes les contours de leurs « îlots de cultures ». Ces îlots sont des regroupements de parcelles contiguës d'une même exploitation, portant une ou plusieurs cultures, généralement délimités par des éléments facilement repérables et permanents : chemins, haies, ruisseaux, etc. ; ce sont donc des unités de terrain exploitées par un même agriculteur mais pouvant contenir plusieurs cultures. Ces exploitants précisent les cultures qui sont pratiquées sur ces îlots, ainsi que les surfaces associées. Ces informations, collectées et mises à jour annuellement, sont utilisées notamment pour instruire et enregistrer les dossiers de déclaration pour les aides dans le cadre de la politique agricole commune (PAC) ; et, en outre, la validation de ces déclarations individuelles ouvre le droit au versement des aides PAC. Le RPG est d'ailleurs produit par l'Agence de service et de paiement (ASP) principal organisme payeur de la PAC pour la France.

Le RPG est donc un jeu de données géographiques recensant les surfaces agricoles des exploitations qui possèdent au moins une parcelle faisant l'objet d'une aide du 1^{er} pilier de la PAC ou encore une parcelle engagée sous une des mesures surfaciques du 2nd pilier de la PAC (mesures agro-environnementales). Il s'agit sans doute de la meilleure représentation (géo-localisée) disponible de l'espace agricole français. Un extrait du RPG est présenté sur les **Figures 1 et 2**.

Une convention entre l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) et l'ASP a été établie² pour la mise à disposition des données du RPG, dans une version anonymisée, pour les travaux de recherches de l'INRA, avec droit à leur réutilisation par les Unités mixtes de recherche (UMR) et accordant également à l'INRA la faculté de diffuser ces données auprès de ses partenaires scientifiques dans le cadre de projets. L'Unité de services Observatoire du développement rural (US-ODR) est dépositaire des données RPG dans le cadre de cette convention et se charge de leur distribution auprès des Unités mixte de recherche (UMR) et autres ayants-droits. L'accès aux données se fait sur demande (lettre d'engagement) auprès de l'US-ODR. Les données sont fournies par département (France entière disponible, y compris DOM, à partir de 2006).

1 INRA, Unité de services 0685, Observatoire du développement rural, 24, Chemin de Borde Rouge, Auzeville, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; pierre.cantelaube@toulouse.inra.fr

2 Juillet 2010, sous financement INRA SAE2/SAD/EA.



Figure 1. Extrait de la BD-Ortho® (Mosaïque d'ortho photographies, base de données IGN).



Figure 2. Extrait de la BD-Ortho® et superposition des îlots RPG (campagne 2010).

L'US-ODR a également complété le RPG avec d'autres données géographiques relatives à l'agriculture en France, notamment les mesures agro-environnementales (MAE) issues du Règlement de Développement rural : conversion à l'agriculture biologique, traitements extensifs des prairies, réduction des traitements phytosanitaires, etc. Une nouvelle couche d'information géographique intégrant ces deux jeux de données a été générée grâce à des travaux de superpositions et de croisements réalisés à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG).

Enfin, l'US-ODR entend proposer une version du RPG enrichie avec l'ensemble des éléments de couverture du sol, hors paysage agricole, tels que les routes, les surfaces en eau, etc. (disponibles grâce à la BD Topo® de l'IGN) ou encore des éléments forestiers (BD Forêt® de l'IGN). De plus, le RPG ne décrit pas la couverture de la totalité de l'espace agricole, compte tenu de la procédure déclarative à laquelle il répond. Pour assurer une couverture exhaustive du sol, il sera donc également nécessaire d'estimer et de localiser les surfaces agricoles absentes du RPG.



Description des données du RPG

Les exploitants agricoles dessinent les contours de leurs îlots de culture sur des fonds papiers A3 réalisés spécifiquement à partir des orthophotographies de la BD Ortho® (IGN), pour une saisie au 1:5000. Ils ont également la possibilité de numériser directement ces informations (par Internet, grâce au service en ligne TéléPac). Cette tâche s'effectue selon une procédure définie par les chambres d'agriculture départementales (voir ASP, 2011). Les déclarations, recueillies par les directions départementales des territoires (DDT, bureaux déconcentrés du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt dans les départements), sont ensuite fournies à l'ASP pour un retraitement avec les outils dédiés³ et la constitution de fichiers annuels recouvrant le territoire français dans son ensemble. Petitjean et de Laroche (2007) décrivent plus en détail les procédures de déclarations, d'instructions et de contrôles.

Pour la France métropolitaine, le RPG comprend à peu près 6 millions d'îlots (correspondants à environ 26 millions d'hectares) répartis entre un peu plus de 400 000 exploitations agricoles (qui peuvent être aussi des regroupements d'exploitations agricoles, des établissements publics, etc.). A titre de comparaison, en 2010, le ministère de l'Agriculture recense 490 000 exploitations agricoles en France métropolitaine sur une SAU de 27 millions d'hectares (Agreste, 2013). Cette différence s'explique par l'absence dans le RPG des surfaces appartenant à des exploitations non primées par la PAC (c'est-à-dire ne recevant aucune aide ni du 1^{er} pilier, ni du 2nd pilier de la PAC).

Diffusion et droits

Le RPG est une œuvre collective dont la propriété intellectuelle est partagée entre l'ASP et le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF). Dans le cadre de l'application de la directive européenne INSPIRE⁴, la diffusion⁵ par l'ASP des données du RPG peut être réalisée suivant six niveaux d'information et d'anonymisation, décrits dans le **Tableau 1** (source ASP, 2011).

Tableau 1. Niveau d'anonymisation des données attributaires associées aux îlots RPG

Niveau 1	Données graphiques avec un identifiant numérique et non significatif (anonyme) par îlot
Niveau 2	Données du niveau 1 avec la commune de localisation de l'îlot, les cultures déclarées et leurs surfaces décrites en 28 groupes de cultures (occupation du sol)
Niveau 3	Données du niveau 2 avec pour chaque îlot, sa surface de référence, s'il y a un moins une parcelle irriguée ou non, et les caractéristiques de l'exploitation (anonymisées) : forme juridique, classe d'âge pour les exploitants individuels, surface déclarée, département de rattachement administratif
Niveau 4	Données du niveau 3 avec par exploitation un identifiant numérique et non significatif
Niveau 5	Données du niveau 4 avec nom ou raison sociale de l'exploitant
Niveau 6	Données du niveau 5 avec régime et montant des aides

L'INRA, au travers d'une convention ASP / INRA - US ODR, a obtenu un droit d'utilisation, des données du RPG documentées niveau 4 à partir de 2007 (et niveau 2 pour la campagne 2006), ceci pour 94 départements de la France métropolitaine (hors 75 et 92) et les DOM (quatre départements). Ces informations sont donc réutilisables conformément aux clauses de la convention signée, en particulier en respectant le caractère anonyme des données.

Format des données géographiques disponibles pour l'INRA

L'information disponible concerne donc les îlots anonymisés (niveau 4) du RPG et leur occupation culturale lors de la campagne de l'année N, dans leur situation consolidée de fin de campagne (arrêtée au 1^{er} janvier de l'année N+1, selon la situation à cette date). Les données sont fournies, par département, sous forme de données géographiques vectorielles, avec données attributaires associées⁶. En résumé :

3 Notamment l'application ISIS-TELEPAC.

4 Directive 2007/2/CE du Parlement européen et du Conseil de l'UE, <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>

5 Circulaire MAP/SG/CSI du 11 décembre 2007.

6 Voir aussi ASP, 2011b.

- ✓ ✓ les îlots sont représentés par des polygones SIG, au format shape-file (ESRI®), identifiés de manière unique chaque année. Le système de projection (pour la France métropolitaine) est Lambert 2 étendu (2007-2008) puis Lambert 93 (depuis 2009). L'échelle de saisie est 1:5000, et les échelles minimale et maximale d'utilisation sont le 1:2500 – 1:10000 ;
- ✓ ✓ à chaque identifiant d'îlot sont associées deux tables attributaires pour, grâce à un ensemble de données alphanumériques, décrire cet îlot et l'exploitation à laquelle il appartient ;
 - pour décrire l'îlot, les attributs suivants sont fournis : nature de la (des) culture(s) (selon une nomenclature en 28 classes⁷) et surface qu'elle(s) occupe(nt), caractère irrigué de l'îlot (jusqu'en 2009 seulement), et surface de référence de l'îlot (déduite directement du dessin numérisé) ;
 - pour décrire l'exploitation : sont disponibles l'identifiant (anonyme) de l'exploitation propriétaire de l'îlot, la structure de cette exploitation (individuelle ou bien collective : EARL, GAEC, etc.), la classe d'âge du chef d'exploitation (pour les exploitations individuelles), le département de rattachement administratif (département d'instruction des dossiers PAC, département siège de l'exploitation) et la surface totale de l'exploitation.

Couverture du sol agricole

Comme indiqué ci-dessus, la couverture de la totalité de l'espace agricole n'est pas assurée. Par exemple, les surfaces agricoles appartenant à des exploitations, professionnelles ou non, qui ne sont sujettes à aucune aide PAC seront absentes du RPG. Ceci exclut du RPG les exploitations spécialisées dans des cultures non-aidées, notamment les vignes ou les cultures fruitières.

Dans les faits, si les données du RPG sont comparées avec des données de surfaces agricoles qui font autorité comme la statistique agricole annuelle (SAA) d'Agreste⁸, nous notons que la surface totale RPG (surface agricole utile RPG ou « SAU RPG ») est plus faible de 2 à 3 % que la SAU des exploitations SAA, de 8,5 à 10 % que la SAU totale SAA⁹ (**Tableau 2**). Si nous distinguons les types de cultures, la différence SAA-RPG est de moins de 1 % pour les surfaces en céréales, oléagineux et protéagineux (SCOP), 12 à 14 % pour les prairies et d'environ 60 % pour les cultures permanentes (en moyenne sur 2006-2009, voir **Tableau 2**). C'est notamment pour renseigner ces surfaces manquantes que l'US-ODR prévoit une version du RPG complétée par les surfaces agricoles non déclarées.

Tableau 2. Différences entre les surfaces Agreste (SAU totale, sauf spécifié) et celles du RPG, en pourcentage :
Formule : (Surface Agreste – Surface RPG)*100/Surface Agreste. (France métropolitaine, 4 campagnes).

	2006	2007	2008	2009
Terres arables	1,2 %	0,7 %	0,1 %	0,9 %
Céréales (– riz + maïs ensilage)	1,4 %	1,2 %	0,6 %	0,5 %
Oléagineux	18,1 %	17,4 %	8,4 %	1,3 %
Protéagineux	0,1 %	0,6 %	1,4 %	0,7 %
Riz	0,2 %	7,7 %	8,6 %	3,8 %
Cultures permanentes	62,6 %	63,1 %	63,2 %	57,3 %
Cultures fruitières	50,2 %	48,5 %	45,0 %	43,5 %
Vignes	65,8 %	66,7 %	67,8 %	60,8 %
Prairies permanentes	14,0 %	13,8 %	12,9 %	11,8 %
Estives / Landes	41,7 %	40,0 %	31,9 %	30,5 %
Surfaces toujours en herbe	4,7 %	5,1 %	6,5 %	5,5 %
Total : SAU des exploitations vs RPG	3,2 %	3,1 %	2,6 %	2,1 %
SAU totale vs RPG	9,7 %	9,5 %	8,9 %	8,5 %

7 Soit : groupe culture (gc) 1 Blé tendre, gc2 Maïs grain et ensilage, gc3 Orge, gc4 Autres céréales, gc5 Colza, gc6 Tournesol, gc7 Autres oléagineux, gc8 Protéagineux, gc9 Plantes à fibres, gc10 Semences, gc11 Gel (surfaces gelées sans production), gc12 Gel industriel, gc13 Autres Gels, gc14 Riz, gc15 Légumineuses à grains, gc16 Fourrage, gc17 Estives Landes, gc18 Prairies permanentes, gc19 Prairies temporaires, gc20 Vergers, gc21 Vignes, gc22 Fruits à coque, gc23 Oliviers, gc24 Autres cultures industrielles, gc25 Légumes-fleurs, gc26 Canne à sucre, gc27 Arboriculture, gc28 Divers.

8 Agreste : organisme public d'études et de statistiques sur l'agriculture, la forêt, les industries agroalimentaires, l'occupation du territoire, les équipements et l'environnement en zone rurale (service de la statistique et de la prospective du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt).

9 Exemple pour la campagne 2009 : RPG SAU : 26 792 000 ha. SAA SAU des exploitations : 27 530 1000 ha et SAA SAU totale : 29 407 000 ha. La SAU totale comprend la SAU des exploitations plus les surfaces en herbes non rattachées aux exploitations plus les jardins et autres cultures individuelles, familiales.

Disponibilité du RPG à l'US-ODR

La version de base du RPG, dénommée version v0, est donc disponible pour les campagnes 2006 à 2012 (à la date d'écriture de cet article, soit avril 2014). Deux autres versions (v1 et v2) peuvent être mises à disposition par l'US-ODR. Les demandes s'effectuent sur le site de l'Unité (<https://odr.supagro.inra.fr>¹⁰).

✓ Version de base (v0)

Pour cette version de base, l'ODR peut fournir soit les fichiers de données géographiques (polygones et données attributaires associées) tels que fournis par l'ASP, soit des tableaux statistiques de données agrégées (tels que fréquemment utilisés par exemple en économie et en sciences sociales) à un niveau administratif usuel (communes, cantons, départements, etc.), ou encore agrégées au niveau des exploitations¹¹.

✓ Version complétée par les mesures agro-environnementales (v1)

Outre la version de base, l'US-ODR complète le RPG avec d'autres données géographiques relatives à l'agriculture en France, notamment les mesures agro-environnementales (MAE¹²) issues du Règlement de développement rural (2^e pilier PAC, Règlement de développement rural 2007-2013, axe 2, mesures 214). Ces données, fournies par l'ASP et le MAAF¹³, sous la forme de données géographiques parcellaires proviennent également des déclarations des exploitants agricoles qui contractualisent ces MAE, c'est un « extrait » du RPG. Les parcelles MAE correspondent ainsi soit à des îlots soit à des parties d'îlots (**Figure 3**). Superposées et croisées avec le RPG, ces parcelles apportent une nouvelle information attributaire aux îlots du RPG (i.e. la part de la surface des îlots engagée dans une MAE, i.e. la surface dédiée à des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement). En outre, grâce à cette information complémentaire, certains îlots peuvent être découpés et les éventuels différents groupes de culture présents sur ces îlots peuvent être mieux localisés (les îlots sont transformés en parcelles accueillant une culture unique).



Figure 3. Extrait de la BD-Ortho® et superposition des îlots RPG et des parcelles MAE (campagne 2010, données MAE modifiées).

De par le caractère confidentiel des données parcellaires relatives aux MAE, la version v1 n'est diffusable que sous la forme de données attributaires agrégées, pour des études ou projets bien déterminés, avec mention au comité de pilotage de l'US-ODR. La diffusion de cette couche n'entre pas dans la convention INRA/ASP, elle relève d'accords spécifiques ou de travaux en collaboration avec l'US-ODR.

10 Sur le site ODR « portail des utilisateurs des données du registre parcellaire graphique » : rubrique Réseau Recherche / RPG.

11 Cependant, à partir de la campagne 2010, les exploitations sont anonymisées par un identifiant qui contient le numéro du département qui accueille ces îlots. Lorsqu'une exploitation possède des îlots dans plusieurs départements, celle-ci sera donc codée par plusieurs identifiants ; un dans chaque département. Il est donc impossible de construire des tables par exploitation correctes (sans doubles comptes) au-delà du niveau départemental.

12 Les mesures agro-environnementales (MAE) sont des outils issus du Règlement européen de développement rural pour la période 2007-2013 (RDR2), outils développés au niveau national dans le Programme de développement rural hexagonal (PDRH). Cofinancées par le Fonds européen agricole pour le Développement rural (FEADER, Union européenne) et une contrepartie nationale, issue du budget de l'Etat ou de collectivités, les MAE rémunèrent des agriculteurs qui s'engagent à respecter pendant 5 ans des pratiques agro-environnementales en compensant financièrement les surcoûts et manques à gagner liés à la mise en place de telles pratiques.

13 Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires, Service de la production agricole – Sous-direction des entreprises agricoles, Bureau des actions territoriales et agro-environnementale (BATA).

✓ **Version enrichie par d'autres données géographiques d'occupation du sol (v2)**

Enfin, l'US-ODR enrichit le RPG avec d'autres informations géographiques relatives à la couverture des sols, notamment hors espace agricole, telles que les routes, les surfaces en eau, etc. (disponibles grâce à la BD Topo® de l'IGN) ou encore des éléments de végétation, éléments forestiers (BD Forêt® de l'IGN¹⁴). Ces couches d'informations géographiques sont disponibles grâce au référentiel à grande échelle (RGE®) de l'IGN. Le RGE est constitué de cinq composantes dont le référentiel ortho-photographique (BD Ortho®) et le référentiel topographique (BD Topo®). Voir à ce sujet Bernier et al., 2014. Le mode de construction du RPG, digitalisation sur ortho-photographies de la BD Ortho®, lui confère une compatibilité avec l'ensemble des données du RGE® (notamment une précision spatiale équivalente). Ces informations permettent d'établir une couverture du sol hors RPG et hors surfaces agricoles non présentes dans le RPG.

Pour assurer une couverture exhaustive du sol, il est nécessaire également de renseigner les surfaces agricoles absentes du RPG et non couvertes par le RGE. Une solution est d'utiliser une carte exhaustive telle que la base de données géographique CORINE Land Cover (CLC), inventaire biophysique de l'occupation des terres en Europe¹⁵. CLC catégorise l'occupation du sol selon une nomenclature en 44 postes, mais les catégories dédiées aux territoires agricoles sont peu détaillées : *terres arables*, *cultures permanentes* (avec distinction vignobles et cultures fruitières), *prairies* et enfin *zones agricoles hétérogènes*. Comme vu précédemment cependant, les surfaces absentes du RPG concernent principalement les cultures permanentes. Même si la précision et la résolution spatiale sont moindres que celles que RPG, l'utilisation de CLC pour renseigner ces surfaces manquantes apparaît comme la solution actuelle la plus adaptée.

Cependant, ces différences de précision et de résolution spatiale génèrent des problèmes techniques d'intégration. Nous savons par exemple qu'une zone classifiée par CLC comme accueillant de la vigne (code 2.2.1) n'est pas en réalité à 100 % couverte par cette culture, mais contient vraisemblablement d'autres éléments (tels que des éléments artificialisés : bâtiment, chemin, haies, etc. ; forestiers, de surface en eau : mares, réservoirs ; etc.), ceci soit parce que leur superficie est inférieure à 25 ha, unité cartographique de la carte CLC, soit parce que provenant d'erreurs thématiques de la carte CLC : erreurs d'interprétation, changements depuis la date de création de CLC, etc.

Les surfaces dédiées à ces activités agricoles sont donc localisées grâce à CLC ; la composition exacte de ces surfaces est estimée grâce à un algorithme de répartition (non détaillé dans cet article) qui assure de retrouver les surfaces références (SAU totale) fournies par les données de la SAA au niveau départemental¹⁶.

De par le caractère non public du RGE, la diffusion de cette couche v2 n'entre pas dans la convention INRA/ASP et elle s'effectue à travers des travaux spécifiques en collaboration avec l'US-ODR. Les informations issues de la version v1 peuvent être reportées sur cette version v2.



Figure 4. Superposition des îlots RPG, de différentes couches de la BD Topo® et de la carte CORINE Land Cover.

14 Les informations de la BD Forêt® (version 2, voir IGN, 2011), depuis la fusion de l'IGN et de l'inventaire forestier national (IFN) sont incorporées peu à peu à la couche Végétation de la BD Topo® ; laquelle passe de monothématique (1 classe unique « zone arborée ») à multithématique pour décrire les espaces forestiers et semi-naturels grâce à différentes classes telles que forêt fermée de feuillus, de conifères, forêt ouverte, bois, haies, etc. C'est cette couche végétation de la BD Topo® qui est utilisée pour être superposée avec le RPG.

15 Produite, dans le cadre du programme européen de COordination de l'Information sur l'Environnement CORINE, par le Service de l'observation et des statistiques du commissariat général au développement durable du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie pour la partie française pour le compte de l'Agence européenne de l'environnement (EEA). CLC est issue de l'interprétation visuelle d'images satellitaires, avec des données complémentaires d'appui. L'échelle de production est le 1/100 000. L'année de production de la dernière version de CLC est 2006.

16 Il est à noter que les informations fournies par CLC ou par la BD-Topo® sont pluriannuelles, à la différence du RPG, et les catégories d'occupation du sol provenant de ces bases seront considérées comme stables dans le temps (sur une dizaine d'années).

Conclusions et perspectives

Le RPG est une source d'informations sur la couverture du sol agricole, de grande qualité, annuelle, permettant des études très localisées aussi bien que des analyses à grande échelle à partir de données homogènes sur le territoire. L'US ODR assure sa distribution auprès du personnel INRA et de ses partenaires, proposant trois versions différentes des données initiales fournies par l'ASP. Les versions v0 et v1 sont disponibles pour l'ensemble des campagnes : de 2006 (pour v0, 2007 pour v1) à 2012. La version v2 est en cours d'élaboration.

Un traitement dédié du RPG, réalisé par l'UMR AGIR (agroécologie-innovations-territoires, INRA Toulouse) a permis la reconstitution de séquences de culture au sein des parcelles des îlots du RPG (sur une durée de 5 ans entre 2006 et 2010, et bientôt sur 7 ans). Des indicateurs agro-environnementaux, permettant d'évaluer la diversité des assolements ou la qualité des séquences de cultures, ont été quantifiés à différents niveaux d'organisation (exploitation, territoire,...). Ces données ont également permis de conduire une analyse du niveau de diversification des cultures au sein des exploitations françaises au regard des critères de paiements directs de la future PAC (Conditionnalité PAC 2014, voir Fuzeau et al., 2012).

Les données du RPG ont également été mobilisées pour analyser l'évolution des prairies permanentes, suite à l'obligation faite par la Commission européenne aux États-membres de veiller au maintien des pâturages permanents (prairies permanentes, estives, landes) via des dispositifs politiques et financiers (Faiq et al., 2013).

Enfin, le fait que le RPG soit un ensemble de données géographiques autorise sa superposition et son croisement avec n'importe quel zonage (local ou global) ou données disponibles sous forme de données SIG. Ceci ouvre une multitude d'applications pour l'utilisation du RPG dans de nombreux domaines de recherche de l'Institut.

Références bibliographiques

Agreste (2013), *GraphAgri France 2013*, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/publications/graphagri/article/graphagri-france-2013>

ASP (2011) Mise à disposition du registre parcellaire graphique anonyme. <http://www.asp-public.fr/?q=node/856>

ASP (2011-b) Données anonymisées attachées aux surfaces objet des aides du 1^{er} pilier (dont le registre parcellaire graphique) : contenu, format et modalités de livraison, métadonnées. http://www.asp-public.fr/sites/default/files/fichiers_attaches/asp_commun/dirap/structure_detailliee_donnees_rpg.pdf

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

Faiq C, Fuzeau V, Cahuzac E, Allaire G, Bortzmeyer M, Therond O (2013) *Les prairies permanentes : évolution des surfaces en France - Analyse à travers le registre parcellaire graphique*, Collection « Études et Documents » du Commissariat général au développement durable, n° 96, 18 p.

Fuzeau V, Dubois G, Therond O, Allaire G (2012) *Diversification des cultures dans l'agriculture française ; état des lieux et dispositifs d'accompagnement*. Collection « Études et Documents » du Commissariat général au développement durable, n° 67, 22 p.

IGN (2011) BD-Topo, version 2.1, Descriptif de contenu. http://pro.ign.fr/sites/default/files/DC_BDTopo_2_1.pdf.

Kay S, Milenov P (2007) Status of the Implementation of LPIS in the EU Member States in *Proceedings of the 12th MARS PAC Annual Conference*, "Geographical Information in support of the Common Agricultural Policy", Toulouse, 2006, EUR 2160 EN, p. 41-48.

Petitjean A, de Laroche E (2007) L'utilisation des données géographiques en France pour le SIGC. In *Proceedings of the 12th MARS PAC Annual Conference*, « Geographical Information in support of the Common Agricultural Policy », Toulouse, 2006, EUR 2160 EN, p. 57-61.

Calcul et gestion par SIG des surfaces épandables

Priscilla Note¹

Résumé. L'objectif de cet article est de montrer par l'exemple les potentialités d'un logiciel SIG (système d'information géographique) tel que QGIS (quantum geographic information system). Les Unités expérimentales orientées élevage sont soumises à une réglementation précise concernant l'épandage des effluents organiques mais aussi à des contraintes naturelles. Les différentes fonctionnalités de QGIS nous permettent de calculer ces surfaces potentiellement épandables en prenant en compte l'ensemble de ces contraintes. Des cartographies thématiques peuvent ainsi être réalisées pour l'illustration de documents, les données géographiques finales des zones épandables peuvent être intégrées à des GPS (global positioning system) embarqués dans les tracteurs et permettre ainsi l'épandage sur les surfaces « éligibles » tout en respectant les bonnes distances aux éléments sensibles du paysage. Cet article n'expose qu'une partie des fonctionnalités du logiciel SIG. Il existe une large gamme d'outils de géotraitement qui peuvent répondre à de nombreux objectifs de recherche comme de terrain.

Mots clés : SIG, QGIS, données géographiques, surfaces épandables

Introduction

Cet article a pour objectif de présenter quelques fonctionnalités des SIG (systèmes d'information géographique) directement utilisables dans le cadre de la gestion d'une Unité expérimentale (UE) orientée élevage. Pour cela, nous nous intéresserons aux calculs des surfaces éligibles à l'épandage des effluents organiques sur prairies. Ces dernières sont soumises à des contraintes réglementaires mais aussi naturelles qui peuvent restreindre leur utilisation. Par exemple, selon les règles administratives (Arrêté du 7 février 2005), nous ne pouvons pas épandre de lisier à moins de 100 m des habitations et à moins de 35 m des cours d'eau. Les contraintes du relief (forte pente) et de la topographie (pierrosité, zone humide, ...) peuvent empêcher le passage de tracteurs attelés à une tonne à lisier. Concrètement il ne nous suffit plus de connaître simplement la surface totale de la parcelle mais il nous faut des données intraparcellaires pour gérer au mieux ces épandages dans le respect de la réglementation mais aussi garder une traçabilité des pratiques à des fins expérimentales.

Nous verrons qu'un logiciel SIG, tel que QGIS (quantum geographic information system) en accès libre, nous permet de calculer et de visualiser ces surfaces épandables. Cet article n'a pas vocation à être un tutorial. Il existe une large documentation sur l'utilisation des SIG disponible sur Internet (site de QGIS, SIGEA – systèmes d'information géographique pour l'enseignement agricole, ...) ainsi que de nombreux forums qui permettent de résoudre certains blocages (GeoRezo, Forumsig, ...).

Données et outils disponibles



Une large gamme de données est disponible grâce au protocole passé entre les ministères de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables (MEDAD), de l'Agriculture et de la Pêche (MAP), et l'Institut géographique national (IGN). Ainsi en tant qu'agents INRA (Institut national de la recherche agronomique), nous pouvons bénéficier sur toute la France de la BD ORTHO® (photographies aériennes orthorectifiées), de la BD SCAN® (cartes IGN au 1:25000 géoréférencées) et de la BD PARCELLAIRE® (cadastre numérisé ou scanné, et géoréférencé). Eventuellement, les parcelles ou groupes de parcelles de l'UE peuvent être téléchargés à partir du site TelePAC (www.telepac.agriculture.gouv.fr) des téléservices des aides PAC (politique agricole commune). Côté outils, un GPS (global positioning system) d'arpentage peut être utile pour pouvoir saisir directement sur le terrain les limites parcellaires du domaine et suivre leurs évolutions. Une alternative à l'utilisation du GPS est de numériser ces limites à partir d'un SIG via la BD ORTHO® cependant il sera toujours nécessaire de mettre à jour les données au fur et à mesure des modifications parcellaires. Or les campagnes de photographies aériennes sont tous les 5 ans (bientôt tous les 3 ans) et ne sont disponibles qu'un an après. En terme de logiciel SIG, deux familles existent :

1 INRA, UE1296 des Monts d'Auvergne, F-63820 Laqueuille, France ; priscilla.note@clermont.inra.fr

les propriétaires et les libres. Dans chacune des catégories, les deux SIG les plus courants sont respectivement ArcGIS d'Esri (payant) et QGIS (gratuit). Dans cet article, nous resterons sur QGIS version 1.8.0 (sachant que la version 2.0.1 est sortie depuis l'automne 2013 et est téléchargeable sur leur site).

Les différentes étapes sous QGIS pour aboutir à la donnée souhaitée

Affichage des données et systèmes de projection

Tout d'abord, à partir de l'icône , nous allons ouvrir la couche vectorielle représentant les parcelles, Parcelaire.shp (le format shapefile, .shp, a été créé par Esri puis repris largement par les autres logiciels SIG). La première étape importante est de vérifier que cette couche, Parcelaire.shp, soit lue dans son bon système de projection : en cliquant droit sur son nom, dans le menu contextuel, on sélectionne « Définir le SCR (système de coordonnées de référence) d'une couche » (**Figure 1**). Une boîte de dialogue s'ouvre dans laquelle, on choisit le bon système, ici il s'agit du Lambert 93 (système officiel pour les données sur le territoire français). Ensuite il faut définir le système de projection dans lequel on veut travailler l'ensemble des données : en cliquant sur l'icône , on définit ainsi le SCR de l'ensemble du projet. En cochant la case « Activer la projection à la volée », cela permet de superposer l'ensemble des couches ouvertes dans le projet et qui n'ont pas forcément le même SCR. Cette étape qui paraît anodine, est primordiale surtout lorsqu'il s'agit de calculer des surfaces !

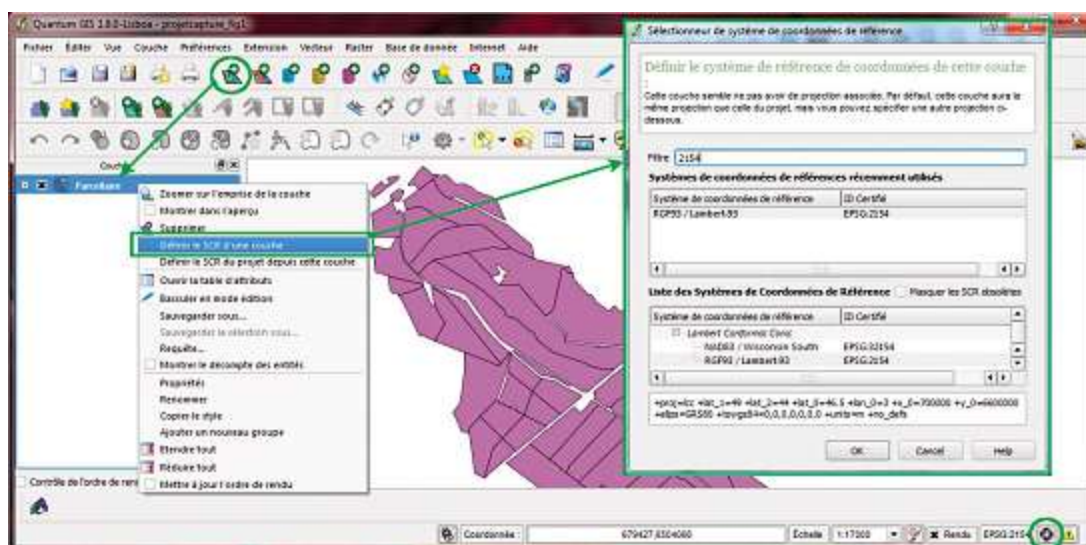


Figure 1. Affichage d'une couche vectorielle Parcelaire.shp et définition du système de projection de la couche et du projet.

Jointure de table et modification de l'aspect de la donnée

La donnée géographique est liée à une table dite attributaire qui contient toutes les informations que l'on souhaite renseigner sur nos entités géographiques, ici nos polygones mais cela peut être des lignes ou des points. Chaque ligne de la table correspond à une entité. Ainsi la table de la couche Parcelaire.shp contient un numéro unique pour chaque parcelle [LaqPrairie] et sa surface [AREA]. Mais il nous manque les noms des parcelles qui sont contenus dans un fichier du tableur Excel® Nom_Parcelle.xls. QGIS nous permet d'ajouter les données de ce fichier dans la table attributaire de notre couche à partir d'un champ commun entre les deux tables (**Figure 2**) : l'identifiant des parcelles. D'autres types de jointures existent telles que les jointures spatiales pour transférer des données entre deux couches qui se superposent.

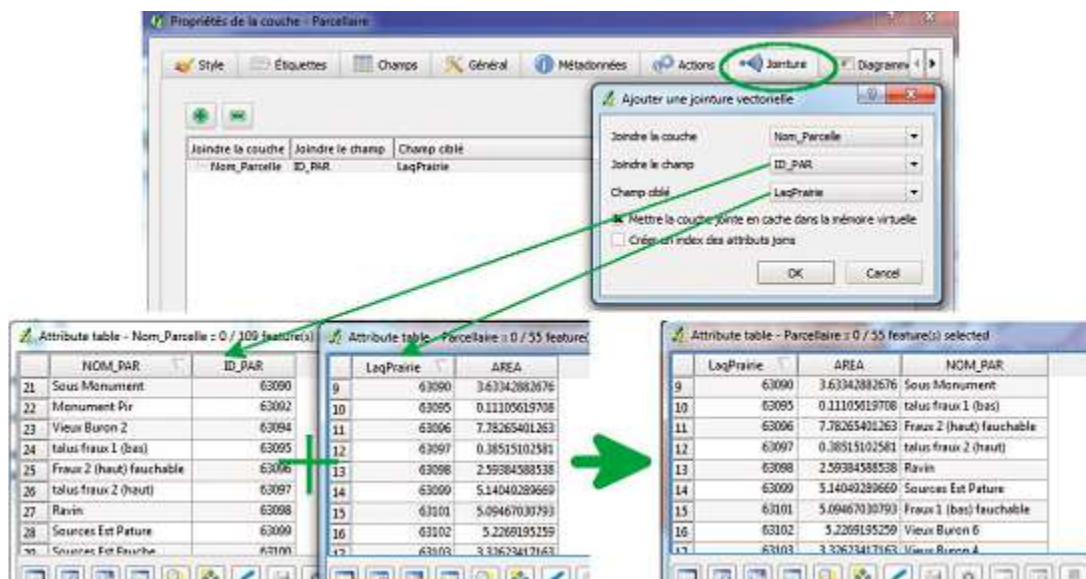


Figure 2. Ajout d'une table « Nom_Parcelle » à la table attributaire de la couche Parcelaire.shp (onglet « Jointure » de la fenêtre « Propriété de la couche » accessible en cliquant droit sur la couche).

Dans l'onglet « Style » de la fenêtre « Propriétés de la couche » (Figure 3), on peut changer l'apparence en modifiant la couleur du remplissage et/ou du trait, la transparence, ... Une légende peut être appliquée selon un champ de la table attributaire par exemple un dégradé de couleur selon la surface de la parcelle. L'onglet « Étiquettes » permet d'appliquer des étiquettes sur la carte selon le champ par exemple [NOM_PAR].

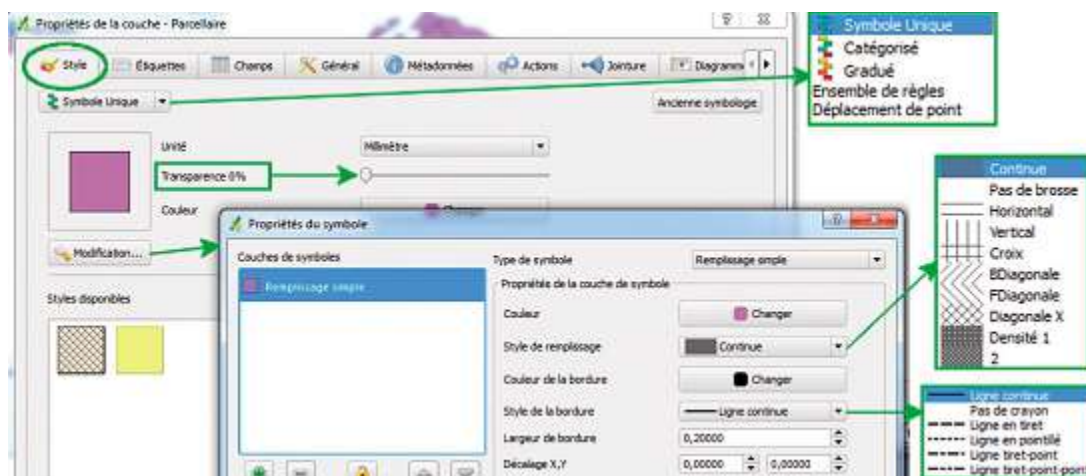





Figure 3. Modification des propriétés de style de la couche.

Numérisation et création de zones tampons : cours d'eau et habitation

L'objectif est ici de créer de la donnée géographique que nous ne possédons pas, par exemple les cours d'eau et les habitations présents dans l'environnement de nos parcelles. Pour cela, nous allons numériser ces lignes et polygones à partir d'un fond cartographique qui possède ces informations : le SCAN 25[®] de l'IGN. L'icône  nous permet d'ouvrir cette donnée qui est du type raster et se présente sous forme de dalles de 10*10 km² (pour notre zone : F063_061.tif et F063_060.tif). De la même façon, il faut définir le SCR de ces dalles pour pouvoir superposer les couches. Ensuite, l'icône  nous permet de créer une nouvelle couche soit de type point, ligne ou polygone.



Pour les rivières, nous prenons le type ligne (riv.shp) et pour les habitations, le type polygone (hab.shp). Ensuite, il faut mettre les couches en mode édition qui permet de les modifier (icône ) et la numérisation peut commencer (Figure 4). Il s'agit de « décalquer » le cours d'eau en suivant son tracé sur la couche raster.

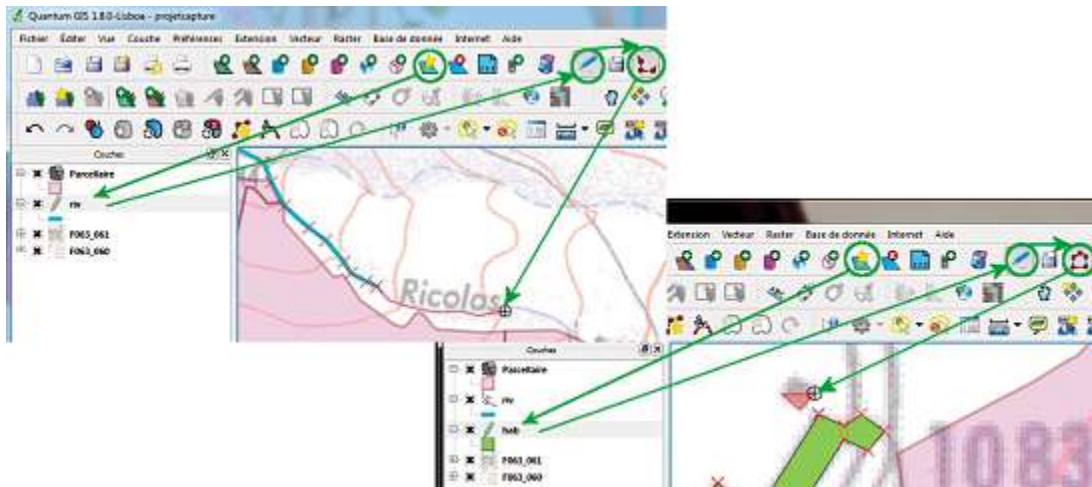



Figure 4. Création de deux nouvelles couches riv.shp (à gauche) et hab.shp (à droite) puis numérisation des entités géographiques (⊕) à partir du fond cartographique SCAN25® de l'IGN.

Une fois que ces entités sont créées par numérisation et que l'icône  est désactivée, il nous suffit de générer autour de celles-ci des zones tampon sur lesquelles l'épandage n'est pas autorisé en allant dans le menu « Vecteur » puis « Outils de géotraitement » et enfin « Tampon(s) » (Figure 5).

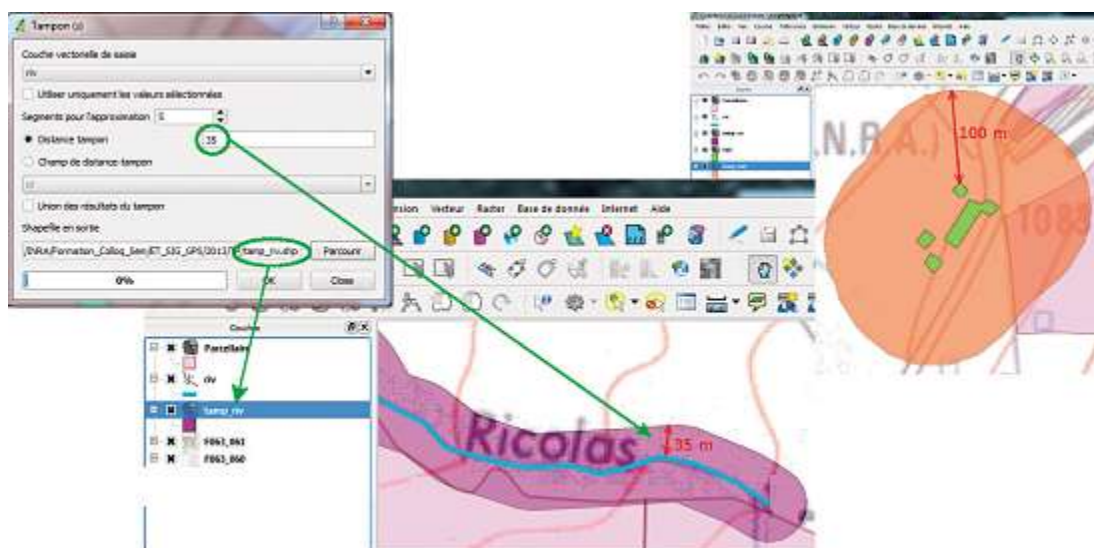



Figure 5. Création d'une zone tampon de 35 m et de 100 m respectivement autour des cours d'eau et des habitations (fond cartographique SCAN25® de l'IGN).

Géoréférencement d'images : les périmètres de captage

Le cadastre numérisé et géoréférencé de l'IGN ne tenait pas encore compte en 2008 des périmètres de captage d'eau de consommation récemment établis dans le secteur. Il a donc fallu scanner et géoréférencer les plans papiers des géomètres à l'aide de l'outil « Géoréférencer » de QGIS (icône ) en créant des points d'attache (= points de contrôle) entre le cadastre numérique (à gauche, Figure 6) et le plan scanné (à droite, Figure 6). Le

nouveau plan créé et recalé correctement par rapport à nos parcelles, reste une image et ne peut être exploité comme tel, il faut commencer un travail de numérisation en créant une couche de polygones pour représenter les périmètres de captage (capt.shp).

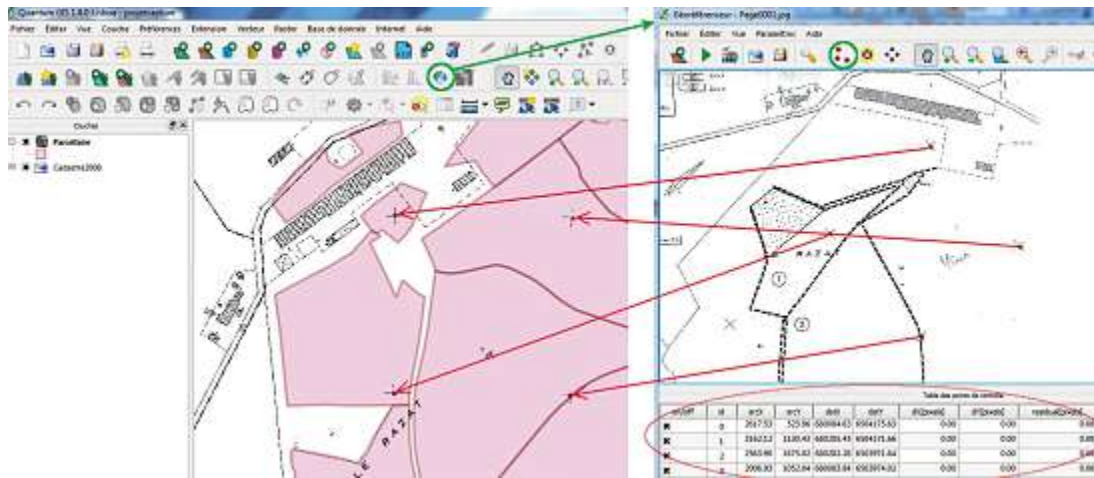


Figure 6. Géoréférencement d'un plan scanné Page0001.jpg (à droite) à partir de repères pris sur le cadastre de la BD PARCELLAIRE® de l'IGN (à gauche).

Union de l'ensemble des données créées pour obtenir les surfaces épançables

Nous avons alors plusieurs couches vectorielles de polygones : les parcelles (Parcellaire.shp), les zones tampons autour des cours d'eau (tamp_riv.shp) et des habitations (tamp_hab.shp), les périmètres de captage (capt.shp). Et enfin pour obtenir l'information sur le caractère mécanisable des parcelles (pente, pierrosité, humidité, ...), nous avons fait appel aux experts terrains et avons directement numérisé l'information sur la couche Parcellaire.shp en découpant nos polygones (→) et en rajoutant un champ () dans la table attributaire [MecaLo] = oui / non. A partir de l'outil « Union » dans le menu « Vecteur » puis « Outils de géotraitement », nous pouvons unir toutes ces couches en une seule (SurfaceEpançable.shp) ce qui permet d'obtenir des polygones qui sont oui ou non épançables, qui ne correspondent plus aux limites de parcelles mais gardent toujours l'identifiant des parcelles (Figure 7). La table attributaire de SurfaceEpançable.shp, après calcul de la surface des nouvelles entités créées (→ [Surface] = \$area / 10 000), peut ensuite être exportée sous Excel® pour la retravailler à l'aide d'un tableau croisé dynamique et obtenir pour chacune de nos parcelles, les surfaces épançables.

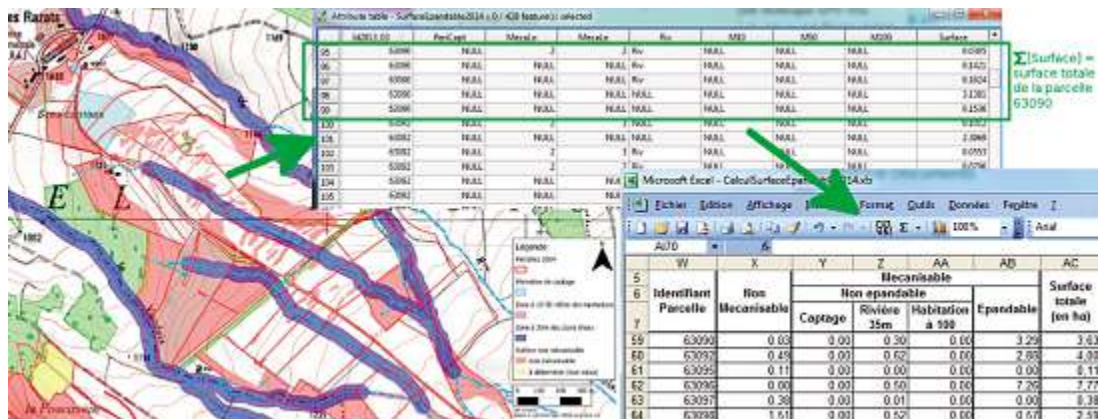


Figure 7. Carte des surfaces épançables (fond IGN SCAN25®) suite à la prise en compte de l'ensemble des contraintes et extraction des données de la table attributaire pour les retravailler sous Excel®.

Perspectives et conclusion

Suite à la création de cette donnée cartographique, il peut être envisagé d'extraire les polygones représentant les surfaces épandables et d'intégrer cette information dans un GPS embarqué sur le tracteur afin de déclencher l'épandage au bon endroit en respectant les limites réglementaires qui ne sont pas toujours visibles ou matérialisées sur le terrain.

Il existe bien d'autres fonctionnalités des logiciels SIG qui peuvent être exploitées au sein des UE et des UR (Unités de recherches) pour la gestion ou la recherche telles que le calcul de pente à partir d'un modèle numérique de terrain ou encore la géostatistique pour extrapoler sur une surface continue des données échantillonnées. Le lien possible entre les SIG et les systèmes de gestion de base de données (SGBD) tels qu'entre QGIS et PostgreSQL/PostGIS est un atout des plus intéressants pour, à terme, enregistrer et gérer l'ensemble des données concernant les pratiques agricoles d'une UE.

Références bibliographiques

Ministère de l'Ecologie et du Développement durable. *Arrêté du 7 février 2008 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les élevages de bovins, de volailles et/ou de gibier à plumes et de porcs soumis à autorisation au titre du livre V du code de l'environnement*, [en ligne]. http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=505B9F42FB183F0CBEA34DBF4DF84308.tpdjo12v_3?cidTexte=JORFTEXT000000258961&dateTexte=20131114 [consulté le 14 novembre 2013]

QGIS. *QGIS, Système d'Information Géographique Libre et Open Source*, 10 novembre 2013 [en ligne]. <http://www.qgis.org/fr/site/> [consulté le 14 novembre 2013]

QGIS. *Manuel d'utilisation de QGIS*, 16 novembre 2013 [en ligne]. http://www.qgis.org/fr/docs/user_manual/index.html [consulté le 14 novembre 2013]

Sigea. *Fiche d'aide à l'utilisation de QuantumGIS (QGIS)*, novembre 2013 [en ligne]. <http://sigea.educagri.fr/ressources-pedagogiques/utilisation-des-logiciels/tutoriels-de-logiciels-gratuits/tutoriels-qgis.html> [consulté le 14 novembre 2013]

GeoRezo. *Georezo, Le portail francophone de la géomatique*, [en ligne]. <http://georezo.net/forum/> [consulté le 14 novembre 2013]

forumSIG. *forumSIG, Système d'Information Géographique et Géomatique*, [en ligne]. <http://www.forumsig.org/forum.php> [consulté le 14 novembre 2013]

Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Institut Géographique National. *Protocole MEDAD – MAP – IGN*, 24 juillet 2007.

SIGMA, un websig sur mesure de gestion des données des expérimentations-système

Julien Ancelin¹, Olivier Schmit¹

Résumé. La cartographie, à l'image d'autres activités de service, n'a pas échappé au développement de l'Internet. L'accès à l'information géographique s'est depuis peu largement démocratisé, propulsant la cartographie sur le Web comme une tendance incontournable. Webmapping et websig sont synonymes de cartographie dynamique où l'utilisateur interagit avec différentes applications via Internet. Au sein de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), ces outils se développent et il devient possible, au champ comme au bureau, d'accéder aux données expérimentales en ligne. SIGMA (système d'Information géographique en marais) est un outil Web collaboratif pour la saisie et la gestion de données spatialisées. Conçu pour l'expérimentation-système (ES) nommée Transi'marsh² de l'Unité expérimentale de Saint Laurent de la Prée (INRA), il centralise et pré-analyse automatiquement les données sous forme de graphiques et de cartes dynamiques et sert d'appui à la production d'analyses multicritères. Élaboré avec des outils Open Source adaptables aux besoins de chaque dispositif expérimental, SIGMA a pour vocation de mieux maîtriser la chaîne d'acquisition et de valorisation des données. Il est en passe d'être utilisé par d'autres expérimentations-système de l'INRA.

Mots clés : webmapping, websig, expérimentation-système, système d'Information géographique

Introduction

L'accès à l'information spatiale s'est récemment démocratisé ; auparavant, l'outil cartographique était limité aux intérêts des États, d'entreprises et d'organismes spécialisés et nécessitait des compétences et des moyens la rendant inaccessible au plus grand nombre. Aujourd'hui, les données cartographiques et la géolocalisation sont accessibles grâce aux navigateurs web et aux GPS (global positioning system) qui équipent désormais la majorité des terminaux portables de communications (e.g. smartphone). De nombreux services web cartographiques sont apparus, mettant à disposition des cartes et images de référence (réseau routiers, images satellite et aériennes). Ces services sont appuyés par des organisations (OGC³ et OSGeo⁴) qui ont un rôle de normalisation mais aussi par les États et les collectivités territoriales qui fixent le cadre légal et donnent accès aux données publiques (géoportails nationaux et régionaux, CNIG⁵ et directive Inspire). Les outils de cartographie en ligne offrent de plus en plus de possibilités d'animation et d'interaction pour l'internaute. Les formats sont devenus interopérables, de sorte que les données peuvent être partagées, échangées et modifiées par différents groupes ou organisations.

L'évolution des technologies de l'information est une opportunité dont il faut se saisir à l'INRA et plus particulièrement pour le développement des expérimentations-système en agro-écologie (Durant et Kernéis, 2010) dans les Unités et Installations expérimentales. En effet, ces dispositifs sont caractérisés par la collecte importante de données disparates (Trommenschlager et al., 2010). Or, les systèmes d'Informations existants au sein de l'Institut sont segmentés par champs scientifiques (végétal/animal, e.g. Agrosyst, logiciels Isagri[®], Margau) et se sont révélés peu adaptés pour traiter nos données pluridisciplinaires spatialisées, que ce soit i) des données issues des relevés et/ou mesures de terrain et destinées à construire une série d'indicateurs agro-environnementaux qui sont souvent spécifiques à chaque dispositif, ou ii) des données externes, issues de référentiels communs. A ces données biotechniques s'ajoutent des données d'ordre qualitatif issues des choix techniques et opérationnels relevant de règles de décisions fixées au préalable, mais aussi de choix subjectifs relevant de l'expertise des opérateurs.

Pour répondre à ces besoins, les informaticiens de l'Unité expérimentale de Saint Laurent de la Prée ont construit SIGMA, un web SIG (Bouquet, 2013) spécifique et adapté aux contraintes de notre expérimentation-système mais qui s'appuie sur des outils utilisés au sein de l'Institut : fiabilité et durabilité pour la gestion des données (PostgreSQL/PostGis/SQLite), souplesse et rapidité d'adaptation pour l'interfaçage (Wavemaker/LizMap), autonomie et portabilité pour la saisie au champ (FieldBook[®]/Android[®]).

1 INRA, UE 0057DSL, F-17450 St Laurent de la Prée, France ; olivier.schmit@stlaurent.lusignan.inra.fr

2 Transi'marsh : transition agro-écologique en marais – Concevoir et évaluer un système agricole en marais, autonome et favorable à la biodiversité

3 OGC : Open geospatial consortium

4 OSGeo : Open source geospatial foundation

5 CNIG : Conseil national de l'information géographique

Depuis peu, la valorisation de cette “suite logicielle” a été engagée dans le cadre du Cati-Action⁶ dont un des rôles est de mutualiser et de développer des méthodes, techniques et outils informatiques centrés sur l’analyse des systèmes socio-écologiques et des systèmes socio-techniques.

Matériel et Méthode

Webmapping vs websig ?

Les solutions de cartographie et de SIG⁷ en ligne ont fait leur apparition depuis une dizaine d’années. Toutefois, elles ne sont entrées en concurrence avec les solutions logicielles sur poste de travail que relativement récemment. L’offre en ligne n’est donc pas encore aussi diversifiée et reste relativement complexe à mettre en œuvre de manière autonome.

Par webmapping, on entend la diffusion par le biais d’un site web de données cartographiques. Une application de webmapping permet *a minima* de représenter à la demande des données géographiques (choix des couches, choix de l’emprise géographique) et d’afficher la carte dans un navigateur. Elle permet d’effectuer des mesures géométriques sur les objets cartographiés, d’interroger les données et d’imprimer des cartes.

Le websig est similaire au webmapping mais offrant un panel de possibilités plus complet tel que la saisie et la modification de données et le traitement de géodonnées. Ainsi, un utilisateur peut produire de manière autonome des cartographies basées sur les données qu’il vient de saisir et éditer des cartes qu’il crée à partir de requêtes prédéfinies.

Architecture Web

Ces solutions Web ont reposé dans un premier temps sur des architectures client-serveur classiques puis depuis récemment sur des architectures orientées services. Elles ont permis de mettre le SIG à la portée d’une communauté large d’utilisateurs et pour certaines d’entre elles à la portée du grand public. Par nature, le Web permet l’acheminement d’un document hypertexte qui peut contenir des images mais aussi des cartes. Le client est un navigateur capable d’interpréter du code HTML⁸ et le serveur est une machine qui stocke des documents et à la fois exécute des programmes qui renvoient les documents au client.

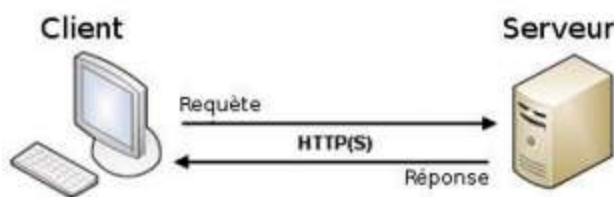


Figure 1. Architecture client/serveur.

En cartographie dynamique, le document est produit à la demande en fonction de critères fixés par le client ; dans ce cas, le client accède à un programme distant chargé de générer le document et de le renvoyer. Cette apparente simplicité cache une architecture logicielle multi-couches ainsi qu’une diversité de solutions techniques possibles (Jégou, 2013). La **Figure 2** montre les principaux éléments d’une architecture Web orientée service spécialisée en information géographique (également appelée IDS⁹) et liste les principaux logiciels et applications du marché.

6 Le Cati-Action est le centre automatisé de traitement de l’information portant sur Acteurs, Changements Techniques, Informatique et Outils Numériques. Il est piloté par le Département SAD (Département Sciences pour l’action et le développement) de l’INRA. Pour en savoir plus, consultez : <https://intranet6.inra.fr/sad/Catis/Le-Cati-Action>

7 SIG : système d’information géographique

8 Hyper text markup language : format de données conçu pour représenter les pages Web

9 IDS : infrastructure de données spatialisées

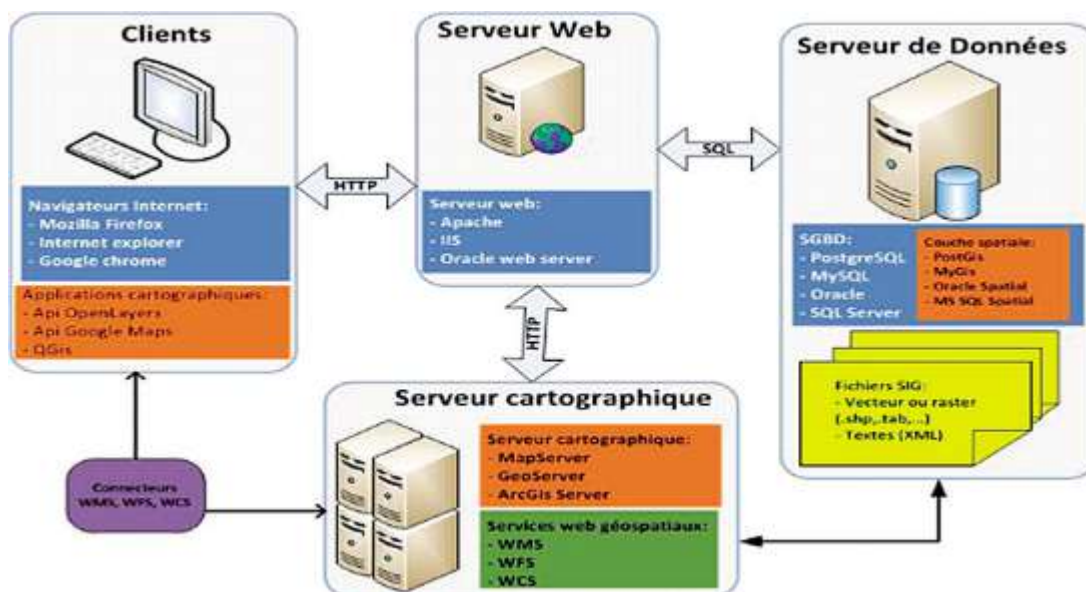


Figure 2. Architecture orientée service-exemple d'une infrastructure de données spatialisées.

Géolocalisation et transfert de données au champ

Les technologies actuelles de géolocalisation (cf. Lahaye et Ladet, 2014 article sur GPS - SBAS¹⁰) et de transmission de données (3G & 4G, WiMAX) permettent d'envoyer la position géographique d'un objet (e.g. un véhicule, un animal, ...) en temps réel sur un serveur, ainsi qu'un certain nombre d'informations annexes également communiquées par des capteurs terrain (identifiant de l'objet, nature, date et heure,...). Les données reçues par le serveur sont qualifiées et archivées. Elles peuvent être stockées directement dans des formats vectoriels de type XML¹¹ ou JSON¹², prétraitées et converties en images, ou encore, et c'est le cas le plus fréquent, insérées dans une base de données spatiales (e.g. PostGIS). L'opération d'écriture étant très brève, elles peuvent, en quasi temps réel, être diffusées vers des clients (Figure 3) à l'aide des solutions de transmission de données évoquées ci-dessus.



Figure 3. Accès au websig SIGMA via 3G+ sur un smartphone.
© Julien Ancelin - INRA

10 SBAS : satellite-based augmentation system

11 XML : extensible markup language

12 JSON : JavaScript object notation

Les outils utilisés pour le websig SIGMA

Le projet SIGMA a été créé en 2010. Il s'appuie sur les savoir-faire des géomaticiens¹³ de l'Unité de Saint Laurent de la Prée ainsi que sur une infrastructure informatique de site rénovée en 2012. Bien que faisant partie du projet initial, le volet websig de SIGMA n'a été déployé qu'au début de l'année 2013, ce dernier module venant compléter la suite logicielle pour l'expérimentation-système. En gage de durabilité, nous avons choisi des outils Open Source qui sont soutenus par une communauté active et établie. Notre choix s'est porté sur QGIS (QuantumGIS) et "ses" plugins recommandés par l'OSGeo. Lizmap-plugin est développé par la société 3Liz qui est l'un des contributeurs « officiel » du SIG Open Source QGIS. Les différentes couches applicatives du websig peuvent être décrites par le prisme client/serveur :

Côté client

- Qgis 2.0, un SIG généraliste sur poste de travail mais simple d'accès, distribué sous licence publique générale GNU¹⁴. C'est l'un des projets soutenu par la fondation Open Source Geospatial (OSGeo). Logiciel multiplateforme, il est compatible avec Linux®, Unix®, Mac OS X®, Windows® et Android® et intègre de nombreux formats vectoriels et raster. Il permet de créer les cartographies en prise directe avec la base de données centrale (postgresql/postGIS) avec la performance et la richesse fonctionnelle d'un SIG de bureau.
- Lizmap-plugin, le plugin pour QGIS (Douchin, 2013b), permet de configurer sa carte avec les données du projet (nom, description, étendue, projection, etc.), les couches (popup, fonds de carte, regroupement de couches, tuilage, mise en cache), les données associées aux couches (organisation hiérarchique, nom, seuils de visibilité, symbologie, étiquettes), les métadonnées (titre, résumé, lien) et les paramètres des cartes (échelles, fonds externes). L'ensemble de ces paramètres, qui sont stockés dans un fichier, seront utilisés pour visualiser les cartes dans le navigateur web.

Côté serveur

- Qgis_mapserver, ce nouveau serveur cartographique s'appuie sur le rendu du logiciel bureautique et permet de configurer toutes les caractéristiques de ses cartes directement avec Qgis : symbologie, étiquettes, seuils d'échelle, etc. En comparaison avec l'écriture à la main du fichier de configuration d'un Mapserver ou d'un Mapnik, le travail est simplifié.
- Lizmap-web-client est l'outil de websig (Douchin, 2013a), lorsque la synchronisation des fichiers créés est terminée, la carte QGIS est alors accessible sur Internet à l'identique. Elle est consultable sur l'application LizMap Web Client au travers des navigateurs majeurs (Firefox, Safari, Chrome, Internet Explorer).



Figure 4. Schéma simplifié de l'architecture logicielle websig SIGMA.

Résultats

Le projet SIGMA a été initié en 2010. La première phase a consisté à déployer un premier bloc d'outils composés du système de gestion de base de données (SGBD) et des interfaces graphiques pour accueillir les données produites par l'expérimentation. La seconde phase, en 2013 a été consacrée au déploiement du websig. Les utilisateurs finaux (expérimentateurs et scientifiques) disposent aujourd'hui d'une dizaine d'interfaces cartographiques avec lesquels il peuvent saisir, modifier et exploiter leurs données.

13 Géomatique / Géomaticien : contraction des termes « géographie » et « informatique », la géomatique regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer des données géographiques. Le géomaticien, spécialiste de la géomatique tient du géographe et de l'informaticien. L'équipe informatique allouée au projet SIGMA représente environ 1 ETP/an : Julien Ancelin conçoit, développe, administre les SI de l'UE (0,5 ETP/an) et encadre les travaux de Claire Bouquet stagiaire en licence Pro SIG 2013 (0,4 ETP/an). Olivier Schmit coordonne et valorise (0,1 ETP/an) les travaux de l'équipe. L'infrastructure informatique de l'UE est composée de quatre serveurs (dont deux hébergent les applications SIGMA) qui sont administrés par l'EIC Poitou-Charentes.

14 GNU / General Public Licence : licence des logiciels libres du projet GNU (GNU's Not UNIX)

SIGMA présente une architecture en trois modules :

- un modèle logique qui répond aux exigences de chacune des disciplines expérimentales mobilisées (écologie, agronomie, zootechnie...) et qui permet de mettre en relation les données. Les objets géographiques (e.g. parcelles culturales) constituent le cœur de la structuration des données. Celles-ci, généralement organisée par disciplines, représentent une arborescence qui est contrainte en fonction des besoins exprimés par les utilisateurs et du langage d'interrogation (SQL) ;
- un espace de stockage continu et durable de l'ensemble des données collectées et/ou produites sur le domaine (e.g. itinéraires techniques, flore et faune sauvage, données zootechniques, mesures issues de la gestion hydraulique, règles de décision...) sous PostgreSQL/PostGIS ;
- un couplage à des formulaires, interfaces cartographiques (**Figure 5**) et à des outils de traitement statistiques pour pré-analyser automatiquement les données sous forme de graphiques ou de cartes thématiques dynamiques (**Figure 6**).

Un accès web sécurisé et personnalisé, une interface simple et intuitive, permettent à chaque acteur de l'expérimentation-système, sans formation en géomatique, de se connecter à la base de données centrale pour y saisir, visualiser et/ou éditer ses propres données ainsi que l'ensemble des données brutes ou élaborées du dispositif. SIGMA est également conçu pour être accessible à des scientifiques extérieurs travaillant en collaboration avec l'Unité.

Actuellement, nous mettons en œuvre la dernière étape du développement du module websig. La fondation LISEA Biodiversité vient de nous financer l'acquisition d'une tablette durcie FieldBook® équipée d'un récepteur GPS et d'une carte Sim 4G. Désormais, les expérimentateurs se connectent directement à SIGMA *in situ*.

Pour les utilisateurs finaux, qu'ils soient expérimentateurs ou scientifiques, un des avantages du websig réside dans la production de cartes qu'ils peuvent éditer de manière autonome. Autre élément important, le couple websig/tablette durcie vient parfaire l'objectif de fiabilisation de la saisie des données expérimentales. Il élimine l'étape « saisie papier » ainsi que l'utilisation de portables (ou PDA) de terrain devant être synchronisés. Cela décharge d'autant le gestionnaire du SI qui n'est plus sollicité pour produire des cartes « basiques » et veiller à la bonne synchronisation des données. Il peut alors concentrer son activité sur des requêtes d'interrogation plus complexes mobilisant des méthodes statistiques et d'analyse spatiale. Pour les scientifiques, le websig met à leur disposition les informations spatialisées du dispositif expérimental, ce qui en facilite sa gestion et son pilotage. Au-delà, l'enjeu est de servir l'analyse multicritère du système testé à Saint Laurent de la Prée en l'appréhendant par l'approche géographique.



Figure 5. Observations avifaune sauvage 2009/2012.
© Julien Ancelin - INRA

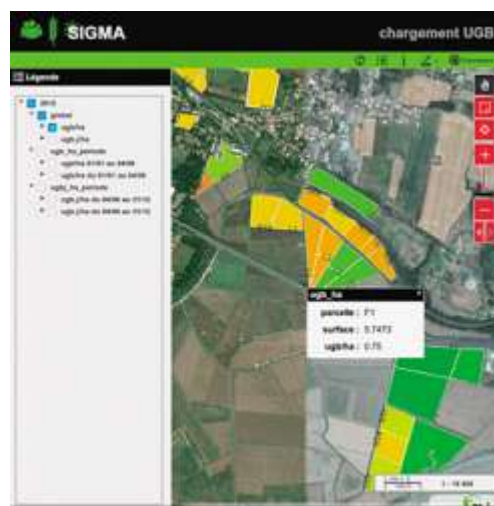


Figure 6. Calcul dynamique de chargement en UGB/ha.
© Julien Ancelin - INRA



Conclusion

Cet outil collaboratif et évolutif, conçu avec des outils de développement Open Source adaptables, est un prototype permettant de construire un websig « sur mesure » en quelques mois. Depuis début 2014, sa valorisation sous forme d'infogérance¹⁵, est portée par les géomaticiens de l'Unité. Ainsi, dans le cadre de l'UE, nous construisons le nouveau SIG de l'Unité d'Entomologie au Magneraud. Il s'agira de tester la portabilité des outils SIGMA au regard de nouvelles thématiques scientifiques et contraintes organisationnelles. Plus largement à l'INRA, nous travaillons pour le Cati-Action dont le rôle est de mutualiser et de développer des méthodes, techniques et outils informatiques centrés sur l'analyse des systèmes socio-écologiques et des systèmes socio-techniques. L'objectif est de proposer un accompagnement aux Unités expérimentales engagées en expérimentation-système pour construire le système d'Information géographique répondant à leurs besoins et pour en assurer l'évolution dans le temps. Prochainement, l'UE d'Alenya-Roussillon qui étudie des systèmes maraîchers sous abris en région méditerranéenne, devrait bénéficier de ces services.

Références bibliographiques

Bouquet C (2013) Déploiement du Web Sig SIGMA pour l'expérimentation système de Saint-Laurent de la Prée (17) Rapport de stage, Université de La Rochelle.

Douchin M (2013a) L'application Lizmap Web Client. <http://docs.3liz.com/fr/lizmap-web-client/index.html> (dernière consultation le 18/04/2014).

Douchin M (2013b) Le plugin Lizmap pour QGIS. <http://docs.3liz.com/fr/lizmap-plugin/index.html> (dernière consultation le 18/04/2014).

Durant D, Kerneis E (2010) Contribution of a system experiment in designing a mixed crop-livestock farming system [...]. In : Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food - Actes du symposium ISDA 2010 (p.4 p.). Presented at ISDA 2010 - Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food, Montpellier, FR (2010-06-28 - 2010-07-01). CIRAD, INRA, Montpellier Supagro.

Jégou L (2013) Applications OpenSource et gratuites de WebMapping. http://www.geotests.net/cours/sigma/webmapping/2013/schema_tableau6_webmapping2013fr.pdf (dernière consultation le 18/04/2014).

Lahaye R, Ladet S (2014) Les principes du positionnement par satellite : les GNSS. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé pp. 9-18.

Trommschlagel J-M, Gaujour E, Fontana E, Harmand M, Foissy D, Huguet J, Bazard C (2010) Gérer et organiser les données agricoles et de recherche d'un site expérimental. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, **69** : 5-27.

15 Infogérance : service d'externalisation informatique dans le cadre d'un contrat pluriannuel qui vise à confier à un prestataire informatique la conception, la gestion et l'exploitation de tout ou partie d'un système d'information (norme AFNOR Z 67 801-1).

/ Chapitre 3 /
GPS piéton ou embarqués
Pour l'arpentage,
l'aide à la conduite ou
le pilotage des essais



Source : John Deere



Source : Francis Decuq

Les solutions mobiles d'arpentage : de la solution topographique à la solution cartographique

Julien Iyer¹, Hervé Wysocinski¹, Guillaume Labrie², Priscilla Note³

Résumé. Différentes solutions de GPS (global positioning system) mobiles d'arpentage sont disponibles sur le marché pour permettre de répondre à nos objectifs de tous les jours au sein des Unités expérimentales à l'INRA par exemple pour l'implantation de microparcelles, la réalisation d'un plan d'échantillonnage en plein champ, la pose de capteurs, la gestion des limites de parcelles agricoles. A travers la présentation d'une large gamme d'outils de la marque Trimble diffusés par deux fournisseurs, Geomesure et D3E Electronique, on peut constater que le choix d'un outil d'arpentage se réfléchit selon plusieurs critères : la précision (du mètre au centimètre), la nature du terrain (milieu forestier, urbain, champ ouvert), le mode de correction (avec ou sans correction différentielle, en temps réel ou post-traitement), l'ergonomie et les fonctionnalités du logiciel disponibles directement sur le terrain (simple mesure de points ou véritable SIG embarqué ; SIG : système d'information géographique).

Mots clés : GPS mobile, arpentage, SIG, topographie, GNSS

Introduction

De l'implantation de microparcelle à la gestion des limites de parcelles agricoles en passant par le prélèvement d'échantillons ou la pose de capteurs en plein champ, les GPS (global positioning system) d'arpentage sont des outils qui peuvent nous être fort utiles au sein de l'INRA pour localiser, implanter, mesurer, calculer et gérer directement sur le terrain des données géographiques. Différentes solutions nous sont proposées par les fournisseurs allant de la solution topographique (précision inférieure au cm) à la solution cartographique (précision centimétrique à métrique avec une gestion cartographique poussée des données). A travers la présentation des gammes de matériels mobiles (récepteurs et terminaux de saisie) et logiciels embarqués proposés par deux fournisseurs qui ont participé aux écoles techniques GPS-SIG, Geomesure et D3E Electronique, nous allons explorer les caractéristiques qui peuvent guider nos choix selon nos besoins.

Récepteurs GNSS et terminaux de saisie

Les critères déterminant le choix d'un récepteur GNSS (global navigation satellite system) sont la précision recherchée, la sensibilité (capacité à travailler dans des environnements plus ou moins sévères, l'éventuelle source de correction différentielle temps réel envisagée et l'ergonomie. Il est également essentiel que les phénomènes de multitrajets, c'est-à-dire la réflexion des signaux satellites sur tous les obstacles environnants : arbres, bâtiments, mais aussi sol, etc.) soient corrigés. Le terme GNSS désigne l'ensemble des constellations satellite dédiées au positionnement : GPS (Etats-Unis), Glonass (Russie), Galileo (Europe), Beidou (Chine), QZSS (Japon).

La précision et la sensibilité d'un récepteur dépendent de l'usage auquel le destine son constructeur. La précision dépend de sa capacité à travailler sur le « Code » ou sur la « Phase » des signaux GNSS (mono ou bi-fréquence). Des traitements particuliers permettent d'adapter le récepteur à des environnements spécifiques, tels que la technologie DeltaPhase (capacité à travailler avec des PDOP (position dilution of precision ou coefficient d'affaiblissement de la précision : qualité de la géométrie de satellites), des SNR (signal to noise ratio : rapport signal/bruit) ou des masques d'élévation extrêmement tolérants, tout en maintenant la précision, ou la technologie Floodlight (traitement poussé des multitrajets, contrainte d'altitude par capteur barométrique...). Ces technologies ne révèlent leur intérêt que dans les environnements difficiles (forêt, bordure d'arbres, milieu urbain...). Les précisions fournies par un récepteur GNSS s'étendent de +/- 5 m en XY en mode « autonome » (sans correction)

1 D3E Electronique, Parc du Grand Troyes, 3 Rond-Point Winston Churchill, CS70055, F-10302 Sainte-Savine Cedex, France ; www.d3e.fr, auteurs pour correspondance : julien.iyer@d3e.fr; herve.wysocinski@d3e.fr

2 GEOMESURE, 560 rue Henri Farman, F-34430 Saint Jean de Vedas, France ; www.geomesure.fr (Zone Sud)
GEOTOPO - ZAC des Grillons, 208, rue de l'Ancienne Distillerie, F- 69400 Gleizé, France ; www.geotopo.fr (Zone Centre, Nord, Est)
TOPO + 32 rue de la Libération, F- 44110 Chateaubriant, France ; www.topo.fr (Zone Ouest)

3 INRA, UE 1296, UE des Monts d'Auvergne, Les Razats, F-63820 Laqueuille, France

jusqu'à +/- 1 cm XY en mode « différentiel » (suivant le mode de correction (temps réel ou post-traitement, sur le Code ou sur la Phase et la technologie retenue). La précision altimétrique est généralement 1,6 fois moins bonne que la précision planimétrique.

Les deux fournisseurs Geomesure et D3E Electronique présentent ici les produits de la marque Trimble qu'ils distribuent et nous montrent pour le premier des solutions topographiques (Trimble Survey) et pour le second des solutions cartographiques (Trimble Mapping and GIS), les deux sous environnement Windows mobile.

Solutions topographiques de Geomesure

Le matériel de relevé topographique (précision inférieure au centimètre) est toujours composé de ces deux éléments majeurs : le récepteur GNSS généralement fixé en haut de la canne et le terminal de saisie (ou contrôleur ou carnet de terrain).

Le Trimble R10 proposé (**Figure 1**), entre autres, par Geomesure est capable de continuer à fonctionner en précision centimétrique même après une coupure de la réception des données de correction différentielle temps réel. Ainsi, lors de relevés réalisés dans les zones où la téléphonie est mauvaise, le récepteur continue à fonctionner malgré les microcoupures data. Le R10 a également une fonctionnalité intéressante pour réaliser des mesures en terrain peu accessible : il est capable de mesurer l'inclinaison exacte de la canne et d'interpoler l'enregistrement à la verticale à l'aide de son système interne de bulle électronique de précision, d'un gyroscope et d'un accéléromètre (**Figure 2**). L'utilisateur contrôle sa position à l'aide de la bulle électronique affichée sur son carnet : la prise de points dans les fossés ou cours d'eau n'est plus une difficulté.



Figure 1. Trimble R10.



Figure 2. Utilisation du Trimble R10 à distance avec la canne inclinée.

Solutions cartographiques de D3E Electronique

Les solutions proposées par D3E Electronique sont des récepteurs GNSS intégrés dans un terminal de saisie : récepteur interne. Selon le matériel, la précision est de l'ordre du mètre, du décimètre ou du centimètre. La gamme Juno offre des précisions allant de 1 à 4 m. Les gammes Trimble Geo 6000, Geo 7X et PRO donnent des précisions de 50 à 1 cm en utilisant pour certains des technologies telles que Floodlight, distancemètre, inclinomètre et compas intégrés permettant d'évoluer dans des milieux difficiles. Autre produit, la tablette PC Yuma 2 est un véritable ordinateur de poche avec une précision du récepteur interne de 2 à 4 m.

Les critères qui déterminent le choix d'un terminal de saisie sont la taille de l'écran et sa visibilité dans des conditions de luminosité très variées en extérieur (qui conditionne l'ergonomie de l'appareil, sa compacité, son poids...), la capacité mémoire, la performance du processeur et la taille de la mémoire vive, le système d'exploitation, l'autonomie électrique et le prix. Un récepteur GNSS pourvu de son terminal de saisie est compact, n'utilise qu'une seule batterie à charger et qu'une seule éventuelle extension de garantie à souscrire, au choix de l'utilisateur.

Les capacités des terminaux Trimble sous environnement Windows Mobile permettent généralement d'utiliser des arrière-plans Raster (« image ») pouvant atteindre 1 Go environ, en une comme en plusieurs dalles, et des fichiers « vecteurs » de 10 000 à 15 000 entités. Ces performances dépendent également beaucoup des performances du logiciel de saisie.

Solutions mixtes

Certains terminaux de saisie avec un récepteur interne peuvent fonctionner avec un récepteur externe pour en améliorer la précision jusqu'au centimètre et permettent une plus grande souplesse d'utilisation. Les récepteurs Trimble GEO XR (**Figure 3**) proposé par Geomesure, GeoXH6000 et Geo 7X (**Figure 4**) proposés par D3E Electronique peuvent effectivement être utilisés dans différentes configurations. Ce choix dépendra de la précision voulue. Lorsqu'ils sont utilisés en RTK (real time kinematic) sur la canne avec une antenne vissée en haut de celle-ci, ces récepteurs apportent une précision centimétrique de l'ordre de 10 mm en horizontal et de 15 mm en vertical. S'ils sont utilisés sans l'antenne externe et sur une mini canne, alors le récepteur GNSS apporte une précision attendue de l'ordre de 25 mm en horizontal et de 40 mm en vertical. Ils peuvent enfin être tenus à la main, la précision attendue sera également de 25 mm en horizontal et de 40 mm en vertical mais elle dépendra surtout de l'habileté de son utilisateur à bien le positionner.



Figure 3. Trimble GEO XR.



Figure 4. Trimble GEO 7X.

Logiciels disponibles dans le terminal de saisie

Solution topographique de Geomesure : logiciel Trimble Access

Trimble Access (**Figure 5**) permet de lever des points (**Figure 6**), de mesurer des surfaces et de les subdiviser, de faire des calculs de points sur le terrain (division d'une droite en plusieurs segments de longueur identique...), d'implanter des points provenant d'un fichier lié ou provenant d'un calcul réalisé sur le terrain. Toutes les opérations sont directement visualisées sur le terrain grâce au large écran d'affichage. Il est possible d'importer et d'exporter les points relevés dans la plupart des formats de fichiers disponibles sur le marché (CSV, SHP, KML, GPX...).





Figure 5. Copie de l'écran d'accueil du logiciel Trimble Access.

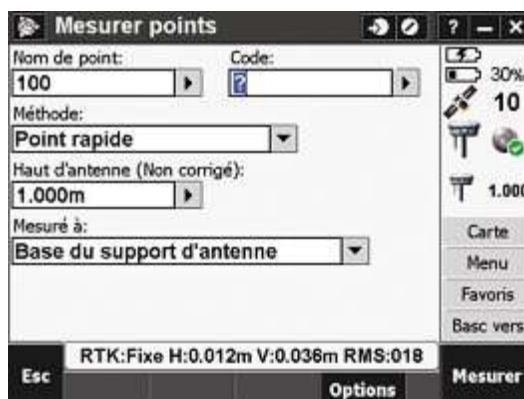


Figure 6. Copie d'écran du logiciel Trimble Access : fonction « Mesurer points ».

L'interface utilisateur, complètement en Français, (Figure 7) est très claire et conviviale, avec une prise en main très rapide. Quelques clics suffisent pour démarrer une étude, la gestion des fichiers liés (images d'arrière-plan, fichiers vectorisés, points à implanter) est également très simple. Trimble Access permet de mettre en arrière-plan des images géo-référencées, des fichiers DXF (drawing exchange format, format de fichier DAO, dessin assisté par ordinateur) en couleur, les fichiers de type SHP (shapefile, format standard en SIG) sont également acceptés.

Lors de l'utilisation d'un fichier ou d'une image en arrière-plan (Figure 8), l'emplacement de l'utilisateur est symbolisé sur la carte en temps réel par une croix, il est possible de zoomer jusqu'à une échelle de 1/1 (1 cm sur l'écran = 1 cm en réalité). Les points à implanter, comme par exemple des tubes d'échantillonnage, seront faciles à retrouver : il suffira de cliquer sur le point puis de sélectionner « implanter », l'interface graphique vous guidera jusqu'au tube, et ceci avec une précision centimétrique en temps réel.

Lors du relevé, l'interface utilisateur permet de contrôler en permanence le nombre de satellites disponibles, les niveaux de batteries carnet et récepteur ainsi que la précision et la qualité du RTK. L'appui sur le bouton « enter » du carnet ou sur l'écran tactile dans la zone « mesurer » qui se trouve en bas à droite de l'écran permet de stocker le point.

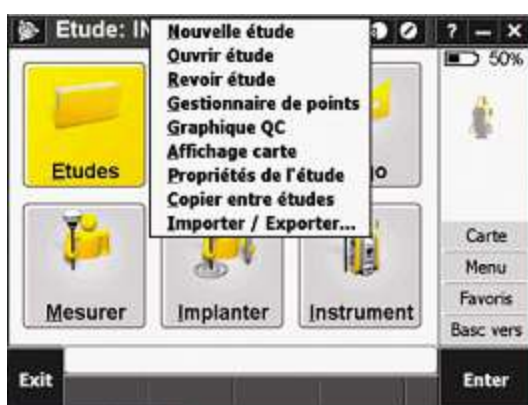


Figure 7. Copie d'écran du logiciel Trimble Access : menu déroulant de gestion d'une étude.



Figure 8. Utilisation d'arrière-plan sur Trimble Access. Gauche : couche vecteur (polygones) ; droite : couche raster (image aérienne).

L'implantation est également très simple : il suffit de sélectionner un point sur la carte ou dans le listing de points qui aura préalablement été chargé lors de la création de l'étude. Ensuite le système vous guide à l'aide d'une flèche directive dans un premier temps puis par un affichage plus fin lorsque l'utilisateur se trouve à quelques centimètres

du point à implanter. Les informations de positionnement et de profondeur sont affichées en permanence à l'écran. Les fonctionnalités de calcul vont permettre d'implanter des alignements de la même façon avec une très grande précision. Il est ainsi possible sur le terrain de relever deux points, d'en faire une droite puis de découper cette droite en segments de longueurs égales et enfin de les implanter un à un. Vous obtenez ainsi un « carroyage » (= quadrillage) très simple. Le relevé de plusieurs points permet également le calcul de surface et la subdivision de surface (**Figure 9**). Les nouveaux points calculés dans cette subdivision peuvent être instantanément implantés. Lorsqu'un calcul de terrain doit être réalisé, Trimble Access doit permettre de réaliser un maillage et un MNT (modèle numérique de terrain, représente les variations d'altitude). Relevez des points caractéristiques sur le terrain puis sélectionnez-les sur la carte. En un clic le logiciel vous affiche un MNT avec les niveaux de couleur pour les altitudes (**Figure 10**). Cette fonctionnalité permet de calculer des volumes et également de déterminer les volumes de terre à enlever pour obtenir une surface plane, par exemple.

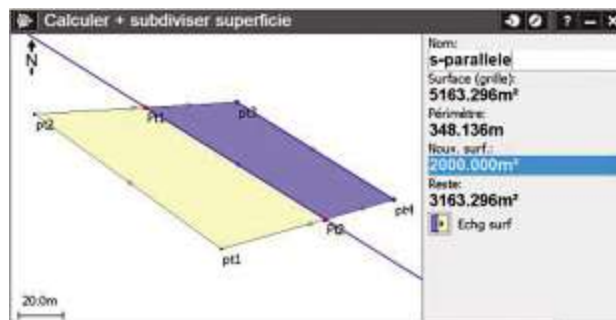


Figure 9. Subdivision d'entité et calcul de la surface et du périmètre des entités créées sous Trimble Access.

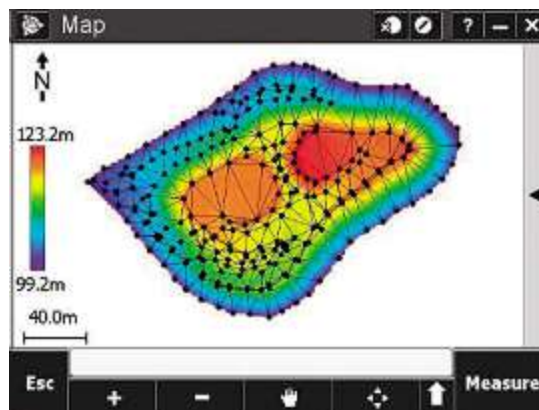


Figure 10. Affichage d'un MNT sous Trimble Access.

Bien souvent, le simple calcul d'un point sur le terrain est indispensable : Trimble Access possède des fonctions de calculs géométriques appelées fonctions COGO permettant de calculer des points, des alignements, des lignes, des courbes, des projections, etc. Il est également possible de mettre en place une codification complète composée d'attributs et de sous-attributs obligatoires ou optionnels. Après le levé, lors de l'export de votre fichier de points, les attributs sont associés et seront parfaitement gérés dans votre logiciel de DAO ou votre SIG.

Trimble Access possède des centaines d'autres fonctionnalités de calcul, destinées tant au relevé qu'à l'implantation de points, de surfaces ou d'alignements. Le logiciel possède un menu d'aide embarqué, contextuel et agrémenté de schémas explicatifs, permettant aux utilisateurs de toujours trouver une solution à leur problématique terrain.



Solution cartographique de D3E Electronique : plusieurs logiciels de saisie disponibles

Le choix du logiciel de saisie, et du logiciel pour la correction différentielle en post-traitement si la correction en temps réel n'est pas disponible, est déterminant. Tous présentent de nombreuses similarités (affichage d'une fenêtre Carte, fonctions basiques de collecte...). Néanmoins, leur mise en œuvre et les prérequis nécessaires peuvent varier considérablement de l'un à l'autre. Il peut ne pas être évident de distinguer de prime abord leurs différences ou l'impact en matière de déploiement, à moins de disposer d'une certaine expérience. Dans le cas contraire, des tests comparatifs sur une certaine durée sont recommandés pour aider au choix de la solution.

ArcPad : le SIG mobile par excellence – Donner des fonctions de saisie avancées aux arpenteurs

ArcPad est la solution originelle ESRI de collecte et maintenance de données sur le terrain (**Figure 11**). Cette application reste encore aujourd'hui la référence logicielle ESRI pour l'acquisition et la gestion de données SIG à l'aide d'un appareil mobile. Son utilisation s'intègre dans un flux de données (échanges) complet impliquant l'ensemble des produits de la suite ArcGIS. L'administrateur SIG crée une base de données (géodatabase), il paramètre les couches de données ainsi que leurs attributs. Ces couches sont ensuite mises en forme (couleurs de représentation sur une carte, étiquettes sur les données, seuils d'affichage) dans un document MXD d'ArcGIS. A partir de ce document les données de la base sont extraites vers un projet ArcPad complet et exploitable directement par l'opérateur. Sur le terrain, l'utilisateur n'a plus qu'à ouvrir une carte et collecter ou modifier des données existantes. Ainsi, pour une parcelle donnée, cette mise à jour concerne aussi bien la donnée attributaire dans son ensemble que la donnée géographique. Pour collecter de nouvelles données, l'arpenteur dispose de



Figure 11. Copie d'écran du logiciel Arcpad sur appareil Trimble Juno distribué par D3E Electronique.

fonctions avancées permettant des accrochages fins sur des données existantes pour maintenir une topologie. L'utilisateur pourra par exemple s'accrocher sur des sommets ou limites de parcelles existantes afin de créer des parcelles contiguës. Pour la collecte de données par satellites, l'utilisateur dispose de deux options d'enregistrement, par sommets ou en continu, pouvant être combinées au sein d'un même arpentage. L'association des options d'accrochage et de ces options de saisie par GPS confère à ArcPad une puissance SIG inégalée sur le marché du SIG Mobile tout en restant une application accessible à tous. La saisie de données pourra se faire au choix en temps réel via un récepteur GNSS corrigé par un service VRS (virtual reference station) par exemple, ou en mode autonome. Dans ce dernier cas, ArcPad sera conjointement utilisé avec l'extension Trimble Positions ArcPad Extension afin d'enregistrer les données nécessaires à un post-traitement. Une fois la collecte réalisée, les données sont synchronisées dans la base d'origine. Par analyse spécifique, les données mises à jour sur le terrain sont mises à jour dans la base et les données nouvellement créées sont ajoutées aux couches de la base. Par utilisation de l'extension Trimble Positions Desktop add-in, l'administrateur peut analyser rapidement les collectes réalisées et les précisions de chaque mesurage directement dans ArcGIS for Desktop et réaliser si nécessaire un post-traitement si d'éventuelles corrections sont à réaliser.

ArcGIS for Windows Mobile : un outil ESRI simple et complet de saisie de données pour l'arpentage

Basé sur le même fonctionnement qu'ArcPad, ArcGIS for Windows Mobile vient compléter son grand frère par une interface épurée et un accès à des tâches simples qui rendent le logiciel accessible pour un utilisateur ayant peu ou pas de connaissances SIG ou GPS (**Figure 12**). Le temps d'apprentissage est minime. Simple ne signifiant pas pour autant rustique, avec ArcGIS for Windows Mobile, l'utilisateur aura tout autant la possibilité de collecter des données ou de mettre à jour des données existantes. Pour un arpentage, des fonctions de collecte par sommets

ou en mode continu sont accessibles et très visuelles. Cette ergonomie permet à un utilisateur non (ou peu) spécialiste de saisir rapidement des données. Toutefois, contrairement à ArcPad, avec ce logiciel de saisie, l'arpenteur fait ce qui lui a été autorisé, rien de plus. Sans les autorisations de l'administrateur ou développements spécifiques, un utilisateur d'ArcGIS for Windows Mobile a moins de souplesse que dans ArcPad pour récréer un nouveau projet mobile ou accéder à des fonctions avancées de collecte de données. Enfin ArcGIS for Windows Mobile possède lui aussi une extension spécifique Trimble (Trimble positions mobile extension) qui en fait à ce jour, la seule solution différentielle (notamment en post-traitement) pour ArcGIS for Windows Mobile. Les sessions terrain d'arpentage sont enregistrées dans une couche spécifique, réintégré dans une base de données (privilégier les Geodatabases Fichiers ou Entreprise) et si nécessaire post-traitées via Trimble Positions Desktop add-in dans ArcGIS for Desktop. Les échanges sont directs et les mises à jour synchronisées en mode filaire ou via le Cloud par l'utilisation d'ArcGIS for Server. Trimble Positions Desktop add-in permettra à l'administrateur SIG de mesurer l'évolution de sa base de données en quasi temps-réel et visualiser l'ensemble de sa flotte de matériel et de sessions d'arpentage réalisées sur ArcGIS for Desktop.



Figure 12. Copie d'écran ArcGis for Windows Mobile (en fonds d'écran, le Domaine expérimental d'Auzeville, Couches vecteur : parcelles, passages tracteur, lignes d'irrigation ; couche raster : image aérienne).

TerraSync : la solution de collecte de données terrain puissante, polyvalente et conviviale

Le logiciel de saisie TerraSync a été conçu pour répondre à des besoins de collecte très divers. Il est utilisé dans le domaine de l'agriculture comme dans celui de la forêt, des collectivités locales, des réseaux (transport et distribution gaz, électricité, télécommunications, eau potable, assainissement, éclairage public...), de la recherche (INRA, CNRS, Cemagref, Ifremer, Instituts techniques, etc.), de l'éducation et de l'environnement. Sa particularité est de n'être pas dépendant d'un logiciel SIG ou DAO en particulier, et d'être suffisamment convivial pour être mis entre toutes les mains, malgré une très grande richesse fonctionnelle. Associé au logiciel de traitement GPS Pathfinder Office, il dispose d'une grande variété de formats d'importation et d'exportation. Une option permet aux utilisateurs du logiciel FME (logiciel dédié à la résolution des problématiques d'interopérabilité spatiale) de disposer des formats natifs Trimble MGIS en standard, autorisant des conversions dans à peu près tous les formats disponibles sur le marché (incluant Oracle Spatial, MySQL, etc.).

TerraSync existe en trois versions : Standard, Professionnel et Centimétrique. Hormis la version Standard dédiée à la seule Collecte de données (position et attributs), les versions Professionnel et Centimétrique sont capables de géoréférencer les mesures issues de capteurs externes, à la condition que les mesures parviennent à TerraSync sous forme de chaînes de caractères ASCII, sur un port série Bluetooth ou filaire RS-232. La chaîne de caractères



issue du capteur peut être directement géoréférencée (création d'une Entité Point avec la chaîne en attribut alphanumérique). Il est également possible d'adresser un attribut particulier défini dans un « dictionnaire d'attributs » (ou formulaire de saisie) conçu à cet usage. Le premier cas concerne les mesures potentiellement très rapides (jusqu'à 10Hz, mais sans autre réelle limite que la bande passante de la liaison série) devant être réalisées en continu et en dynamique (conductimètre, compteur Geiger, luxmètre, sonar bathymétrique, etc.). Le second cas concerne des mesures effectuées plus ponctuellement où l'utilisateur aura à marquer un temps d'arrêt. Si plusieurs mesures composent la chaîne de caractères, il est aisé de les dé-concaténer depuis un logiciel SIG tel qu'ArcGIS. TerraSync dispose de deux entrées Capteur qui peuvent être utilisées simultanément. Il faut alors veiller à ce que le terminal de saisie dispose de deux ports COM.

ArpentGIS : la collecte de données accessible à tous

Le logiciel de saisie ArpentGIS a été conçu de manière à être le plus simple possible, tout en disposant des fonctions de collecte essentielles. Ses fonctions de mesurage de parcelles ont été validées par un cabinet d'expertise en topographie, intervenant comme conseil auprès du Joint Research Center à Ispra (the Italy's Institute for Environmental Protection and Research) pour la Commission européenne. ArpentGIS est utilisé comme outil de contrôle des surfaces agricoles dans le cadre de la PAC (politique agricole commune) dans plusieurs pays européens, en France par l'Agence de services et de paiement (ASP). D'autres organismes de contrôle, tels que les services des Douanes ou encore France Agrimer, utilisent aussi ArpentGIS. Pour chaque parcelle contrôlée, un calcul des précisions absolues et relatives des surfaces est effectué. Pour la récupération des données du capteur GNSS, ArpentGIS peut utiliser le protocole standardisé NMEA (National Marine Electronics Association) tout comme le protocole propriétaire Trimble TSIP. Dans ce dernier cas, l'utilisateur connaît à tout moment sa précision temps réel (avec ou sans correction différentielle) et la précision qui sera obtenue à l'issue du post-traitement. Un fichier des mesures GNSS brutes est alors généré de manière transparente pour l'utilisateur, permettant sa correction différentielle ultérieure. ArpentGIS est capable de se connecter aux détecteurs Radiodétection pour la cartographie des réseaux enterrés conducteurs (électricité, télécommunications, gaz (si conduite acier, fonte), non conducteurs (à l'aide d'une sonde ou d'une aiguille détectable) ou de « boules marqueuses ». La solution ArpentGIS est livrée avec un logiciel bureautique baptisé ArpentGIS-Expert. Ce logiciel permet de concevoir le formulaire de saisie, de transférer les fichiers depuis/vers le récepteur GNSS, de consulter les fichiers terrain, d'ouvrir des arrière-plans aux formats raster ou vecteur (dont la base de données libre OpenStreetMap), et d'exporter les fichiers de mesures dans de nombreux formats : SIG, DAO, ASCII et Google Earth. ArpentGIS-Expert permet également de consulter la qualité des observations GNSS, de synchroniser les mesures post-traitées et d'effectuer certains travaux d'édition et d'impression de levés cartographiques.

Le choix d'une solution GNSS dépend beaucoup de l'utilisation recherchée. Après le choix du matériel et de la précision (solution post-traitement, RTK, DGPS) vient celui du logiciel de saisie le plus adapté au besoin de l'utilisateur et de son profil (administrateur SIG, arpenteur, exploitant, etc.). La gamme Trimble Mapping & SIG est très fournie dans ce domaine. Chaque utilisateur pourra trouver un logiciel à sa convenance, que ce soit en privilégiant la simplicité ou la richesse fonctionnelle.

Conclusion

A travers la présentation d'une large gamme d'outils Trimble présentés par deux fournisseurs, Geomesure et D3E Electronique, nous pouvons constater que le choix d'un outil d'arpentage se réfléchit selon plusieurs critères à mettre en adéquation avec les besoins de l'utilisateur : la précision (du mètre au centimètre), la nature du terrain (milieu forestier, urbain, milieu ouvert, etc.), le mode de correction (avec ou sans correction différentielle, en temps réel, en post-traitement), l'ergonomie et les fonctionnalités du logiciel disponibles directement sur le terrain (simple saisie de points ou fonctionnalités SIG embarquées).

Les GPS embarqués sur machines agricoles

Nicolas Barthe¹, Ludovic Munoz², André Gavaland³

Résumé. Cet article détaille les principales applications des GPS (global positioning system) embarqués sur véhicule agricole, guidage ou autoguidage, coupures de tronçons et cartographie intraparcellaire, à travers les gammes proposées par deux fournisseurs, InnovGPS et Géo-Pro Agriculture. L'assistance à la conduite par barre de guidage est progressivement remplacée par des systèmes plus performants qui permettent de valoriser des positionnements GPS précis de type RTK (real time kinematic) : l'autoguidage commande la direction du véhicule, soit par un système électrique installé au niveau du volant, soit directement sur l'hydraulique. La précision des interventions peut être encore améliorée en ajoutant au guidage du tracteur un second guidage par GPS sur l'outil entraîné (semoir ou bineuse). Les GPS peuvent également être couplés à des appareils d'épandage ou de pulvérisation pour commander des coupures de section et réduire les zones de recouvrement. Des systèmes de couplage entre GPS et capteur embarqués permettent de réaliser en végétation ou à la récolte, des cartographies intraparcellaires qui constituent le pilier de l'agriculture de précision.

Mots clés : autoguidage, GPS, RTK, cartographie du rendement, coupures de tronçons

Introduction

Tirer le meilleur parti des heures de travail ainsi qu'augmenter la précision de conduite sont des besoins des agriculteurs mais encore plus des Domaines expérimentaux INRA. A titre d'exemple, l'Unité expérimentale Grandes Cultures de l'INRA de Toulouse s'équipe depuis 5 ans de divers matériels dans cet objectif.

L'utilisation de récepteur GPS (global positioning system) dans l'agriculture ou l'expérimentation agronomique permet de se positionner dans la parcelle pour plusieurs utilisations : guidage du tracteur et/ou de l'outil (semoir, bineuse), coupures de tronçons ou modulation de doses avec des pulvérisateurs ou épandeurs d'engrais, déclenchement d'appareils tels que les semoirs à micro-parcelles expérimentales (Bataillon et Gavaland, 2014) ou encore enregistrement de données géolocalisées pour l'établissement de cartes d'hétérogénéité des parcelles (carte de végétation ou carte de rendement).

Cet article détaille les GPS embarqués de deux fournisseurs, InnovGPS et Géo-Pro Agriculture. Cette présentation ne couvre pas l'exhaustivité des systèmes disponibles sur le marché mais en résume l'essentiel.

InnovGPS vend des solutions innovantes des constructeurs TEEJET, AGLEADER, REICHHARDT, RDS et les adapte aux demandes en France.

Géo-Pro Agriculture diffuse la gamme de solutions Trimble : consoles, autoguidages, équipements de coupure de tronçons et de modulation Field-IQ.

Matériels et utilisation

Guidage de véhicule agricole

Les barres de guidage sont composées d'un écran (deux modèles sont présentés en **Figure 1**), la plupart du temps tactile, couplé à des diodes ainsi que d'un récepteur GPS compatible EGNOS (Lahaye et Ladet, 2014). Elles permettent de se guider dans un champ à partir d'une ligne de référence. Le principe de base est de paramétrer sa largeur de travail, son type de ligne de référence, ligne droite ou courbe (**Figure 2**), et de lui indiquer lors d'un déplacement avec le tracteur le début, point A, et la fin de cette ligne de référence, point B. Ceci fait, l'appareil nous indique la position des passages parallèles sur la parcelle.

1 EURL 2GA, 13 Boulevard Clémenceau, F-81100 Castres, France

2 Géo-Pro Agriculture Fontenay, F-36130 Déols, France

3 INRA, Unité expérimentale Grandes Cultures Auzeville UE0802, F-31326Castanet- Tolosan, France ; andre.gavaland@toulouse.inra.fr



Centerline 220 Teejet

Trimble EZ-Guide 250

Figure 1. Présentation de deux exemples de consoles de guidage.

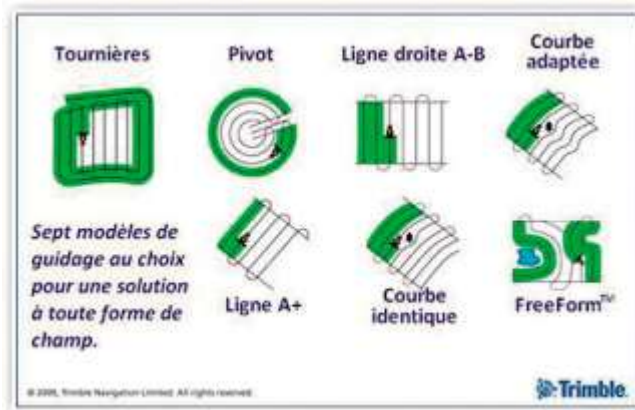


Figure 2. Les différents types de lignes de références programmables sur une console de guidage (source : Trimble).

Avec ce système le chauffeur reste pilote de son engin. Il corrige sa trajectoire en suivant autant que possible les diodes et les lignes représentées sur la console de guidage (Figure 1). L'écart à la trajectoire optimale est affiché sur l'écran et matérialisé par les diodes qui s'allument du côté où l'engin s'écarte. La console affiche également la zone travaillée et fait apparaître les zones non travaillées lorsque le chauffeur a dévié par rapport à sa ligne de guidage.

Autoguidage de véhicule agricole

L'autoguidage de véhicule agricole permet de prendre le contrôle de la direction du véhicule : le chauffeur n'a plus à tenir le volant de l'engin autoguidé. Son utilisation est indispensable lorsque l'on travaille avec une correction RTK (real time kinematic).

Il existe deux types d'autoguidages : le système électrique pris sur le volant et le système hydraulique monté sur le circuit de direction du véhicule.

Le système est composé d'un écran (voir deux exemples **Figure 3**), d'un récepteur GPS, la plupart du temps RTK pour plus de précision et d'une correction de dévers (appelée aussi contrôleur).

Le contrôleur utilise les informations venant du récepteur GPS et des capteurs internes. Il envoie des commandes précises au système de guidage et corrige en continu les erreurs de position dues au roulis, au tangage et au lacet.

Dans la gamme InnovGPS, il existe deux niveaux de qualité :

- système simple antenne pour une utilisation standard couplé à un capteur de dévers et un gyroscope pour anticiper les mouvements du véhicule : GEOSTEER (AGLEADER) ou FIELDPILOT (TEEJET), cf. **Figure 3a** ;
- système double antenne permettant une précision supérieure pour le dévers et capable de travailler à des vitesses très faibles tout en garantissant un niveau de précision centimétrique jusqu'à moins de 100 m/h. Ces équipements gèrent le dévers et les mouvements du véhicule grâce à deux récepteurs GPS RTK : PARADYME (AGLEADER), cf. **Figure 3b**.



3a) Matrix 570 GSI (écran de 14,5 cm), simple récepteur et caméra (Teejet)

3b) Intégra (écran tactile de 30,7cm) et double récepteur ParaDyme (AgLeader)

Figure 3. Exemples d'équipements Teejet et AgLeader commercialisés par InnovGPS.

Trimble propose également (**Tableau 1**) une gamme de plusieurs consoles qui se distinguent entre elles par la taille de leur écran, la capacité de réception des différents signaux GPS, la possibilité, ou non, de gérer simultanément l'autoguidage électrique ou hydraulique du tracteur et le guidage par GPS de l'outil (semoir, bineuse, illustration **Figure 4b**), et de connecter des caméras, par exemple pour surveiller sur la console le fonctionnement des outils entraînés.

Le modèle Trimble FMX permet en plus de gérer un capteur de rendement sur machine de récolte ou encore un capteur GreenSeeker d'indice de végétation par différence normalisé (NDVI : normalized difference vegetation index ; (Tucker, 1979)) : à partir des données du GreenSeeker, le FmX calcule la fumure à appliquer à la culture et commande en temps réel l'épandeur d'engrais si celui-ci est prévu pour faire de la modulation de dose.

Sur l'ensemble de la gamme de consoles Trimble, il est possible de récupérer sur clé USB le fichier informatique de guidage et de le visualiser sur ordinateur avec le logiciel fourni.



Tableau 1. Comparatif des consoles Trimble

Consoles	EZ Guide 250	CFX 750	TMX-2050	FmX
Taille de l'écran couleur	10,9 cm	20,3 cm	30,7 cm	30,7 cm
Ecran tactile		✓	✓	✓
Entrée caméra vidéo		2	Port HDMI	4
Récepteur GPS intégré	1	1	1	2
Précisions				
EGNOS (+/- 15-20 cm)	✓	✓	✓	✓
RangePoint RTX (+/- 10 cm)				
OmniSTAR XP/HP/G2 (5-10 cm)		✓	✓	✓
CenterPoint RTX (+/- 4 cm avec répétabilité)		✓	✓	✓
CenterPoint RTK (+/- 2,5 cm avec répétabilité)		✓	✓	✓
Comptabilités / évolutivité :				
GLONASS		✓	✓	✓
Autoguidage hydraulique du tracteur		✓	✓	✓
Guidage d'outil				✓
Autoguidage électrique du tracteur	✓	✓	✓	✓
Contrôle du débit et de l'application			✓	✓
VRA embarquée avec capteur GreenSeeker				✓
Gestion de l'eau (*)				✓
Moniteur de rendement				✓
Logiciel de bureau	✓	✓	✓	✓

* La gestion de l'eau regroupe le nivellement et le drainage par GPS (gestion de l'altimétrie d'une lame niveleuse, d'un scraper, d'un sous-soleur...). Ces systèmes tournent principalement en Camargue pour la culture du riz.

Système électrique

L'autoguidage du véhicule est facilement adaptable et déplaçable sur plusieurs machines. Une molette (TEEJET ou REICHHARDT) ou une pince avec un engrenage sur le volant fait tourner le volant grâce à un moteur électrique pour agir sur la direction en fonction des indications du calculateur.

Trimble propose le système d'autoguidage électrique EZ-Pilot™ intégré à la colonne de direction du tracteur. Ce système est équipé d'une correction de dévers qui ajuste immédiatement la direction du véhicule afin de compenser les erreurs engendrées par les pentes et les coteaux (Figure 4a). La correction de dévers T3™ utilise des capteurs pour calculer la position réelle du véhicule afin de minimiser les recouvrements et les manques et ainsi accroître la productivité.

La plage d'utilisation du Trimble EZ-Pilot™ s'étend de 1,6 km/h à 28 km/h. A noter qu'il ne fonctionne pas en marche arrière. Le système EZ-Pilot™ peut être équipé d'un volant Trimble qui remplace le volant d'origine du véhicule. C'est le « volant universel » que l'on trouve dans les gammes de certains fournisseurs d'autoguidage.

Système hydraulique

L'autoguidage agit directement sur le circuit hydraulique de direction du véhicule, que ce dernier soit prédisposé d'usine ou non. Le système d'autoguidage hydraulique est plus réactif et plus précis dans ses commandes. Contrairement à ce qu'annoncent certains revendeurs de machines agricoles, l'autoguidage hydraulique peut être installé sur tous les véhicules agricoles du marché, mêmes anciens, à condition bien évidemment qu'ils aient une direction commandée par hydraulique.

Trimble propose le système Autopilot™ qui est composé de trois éléments principaux :

- *un contrôleur de navigation : NavController II* : il collecte les informations provenant du récepteur GPS et possède six capteurs internes ce qui lui permet de corriger en continu les erreurs de position dues au roulis, au tangage et au lacet (correction de dévers T3™ en trois dimensions) ;
- *un capteur angulaire Autosense* : Il mesure de façon très précise les informations d'angle de roue sur tous les terrains. Ces informations sont obtenues sans utiliser de pièces mobiles ;
- *une électrovanne proportionnelle H3* : ce distributeur hydraulique reçoit les consignes électriques transmises par le NavController II et les convertit en commandes hydrauliques précises permettant de maintenir le véhicule sur sa trajectoire.

La plage d'utilisation du système Autopilot™ varie de 70 m/h à 50 km/h. Il fonctionne également en marche arrière.



4a Chantier de semis en coteaux avec autoguidage



4b Bineuse autoguidée par GPS

Figure 4. Deux exemples d'application du guidage par GPS (photos Géo-Pro Agriculture).

Gestion automatique de tronçons

La gestion automatique des outils de pulvérisation et d'épandage est une option également disponible dans la gamme de produits distribués par InnovGPS, aussi bien AGLADER que TEEJET ou REICHHARDT, ainsi que dans la gamme Trimble (**Tableau 1**).

Ce système permet d'optimiser les zones d'ouverture ou de fermeture des sections du pulvérisateur (**Figure 5**). Il permet de réduire les zones traitées deux fois par recoupement, et donc les risques de phytotoxicité, et engendre des économies de solution épandue, de l'ordre de 5 %, économie qui varie en fonction du parcellaire. Cette option est actuellement montée sur la moitié des pulvérisateurs vendus.

Les épandeurs d'engrais centrifuges de nouvelle génération sont capables de gérer des sections quasiment comme sur une rampe de pulvérisateur grâce à un ensemble de vérins qui font varier les points de chute de l'engrais sur les disques épandeurs et/ou qui modifient la quantité d'engrais tombant sur le disque. Le mode d'épandage des sections peut se régler en nappe et non plus en ligne droite comme sur les pulvérisateurs. Ce système permet de réduire les zones recevant une double dose d'azote et par conséquent de limiter les risques de verse et de fuites éventuelles de nitrate dans les eaux de drainage.



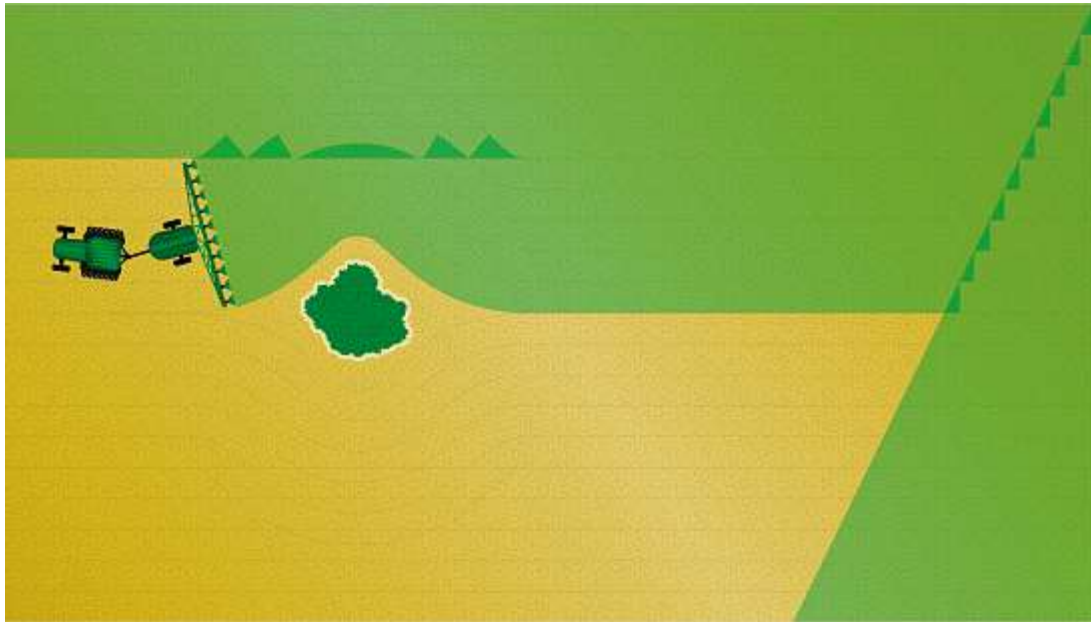


Figure 5. Illustration du fonctionnement des coupures de tronçon.

Cartographie de rendement

Les systèmes de cartographie de rendement permettent de créer et d'afficher des cartes de rendement et d'humidité durant la récolte mais également d'observer instantanément ou *a posteriori* la manière dont les conditions du terrain affectent le rendement de la culture. Le principe de fonctionnement (Figure 6) est l'enregistrement en continu et à intervalles réguliers pendant la récolte de données instantanées de rendement et d'humidité du grain récolté obtenues à partir de capteurs. Le couplage de ces capteurs à un récepteur GPS positionné sur la cabine de la machine permet de géo-localiser les données. L'enregistrement se fait sur une console numérique et le transfert des données est possible via une carte mémoire.

Le montage de ces équipements est envisageable sur des moissonneuses-batteuses d'ancienne génération qui ne disposent initialement d'aucun capteur ainsi que sur du matériel récent.



Figure 6. Schéma de montage d'un capteur de rendement et d'humidité sur une moissonneuse-batteuse.

Conclusion

Les systèmes de guidage, *a fortiori* d'autoguidage, permettent d'améliorer la précision des interventions culturales et de travailler plus longtemps, quelles que soient les conditions de terrain ou de visibilité. Outre le confort de travail qu'ils procurent au chauffeur, ils améliorent l'efficacité du travail réalisé et les rendements de chantier : on peut travailler plus vite, mieux et plus longtemps. Ils contribuent de ce fait à améliorer les performances économiques des entreprises utilisatrices.

Les systèmes de coupe de section couplés à des GPS embarqués permettent de réduire les zones de recouvrement recevant double dose lors des opérations de pulvérisation ou d'épandage. Outre l'économie d'intrants qu'ils génèrent, ils contribuent à la réduction des pollutions diffuses et de ce fait au développement de pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement : suivant les régions, l'acquisition des outils de guidage par GPS peut être subventionnée dans le cadre d'un plan végétal environnement (PVE).

Certaines solutions GPS disponibles sur le marché permettent le couplage entre un récepteur GPS embarqué et un ou plusieurs appareils de mesure (indice de végétation, rendement). On en tire une cartographie des hétérogénéités intraparcellaires qui peuvent être utilisées pour établir des cartes de préconisation et moduler les intrants.

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.

FR CUMA Ouest, France (2008) Bien choisir votre système de guidage par satellite, 6 p.

FR CUMA Midi-Pyrénées, France (2010) Machines agricoles, quelles pistes pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires ? 8 p.

Lahaye R, Ladet S (2014) Les réseaux de correction différentielle. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé, pp. 36-43.

Pool machinisme Sud-Ouest (2010) GPS et coupe de tronçons, fiche technique Ecophyto 2018 n° 8.

Tucker CJ (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ* 1979: **8**, 127-150 .



Gestion des données d'un semoir d'expérimentation à déclenchement par GPS

Paul Bataillon¹, André Gavaland¹

Résumé. En 2008, l'Unité expérimentale d'Auzeville a acquis un nouveau semoir expérimental de précision. Pour le système de déclenchement des cycles, l'option GPS-RTK (global positioning system-real time kinematic) a été préférée au système câble avec olives, pour faciliter les chantiers de semis (rapidité d'intervention). Ce semoir innovant a été construit par ERMAS[®], en partenariat avec S@t-Info[®], fournisseur de la correction différentielle. En parallèle, le SIG (système d'information géographique) du Domaine a été créé : parcelles et références fixes (passages tracteurs) ont été géoréférencées, et les procédures pour gérer les expérimentations ont été établies. Lors du semis d'une plate-forme d'évaluation variétale, les positions de déclenchements par GPS-RTK du semis de chaque microparcelle sont enregistrées dans un fichier sur une clef USB. Ce fichier est ensuite directement transformé, par un logiciel créé par S@t-Info[®], en couche de polygones correspondant aux microparcelles. Chaque champ d'essai semé est ainsi directement géoréférencé. Par liaison avec notre base de données (sous Dbase, format utilisé par ArcGIS), les couches sont rapidement et automatiquement renseignées avec les identifiants des microparcelles, et avec des données d'itinéraires techniques : le SIG est ainsi devenu une aide précieuse à la gestion des expérimentations menées sur le Domaine d'Auzeville : l'historique des essais et de leur conduite, couplé à une meilleure caractérisation des sols permettent d'optimiser le positionnement des expérimentations. Les informations collectées sur les essais contribuent à améliorer la connaissance du site expérimental par le géoréférencement des effets terrains révélés par la cartographie des résidus des variables mesurées.

Mots clés : semoir à essais, système de déclenchement, géolocalisation, plan d'essai

Introduction

L'Unité expérimentale (UE) Grandes Cultures d'Auzeville (INRA) met en place tous les ans des dispositifs expérimentaux pour évaluer des variétés dans le cadre de programmes de recherche en génétique de l'INRA ou pour l'inscription au catalogue national des nouvelles variétés (essais de Valeur Agronomique, Technologique et Environnementale, VATE, pour le GEVES²). La mise en place de ces essais en microparcelles (10 à 20 m² suivant les espèces et les protocoles) nécessite l'utilisation d'un semoir spécial pour l'expérimentation et une organisation rigoureuse pour implanter l'essai suivant le plan expérimental préétabli : sur une même ligne de semis (passage du semoir d'un bout à l'autre du champ d'essai), de nombreuses variétés se succèdent. Le passage d'une microparcelle à la suivante et le changement de semence qui l'accompagne est réalisé en continu grâce à un dispositif complexe d'envoi des graines sur les socs semeurs avant le début d'une microparcelle puis de réaspiration des graines restantes en fin de microparcelle pour éviter tout mélange de variétés. Le déclenchement du cycle « aspiration des restes de graines » – « admission graines suivantes » doit se faire à un emplacement précis sur le terrain pour que les allées inter-microparcelles, perpendiculaires aux lignes de semis soient alignées, et délimitent bien les planches de semis (bandes de microparcelles perpendiculaires au sens du semis). Cet article présente un dispositif de déclenchement par GPS (global positioning system) qui équipe le semoir utilisé depuis 2008 à Auzeville pour l'implantation des essais des cultures de printemps, sa mise en œuvre et l'intérêt qu'il présente pour la réalisation des plans d'essais sous SIG (système d'information géographique) et l'amélioration de la connaissance du site expérimental par la cartographie des résidus (statistiques).

Historique

Depuis sa création en 1986, l'UE d'Auzeville a utilisé, pour le semis des expérimentations en monograine un prototype conçu par J.M.Nolot³ à partir d'éléments semeurs Nodet[®] montés sur un automoteur porte-outil Dérot[®]. Le déclenchement des cycles (réaspiration / admission) était actionné manuellement par le chauffeur qui se repérait

1 INRA, UE 802 Grandes Cultures d'Auzeville F-31326 Castanet -Tolosan Cedex, France ; paul.bataillon@toulouse.inra.fr

2 GEVES : groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences.

3 Responsable de l'antenne expérimentale de 1984 à 1990, puis Directeur de l'UE d'Auzeville de 1991 à 2009.

à un marquage au sol (au plâtre) des lignes de milieux d'allées. Ces lignes matérialisaient les limites des planches de semis.

En 2008, l'UE d'Auzeville a fait l'acquisition d'un nouveau semoir expérimental de précision pour les expérimentations tournesol, soja et sorgho (semoir à 6 rangs écartés de 50 cm). Pour automatiser le déclenchement des cycles, le système GPS-RTK (global positioning system-real time kinematic) a été préféré au système câble qui équipe la plupart des semoirs à microparcelles. (Le semoir sème le long d'un câble sur lequel sont soudées des olives, à intervalles réguliers correspondant à la longueur de parcelle ; le passage des olives dans un dispositif (fourchette) fixé latéralement au semoir déclenche le cycle). Le semoir innovant a été réalisé par la Société ERMAS® par adaptation d'un semoir Kuhn® (type maxima), et en partenariat avec S@t-Info® qui a adapté le système de déclenchement par GPS. S@t-Info® en a profité pour installer sur le Centre INRA d'Auzeville une antenne qui lui permet de fournir la correction différentielle RTK du signal GPS dans un rayon de 25 km autour d'Auzeville. Cette correction permet également d'obtenir la précision centimétrique pour toutes les autres applications du GPS : arpentage, autoguidage de tracteurs, géolocalisation des données d'un capteur de rendement embarqué sur machine de récolte.

En 2009, le SIG a été mis en place sur l'UE d'Auzeville par Milène Legalle, stagiaire Master Géomatique SIGMA⁴ : les parcelles du Domaine expérimental et les références fixes (passages tracteurs pour traitements phytosanitaires et épandage d'engrais (tous les 12 m), passages de rampe d'irrigation (tous les 48 m) ont été géoréférencées, et des procédures pour gérer sous SIG les expérimentations ont été établies.

Le semis de la plate-forme expérimentale

Réglage de la position de l'antenne

La position de l'antenne GPS est réglée pour tenir compte de l'absence de semis pendant le temps programmé pour la réaspiration du fond de cuve des éléments semeurs, couplé à la vitesse du semoir, et pendant la prise en charge des grains sur le disque semeur (fonction de la densité de semis, et du nombre de trous du disque). Sans ce réglage, les allées (zones non semées correspondant à la réaspiration du fond de cuve et à la prise en charge des graines) seraient décalées en quinconce. L'antenne est donc positionnée précisément sur une mire graduée (depuis l'élément semeur, vers le tracteur) placée sur l'axe médian du tracteur, comme le montre la **Figure 1**.

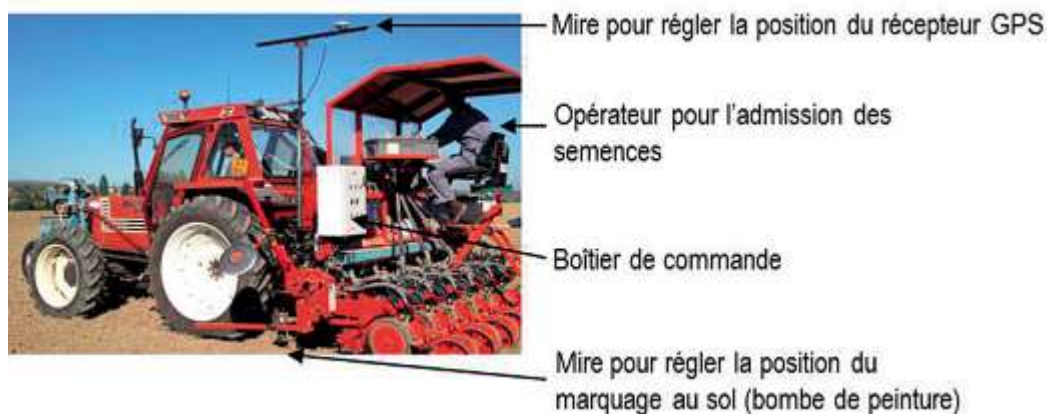


Figure 1. Présentation du semoir attelé au tracteur.

Le semis de la plate-forme

La longueur de parcelle, X, est déterminée par une instruction stockée sur une clef USB qui est connectée au boîtier de programmation du semoir. On peut ainsi choisir une longueur de parcelle entre 3 m et 12 m.

4 SIGMA : Science de l'Information Géoréférencée pour la Maîtrise de l'environnement et l'Aménagement des territoires, Master 2 professionnel géomatique, Université de Toulouse.

Tout chantier de semis commence par l'initialisation d'une ligne de référence. On matérialise cette ligne en mettant en place quelques jalons, un premier au point de départ et les suivants sur l'axe que doit suivre le tracteur. Sur cette ligne de référence les déclenchements s'opèrent par GPS-RTK tous les X mètres. Après la dernière planche semée, l'opérateur signale « fin de ligne » au boîtier de commande en actionnant un interrupteur électrique. Pendant les allers retours successifs du semoir, les déclenchements vont s'opérer sur des lignes perpendiculaires à cette ligne de référence et passant par les points d'initialisation, donc espacées de X mètres.

Quand on le souhaite, les déclenchements peuvent être couplés à un marquage au sol automatique réalisé par une bombe de peinture, positionnée sur une mire graduée (**Figure 1**). Ces marques de peinture permettent de planter des jalons et de positionner les milieux d'allées.

Pendant le semis de la plate-forme expérimentale, les positions des déclenchements par GPS-RTK du semis de chaque microparcelle sont enregistrées dans un fichier texte sur la clé USB ; (ces points correspondent donc au milieu de l'allée – changement de parcelle – et sur l'axe du semoir). La **Figure 2** illustre la projection sur SIG des points de déclenchement de semis de la plate-forme sorgho semée en 2013 constituée de 15 lignes de semis sur 18 planches de 7 m de longueur : l'initialisation de la ligne de référence (qui sert également à vérifier le bon fonctionnement du semoir) a été faite sur la ligne centrale (en rouge, référence du passage de la rampe d'irrigation), puis le semis a été réalisé de part et d'autre de cette ligne.

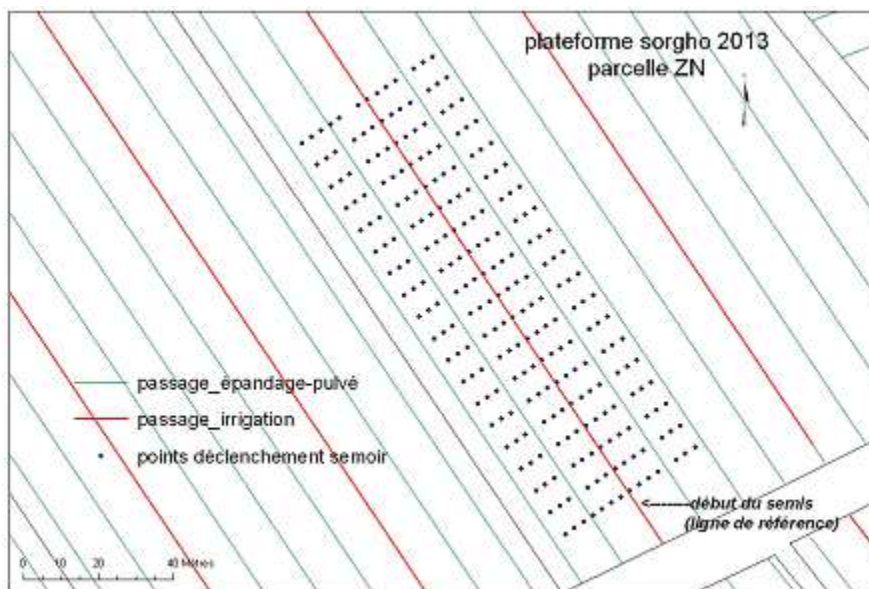


Figure 2. Informations stockées suite au semis d'une plate-forme : les points de déclenchement.

La récupération du plan de la plate-forme géoréférencée

Le fichier des points de déclenchement est directement transformé, par le logiciel RTK St@rt créé par S@t-Info®, en couche de polygones : sur ce logiciel, on renseigne la largeur de parcelle (3 m avec la configuration du semoir Ermas), le sens de semis est calculé par le logiciel, et ainsi chaque point de déclenchement est transformé en un polygone correspondant à une microparcelle (allée et interparcelle incluses). **La position de chaque champ d'essai semé est ainsi instantanément géoréférencée** sur le parcellaire du Domaine, comme le montre la **Figure 3**.

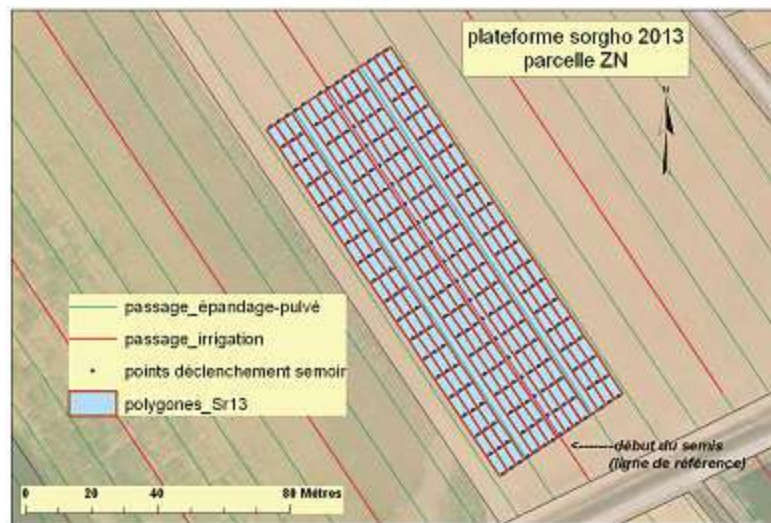


Figure 3. Couche SIG des polygones correspondant à la plate-forme.

Le renseignement de la couche SIG avec les données attributaires

Ces données sont de différentes natures, et peuvent être renseignées dès le semis de la plate-forme (identifiants, **Figure 4**) ou au fur et à mesure de l'acquisition des variables. Elles servent à effectuer des représentations symboliques des plate-formes (**Figure 5**), à mémoriser de façon précise les différents itinéraires techniques appliqués à la plate-forme (par exemple deux conduites fertilisation azotée) pour pouvoir gérer les arrières effets durant la campagne suivante. Elles permettent également de diagnostiquer d'éventuels effets terrains par la cartographie des résidus statistiques des variables mesurées (**Figure 6**).

Les identifiants

Renseigner les identifiants constitue le point de départ de toute expérimentation attachée à un protocole. Dans le cadre de nos essais variétaux regroupés en plate-forme d'essais, ils constituent la charpente de la base de données de chaque plate-forme. Ces identifiants sont de trois natures :

- coordonnées des microparcelles (N° de planche de semis, N° de ligne de semis),
- intitulés du (des) protocole(s), numéros des différents facteurs contrôlés (bloc, sous-bloc),
- modalités des facteurs étudiés (géotypes, densité de semis, dose d'azote, nombre de traitements fongicides, dose d'irrigation, etc).

Les variables mesurées

Toute variable notée ou mesurée à l'échelle de la microparcelle peut être intégrée dans le SIG en vue d'une cartographie, par représentation symbolique par catégorie. La plupart des protocoles en expérimentation variétale ayant des répétitions, ce sont le plus souvent les résidus⁵ des variables qui sont représentés, ce qui permet de cartographier directement d'éventuels effets terrain.

Les différentes méthodes pour renseigner les données attributaires

Concernant les identifiants N° de planche et N° de ligne de semis, il n'y a pas d'automatisation possible : nous effectuons cette saisie directement sur SIG, en sélectionnant l'une après l'autre les différentes planches de semis puis les différentes lignes de semis et en leur affectant la bonne valeur. Puis, nous créons le champ issu de la

5 Résidu : pour une microparcelle et une variété données, écart entre la valeur de la variable et la moyenne de cette variable sur les différentes répétitions de la variété.

concaténation Planche_Ligne, qui servira de « champ de jointure », champ commun avec les fichiers de la base de données.

Pour tous les autres identifiants et les variables mesurées (ou leurs résidus), on les intègre dans les tables attributaires du SIG en réalisant une jointure sur le champ « Planche_Ligne ». Cette procédure est automatique depuis notre base de données expérimentales au format dBase dont les tables sont des fichiers .dbf, format également utilisé par ArcGIS. Les niveaux de certains facteurs étudiés – traitement fongicide, azote ou irrigation – sont renseignés directement sur SIG par sélection des zones concernées quand ils ne sont pas dans la base de données.

DAYS	P.L.	REP	VARIETE	PLANCHE	BLOC	SOBLON	LIGNE	ESSE	BIMANAR	Shape_Length	Shape_Area
19	102	103	1	18	3	1	0	0	00 Arto	20.00274	-21.00926
20	10	120	4	17	3	2	0	2	Fuego 05	18.94662	-20.92179
21	5	121	5	18	3	2	0	2	Ed Joran	20.07165	-21.02823
22	10	120	11	18	3	2	0	2	BAG 233	19.08138	-20.89200
23	10	119	8	14	3	2	0	2	Aragn	20.07141	-21.00854
24	10	110	13	13	1	3	0	2	BAG 301	18.94625	-20.92355
25	10	117	8	12	1	2	0	2	Bagno	20.00190	-21.01410
26	10	171	1	11	3	0	0	0	00 Arto	20.00180	-21.00780
27	10	93	24	13	3	2	0	1	DGRI 2-341	20.07494	-21.02552
28	10	52	11	8	3	2	0	1	E5 Forny	20.00113	-21.00052
29	10	91	16	8	3	2	0	1	Boyy	20.01149	-21.01758
30	10	80	7	7	2	2	0	1	Arto	19.89982	-20.88033
31	10	40	25	6	2	2	0	1	BAG 1325	20.00024	-21.00112
32	10	40	4	5	2	2	0	1	E5 Arto	18.95624	-20.92000
33	10	47	26	4	1	2	0	1	BAG 325	20.00122	-21.00077
34	10	40	1	3	1	2	0	1	Arto	20.00082	-21.00084
35	10	45	1	2	1	2	0	1	Boyy	18.97325	-20.96047
36	10	150	1	1	1	0	0	0	00 Arto	18.96307	-20.96623
37	10	160	1	1	1	0	10	0	00 Arto	20.00746	-21.00816
38	10	88	21	2	1	3	10	1	BAG 322	18.92201	-20.89008
39	10	55	6	3	1	3	10	1	Aragn	20.00121	-21.00207
40	10	50	27	4	1	3	10	1	E5 Arto	20.07474	-21.01548
41	10	93	12	3	2	3	10	1	Arto	20.00820	-21.00829

Figure 4. La table attributaire complétée avec les identifiants, suite à une « jointure » sur le champ Planche_Ligne.

Exemple de représentation symbolique de la plate-forme

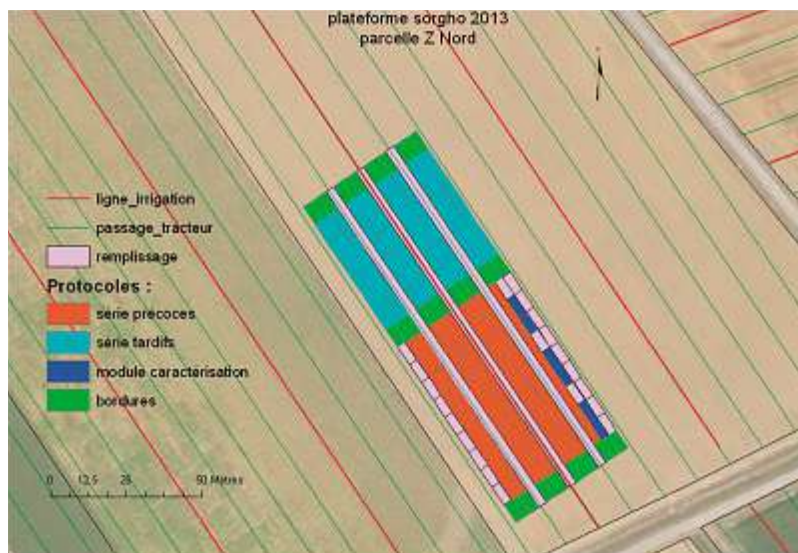


Figure 5. Représentation symbolique de la plate-forme Sorgho par protocole (n° essai).

Exemple de cartographie des résidus de variable

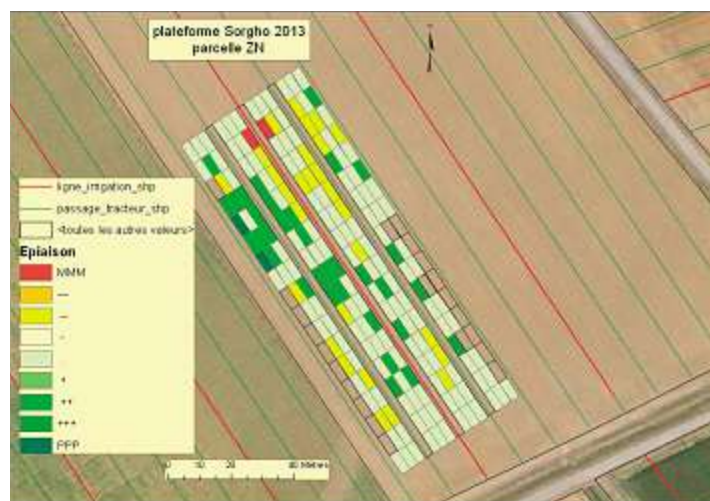


Figure 6. Représentation des résidus de la variable Date d'Épiaison sur la plate-forme Sorgho.

La **Figure 6** présente les résidus de la variable 'Date d'Épiaison'. Ces écarts sont exprimés en proportion de l'écart type résiduel de la variable qui était ici de 0,5 jour à l'échelle de la plate-forme. ++ signifie donc un écart à l'épiaison de $2 \times 0,5 = 1$ jour plus tardif que la moyenne de la variété, PPP un écart supérieur à $3,5 \times 0,5 = 1,75$ jours. Cette cartographie révèle un secteur plus tardif partie gauche de l'essai 'série Tardifs', correspondant en fait à une zone plus enherbée qui a freiné le développement des sorghos.

Dans la plupart des cas, la cartographie des résidus de variables va révéler des « effets terrains », qui seront ainsi directement géoréférencés, et qui vont concourir à améliorer notre connaissance de l'hétérogénéité des parcelles. D'autres sources d'informations sont à notre disposition, comme les mesures de résistivité électrique du sol (Séger et al., 2014) et les cartes de rendement agricole des années où la parcelle est en homogénéisation (sans essai).

Conclusion

L'utilisation sur le Domaine d'Auzeville depuis 2008 d'un semoir à microparcelles à déclenchement par GPS-RTK a permis de simplifier le travail de jalonnage et de traçage au sol préalable à l'implantation des essais. Le géoréférencement de l'essai est réalisé pendant le semis par la géolocalisation des points de déclenchement du semoir. Ces données sont ensuite traitées sur ordinateur pour i) générer le plan de l'essai avec le module RTK St@rt de S@t-Info® et le récupérer dans le SIG ii) cartographier les données de l'essai avec des représentations symboliques iii) analyser les résidus statistiques des rendements des microparcelles et de ce fait enrichir notre connaissance des hétérogénéités du site expérimental. L'ensemble de ces actions s'inscrit dans la démarche engagée à l'UE d'Auzeville qui vise à mettre les outils de l'agriculture de précision (GPS, SIG) au service de l'expérimentation de précision.

Références bibliographiques

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). Stage soutenu le 16 septembre 2009. INRA, Domaine expérimental Grandes cultures, Auzeville. 54 p. + annexes.

Séger M, Giot G, Pasquier C, Courtemanche P, Bourennane H, Ubertosi M, Nicoulaud 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.



Une pulvérisation localisée par robot

Christelle Gée¹, Ghislain Salis¹, Eric Busvelle², Benoît Gobin¹, Gawain Jones¹, Jean-Noël Paoli¹, Sylvain Villette¹

Résumé. Dans le cadre de la réduction des apports de produits phytosanitaires sur une parcelle cultivée, la gestion localisée des cultures (gestion du désherbage, de l'épandage, de la récolte) nécessite le développement de systèmes innovants et non destructifs. On s'attache ainsi à prévenir les risques de dégradation de l'environnement et à renforcer le caractère durable de ces agrosystèmes. Cela passe en particulier par l'utilisation de machines toujours plus performantes car dotées de technologies innovantes : capteurs, systèmes optiques, systèmes automatisés, systèmes de positionnement par satellites, etc. Pour une pulvérisation localisée, l'utilisation combinée de la vision et de l'informatique se révèle être un précieux procédé qui vise à éliminer une mauvaise herbe identifiée en temps réel. Notre équipe de recherche travaille sur un robot de désherbage chimique localisé. Le projet repose sur la réalisation d'une petite plate-forme mobile autoguidée. Elle devra se déplacer de façon autonome sur des parcelles en suivant par GPS une trajectoire qui lui aura été définie au préalable. La première utilisation d'un tel robot sera pour une pulvérisation localisée : appliquer l'herbicide uniquement sur les adventices. Pour ce faire, nous miniaturiserons le concept de l'ILS (intelligent localized spray) développé par notre équipe pour un pulvérisateur agricole de précision. Il s'agit d'un dispositif de pilotage séquentiel de rampe de pulvérisation par imagerie pour une gestion localisée des adventices.

Mots clés : agroécologie, pulvérisation, robotique, GPS, imagerie

Introduction

Depuis quelques années, les nouvelles technologies, les systèmes de navigation, l'informatique, la robotique sont de plus en plus présents dans le milieu agricole rendant les machines plus sophistiquées et plus intelligentes pour caractériser l'hétérogénéité des parcelles (Pierce et Nowak, 1999 ; Stafford, 2000). Dans ce contexte de réduction des intrants chimiques, il est nécessaire de repenser l'agriculture d'aujourd'hui en développant des outils qui permettent la modulation automatique des apports de produits phytosanitaires sur une parcelle cultivée et d'ajuster la dose aux besoins de la plante.

Parmi les systèmes commercialisés de désherbage localisé, la gestion automatique de la coupe de tronçons d'une rampe de pulvérisation grâce à l'utilisation d'un système de positionnement GPS (global positioning system) s'est standardisée. On notera également l'émergence de systèmes optiques. Couplés à une buse de pulvérisation (i.e. module Weedseeker développé par la Société Trimble), ils permettent de détecter la présence d'adventices et de pulvériser un herbicide spécifiquement sur celles-ci. Ce type de système fonctionne sur l'information spectrale pour détecter la présence de végétation sur sol nu. Ne permettant pas de faire la distinction entre culture et adventices, il est nécessaire de positionner un module par inter-rang. Pour une pulvérisation efficace, il faudra autant de modules que d'inter-rangs à pulvériser. Son principal inconvénient, outre son coût, est la rigidité du système : il est impératif de placer chaque module dans l'entre-rang de la culture car sa faible résolution spectrale ne permet pas la discrimination culture/adventices. Concernant le désherbage mécanique, la Société Garford, présente un système de vision pour optimiser le guidage d'une bineuse.

Les activités de recherche de notre équipe sont axées sur « la réduction des intrants » et plus spécifiquement nous recherchons des solutions innovantes pour augmenter les performances et l'efficacité de machines agricoles tout en intégrant la dimension écologique. Notre activité permet ainsi d'apporter cette dimension « machine » souvent absente du débat politique et scientifique et pourtant indispensable à une production agricole compétitive.

Nous avons axé nos activités sur le traitement d'images en embarquant sur tracteur ou sur drone radiocommandé des systèmes de vision destinés à discriminer les plantes cultivées des adventices (Vioix et al., 2002 ; Vioix, 2004 ; Bossu ; 2007 ; Bossu et al., 2007). Nos travaux ont été récompensés en 2011 par une médaille d'argent au Salon International du Machinisme Agricole de Villepinte pour le développement de l'ILS (intelligent localized spray) conduit en partenariat avec la société Tecnomat. L'ILS est un premier pas vers la modernité annonçant l'agriculture

1 INRA, UMR 1347 Agroécologie INRA/AgroSup Dijon/uB, Pôle ECOLDUR, Equipe Agroéquipements, 26 Bd Docteur Petitjean, F-21000 Dijon, France ; christelle.gee@agrosupdijon.fr

2 CNRS, UMR 6306, Laboratoire Le2i, Site d'Auxerre, Route des Plaines de l'Yonne, F-89000 Auxerre, France

de demain. Une caméra fixée sur l'avant du tracteur permet de discriminer en temps réel les adventices de la culture et du sol pour une pulvérisation localisée (par exemple la bonne dose, au bon endroit et au bon moment). Mieux encore, la robotique se développe de plus en plus pour accompagner l'agriculteur dans des tâches simples et répétitives. C'est dans les bâtiments d'élevage que les premiers robots sont apparus avec les robots de traite puis un robot pousse-fourrage Juno, un robot racleur Discovery ou encore un robot distributeur d'aliment Vector commercialisés par la Société Lely.

Tout laisse à penser que la forte croissance du marché des robots devrait logiquement se confirmer à l'avenir, et démontre que les agriculteurs se laissent séduire par la robotique. Cependant, très peu de produits sont capables d'évoluer en plein champ. Très récemment, la robotique est arrivée en viticulture avec un robot tondeuse proposé soit par la Société Vitirover soit par John Deere (Tango E5). Enfin, concernant le marché du désherbage, la start-up toulousaine 'Naïo Technologies' (Cordelier, 2013) commercialise « Oz », un robot de désherbage mécanique guidé par vision. Concernant la pulvérisation localisée et, qui plus est, guidée par GPS, il n'existe pas de tels robots opérationnels et commercialisés. Néanmoins arriver à moduler les doses de produits phytosanitaires est le nouveau défi de l'agriculture occidentale (pays industrialisés) qui est rendu possible grâce à l'essor de l'informatique et de l'électronique embarquée. La robotique se présente aujourd'hui comme une solution majeure qui doit jouer un rôle important dans cette vision de l'agriculture. Afin de répondre à ces nouvelles contraintes, nous proposons de développer une solution agroécologique : préserver l'environnement en appliquant l'herbicide uniquement sur les adventices, ce qui permettra de diminuer la consommation de produits. A travers cet article nous présentons la réalisation et la conception d'une petite plate-forme mobile guidée par un GPS de haute-précision (RTK -real time kinematic), précision de 2 cm), équipée d'un kit de pulvérisation reposant sur un traitement localisé.

Matériel et Méthodes

Cette plate-forme robotique (**Figure 1**) est guidée par un GPS de haute-précision (RTK). La motorisation est électrique, les batteries assureront une autonomie d'une demi-journée. Le robot se déplace dans l'inter-rang de cultures agricoles et utilise une cuve et un système de pulvérisation sélectif puisqu'en amont de chaque buse est positionnée une électrovanne.

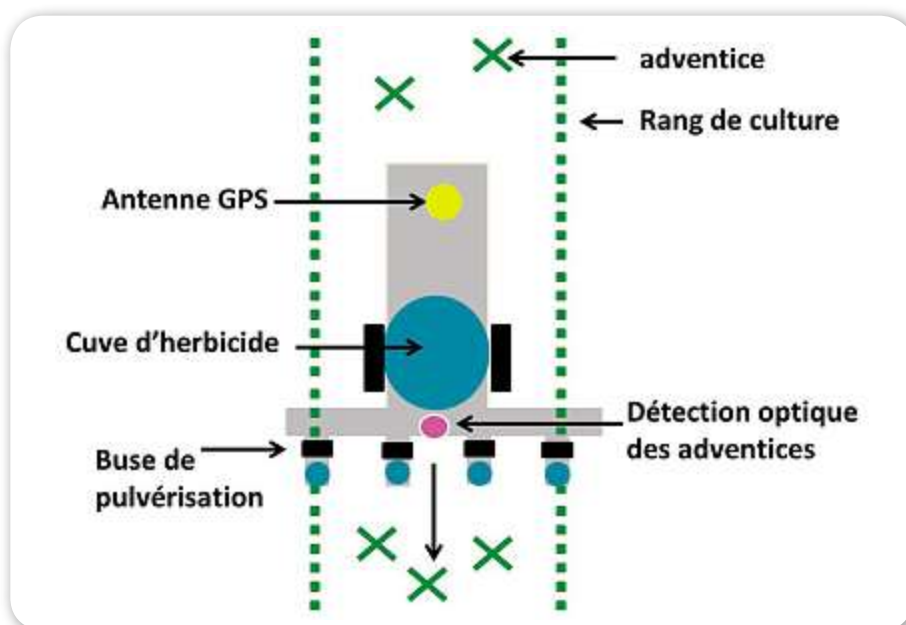


Figure 1. Vue schématique de l'I-Weed Robot au travail.

Le guidage par GPS

Ce robot est actuellement pilotable selon deux modes : radiocommande ou GPS. La radiocommande permet à l'agriculteur de guider le robot jusqu'à la parcelle désirée. Ensuite, il actionne le mode pilotage automatique par GPS pour le guidage du robot dans la parcelle. Ce robot est guidé par un GPS de haute-précision (RTK, précision de 2 cm) grâce notamment à un signal délivré par la société Sat-Info à Chalon-sur-Saône. Nous avons opté pour un guidage par GPS et non par vision car l'intérêt du GPS est la souplesse du système pour s'adapter à tous les types de situation et de culture. Il suffira d'enregistrer les trajectoires à suivre lors du semis pour qu'I-Weed Robot puisse circuler entre les rangs de la culture en place, et ce quel que soit son type. Il ne sera donc pas nécessaire de développer un algorithme de guidage pour chaque espèce de culture et/ou chaque stade de développement de la culture, ce qui serait indispensable pour un système de guidage par caméra.

Un filtre récuratif de Kalman (Kalman, 1960) est utilisé pour optimiser le signal GPS qui peut-être bruité. Les équations de Kalman sont bien connues et peuvent être redécouvertes dans les travaux de Boizot et Busvelle (2007) où d'autres exemples en temps réel sont proposés. Une trajectoire prédéfinie est enregistrée dans une carte SD, ensuite une loi de commande guide le robot entre les rangs de semis jusqu'à ce que le robot arrive en bout de rang (Ortiz et Olivares, 2006 ; Cariou et al., 2009 ; Lenain, 2010). A chaque instant, un correcteur proportionnel-intégral-dérivé (PID controller) ajuste la vitesse et l'orientation du robot à partir de sa position réelle et de sa position théorique (prédéfinie). Nous avons utilisé une carte électronique ARDUINO, permettant de créer des objets électroniques interactifs reposant sur un système open-source. La **Figure 2** résume l'ensemble de ces procédures.

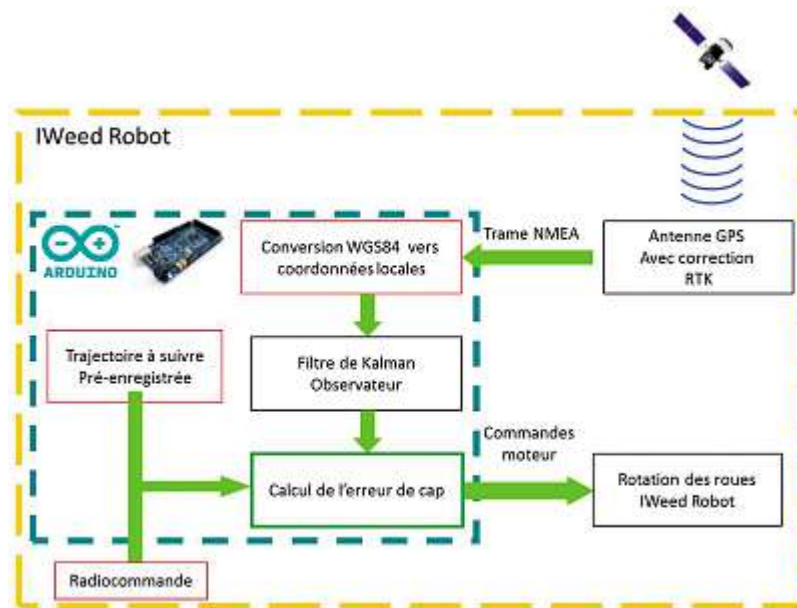


Figure 2. Organigramme général de fonctionnement de l'asservissement de l'I-Weed Robot.

L'utilisation d'un simple PID est suffisante pour travailler en parcelles agricoles puisque dans la plupart des cas, le robot se déplace en ligne droite à vitesse constante. Les trajectoires préenregistrées sont établies à partir de la création d'une droite de référence à partir de deux points prédéfinis manuellement et à partir de la connaissance de l'inter-rang du semis. On peut ainsi déterminer mathématiquement toutes les droites parallèles à droite ou à gauche de la ligne de référence. Après une procédure de demi-tour automatisé, l'algorithme de navigation est capable de déterminer la ligne droite qui lui est la plus proche afin de la suivre.

L'ensemble de ces programmes (filtre de Kalman et PID) permettent de prédire à chaque instant la meilleure position à prendre par le robot ; position déterminée comme étant un compromis entre la position prédéfinie et la position réelle.

La pulvérisation localisée : utilisation d'une caméra

L'I-Weed robot est équipé d'une rampe de pulvérisation où une électrovane est positionnée en amont de chaque buse. Pour l'instant la pulvérisation sur le rang se fera en plein car les algorithmes ne permettent pas de séparer la culture des adventices. En revanche, sur l'inter-rang, nous utilisons une caméra pour réduire les intrants chimiques en reprenant le concept de l'ILS qui repose sur la prise d'image et le déclenchement d'une action de précision. Plus en détail, ce concept se décompose en trois étapes :

- la prise d'images par une caméra monochrome ayant un filtre infra-rouge embarquée à l'avant du robot ;
- l'analyse en temps réel de l'image pour extraire l'information sur les adventices situées dans l'entre-rang. Le traitement de l'image repose dans un premier temps sur l'identification de la végétation du reste de la scène par une approche spectrale. La végétation est identifiée grâce à un signal de réflectance plus élevé dans le proche infra-rouge que celui du sol. Dans un second temps, l'approche spectrale est couplée à une approche spatiale. Par l'utilisation d'une transformée de Hough optimisée (Jones et al., 2010), on identifie les rangs de culture. Ainsi, toute végétation (i.e. culture et/ou adventice) présente dans le rang est alors considérée comme de la culture (**Figure 3**). Cette méthode, qui est en cours d'amélioration, permet actuellement de réaliser une carte de localisation des adventices situées dans l'entre-rang ;
- le désherbage chimique localisé. Une fois la carte d'infestation réalisée, chaque électrovane va être actionnée au bon moment et durant la bonne période.

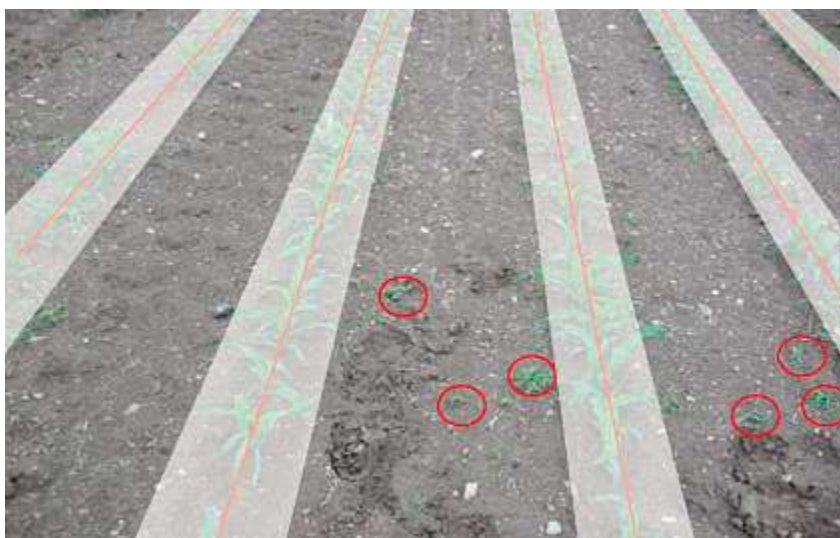


Figure 3. Le traitement d'image pour détecter les adventices dans l'inter-rang d'une culture (crédits photo : C.Gée).

Conclusion

Nous avons présenté un nouveau robot de désherbage localisé qui est électrique et guidé par un système de GPS de haute précision. Le premier marché visé est celui de l'expérimentation végétale, qui est composé d'établissements de recherche mais aussi de sociétés effectuant de la sélection variétale et des instituts techniques. En second lieu, le marché des maraîchers pourrait également être une bonne opportunité. Un prototype est actuellement en cours de réalisation.

Par la suite, après avoir démontré le fonctionnement et l'opérationnalité de la plate-forme en conditions réelles, sur des parcelles cultivées, il sera possible d'embarquer d'autres mini-outils agricoles ou capteurs pour agir localement, uniquement là où le besoin est nécessaire (i.e. désherbage mécanique, greenseeker, weedseeker, etc). Également des capteurs complémentaires pourront être embarqués pour caractériser et analyser la végétation (stress, croissance, etc).



Références bibliographiques

- Boizot N, Busvelle E (2007) Adaptive-gain observers and applications in Nonlinear Observers and Applications, Gildas Besançon (Ed), *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 363, Springer.
- Bossu J (2007) Segmentation d'images pour la localisation d'adventices. Application à la réalisation d'un système de vision pour une pulvérisation spécifique en temps réel. Thèse de Doctorat, AgroSup Dijon, Université de Bourgogne.
- Bossu J, Gée C, Truchetet F (2007) Development of a machine vision system for a real-time precision sprayer. Proceedings SPIE 6356, 8th International Conference on Quality Control by Artificial Vision.
- Cariou C, Lenain R, Thuilot B, Berducat M (2009) Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations. *J Field Robot*, **26** : 504-518.
- Cordelier J (2013) Bienvenue au pays des robots. *Le Point*, 11avril, **2117** : 1-IV.
- Jones G, Gée Ch, Villette S, Truchetet F (2010) Validation of a crop field modelling to simulate agronomic images. *Optics Express*, Vol.**18**, Issue 10, pp. 10694-10703.
- Kalman RE (1960) A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transaction of the ASME-J Basic Eng* **82** : 35-45.
- Lenain R, Thuilot B, Cariou C, Martinet P (2010) Mixed kinematic and dynamic sideslip angle observer for accurate control of fast off-road mobile robots. *J Field Robot* **27** : 181-196. DOI : 10.1002/rob.20319
- Ortiz J M, Olivares M (2006) A vision based navigation system for an agricultural field robot. Conference : *3rd IEEE Latin American Robotics Symposium*, pp.164-172.
- Pierce FJ, Nowak P (1999) Aspects of precision agriculture. *Adv Agron*, **67** : 1-85.
- Stafford JV (2000) Implementing precision agriculture in the 21st Century. *J Agric Eng Res*, **76** : 267-275.
- Vioix JB, Douzals JP, Truchetet JP, Assémat L, Guillemin JP (2002) Spatial and spectral methods for weed detection and localization. *EURASIP J Appl Signal Process* **2002** : 679-685.
- Vioix JB (2004) Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multispectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'adventices. Thèse de Doctorat, AgroSup Dijon, Université de Bourgogne.

Un prototype de rampe de phénotypage haut débit au champ piloté par GPS-RTK

Philippe Burger¹, Fabrice Daumard¹, Pierre Perrin¹, Didier Campergue², Jean-François Liévin², Jean-François Hanocq³, Frédéric Baret³, Benoit de Solan⁴, Alexis Comar³

Résumé. Dans le cadre du développement des techniques de phénotypage à haut débit, l'UMRAGIR (AGroécologie, Innovation et TERritoires) et l'UE d'Auzeville en collaboration avec l'UMT CAPTE (CAPteurs et TELédétection) ont développé un dispositif d'acquisition de données sur des microparcelles de céréales à pailles. Le dispositif de mesure est composé d'appareils photographiques numériques du commerce et d'un ensemble de quatre spectromètres hyperspectraux dans la gamme VIS-NIR. Un logiciel a été développé dans le cadre du projet ANR Phénoblé pour piloter ces instruments. Il utilise un repérage de haute précision par GPS (global positioning system) différentiel RTK - real time kinematic). Le système utilise un plan géoréférencé de l'essai issu du SIG (système d'Information géographique) de l'UE et nomme automatiquement tous les fichiers en utilisant le nom de la parcelle (coordonnées XY), la date de mesure et un numéro d'ordre. Le déclenchement du cycle est automatique et basé sur la position des capteurs. Le système permet d'améliorer la répétabilité du positionnement des images des différents passages et géoréférence chaque spectre acquis, ce qui améliore l'analyse des données.

Mots-clés : rampe de phénotypage haut débit : GPS-RTK, SIG, prototype, imagerie, réflectance

Introduction

Le phénotype est l'ensemble des caractères observables d'un organisme vivant. Il est le résultat de l'interaction entre les gènes et le milieu dans lequel cet organisme se développe. Le phénotypage est l'activité qui consiste à caractériser un phénotype. C'est le pendant du génotypage qui consiste à caractériser le support génétique au travers de l'ADN. Les progrès technologiques dans le domaine du génotypage ont été spectaculaires entraînant une augmentation du débit de mesure et une forte diminution des coûts, ce qui a permis la création de vastes bases de données aussi bien en génétique humaine qu'en génétique animale et végétale. Dans le domaine végétal, l'exploitation de ces bases de données est limitée par la quantité et la qualité des observations phénotypiques que l'on peut associer aux données génotypiques.

La création de bases de données phénotypiques de qualité est devenue un enjeu majeur en biologie végétale (Montes et al., 2007). La tâche est complexe car une plante donnée n'a qu'un seul génotype alors qu'elle a une infinité de phénotypes. Il ne s'agit bien entendu pas de caractériser cette plante dans sa totalité mais bien de se concentrer sur des caractères d'importance économique liés à la production agricole (rendement, qualité, tolérance au stress, ...). Pour faciliter l'interprétation des mesures, il est important de pouvoir réaliser des mesures non destructives afin d'acquérir des données sur des caractères différents sur la même parcelle et de pouvoir répéter les observations pour décrire l'évolution de ces caractères au cours du cycle. La notion de débit de mesure est également primordiale pour deux raisons i) statistiques, il est nécessaire d'observer un grand nombre de plantes pour pouvoir faire le lien avec les données génétiques, ii) biologiques, il est souvent nécessaire de pouvoir observer ces plantes dans un laps de temps assez bref car la plante se développe et change continuellement et les conditions d'observations peuvent également évoluer, rendant l'interprétation plus incertaine. On parle alors de phénotypage haut débit. Les techniques issues de l'imagerie et de la télédétection sont très vite apparues comme de bonnes candidates et leur utilisation dans ce contexte a donné naissance à une nouvelle discipline appelée 'phénomique' (Furbank et Tester, 2011).

Le phénotypage haut débit a d'abord été envisagé sur des plantes isolées élevées en pot, le plus souvent sous serre. Le contrôle des conditions de croissance est en effet un élément important lors de l'analyse des données. Des dispositifs spécialisés permettant de suivre la croissance des feuilles ont ainsi été développés. Il s'agit en général de photographier les plantes à intervalle régulier sous plusieurs angles et dans des conditions d'illumination bien contrôlées afin de pouvoir automatiser le traitement d'images. Certains caractères ne sont cependant pas

1 INRA, UMR1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; Philippe.Burger@toulouse.inra.fr

2 INRA, UE802 GCA, F-31326 Castanet-Tolosan, France

3 INRA, UMT CAPTE, F-84914 Avignon, France

4 UMT CAPTE Arvalis Institut du végétal, France

observables de façon réaliste sur une plante isolée en pot et élevée en serre (exemple l'absorption d'azote), ils doivent être observés sur une plante en peuplement (en situation de compétition entre plantes) et dans des conditions de croissance normales. Il est donc nécessaire de développer des outils permettant le phénotypage haut débit au champ.

Un premier projet, visant à développer un instrument de mesure au champ, a été soumis à l'appel d'offre interne à l'INRA 'projet innovant' du Département Environnement et Agronomie en 2008 par l'UMR AGIR (AGroécologie, Innovation et TERritoires) (en partenariat avec l'UMR EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-hydrosystèmes). Le projet intitulé '*Proxi-détection pour le phénotypage haut débit au champ*' a été financé pour deux années (2008 et 2009). Ce financement a permis l'acquisition des capteurs et les premiers tests du système. Les développements ultérieurs ont eu lieu dans le cadre du projet ANR 'Phénoblé' (2010-2014) et ont concerné le développement du logiciel de pilotage ainsi que des méthodes d'analyse des données. Ces développements ont en partie été réalisés dans le cadre de l'UMT CAPTE (CAPteurs et TELédétection) d'Avignon, centrée sur le phénotypage et l'aide à la décision ou à l'expérimentation.

Description du matériel

Les capteurs

Le dispositif (Comar et al., 2012) est constitué de deux APN (appareil photo numérique) (Canon EOS 400D puis 1000D) et de quatre spectrophotomètres dans le domaine visible et proche infrarouge (domaine 400-900 nm, résolution spectrale environ 3 nm, MMS1 de Zeiss). Ces capteurs sont montés sur une arche dimensionnée pour enjamber une microparcelle de blé de 1,44 m de large (10 rangs à 16 cm). Les APN servent à estimer la fraction de vert du couvert selon deux angles : nadir et 57° par rapport à la verticale. Les images sont acquises perpendiculairement au rang et deux flashes industriels au xénon (FR50, Lumix, Lyon, France) permettent d'assurer une bonne homogénéité de l'éclairage de la scène et une constance des conditions lumineuses entre dates. Les spectrophotomètres sont placés de la façon suivante : trois visent le couvert (un au nadir, les deux autres de chaque côté de la parcelle avec un angle zénithal de 57°), le 4^e équipé d'un diffuseur vise le ciel à la verticale pour acquérir de façon synchrone le rayonnement incident.

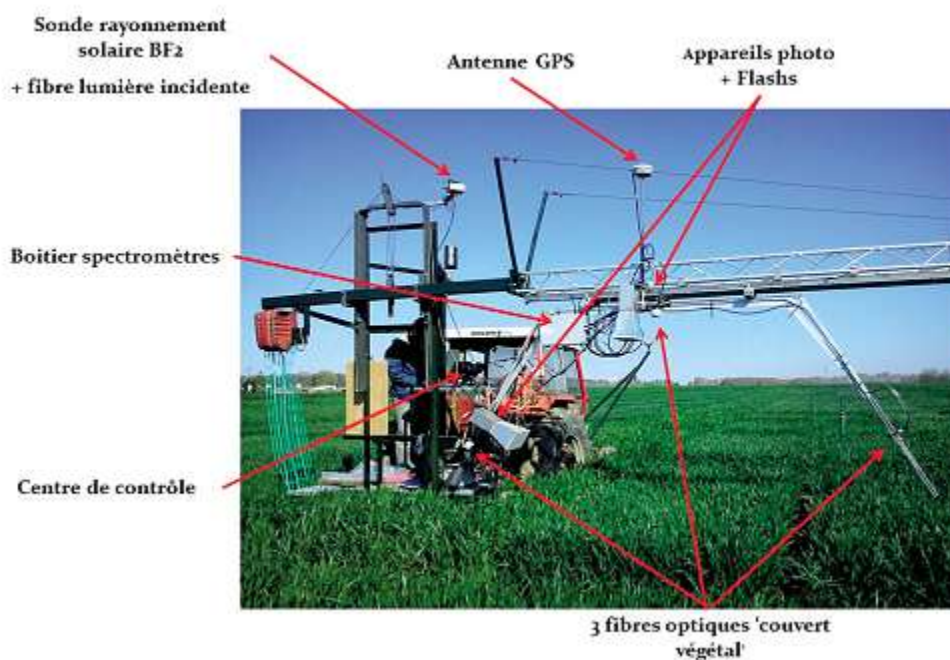


Figure 1. Positionnement des capteurs sur la rampe.

Le dispositif est monté sur une rampe fixée sur un châssis de pulvérisateur modifié en interne et tiré par un tracteur dont le déplacement permet de faire passer l'arche au-dessus des microparcelles dans le sens de la longueur.

Par la suite, un GPS (global positioning system, CFX 750, Trimble) a été intégré au système, il fonctionne en mode RTK (real time kinematic), réseau Sat Info avec récupération des corrections en temps réel par GSM (global system for mobile communications) ce qui permet un positionnement centimétrique en temps réel. L'antenne est fixée sur l'arche à la verticale du centre de la micro parcelle (au-dessus de l'APN nadir). En tenant compte des mouvements d'oscillations de l'ensemble tracteur-rampe-arche, le positionnement reste au moins décimétrique.



Figure 2. Vue du système en cours d'acquisition sur des microparcelles de blé (Photo P. Burger).

Les images permettent de mesurer la fraction de vert du couvert (feuilles, tiges et épis) alors que les mesures spectrales, converties en réflectance, sont sensibles à la fois à la structure du couvert et au contenu en chlorophylle.

Le logiciel de pilotage des acquisitions

Les spectromètres et les APN sont reliés à un ordinateur portable sur lequel un programme dédié permet de piloter l'acquisition des mesures.

Un logiciel Version 1 basé sur un cycle temporel

Le premier programme de pilotage des instruments a été écrit en Labview. Il permettait de déclencher manuellement, directement depuis le clavier de l'ordinateur, un cycle de mesures par parcelle. Celui-ci consiste à prendre un nombre paramétrable d'images de la parcelle (trois positions pour une parcelle de 5 m de long) et à acquérir des spectres entre les images (en respectant une latence pour éviter l'influence des flashes sur les mesures). Le déclenchement du cycle était décidé par l'opérateur et seuls les spectres étaient enregistrés sur l'ordinateur, les photos étant stockées sur les cartes mémoire des appareils. Le cycle avait une durée fixe (mais paramétrable), de sorte qu'il fallait assurer une vitesse de déplacement régulière et déclencher le cycle au bon moment afin de positionner les prises de données sur les zones cibles.

Ce premier logiciel a permis de tester le concept du système de mesure mais s'est vite avéré limité. Le déclenchement manuel requérait une grande attention de la part de l'opérateur et le moindre problème était source



de difficultés. En effet, seul le cycle d'acquisition était repéré dans les données, on se retrouvait donc souvent avec plus de cycles que de parcelles. Il fallait de plus assurer manuellement la concordance entre les fichiers images (stockés uniquement sur la carte mémoire des appareils) et les spectres et faire le nettoyage des acquisitions manquées.

Un pilotage Version 2 basé sur la position GPS

Le projet ANR Phénoblé a permis, via le recrutement d'un Ingénieur de Recherche (F. Daumard, CDD 2 ans), le développement d'un logiciel bien plus performant (AcQPhen) dont le fonctionnement est basé sur la position GPS de l'arche.

Le logiciel d'acquisition, AcQPhen, utilise donc la position de l'arche pour déclencher les mesures. Il n'y a pas de parcours préalablement établi mais un plan géoréférencé des parcelles à mesurer et un paramétrage du cycle de mesure basé sur la taille de la parcelle. Il s'agit notamment de définir i) deux zones de sécurité (entrante et sortante, paramétrables) dans lesquelles on ne veut pas faire de mesures (pour éviter les effets de bordure et les petites imprécisions de positionnement) et ii) le nombre d'images que l'on souhaite acquérir. Le logiciel se charge ensuite de déterminer le sens d'avancement du tracteur et de répartir les prises de vue sur la zone d'intérêt. Les spectres sont acquis avant et après chaque image (en respectant une latence pour éviter l'influence des flashes sur les mesures). L'ensemble des images et des spectres est enregistré sur l'ordinateur dans un répertoire qui porte le nom de la parcelle. Chaque image est renommée avec le nom de la parcelle, son type de prise de vue (nadir ou angle) et l'heure de prise de vue. De même, chaque spectre est référencé avec la date et l'heure, la parcelle et le numéro du spectromètre. L'ensemble des transferts de données vers l'ordinateur est réalisé de manière asynchrone (on n'attend pas qu'un instrument ait terminé de transférer ses données pour réagir aux déplacements du tracteur et lancer l'acquisition suivante). Par exemple, le transfert des photos est plus lent que le temps entre deux déclenchements et se prolonge ainsi pendant les déplacements entre deux microparcelles et pendant les virages en bout de ligne.

Les parcelles sont identifiées par un nom et les coordonnées GPS (WGS84 degrés décimaux) des quatre coins. Ces informations sont stockées dans un fichier texte.

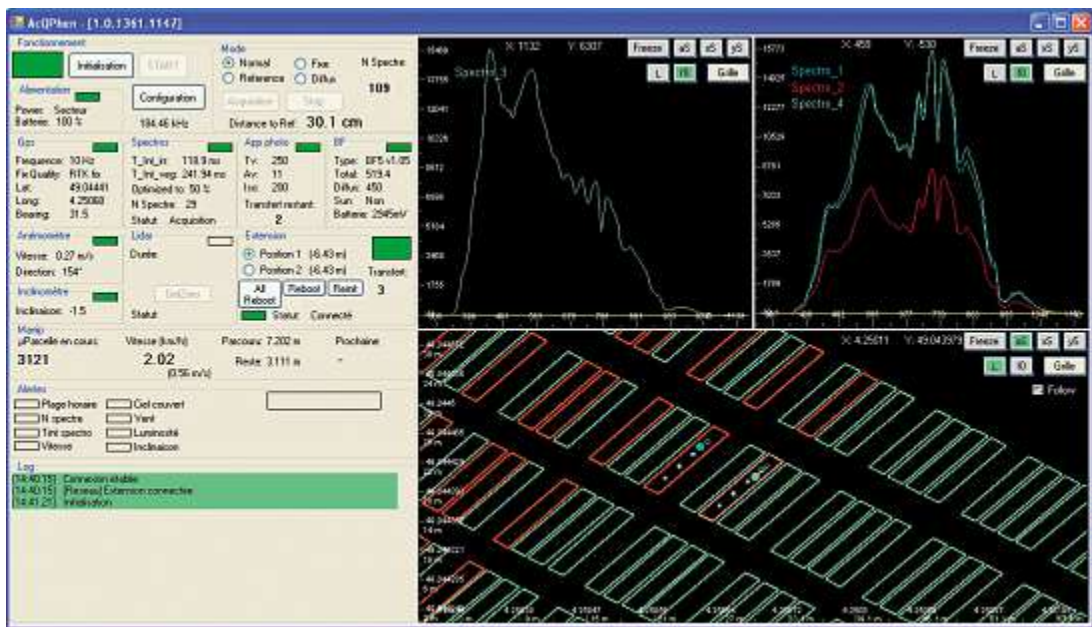


Figure 3. Fenêtre principale du logiciel : sur la partie gauche la liste des instruments et leur état, en haut à droite les spectres et en bas le plan des parcelles à mesurer (en vert les parcelles déjà mesurées).

Un outil qui s'insère dans la démarche SIG de l'UE

L'UE d'Auzeville utilise ArcGis for Desktop, logiciel commercial édité par ESRI (<http://www.esrifrance.fr/bureautique.aspx>), pour gérer ses données spatialisées (Legalle, 2009). En particulier, chaque essai est géoréférencé avec une précision centimétrique soit directement au semis lorsque le semoir à déclenchement par GPS est utilisé (cultures d'été) soit par relevé de quelques coordonnées à l'aide du GPS d'arpentage. Les couches SIG (système d'information géographique) sont définies dans le système de coordonnées Lambert 93. Les coordonnées des coins de chaque microparcelle, nécessaires au fonctionnement d'AcQPhen, sont donc récupérées dans le SIG après projection du repère Lambert 93 vers le repère WGS84. Le système de pilotage de la rampe s'insère donc naturellement dans la démarche engagée par l'UE vis-à-vis des outils de géolocalisation de ses activités. Il utilise aussi l'abonnement au réseau Sat-Info de l'UE utilisé pour les autres opérations nécessitant un géoréférencement précis en temps réel.

Conclusion

Le pilotage par GPS apporte un plus grand confort et une plus grande fiabilité dans les mesures en déchargeant l'opérateur du déclenchement et en lui permettant ainsi de se concentrer sur la surveillance des instruments. Il apporte aussi, grâce au positionnement absolu des mesures, une amélioration majeure dans l'exploitation des données en permettant une bonne concordance spatiale entre les séries de mesures successives d'une même microparcelle sur un cycle de culture. Le principe a donné satisfaction et sera repris pour le développement de la phénomobile qui équipera les plateformes de phénotypage au champ du projet Phénomène (projet Investissement d'Avenir, piloté par F. Tardieu et J. Le Gouis, visant à créer un réseau de plateformes de phénotypage des plantes). La phénomobile utilisera le positionnement GPS non seulement pour déclencher les mesures mais aussi pour piloter les déplacements de façon autonome.

Références bibliographiques

Montes JM, Melchinger AE, Reif JC (2007) Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies. *Trends Plant Sci* **12** : 433-436.

Furbank RT, Tester M (2011) Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck *Trends Plant Sci* **16** : 636-644.

Comar A, Burger P, de Solan B, Baret F, Daumard F, Hanocq J-F (2012) A semi-automatic system for high throughput phenotyping wheat cultivars in field conditions : description and first results. *Funct Plant Biol* **39** : 914-924.

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) », stage soutenu le 16 septembre 2009. INRA, Domaine expérimental Grandes cultures Auzeville, 54 p. + annexes.



Utilisation des données spatiales obtenues par un GPS embarqué pour établir une carte de fréquentation des parcelles

Francis Décuq¹, Anne Farruggia¹, Marc Barbet², David Egal², Bertrand Dumont¹

Résumé. Les systèmes d'information géographique (SIG) permettent d'exploiter, d'analyser et de représenter les volumes importants de données obtenues par les appareils d'enregistrement automatique du comportement embarqués sur des animaux. Nous avons utilisé cette application dans le cadre d'un essai visant à étudier l'impact de l'augmentation de la taille des parcelles pâturées sur leur utilisation par des troupeaux de bovins. Les mesures sur les animaux équipés d'un collier GPS (global positioning system) ont permis d'enregistrer leur comportement spatial (localisations) et alimentaire (activité de pâturage) sur des parcelles de tailles différentes pâturées à un même chargement d'une génisse par hectare. Les données obtenues ont été traitées avec un SIG (ArcView 3.2), ce qui nous a permis de dresser des cartes de fréquentation des parcelles représentant la localisation des animaux durant leurs repas.

Mots clés : SIG, comportement, spatial, alimentaire, fréquentation

Introduction

Augmenter la taille des parcelles pâturées permet de diminuer le temps de manipulation des animaux, mais aussi les aménagements des parcelles (moindre longueur de clôtures, moins de points d'eau et de points d'affouragement). Pour en analyser les conséquences, l'équipe Relations Animal Plantes et Aliments de l'Unité mixte de recherche sur les herbivores (INRA, Clermont-Ferrand) a mis en place un essai visant à étudier l'impact d'une augmentation de la taille des parcelles pâturées sur l'évolution du comportement spatial et alimentaire des animaux, la valeur fourragère des prairies, et la structure des communautés végétales (Décuq et al., 2010).

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a utilisé des génisses de 2 ans de race Charolaise ou Prim'Holstein issues des troupeaux INRA de l'Unité expérimentale des Monts d'Auvergne (UEMA). L'objectif est de tester à un même chargement (1 animal/ha) l'effet de l'augmentation de taille des parcelles. Celles-ci ont été implantées à l'intérieur de deux zones de prairies de moyenne montagne, au cœur du Massif du Sancy (Auvergne). Deux blocs de trois parcelles de 3, 9 ou 27 ha, ont ainsi été respectivement pâturés par 3, 9 ou 27 animaux pendant 4 ans, les animaux d'une race donnée changeant de bloc chaque année.

Mesures

Les mesures sur les animaux étaient destinées à étudier leur comportement spatial (localisation) et alimentaire (activité de pâturage) sur chaque parcelle des deux blocs. Les animaux étaient suivis pendant un nycthémère complet et ce durant 3 journées réparties au cours de la saison de pâturage : une au début de la saison (début juin), une deuxième lorsque la quantité d'herbe sur les parcelles était maximale (fin juillet) et la dernière à la fin de la saison (mi-septembre). A noter que pour des problèmes de coûts et de faisabilité, nous n'avons pu équiper qu'une partie des animaux. Les trois animaux de la parcelle de 3 ha étaient équipés, ainsi que six sur les neuf de la parcelle de 9 ha et dix sur les 27 de la parcelle de 27 ha.

1 INRA, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint Genès Champanelle, France ; francis.decuq@clermont.inra.fr

2 INRA, UE1296 Monts d'Auvergne, F- 63122 Domaine du Roc, Orcival, France

Techniques

Les mesures de comportement spatial et alimentaire ont été effectuées grâce à des appareils d'enregistrement automatique, à savoir le système GPS utilisé en mode différentiel (Décuq et al., 1998 ; Schlecht et al., 2004) pour les localisations et le système « ETHOSYS® » (Décuq et al., 1996 ; Scheibe et al., 1998) pour l'activité de pâturage. Ces deux appareils avaient déjà été précédemment utilisés avec succès dans l'équipe sur des bovins (Espinasse et al., 1996 ; Dumont et al., 2007), des chevaux (Espinasse et al., 1996) ou des cerfs (Pépin et al., 2006). Ils étaient embarqués simultanément sur les animaux. Si le système « ETHOSYS® » a été prévu pour être utilisé sur des animaux dès sa conception, nous avons dû adapter le système GPS afin qu'il puisse fournir des données systématiques, fiables et précises. Il a donc fallu concevoir un appareil permettant à la fois le fonctionnement optimal du GPS (global positioning system) tout en préservant le confort de l'animal afin que son comportement ne soit pas affecté par la pose de l'appareil, et que celui-ci ne génère ni souffrances, ni gêne, ce qui aurait altéré la signification des données enregistrées.

Le système GPS se compose de trois grandes parties : une antenne de réception, un récepteur qui stocke les données de localisations, et une alimentation permettant le fonctionnement de l'ensemble. Nous avons décidé de regrouper ces trois parties sur un surfaix en cuir robuste et confortable porté autour du cou de l'animal. Le principe du bon fonctionnement du système GPS est basé sur une réception la meilleure possible des signaux provenant d'un réseau de satellites. C'est pourquoi nous avons disposé l'antenne sur la partie supérieure du surfaix, sur le haut de l'encolure de l'animal. Le récepteur GPS est alimenté par des batteries au lithium de 9,6 volts. Celles-ci ont l'avantage de garantir le fonctionnement du système durant 24 h, mais aussi, grâce à leur faible poids (600 g) de ne pas trop alourdir notre surfaix et donc de ne pas gêner l'animal. Nos expériences précédentes nous ont conduit à limiter au maximum le câblage extérieur qui peut être arraché par les animaux. C'est pour cela que le récepteur et son alimentation ont été disposés côte à côte à l'intérieur d'une boîte en PVC robuste (**Figure 1**).

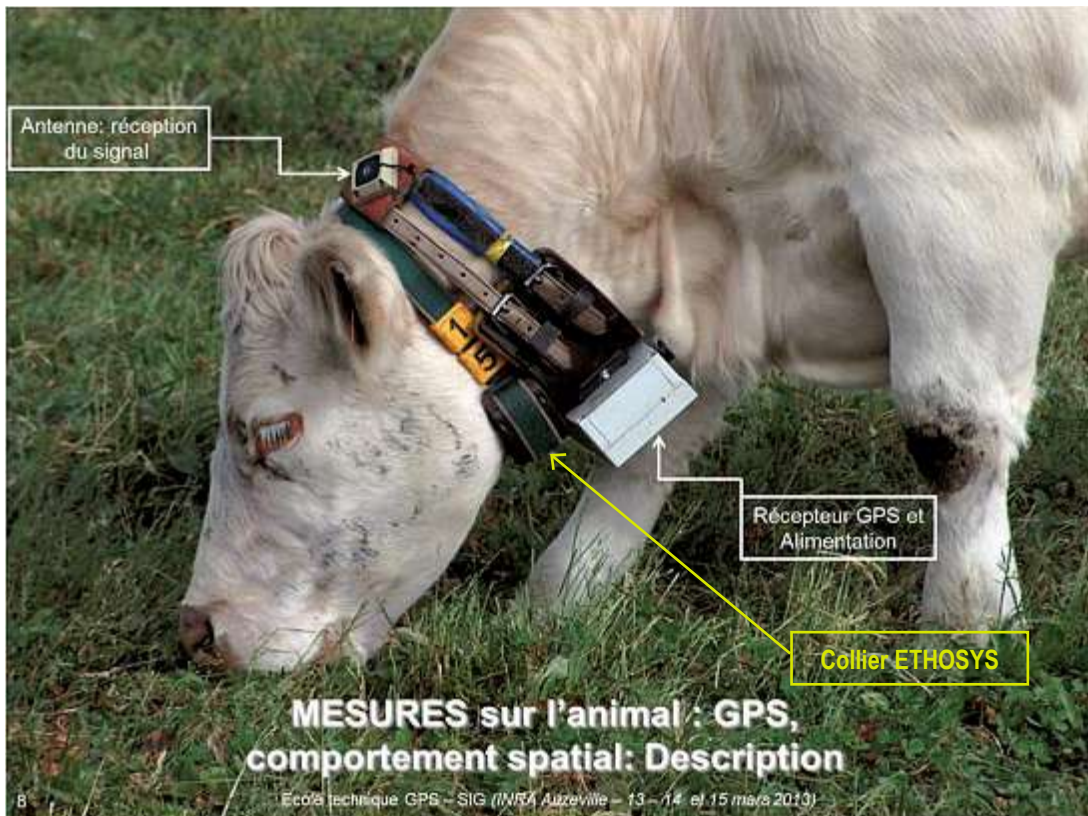


Figure 1. Photo INRA Clermont Ferrand/Theix, Francis Décuq.

Les deux systèmes embarqués sur les animaux étaient programmés afin d'effectuer un enregistrement toutes les 5 secondes, c'est-à-dire en quasi continu ce qui représente à la fin d'une journée 17 280 valeurs par animal. Dans cette expérience particulière, près de 2 millions d'enregistrements ont été réalisés pour l'ensemble des animaux. Comment alors exploiter, analyser, et représenter l'ensemble de ces données ? Nous avons choisi d'utiliser le SIG (ArcView 3.2), grâce auquel on peut facilement exploiter des données préalablement traitées avec d'autres logiciels (Access par exemple). Le SIG permet de créer des cartes, afin de représenter les localisations des animaux en fonction de leurs activités. C'est ainsi que nous avons pu éditer les cartes de fréquentations présentées dans cet article.

Résultats

Avant de pouvoir exploiter les fichiers concernant les localisations par le SIG, il a fallu au préalable effectuer un traitement différentiel dit en « post traitement » sur l'ensemble de ces données, pour en améliorer la précision (Décuq et al., 1998 ; Schlecht et al., 2004). En effet, les fichiers obtenus par les appareils GPS sont entachés d'erreurs induites par l'utilisation proprement dite du système. On peut en retenir quatre sources principales. Celles d'origine atmosphérique (passage du signal à travers les différentes couches de l'atmosphère), celles liées à la géométrie des satellites (leur position au moment du calcul de la localisation), les trajets multiples (présence d'obstacles, bâtiments, arbres à proximité de l'antenne de réception), et enfin les erreurs d'orbites et d'horloge. Le traitement différentiel en « post traitement » est basé sur le principe que deux récepteurs GPS situés à proximité l'un de l'autre (une distance inférieure à 100 km) reçoivent en même temps les mêmes signaux provenant des mêmes satellites et donc les mêmes erreurs. S'il est impossible d'appréhender ces erreurs sur un récepteur placé sur un animal (et donc mobile) c'est beaucoup plus facile sur un appareil en position fixe (qui sert de référence) dont on connaît la position réelle. Il sera alors possible, de calculer pour chaque localisation acquise par la référence une erreur par rapport à sa position réelle que l'on appellera terme correcteur. Sachant qu'à chaque localisation du récepteur mobile correspond une localisation de la référence, puisque elles ont été obtenues dans les mêmes conditions, il suffit d'appliquer le terme correcteur aux localisations du récepteur mobile a posteriori afin d'améliorer la précision des données.

C'est à partir de ces données corrigées que l'on crée ensuite les cartes de fréquentations. Pour cela il faut d'abord réunir dans une vue du SIG l'ensemble des informations qui nous seront nécessaires. Les fréquentations représentent les localisations des animaux et on va donc créer un plan les contenant. Ces localisations ont été obtenues lorsque les animaux pâturaient une parcelle ; on éditera donc le plan de la parcelle représentée suivant un quadrillage de plusieurs carrés ou polygones de 30 m de côté (pour une superficie de 900 m² chacun). L'ensemble des informations contenues à l'intérieur de ces polygones est exploitable par le SIG. A partir d'un plan regroupant les informations de localisations et de la parcelle quadrillée, on peut demander au SIG de compter le nombre de localisations contenues dans chacun des polygones. On crée alors un nouveau paramètre, indice de fréquentation, obtenu en divisant le nombre de localisations contenues dans un polygone par sa surface. Enfin on a représenté avec des couleurs différentes ces indices de fréquentation après les avoir classés globalement en trois catégories pour des fréquentations nulle, faible ou forte (pour les zones dans lesquelles des animaux ont été observés en train de pâture on sépare pour cela de part et d'autre de la médiane des indices de fréquentation). Nous obtenons alors des cartes, composées des polygones colorisés différemment en fonction de la pression de pâturage, permettant ainsi une visualisation de la fréquentation des zones par les animaux. On notera ainsi que les parcelles de petite taille semblent être plus fortement pâturées, et que par ailleurs plus la parcelle est grande plus la pression de pâturage est irrégulière (**Figures 2 et 3**). Dans ces conditions, le pâturage bovin pourrait entraîner le maintien de zones plus ou moins pâturées au sein des couverts prairiaux (Rossignol et al., 2011), entraînant à terme une divergence fonctionnelle bénéfique à la biodiversité (Dumont et al., 2011).

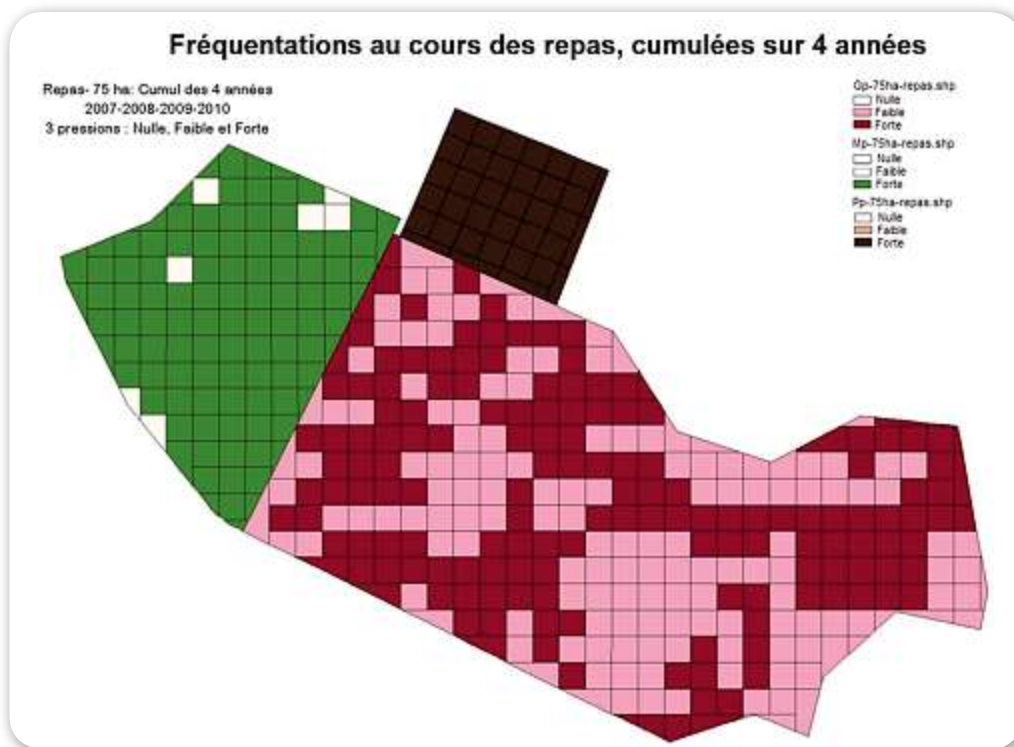


Figure 2

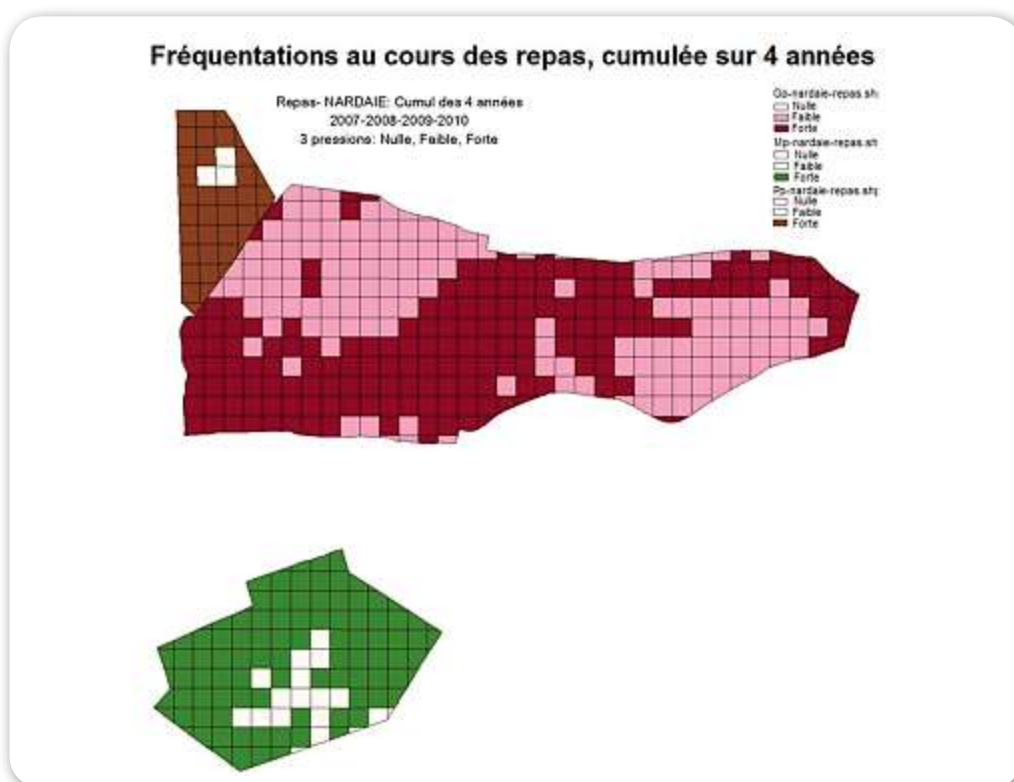


Figure 3



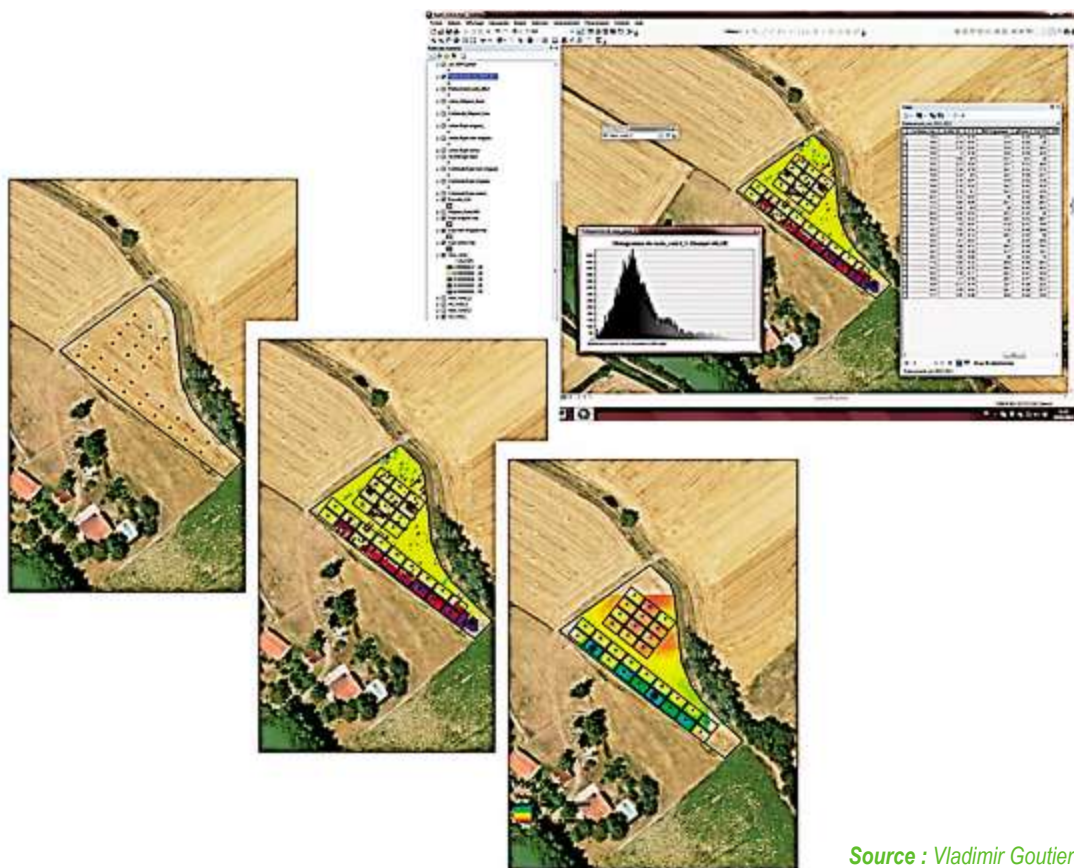
Références bibliographiques

- Décuq F, Dubroeuq H, Micol D (1996) Utilisation du système d'enregistrement automatique ETHOSYS® sur des troupeaux de bovins et de chevaux. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* **3** : 74.
- Décuq F, Brun JP, Dubroeuq H, Micol D (1998) Adaptation des techniques GPS à la localisation des herbivores domestiques. 1^{re} journée « Gestion des territoires ruraux sensibles ». *Ann Zootech* **47** : 508.
- Décuq F, Farruggia A, Dumont B (2010) Effet de la taille de la parcelle sur le comportement spatial et alimentaire des animaux et sur l'évolution de la structure du couvert herbacé : présentation effectuée au cours des journées de l'UMT PASF, avril 2010 Le Mourier.
- Dumont B, Garel JP, Ginane C, Décuq F, Farruggia A, Pradel P, Rigolot C, Petit M (2007) Effect of cattle grazing a species-rich mountain pasture under different stocking rates on the dynamics of diet selection and sward structure. *Animal* **1** : 1042-1052.
- Dumont B, Carrère P, Ginane C, Farruggia A, Lanore L, Tardif A, Décuq F, Darsonville O, Louault F (2011) Plant-herbivore interactions affect the initial direction of community changes in an ecosystem manipulation experiment. *Basic Appl Ecol* **12** : 187-194.
- Espinasse C, Décuq F, Micol D (1996) Suivi des activités et des localisations de troupeaux d'herbivores en estive avec un système d'information géographique (SIG). *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* **3** : 75.
- Pépin D, Renaud PC, Dumont B, Décuq F (2006) Time budget and 24-h temporal red-activity patterns of captive red deer hinds. *Appl Anim Behav Sci* **101** : 339-354.
- Rosignol N, Chadoeuf J, Carrère P, Dumont B (2011) A hierarchical model for analysing the stability of vegetation patterns created by grazing in temperate pastures. *Appl Veg Sci* **14** : 189-199.
- Scheibe KM, Schleusner T, Berger A, Eichhorn K, Langbein J, Dal Zotto L, Streich WJ (1998) ETHOSYS® – new system for recording and analysis of behavior of free-ranging domestic animals and wildlife. *Appl Anim Behav Sci* **55** : 195-211.
- Schlecht E, Hülsebusch C, Mahler F, Becker K (2004) The use of differentially corrected global positioning system to monitor activities of cattle at pasture. *Appl Anim Behav Sci* **85** : 185-2.

/ Chapitre 4 /

Couplage GPS-SIG

Pour la caractérisation du milieu expérimental et le suivi des essais au champ



Source : Vladimir Goutiers

La mesure de résistivité électrique : un outil d'aide à la cartographie des sols L'exemple de l'Unité expérimentale d'Epoisses

Maud Séger¹, Hocine Bourennane¹, Marie-Noël Mistou², Catherine Pasquier¹, Guillaume Giot¹,
Marjorie Ubertos³, Isabelle Cousin¹

Résumé. A l'échelle parcellaire, le sol constitue un milieu dont la nature et les propriétés varient. Pour caractériser plus précisément les sols de certaines Unités expérimentales de l'INRA, des prospections géoélectriques ont été réalisées. Sur la base de l'exemple de l'UE d'Epoisses, ce document présente d'une part les avantages de la mesure électrique pour la caractérisation des sols et d'autre part les techniques SIG (système d'informations géographiques) mises en œuvre pour le traitement des données.

Mots clés : résistivité électrique, hétérogénéités intraparcellaires, cartographie, caractérisation des sols, SIG

Introduction

La nature du sol est très variable dans l'espace, à toutes les échelles, depuis l'horizon jusqu'au bassin versant. Au sein d'une même parcelle, il n'est pas rare d'observer plusieurs types de sols présentant des caractéristiques physiques, physico-chimiques et biogéochimiques très différenciées. Pour conduire des études agronomiques et environnementales de qualité à l'échelle infra-parcellaire, la cartographie des sols, qui permet de décrire leur variabilité, est une étape incontournable. Les Unités expérimentales (UE) de l'INRA des Départements EA (Environnement et Agronomie) et BAP (Biologie et Amélioration des Plantes), ont entrepris de cartographier finement les propriétés des sols de leurs parcelles d'essais, dans le but de mieux quantifier les stress hydriques et azotés rencontrés par les cultures lors des expérimentations agronomiques (projet CAREX). A cette fin, des mesures de résistivité électrique ont été conduites sur les Domaines INRA des Départements concernés. En effet, cette mesure quasi-exhaustive, rapide et non destructive permet de caractériser des hétérogénéités du sol de manière quasi-continue dans l'espace. L'objectif de ce travail est de montrer, à partir de l'exemple de l'UE d'Epoisses, que l'intégration sous SIG (système d'information géographique) de mesures ponctuelles de propriétés du sol et de données de résistivité électrique s'avère pertinent pour décrire la variabilité spatiale des sols.

La mesure de résistivité électrique

La résistivité électrique est la propriété physique du sol qui caractérise sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. Pour la mesurer, on injecte dans le sol un courant électrique d'intensité connue, via deux électrodes (A et B). Deux autres électrodes (M et N) permettent de mesurer la différence de potentiel qui en résulte. On calcule alors la résistivité électrique selon l'équation (1).

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \quad (1)$$

où ρ est la résistivité électrique (ohm.m), ΔU_{MN} la différence de potentiel (V), I_{AB} l'intensité électrique (A) et K un facteur géométrique qui dépend de la configuration géométrique des électrodes, c'est-à-dire de leur position respective les unes par rapport aux autres. La circulation du courant électrique à l'intérieur du sol dépend de la nature de ce dernier (granulométrie, présence d'éléments grossiers) et de son état lié à des facteurs conjoncturels (remplissage de la porosité par de l'eau, arrangement spatial des particules de sol, température).

1 INRA, UR0272 SOLS, F-45075 Orléans, France ; Maud.Seger@orleans.inra.fr

2 INRA, UMR0211 Agronomie, INRA Versailles-Grignon, F-78850 Thiverval-Grignon ; France

3 AgroSup Dijon, UMR 1347 Agroécologie, F- 21079 Dijon, France

Dans un milieu hétérogène tel que le sol, la mesure de résistivité électrique résulte de la contribution volumique de toutes les hétérogénéités traversées par le courant, on parle alors de résistivité apparente. Il est important de noter que le volume prospecté augmente avec l'écartement entre les électrodes.

Conditions de mesure

La mesure de résistivité électrique est de manière générale une méthode robuste et fiable. Cependant, certaines conditions de prospection peuvent engendrer une trop forte résistance de contact entre le sol et les électrodes et ainsi dégrader la qualité des mesures. On évitera par exemple les prospections sur des sols trop secs ou trop caillouteux en surface.

Comme précisé dans le paragraphe précédent, la résistivité électrique du sol dépend de variables pérennes (nature du sol) et de variables conjoncturelles. Si l'objectif d'une prospection de résistivité électrique est de caractériser la nature du sol, il est important de la réaliser dans des conditions hydriques et de température les plus constantes possibles au cours de la prospection. Dans tous les cas, des mesures de la teneur en eau et de la température du sol sont des éléments de compréhension très importants.

Le dispositif automatic resistivity profiler (ARP)

L'automatic resistivity profiler (ARP), évolution du MUCEP développé par Panissod et al., (1997) est un dispositif tracté permettant de déplacer quatre paires d'électrodes (une paire AB pour l'injection et trois paires M_1N_1 , M_2N_2 et M_3N_3 pour la mesure de la différence de potentiel) attelées à l'arrière d'un véhicule (Figure 1). Ce dispositif permet donc de prospecter les sols à la fois latéralement, grâce au déplacement du véhicule, et sur trois profondeurs, selon les trois voies de mesures V1, V2 et V3. Chaque mesure est géo référencée par un GPS (global positioning system) différentiel (John Deere, modèle StarFire ITC, précision planimétrique de l'ordre de 10 cm).

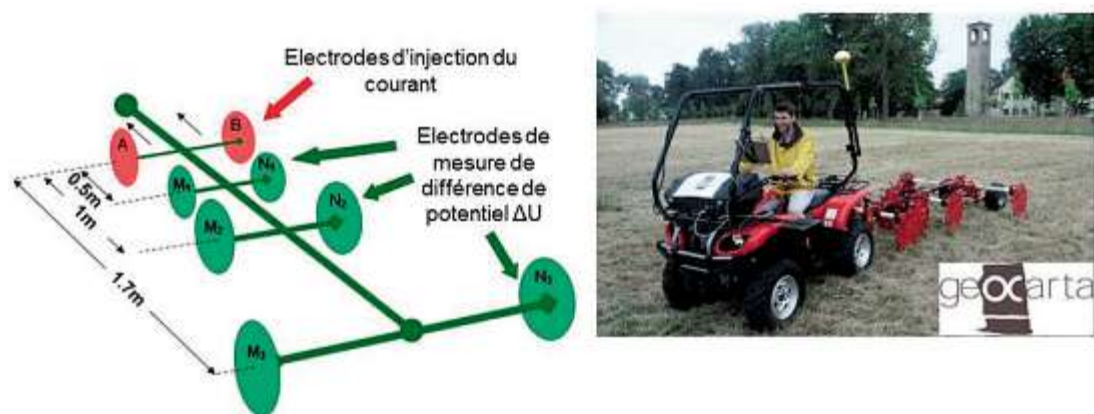


Figure 1 . Schéma et photographie du dispositif tracté ARP, déployé par la société GEOCARTA (www.geocarta.net).
Photo : Geocarta.

Valorisation des données : l'exemple de l'UE d'Epoisses

L'UE d'Epoisses

Le Domaine expérimental d'Epoisses se situe au Sud-Est de Dijon et compte environ 120 ha subdivisés en une centaine de parcelles expérimentales. La carte pédologique au 1/100 000 (Chrétien, 1976) indique que le site présente deux types de sols : des Rendzines brunifiées, de faibles épaisseurs (20 à 40 cm) et des sols bruns calciques plus profonds (épaisseur supérieure à 40 cm). Les deux types de sols reposent sur un cailloutis calcaire.

La campagne de prospection ARP sur le site d'Époisses a eu lieu du 15 au 25 novembre 2011. D'après les données de la station météorologique du site, cette période se caractérise par de faibles précipitations (2,5 mm au total) et une faible évapotranspiration (2 mm au total selon le modèle de Penman). La température journalière moyenne du sol à 50 cm a varié entre 9,5 et 11,3 °C pendant ces 10 jours. L'effet des variations temporelles de ces variables a été considéré comme négligeable dans le cas de cette étude.

Représentation des cartes de résistivité électrique

Les fichiers contenant les données de résistivité sont constitués des coordonnées géographiques de chaque point de mesure et des trois valeurs de résistivité associées (V1, V2 et V3). Les données fournies sont de deux types : 1) les données pré-traitées qui correspondent aux mesures réalisées sur le terrain avec suppression des valeurs aberrantes, recalage des coordonnées géographiques et filtrage 1D et 2) une grille régulière de points, grille qui correspond aux données pré-traitées, interpolées selon une maille carrée⁴. La **Figure 2** présente les cartes de résistivité pour les trois voies de mesure sur l'UE d'Époisses réalisées dans un SIG (Arc Map 10.1) à partir de la grille régulière.

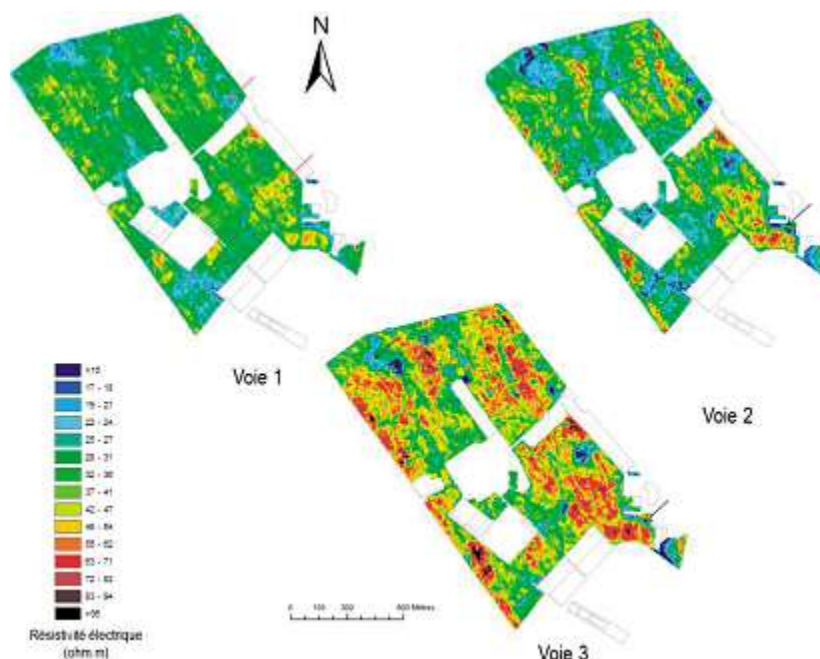


Figure 2. Cartes interpolées des résistivités électriques mesurées par les trois voies de l'ARP et plan d'échantillonnage.

Les valeurs de résistivité des trois voies sont comprises entre 10 et 100 ohm.m avec une majorité de valeurs comprises entre 10 et 80 ohm.m. Du fait du caractère emboîté des mesures, on retrouve une organisation spatiale similaire entre les trois voies, c'est-à-dire que les zones les plus résistantes sur la voie 1 le sont également sur les voies 2 et 3. La forme de certaines zones de faibles résistivités fait penser à des structures de type paléo chenal (voir flèches noires sur la **Figure 2**). La voie 1 met en évidence des structures dont les contours suivent les limites de parcelle (voir flèches rouges sur la **Figure 2**). Cette voie prospectant approximativement sur la couche 0-50 cm est en effet influencée par la structure du sol, elle-même largement dépendante des types de cultures et des pratiques culturales mises en œuvre sur les parcelles comme par exemple le type de travail du sol. Les voies 2 et 3 qui englobent des volumes de sol plus importants sont moins influencées par cet effet parcellaire. La voie 3 met en évidence des résistivités en moyenne plus élevées (moyenne égale à 44 ohm.m) que celles des voies 1 et 2 (moyennes égales à 32 et 33 ohm.m respectivement), laissant à penser que le volume prospecté intègre une partie du cailloutis calcaire résistant.

⁴ L'interpolation est réalisée selon une fonction spline cubique. Cette méthode est adaptée à la création de surfaces variant graduellement. La taille de la maille dépend de l'écartement entre les passages ARP réalisés lors de la prospection. Elle est égale à environ la moitié de cet écartement. Par exemple pour une prospection réalisée tous les 6 m, la maille aura une taille de 3 m de côté.

Guide pour la réalisation d'un plan d'échantillonnage

Les cartes de résistivité électrique, dont la structuration spatiale est liée aux caractéristiques et propriétés des sols décrites plus haut, ne constituent pas pour autant des cartes de sol. Pour réaliser une carte des sols, on doit en effet décrire certaines variables pédologiques, à l'aide de sondages à la tarière ou de fosses pédologiques. La position de ces derniers peut être réfléchiée en fonction de la variabilité spatiale du milieu, appréhendée notamment par les mesures de résistivité électrique. Celles-ci viennent en effet s'ajouter aux connaissances *a priori* du milieu (carte géologique, modèle numérique d'altitude, etc.) et permettent d'optimiser la position des sondages et le futur contour des unités cartographiques de sol. Pour autant, la connaissance exhaustive de la résistivité électrique sur le site d'étude ne s'accompagne pas d'une réduction du nombre de sondages pédologiques pour une résolution cartographique donnée.

Sur le site d'Epoisses, la connaissance que nous avons *a priori* sur l'épaisseur du sol a orienté le choix de la carte de la voie 2 comme support pour la réalisation du plan d'échantillonnage. Elle a été représentée en quatre classes de gamme de résistivité et les 30 points de sondages pédologiques ont été répartis équitablement au sein de ces dernières (**Figure 3**) grâce au SIG. Ce nombre de points, qui représente une observation pour 4 ha de terrain, permet théoriquement de restituer une carte des sols à l'échelle du 1/25 000 (norme AFNOR NFX31-560).

A l'aide d'un DGPS (Trimble, Pro XR, précision < 1 m), les points identifiés sur le SIG ont été implantés sur le terrain pour y effectuer des sondages pédologiques. Pour chaque sondage, la profondeur du sol a été mesurée et les horizons de sols ont été décrits et échantillonnés pour la réalisation d'analyses de sols (granulométrie, CEC, cations échangeables, pH...) au laboratoire de l'INRA d'Arras.

L'observation des sondages de sol montre qu'ils sont constitués d'un horizon de surface labouré reposant soit directement sur le cailloutis calcaire pour les sols de faible épaisseur, soit, pour les sols plus épais sur un horizon structural. Sur l'ensemble des points décrits, l'épaisseur du sol varie entre 23 et 192 cm. Les analyses physico-chimiques montrent des résultats comparables d'un sondage de sol à l'autre. Ces résultats ont permis de mettre en évidence que le site est composé de sols qui se différencient essentiellement par leur épaisseur, en cohérence avec la carte des sols à plus petite échelle réalisée sur la région par Chrétien (1976).

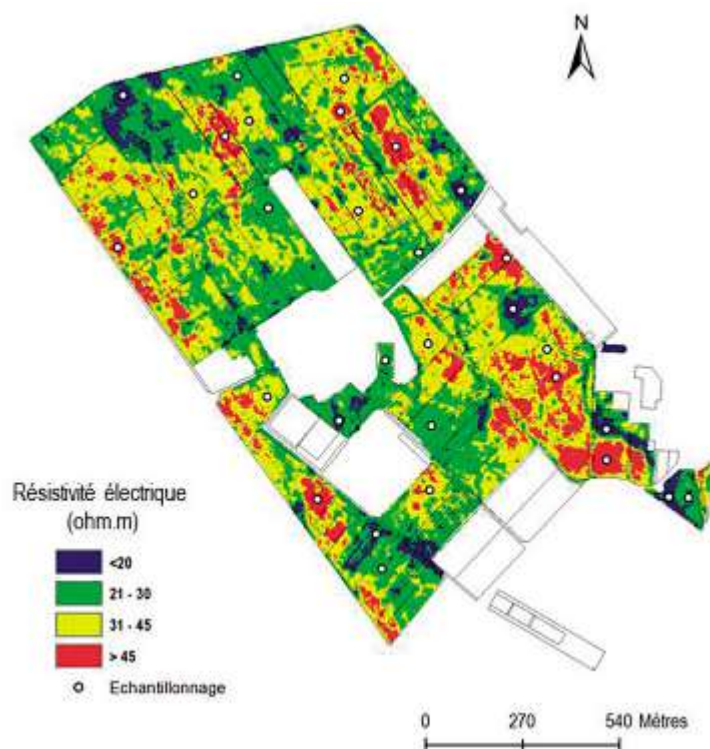


Figure 3 . Carte de quatre classes de résistivité à partir des mesures de la voie 2 et plan d'échantillonnage.

Construction de cartes de profondeurs du sol

Des analyses statistiques (Mitombo, 2013), ont montré qu'il existe, dans le cas du site d'Epoisses, une relation linéaire entre l'épaisseur du sol et le logarithme de la résistivité électrique mesurée par la voie 3 (**Figure 4**) : dans le cas de l'UE d'Epoisses, 71 % de la variation de l'épaisseur est expliquée par la résistivité mesurée sur la voie 3.

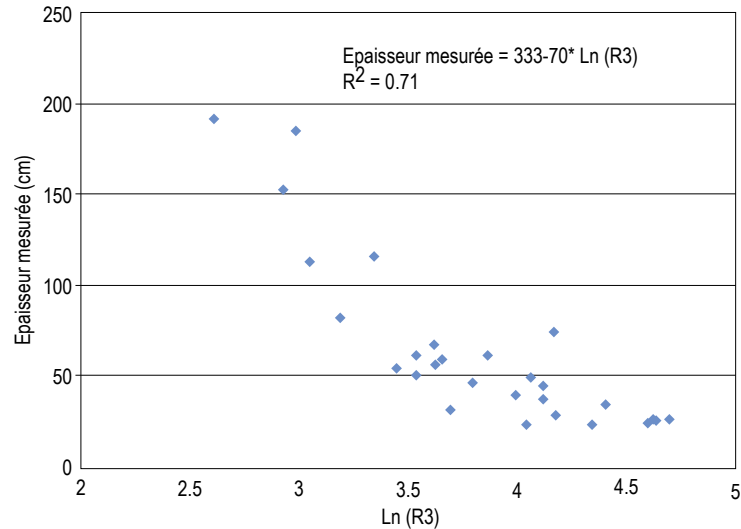


Figure 4. Modèle linéaire entre l'épaisseur du sol mesurée et le logarithme de la résistivité électrique de la voie 3.

Ce modèle a permis de réaliser, sur son domaine de validité (dans la gamme de résistivité qui a servi à établir le modèle), une carte de l'épaisseur estimée du sol à partir des résistivités de la voie 3 (**Figure 5**).

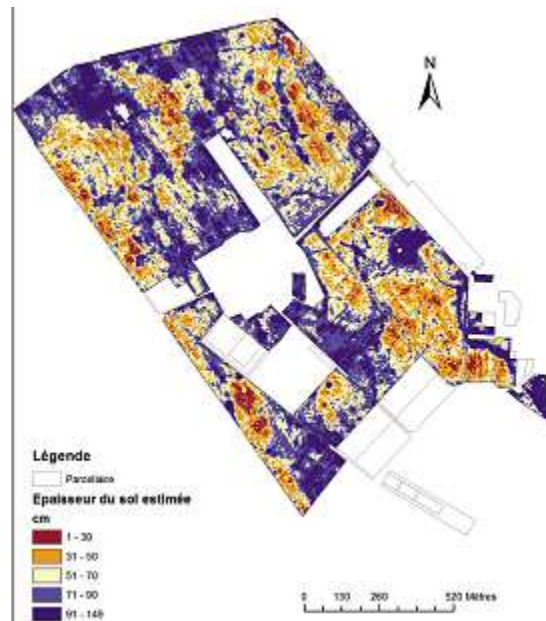


Figure 5. Carte de l'épaisseur du sol estimée grâce au modèle de régression linéaire. Les zones représentées en couleur blanche sur la carte correspondent aux zones qui n'ont pas pu être estimées par le modèle car en dehors du domaine de validité.

La gamme des épaisseurs estimées (3 à 149 cm) est cohérente avec les observations de terrain.

Pour critiquer la qualité du modèle, une nouvelle campagne de mesure doit être réalisée afin d'obtenir un jeu de données de validation indépendant.



Conclusion

Sur la base de l'exemple du Site expérimental de l'INRA d'Epoisses, ce document permet d'illustrer l'intérêt de l'intégration sous SIG de mesures de résistivité électrique associées à des mesures pédologiques pour la cartographie des sols. En effet, la carte de résistivité électrique permet d'acquérir, dans un premier temps une connaissance des hétérogénéités du sol à l'échelle infra-parcellaire et ce, sur trois profondeurs d'investigation ce qui s'avère utile pour établir une stratégie d'échantillonnage. La prospection géoélectrique ne permet pas de faire des cartes des sols ou de propriétés du sol directement. Cependant, des travaux de recherche, nécessitant une phase de calibration, ont permis de proposer des modèles statistiques ou géostatistiques permettant de réaliser des cartes de certaines propriétés du sol (teneur en eau, charge en éléments grossiers par exemple). Dans le cas de l'UE d'Epoisses, elle a permis de construire une carte de l'épaisseur du sol à partir d'un modèle statistique.

Remerciements

Nous remercions Rodolphe Hugard de l'UE d'Epoisses et Gilles Grandeau de l'UMR Agronomie pour le travail d'échantillonnage réalisé pendant la campagne de prélèvement des sols.

Références bibliographiques

Panissod C, Dabas M, Jolivet A, Tabbagh A (1997) A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3 m) geoelectrical investigation : the 'Vol-de-canards' array. *Geophys Prospect* 45, 983-1002.

Chrétien J (1976) Carte pédologique de la France à 1/100 000. Feuille de Dijon, INRA. Editions, carte et notice. 218 p.

Mitombo ND (2013) Valorisation d'une prospection électrique pour établir une carte de l'épaisseur du sol. Mémoire de Master 2 Géosciences planètes ressources Environnement, spécialité Sol, Eaux et Environnement, Université de Lorraine, 25 p.

Proxidétection par drone au service du suivi expérimental

Nathalie Vigneau, Romain Faroux¹

Résumé. La société AIRINOV® propose un service d'acquisition et de traitement d'images aériennes multispectrales ou RGB (red green blue) par drone au service de l'agriculture et de la recherche agronomique. Le drone est une aile volante robotisée d'une envergure de 1 m. Sa hauteur de vol comprise entre 30 et 150 m permet de s'affranchir de la couverture nuageuse. Le drone est équipé d'un capteur quadri-bande modulable qui enregistre la valeur de la réflectance de la végétation dans quatre bandes spectrales (gamme 400-850 nm) avec une résolution spectrale pouvant descendre jusqu'à 10 nm. La résolution spatiale du capteur multispectral varie de 5 à 15 cm/px selon la hauteur de vol, celle du capteur RGB de 1 à 5 cm par pixel. Le vol est réalisé de manière totalement automatique grâce à un logiciel autopilote et sous le contrôle d'un opérateur certifié. Avec une capacité d'acquisition de 1,5 ha/min, le drone peut couvrir l'ensemble d'une plateforme expérimentale en quelques minutes, garantissant l'homogénéité de la mesure. Le traitement des données permet d'accéder à des variables agronomiques telles que le LAI (leaf area index) ou le taux de chlorophylle sur blé, colza et maïs ainsi qu'à des d'indices de végétation tels que le NDVI (normalized difference vegetation index) ou le PRI (photochemical reflectance index). Des valeurs moyennes peuvent être extraites par microparcelle, grâce à la vectorisation du parcellaire directement sur les cartographies. Les données peuvent alors être exportées dans une base de données en respectant sa nomenclature. La simplicité de mise en œuvre et la rapidité des prises de vue drone autorisent une fréquence de revisite élevée tout au long du cycle de culture permettant le suivi dynamique des paramètres de la culture (cartographies superposables du NDVI, courbes de LAI par variété, cinétique de stade, etc.). L'acquisition aérienne par drone AIRINOV® constitue un moyen fiable, rapide et précis de suivi des plateformes d'essais dans leur totalité, tout au long d'un cycle de culture.

Mots clés : drone, image multispectrale, image RGB très haute résolution, microparcelles, phénotypage

Introduction

L'intérêt de la télédétection n'est plus à démontrer pour le suivi de parcelles agricoles et la caractérisation de l'état de la végétation. Cette technologie donne accès à de nombreuses données : biomasse, LAI (leaf area index ou indice de surface foliaire) taux de chlorophylle (Cab), etc. (Smith et al., 1995 ; Thenkabail, 2003 ; Mulla, 2013). Cependant l'usage du satellite connaît des limites, notamment en terme de résolution spatiale, mais aussi en raison de sa dépendance aux conditions météorologiques et à son trop grand délai de revisite (Moran et al., 1997 ; Pinter et al., 2003). Le drone, par sa réactivité et sa rapidité de mise en œuvre, constitue alors une alternative possible pour acquérir des données pour l'agriculture de précision. Il est ainsi possible de réaliser des acquisitions aux dates et à la fréquence que l'on veut.

Par ailleurs, l'intérêt croissant pour des données de phénotypage et le développement de plates-formes expérimentales a mis en évidence le besoin de données agronomiques objectives adaptées à l'échelle de la plante, répétables et sur l'intégralité des plateformes d'essais (Kipp et al., 2014, Araus et Cairns, 2014). Dans ce cadre, le drone constitue également un outil particulièrement pertinent. Permettant d'obtenir des données de manière simultanée sur l'ensemble d'une plateforme, le drone augmente la représentativité des mesures.

AIRINOV® est une jeune PME créée en décembre 2010 et qui a choisi de se spécialiser exclusivement dans l'utilisation de l'imagerie aérienne par drone pour le suivi agronomique. Ses services s'adressent à la fois aux agriculteurs (carte de préconisation d'azote sur colza ou blé) mais aussi aux semenciers, aux chercheurs du domaine public, aux responsables de plates-formes expérimentales, etc. Les données acquises avec les drones AIRINOV® permettent de s'intéresser à différentes thématiques : du phénotypage à la dynamique de floraison en passant par le

¹ SAS AIRINOV, 48 rue René Clair, 75899 Paris Cedex 18, France ; nathalie.vigneau@airinov.fr

dénombrement de pieds (tournesol, maïs, etc.). La maîtrise de la chaîne, de la conception de drones et de capteurs à la production de cartes en passant par l'acquisition des images, permet à AIRINOV® d'offrir un accompagnement personnalisé en lien avec les objectifs et besoins des expérimentateurs.

La proxidtection par drone

Le drone

Parmi les différents types de drones existants (pour plus de détails, voir la revue de Colomina et Molina (2014), AIRINOV® a choisi l'aile volante (ou voilure fixe) pour des raisons de résistance au vent et de vitesse de couverture. Après avoir développé et exploité ses propres drones, AIRINOV® s'est associé à senseFly et devient exploitant et revendeur de ses drones eBee (**Figure 1a**). D'un poids inférieur à 700 g charge comprise, le eBee fait partie de la catégorie des drones légers facilitant sa mise en œuvre opérationnelle. Construit en EPP (expanded polyPropylene), mélange de polystyrène et de résine, il est capable de supporter les chocs sans se casser (atterrissage sur sol nu par exemple).



Figure 1 (a). Le drone eBee de senseFly (b) équipé du capteur MultiSpec 4C d'AIRINOV® (Copyright AIRINOV®).

Le capteur

Le drone peut embarquer deux types de capteurs différents selon l'information nécessaire : un appareil photo classique ou un capteur multispectral quadribande. Le capteur multispectral, breveté, est constitué de quatre caméras distinctes sur lesquelles ont été ajoutés des filtres permettant de sélectionner les longueurs d'onde d'intérêt. L'innovation réside dans la combinaison d'un capteur à la fois léger (donc adapté au drone) et adapté à la végétation. Le système optique est traversant, avec les optiques sous le drone (**Figures 1b, 2a et 2b**) alors que le capteur PAR (enregistrant l'illumination ambiante pour la correction en réflectance) est situé sur la face supérieure.

De manière opérationnelle, le système agrodronne™ utilise un capteur avec une bande dans le vert (550 nm, FWHM (full width at half maximum) de 40 nm), une dans le rouge (660 nm, FWHM de 40 nm), une dans la gamme spectrale du red edge (735 nm, FWHM de 10 nm) et une dans le proche infra-rouge (790 nm, FWHM de 40 nm). Ces bandes ont été définies conjointement avec l'UMR EMMAH (Environnement méditerranéen et modélisation des agro-hydrosystèmes) de l'INRA d'Avignon comme étant les bandes principales permettant d'accéder aux informations agronomiques d'intérêt (LAI, Cab). Toutefois, si besoin, ces filtres sont modulables et permettent de sélectionner des bandes dans la gamme 350-800 nm avec une résolution spectrale variant de 10 à 40 nm.



Figure 2. a recto et b verso du capteur MultisSpec 4C breveté par AIRINOV® (Copyright AIRINOV®)


Le vol

Le vol du drone est entièrement automatique. Il est nécessaire de connaître les coordonnées géographiques de la parcelle d'intérêt. Une fois ses coordonnées entrées dans l'autopilote, le drone est lancé à la main et suit sa trajectoire (calculée automatiquement) contrôlée par son GPS embarqué (Figure 3) et sous la surveillance de son opérateur. Sa vitesse de vol est de 60 km/h et son autonomie, assurée par une batterie électrique, est de 30 min. L'acquisition des images par le drone est peu influencée par la couverture nuageuse puisque le drone vole en dessous des nuages. Sa hauteur de vol maximale en France est de 150 m afin de rester dans le cadre réglementaire le moins contraignant et il peut supporter le vent jusqu'à 50 km/h. Seule la pluie le contraint à rester au sol. En effet, les gouttes d'eau favorisent la diffusion de la lumière et viennent perturber le signal enregistré qui n'est pas facilement exploitable (Rees, 2013).



Figure 3. Le système AIRINOV® (Copyright AIRINOV®).





Le drone enregistre les photos à la fréquence d'une image toutes les 1,5 seconde ce qui donne par exemple environ 1 000 images pour une parcelle de 15 ha à 15 cm de résolution. La position géographique et l'altitude du drone sont enregistrées grâce à un capteur GPS et une centrale inertielle, permettant de géoréférencer précisément les données obtenues. Le positionnement relatif entre les images est inférieur au pixel. L'erreur moyenne de positionnement absolu est d'environ 5 m (précision du GPS embarqué). Un essai, réalisé par AIRINOV® et l'équipe « sol » de l'INRA de Grignon (78) dans une parcelle agricole, en utilisant 23 cibles au sol géolocalisées centimétriquement avec un DGPS (differential global positioning system ou GPS différentiel) Trimble® Pathfinder Power, a montré qu'il était possible de recalibrer les images drones avec une précision de quelques centimètres, en s'appuyant sur ce type de références.

Un algorithme automatique de reconstruction de scène (voir paragraphe suivant), utilisant des approches photogrammétriques, est utilisé pour créer la carte globale de la parcelle en mosaïquant l'ensemble des images. Pour ce faire, le système doit identifier des points de repère identiques présents dans les images successives, on parle de points homologues ou points d'intérêts, qui vont permettre le recalage des images entre elles. Il est donc indispensable d'avoir un bon recouvrement spatial entre les images successives. Les paramètres de vol de l'agrodrome™, permettent un recouvrement de 80 % dans le sens de déplacement du drone (intra bande) et de 60 % entre les passages (inter bande).

Avant chaque vol, une surface de référence est scannée avec le capteur. Cette surface a été caractérisée spectralement en laboratoire. Le capteur de lumière (luxmètre) avec une sensibilité de 400 à 700 nm situé sur le drone et synchronisé avec l'acquisition d'images enregistre les variations d'irradiance durant le vol. La combinaison de ces deux mesures permet la correction des images en réflectance.

La production d'une carte

Les photos sont enregistrées à bord du drone sur une carte SD (carte mémoire utilisée génériquement pour les appareils photographiques) et sont récupérées après l'atterrissage du drone. Il est alors nécessaire de recréer la géométrie de la scène pour pouvoir reprojeter les photos suivant un référentiel géographique et un système de projection donnés. L'ensemble des traitements géométriques est automatisé et réalisé grâce à un logiciel du commerce. Il comprend la définition de points d'intérêts dans les images, la mise en correspondance des points entre les images, l'ajustement de faisceaux pour affiner la géométrie de la scène et la reconstruction de la géométrie (MNS, modèle numérique de surface) (Hartley et Zisserman, 2004). La reprojection des images sur cette géométrie permet d'obtenir une orthophoto de la zone complète.

Dans le cas du capteur multispectral, il y a nécessité de recalibrer les images des bandes entre elles, c'est l'étape de « co-registation ». La procédure développée par AIRINOV® permet d'atteindre une précision de superposition entre les bandes de l'ordre du demi-pixel. Il ne reste plus qu'à appliquer la correction en réflectance grâce aux données du luxmètre et de la surface de référence. Les bandes peuvent alors être traitées séparément pour l'établissement de corrélations avec des mesures terrain ou servir au calcul d'indices ou à l'inversion de modèles de transfert radiatif.

La robustesse du signal

Afin de s'assurer de la qualité des données produites en sortie de la chaîne de traitement ainsi que de la robustesse du signal enregistré par le drone, deux vols ont été réalisés sur la même parcelle au cours de la même journée, un le matin et un l'après-midi. Ces vols ont permis le calcul de deux indices de végétation, le NDVI (normalized difference vegetation index) et le PRI (photochemical reflectance index). La **Figure 4** représente la régression linéaire qui a pu être réalisée pour chaque indice avec en abscisse les données du vol 1 et en ordonnée, les données du vol 2. Pour chaque indice, le coefficient de détermination est supérieur à 0,9 prouvant la cohérence et la robustesse du signal. Par ailleurs, une étude statistique plus poussée a montré que 95 % des points sur la parcelle avaient un coefficient de variation absolu inférieur à 3,7 %.



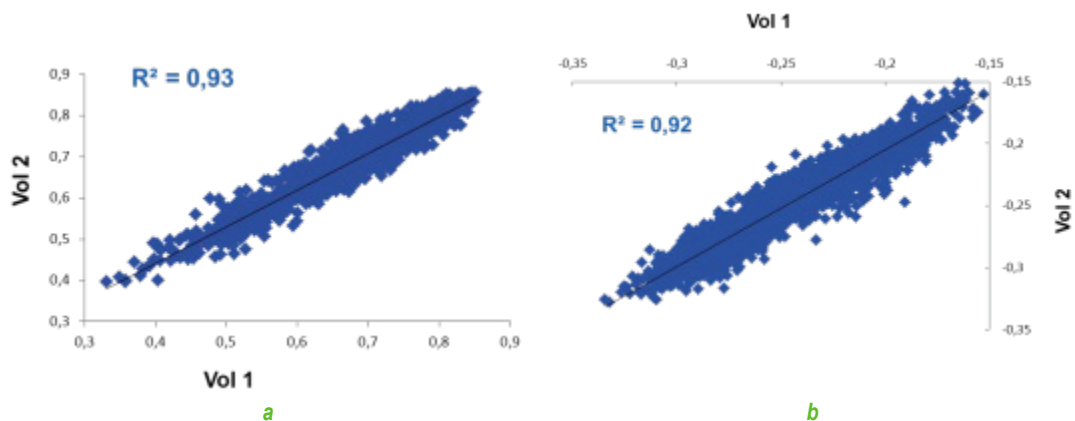


Figure 4. Estimation de la robustesse du signal : a. NDVI, b. PRI (Copyright AIRINOV®).

L'estimation de paramètres biophysiques et biochimiques

AIRINOV® utilise l'inversion de modèles de transfert radiatif (méthode développée en exclusivité avec l'équipe de F. Baret de l'INRA d'Avignon) pour l'obtention du GAI (green area index -indice de surface verte), de Cab (taux de chlorophylle de la feuille) ainsi que du QCab, quantité de chlorophylle intégrée sur l'ensemble du couvert (Verger et al., 2014). La Figure 5 présente les résultats de validation de l'estimation de l'indice foliaire. On constate que la pente vaut 1 et que les résultats de l'estimation sont en parfaite cohérence avec les mesures qui peuvent être réalisées au sol. Par ailleurs, la RMSE (root-mean-square error - racine de l'erreur de prédiction quadratique moyenne) pour ces 38 points est de seulement 0,21 ce qui est très satisfaisant.

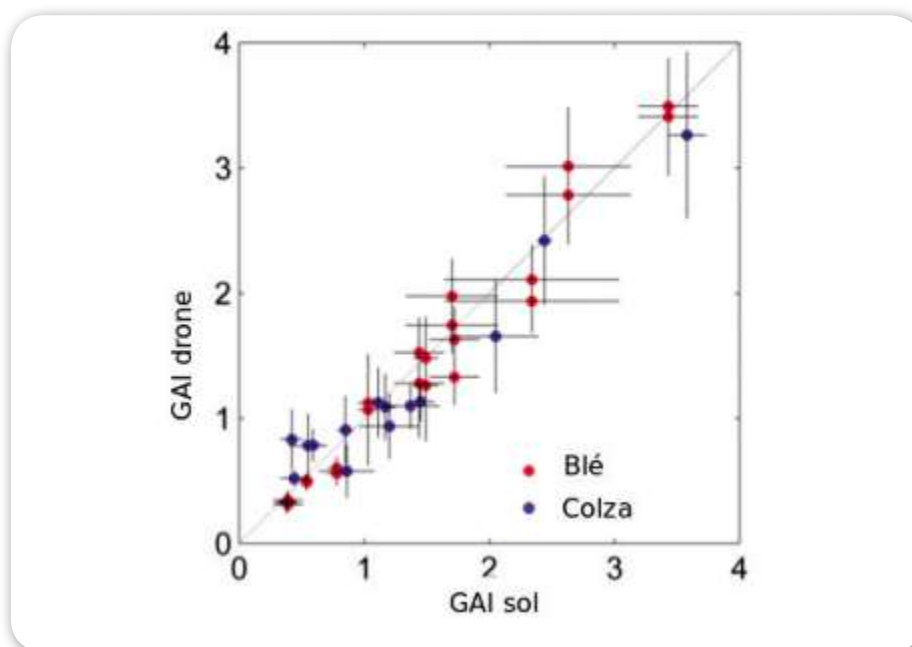


Figure 5. Résultats d'estimation du GAI par drone AIRINOV® en comparaison de mesures réalisées au sol (Copyright AIRINOV®).



Le drone au service de la recherche et de l'expérimentation

Les caractéristiques d'un vol

Pour le suivi de parcelles expérimentales de quelques m², la résolution spatiale doit être la plus fine possible pour des études par exemple sur le phénotypage. Lorsque le drone vole à 50 m, la résolution spatiale est de 5 cm en multispectral et de 1,5 cm en RGB classique.

La vectorisation

En plus de la production de cartes, il est possible grâce à un logiciel de SIG (système d'information géographique) de vectoriser le parcellaire directement sur les images (**Figure 6**). Cette vectorisation permet l'extraction de données statistiques à la microparcelle. Cette vectorisation n'est réalisée qu'une seule fois au cours du cycle de culture. Elle permet de mieux visualiser les cartographies d'un paramètre donné en distinguant les différentes parcelles ou placettes (**Figure 7**) et permet l'extraction de données au format tableur. Ces données sont ensuite directement intégrables dans une base de données qui peut suivre la nomenclature précise des microparcelles (blocs, lignes, colonnes, etc.). Il est alors possible de confronter ces données à des mesures réalisées sur le terrain pour mettre en place des corrélations.



Figure 6. Résultats de la vectorisation des 1356 microparcelles de maïs (2 ou 4 rangs) (Copyright AIRINOV®).

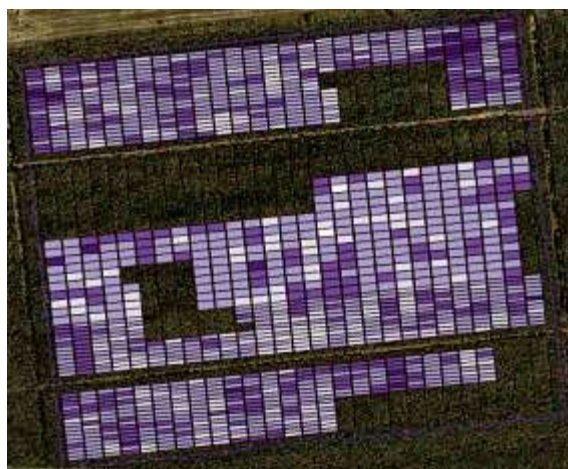


Figure 7. Visualisation d'un paramètre par cartographie colorée sur le parcellaire (Copyright AIRINOV®).

L'intérêt du système AIRINOV® pour le suivi de parcelles expérimentales

Le drone couvre l'ensemble d'une plate-forme expérimentale en quelques minutes, garantissant l'homogénéité de la mesure. Le traitement des données permet d'accéder à des variables agronomiques telles que le LAI ou le taux de chlorophylle sur blé, colza et maïs ainsi qu'au calcul d'indices de végétation tels que le NDVI ou le PRI. La rapidité et la réactivité du drone permettent de choisir le moment le plus favorable pour la prise de vue et des acquisitions fréquentes au cours du cycle de culture et ainsi le suivi dynamique d'un paramètre donné. La **Figure 8** présente des cartographies superposables du NDVI. Si la plate-forme a été vectorisée, il est également possible d'extraire des valeurs quantitatives par microparcelle et d'établir des courbes de LAI par variété au cours du temps ou des cinétiques de stade.

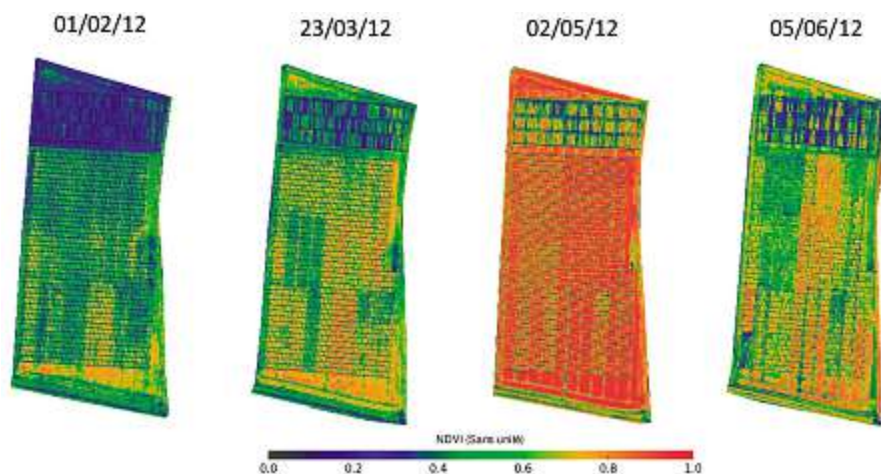


Figure 8. Exemples de cartes superposables de NDVI d'une même parcelle au cours du temps (Copyright AIRINOV®)

L'acquisition d'images à très haute résolution (THR) (1,5 cm en RGB, 5 cm en multispectral) peut également permettre le dénombrement (de pieds de tournesol comme sur la **Figure 9**), la détection d'adventices dans l'inter-rang ou le suivi de dynamique de floraison sur tournesol et colza.

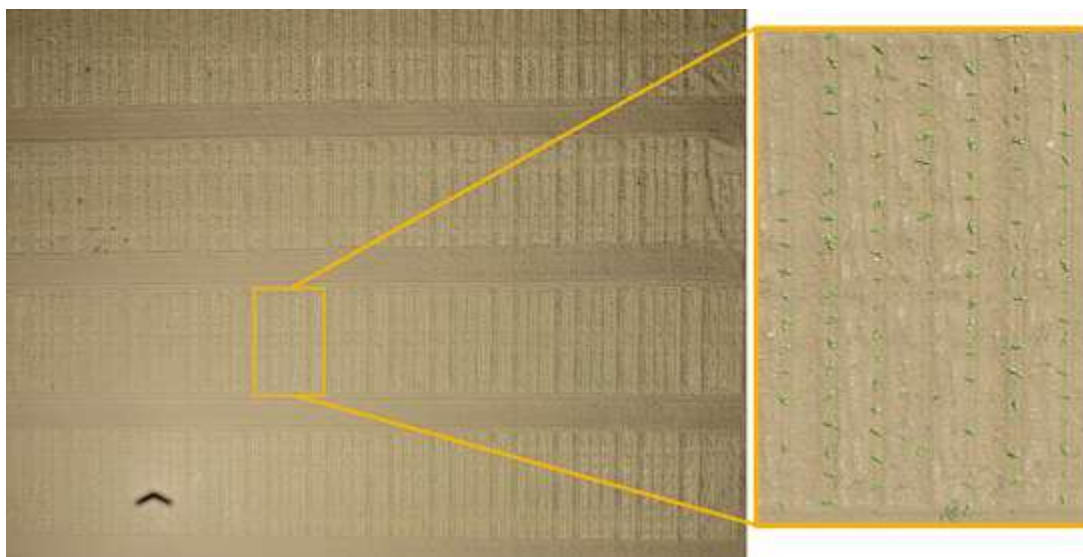


Figure 9. Image RGB THR (résolution spatiale de 8,5 mm) d'une plateforme de tournesol illustrant la possibilité du dénombrement de pieds, zoom sur 5 rangs (5 x 3m) (Copyright AIRINOV®).



Le géoréférencement des orthophotos produites par AIRINOV® permet un affichage dans des outils de SIG ou dans GoogleEarth (**Figure 10**). Cette visualisation autorise un affichage de cartes à différentes dates permettant la gestion d'un lot de parcelles.



Figure 10. Visualisation d'un ensemble de microparcelles sous Google Earth (copyright AIRINOV®).

AIRINOV® a proposé ses services à de nombreux sélectionneurs et a réalisé différents travaux sur blé (dynamique de mise en place du couvert), sur maïs (suivi de stress hydrique, estimation de la variabilité de levée), sur colza (dynamique de floraison) ou sur tournesol (dénombrement de pieds à la levée). L'INRA a également pu apprécier les avantages de cette technique que ce soit pour des études sur sol nu (INRA Grignon), sur tournesol, prairie ou céréales (INRA Auzeville) ou sur colza et betterave (INRA Dijon en partenariat avec le Cetiom). Les nombreux échanges avec les chercheurs permettent d'améliorer constamment le service proposé et de s'adapter aux besoins des projets en cours ou à venir.

Conclusion

L'intérêt du drone pour le suivi de plateforme d'essais provient principalement de sa fine résolution spatiale. En effet sa faible altitude de vol autorise une très bonne résolution spatiale (de 5 cm à 15 cm en multispectral et de 1,5 à 5 cm en RGB) et rend l'acquisition indépendante de la couverture nuageuse. L'offre agrodrome™ AIRINOV® présente également une grande rapidité de déploiement qui rend son utilisation souple de manière à suivre au plus près les stades clés de la végétation et qui lui permet d'être réactif face aux conditions météorologiques changeantes. La modularité de son capteur permet d'accéder à des données très variées : LAI, Cab, NDVI, PRI, etc. Pour toutes ces raisons, l'offre agrodrome™ d'AIRINOV® constitue un excellent outil de suivi de parcelles expérimentales.

AIRINOV® propose ses services aux expérimentateurs mais aussi aux agriculteurs pour leur fournir un conseil en fertilisation azotée sur colza notamment. AIRINOV® a pour objectif de développer de nouveaux services tant pour les agriculteurs que pour les expérimentateurs. C'est pourquoi AIRINOV® poursuit ses travaux de recherche sur de nouveaux capteurs comme par exemple l'utilisation de l'imagerie thermique pour le suivi de stress hydrique ; et sur de nouvelles thématiques comme la détection de mauvaises herbes, la détection de maladie de la vigne, etc.

Références bibliographiques

- Araus JL, Cairns JE (2014) Field high-throughput phenotyping : the new crop breeding frontier. *Trends Plant Sci*, **19**, 52-61.
- Colomina I, Molina P (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing : A review. *ISPRS J Photogram Remote Sens* **92** (79-97).
- Hartley R, Zisserman A (2004) *Multiple View Geometry in computer vision (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Kipp S, Mistele B, Baresel P, Schmidhalter U (2014) High-throughput phenotyping early plant vigour of winter wheat. *Eur J Agronom* **52**, Part B, 271-278.
- Mulla DJ (2013) Twenty five years of remote sensing in precision agriculture : Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosyst Eng*, **114**, 358-371.
- Moran MS, Inoue Y, Barnes E M (1997) Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sens Environ*, **61**, 319-346.
- Pinter PJ, Hatfield J L, Schepers JS, Barnes E M, Moran M S, Daughtry CS et al. (2003) Remote sensing for crop management. *Photogramm Eng Remote Sens*, **69**, 647-664.
- Rees WG (2013) *Physical Principles of Remote Sensing (3rd ed)*. Cambridge University Press.
- Smith R, Adams J, Stephens D J, Hic PT (1995) Forecasting wheat yield in a Mediterranean-type environment from the NOAA satellite. *Aust J Agric Res*, **46**, 113-125.
- Thenkabail PS (2003) Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images. *Int J Remote Sens*, **24**, 2879-2904.
- Verger A, Vigneau N, Cheron C, Baret F (2014). Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sens Environ*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.006>



Quelle plus-value pour le suivi des essais au champ de l'exploitation des informations géo-localisées des capteurs de proxi et télédétection avec des méthodes géomatiques ?

Vladimir Goutiers¹, Paul Laurent¹

Résumé. L'étude traite de l'intérêt d'utiliser des outils de géolocalisation et de mesures physiques haut débit en expérimentation végétale à l'INRA pour appréhender l'hétérogénéité spatiale intraparcellaire. Un travail exploratoire a été engagé sur le Domaine expérimental de Toulouse Auzeville. Nous présentons une comparaison de résultats d'estimation des paramètres biophysiques pour le suivi des sols et des couverts prairiaux, entre des mesures réalisées au champ (LAI : leaf area index), et des mesures acquises par des capteurs de proxi et télédétection, telles que : la résistivité électrique apparente des sols et des images multispectrales de drone. La chaîne d'analyse des informations est décrite afin de présenter les points faibles et les points forts de ces approches. Dans nos conditions expérimentales la résistivité électrique s'avère être un bon indicateur pour cartographier les propriétés de la couche travaillée des sols (fertilité, texture et concentration en calcaire). Il en est de même pour les indices de télédétection agronomique qui rendent bien compte de la variabilité des couverts végétaux prairiaux. Nous pouvons conclure dans nos conditions d'essai que ces méthodes et techniques de cartographie haut débit des propriétés du sol et des couverts peuvent être très utiles à l'expérimentateur en production végétale. Elles permettent de mieux appréhender la variabilité spatiale de la parcelle dans les étapes de conception du plan d'expérience et dans l'étape d'interprétation des résultats d'expérimentations factorielles.

Mots clés : géomatique, télédétection agronomique, GNSS, physico-chimie des sols, indice de surface foliaire, résistivité électrique, drone

Introduction

L'agriculture de précision mobilise depuis de nombreuses années les images multispectrales de télédétection pour caractériser l'état nutritionnel des couverts cultivés (Coquil et Bordes, 2005). De nouvelles technologies plus souples à mettre en œuvre pour l'expérimentateur de terrain sont maintenant disponibles sur le marché (aéromodélisme volant à basse altitude avec pilotage par l'utilisateur). Nous présentons ici une des solutions de drone civil permettant de recueillir des images multispectrales à une résolution de 15 cm.

En télédétection les images multispectrales permettent de calculer des indices de végétation. Ces indices sont bâtis en transformant des luminances mesurées à partir de capteurs embarqués, en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement (paramètres biophysiques des couverts végétaux). De très nombreux indices de végétation ont été créés et utilisés ces quarante dernières années (Bannari et al., 1995). Une des difficultés est donc de choisir l'indice mettant en évidence le phénomène que l'expérimentateur veut mesurer. L'indice le plus connu et le plus utilisé est l'indice de végétation par différence normalisée ou indice de Tucker NDVI (normalized difference vegetation index) (Tucker, 1979). Cet indice est utilisé pour évaluer l'état nutritionnel azoté d'un couvert. Parmi les variables du couvert végétal à estimer, l'indice foliaire (LAI : leaf area index) est le plus utilisé en agriculture. Il caractérise la taille des surfaces d'échange (rayonnement, eau, carbone) avec l'atmosphère (Baret, 1999) et permet de rendre compte de l'hétérogénéité parcellaire à partir des couverts végétaux. Des relations entre NDVI et LAI ont été mises en évidence (Dubois, 2003), ces deux paramètres réagissent de façon identique dans le domaine spectral pour les mêmes structures végétales. La cartographie de la résistivité électrique apparente du sol est une autre méthode pour rendre compte de l'hétérogénéité intra et interparcellaire dans les dispositifs expérimentaux. L'utilisation de cette technologie de par la densité spatiale des points de mesure permet une très bonne estimation de la variabilité spatiale à l'échelle de la parcelle de certaines propriétés du sol comme la teneur

1 INRA, UMR 1248 AGroécologie Innovations Ruralités, F- 31326 Castanet-Tolosan, France ; Vladimir.Goutiers@toulouse.inra.fr

en argile, la charge en cailloux ou la présence de calcaire (Moeys et al., 2006). Actuellement, les technologies GNSS (global navigation satellite system) et SIG (système d'information géographique) sont assez peu utilisées dans le domaine de l'expérimentation végétale à l'INRA (Institut national de la recherche agronomique). En partenariat avec l'Unité expérimentale d'Auzeville, nous avons donc engagé un travail exploratoire afin d'analyser les possibilités d'utilisation en routine de ces technologies dans les métiers de l'expérimentation. L'étude présentée ici est une illustration d'un cas concret d'intégration de ces nouveaux outils dans la chaîne d'analyses des résultats d'un essai. La **Figure 1** est une illustration de la démarche appliquée.

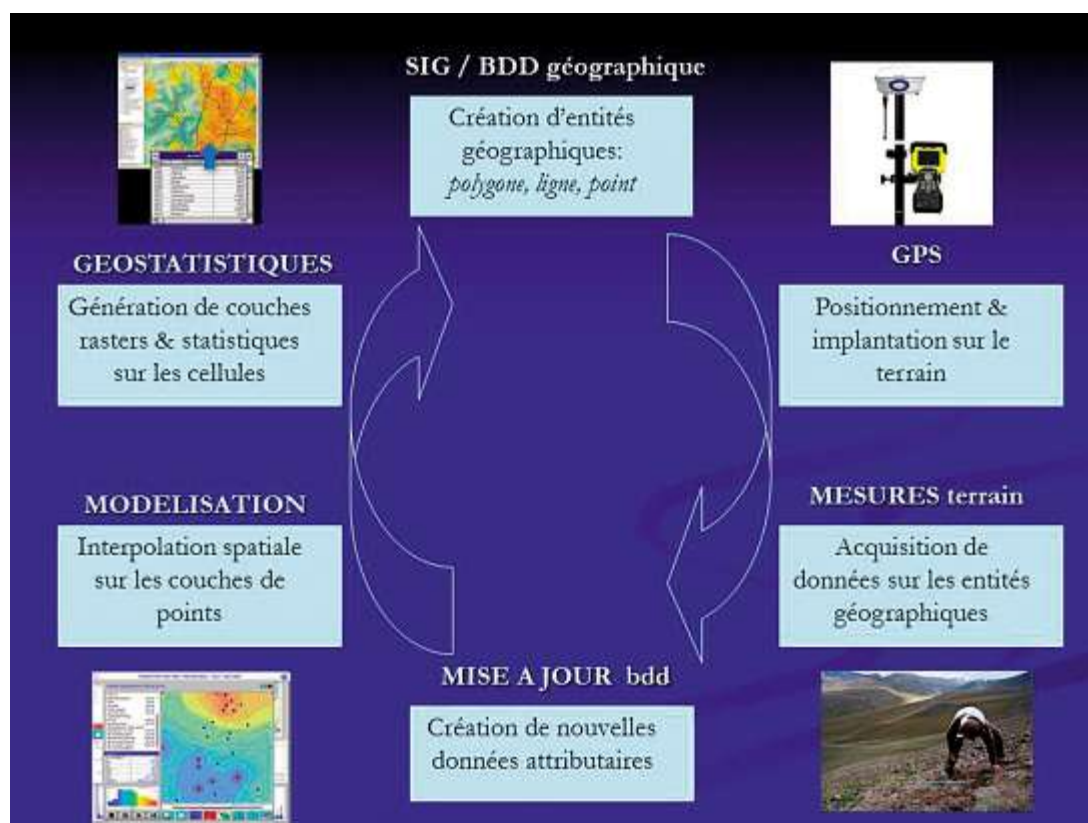


Figure 1. Chaîne d'analyses appliquée sur un dispositif expérimental.

Au travers de cet article nous cherchons à démontrer que l'utilisation des outils de statistiques spatiales permet de caractériser les sols et les couverts végétaux d'une expérimentation et de rendre compte de l'hétérogénéité (intra et interparcellaire). L'étude porte sur la comparaison de résultats issus de mesures au champ et de données produites par télédétection et cartographie de résistivité apparente du sol. Après avoir présenté rapidement la méthode utilisée pour la conception et la mise en place de l'essai, nous exposerons la manière dont nous avons géré l'acquisition et le traitement des données géolocalisées et issues de proxidtection. Nous nous intéresserons aux corrélations entre les paramètres physico-chimiques du sol et la résistivité électrique apparente sur une grille de points de prélèvement. Nous présenterons ensuite les résultats issus de l'analyse des couches modélisées par interpolation spatiale sous la forme d'une matrice de corrélation. Ces éléments seront complétés par une analyse des relations existantes entre indices de télédétection agronomiques et une variable biophysique (LAI) mesurée au sol. L'objectif de ces indicateurs est de pouvoir cartographier à haut débit l'hétérogénéité parcellaire.



Matériels et méthodes

Les parcelles sont situées sur le Domaine expérimental d'Auzeville. L'essai support d'étude est un dispositif en bloc aléatoire complet de trente microparcelles implanté en octobre 2010 avec des couverts prairiaux utilisés en fauche (**Figure 2**). Le dispositif couvre une surface de 2000 m². Nous étudions l'effet des facteurs biotiques et abiotiques (composition du couvert, alimentation hydrique et minérale) sur la cinétique de constitution de la matière sèche produite. Il est indispensable pour nous d'intégrer la variabilité intraparcellaire afin d'interpréter nos résultats.

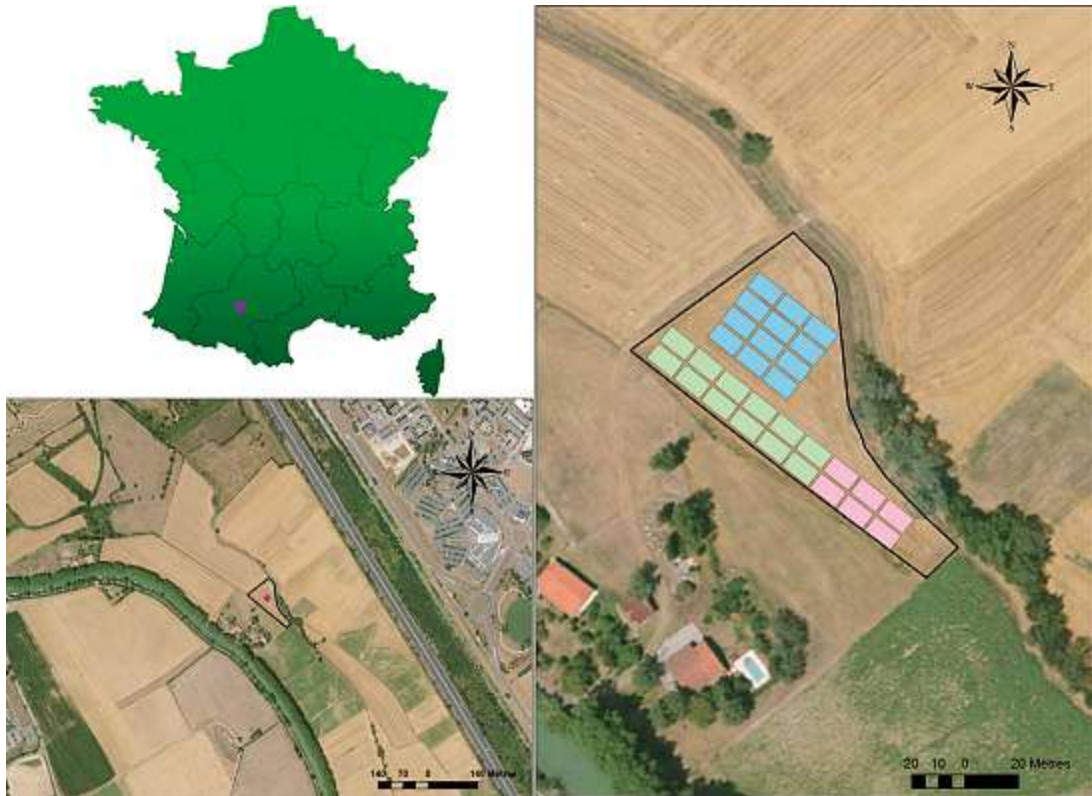


Figure 2. Parcelle expérimentale support d'essai. Copyright « © IGN – BD ORTHO 2010 »

Pour concevoir le plan d'expérience nous avons utilisé le logiciel ArcGIS-Arcinfo 10 avec les extensions ET GeoWizard et Graphics and Shapes. Les microparcelles ainsi constituées ont été implantées au champ à l'aide d'un GNSS Trimble R6 sur canne avec correction différentielle RTK (real time kinematic) de précision centimétrique. Des mesures de résistivité électrique ont été faites avec le système ARP® (automatic resistivity profiling) de la société Géocarta². Trois profondeurs ont été prospectées (voie 1 : 0-50 cm, voie 2 : 0-100 cm et voie 3 : 0-150 cm). Le descriptif de la méthode de mesure est décrit dans l'article de Séger et al., (2014).

Pour interpréter cette caractérisation géophysique des microparcelles, nous avons réalisé des analyses physico-chimiques sur des prélèvements de sol de la couche labourée collectés au centre de chacune d'entre elles (**Figure 3**). Nous avons ainsi construit par interpolation spatiale 20 couches thématiques au format raster correspondant à l'ensemble des variables physico-chimiques mesurées. La résolution spatiale de ces couches est de 15 cm comme pour les images multispectrales. Durant la saison de végétation 2013 nous avons recueilli des images multispectrales grâce au drone de la société Airinov³ avant chaque fauche de la végétation pour quatre longueurs d'onde (vert 550 nm, rouge 660 nm, red-edge 735 nm et proche infrarouge 790 nm). Grâce à ces photographies aériennes nous avons calculé 19 indices de végétation fréquemment utilisés en télédétection (Girard et Girard, 2010). En parallèle, nous avons relevé au sol sur 138 points géoréférencés l'indice de surface foliaire (LAI) avec un appareil de mesure LAI2000 de la marque LI-COR. Les points de mesures ont été implantés de façon équidistante sur les diagonales des rectangles constituant les microparcelles.

2 <http://www.geocarta.net>

3 www.airinov.fr

Toutes les données ont été analysées avec le logiciel de statistique SPAD 8 et l'extension Spatial Analyst d'Arcgis. Notre stratégie méthodologique pour mettre en évidence les liens entre les mesures de capteurs, les paramètres du sol et les propriétés des couverts a porté sur deux niveaux : (i) explorer les relations statistiques entre des propriétés physico-chimiques des sols et leur résistivité électrique apparente ; (ii) explorer les relations statistiques entre des variables biophysiques (LAI) mesurées au sol et des indices de télédétection agronomiques construits à partir d'images multispectrales obtenues par vol de drone. Les données ponctuelles (analyses de terre et résistivité) ont été spatialisées par interpolation à l'aide d'une méthode de pondération par l'inverse de la distance (IDW) (Watson et Philip, 1985). Nous avons ensuite vérifié si les relations statistiques entre les couches thématiques ainsi modélisées étaient conservées par rapport aux relations établies sur les données brutes. L'analyse intercouches thématiques s'est appuyée sur une méthode de comparaison des valeurs de pixels pour établir un coefficient de détermination de Pearson.



*Figure 3. Points de prélèvement des échantillons de sol pour analyses physico-chimiques (N=30).
Copyright « © IGN – BD ORTHO 2010 »*

Résultats

L'ensemble des couches constituées à partir des variables mesurées a été intégré dans une base de données géographique. Cette dernière a été ensuite exploitée pour réaliser les analyses statistiques. Voici les principaux résultats que nous pouvons mettre en évidence dans nos conditions expérimentales.

Corrélation entre les propriétés physico-chimiques et la résistivité électrique apparente des sols

Comparaison au niveau des points de prélèvement des sols

La résistivité électrique apparente est toujours corrélée à certains cations (K et Na) du sol quelle que soit la profondeur prospectée par les électrodes. De même il existe une relation positive entre la teneur en sables de l'horizon labouré et la valeur de résistivité. Les mesures réalisées sur les voies profondes (voie 2 ou 3) permettent



d'obtenir de meilleures prédictions des variables physico-chimiques (texture, cations...) que la voie 1. De nouvelles corrélations non observées sur la couche 0-50 cm (voie 1) sont mises en évidence entre les concentrations en phosphore Olsen et en CaCO₃ de la couche labourée et la mesure de résistivité des voies profondes (**Tableau 1**).

Tableau 1. *Corrélations entre la résistivité électrique apparente de la couche 0-150 cm et les variables physico-chimiques du sol de la couche labourée (coefficient de corrélation de Pearson, p-value, effectif)*

Corrélations avec les variables continues
De la variable : Resistivite_voie3

Variable caractéristique	Valeur-Test	Corrélation	Probabilité	Poids
Resistivite_voie2	9.04	0.94	0.000	30
Sables grossiers	5.16	0.76	0.000	30
Sables	5.06	0.75	0.000	30
P2O5 Olsen	4.37	0.69	0.000	30
Resistivite_voie1	4.26	0.67	0.000	30
K éch.	3.87	0.63	0.000	30
P2O5 Joret Hebert	2.86	0.50	0.002	30
Limons fins	-2.39	-0.43	0.008	30
pH eau	-2.44	-0.44	0.007	30
Limons grossiers	-3.49	-0.59	0.000	30
Limons	-4.15	-0.66	0.000	30
CaCO3	-4.75	-0.72	0.000	30
Na éch.	-5.54	-0.79	0.000	30

Comparaison entre les couches interpolées spatialement

A la lecture des cartes (**Figure 4**) nous pouvons déjà observer des liaisons entre les couches interpolées. Nous devons maintenant confirmer qu'il existe bien des relations statistiques entre les couches et que ces relations sont identiques à ce que nous avons observé sur les données brutes liées aux points de prélèvement. Si nous ne mettons pas en évidence les mêmes tendances, l'utilisation des statistiques spatiales n'apportera alors aucune plus-value pour rendre compte de l'hétérogénéité intra et interparcelleaire.

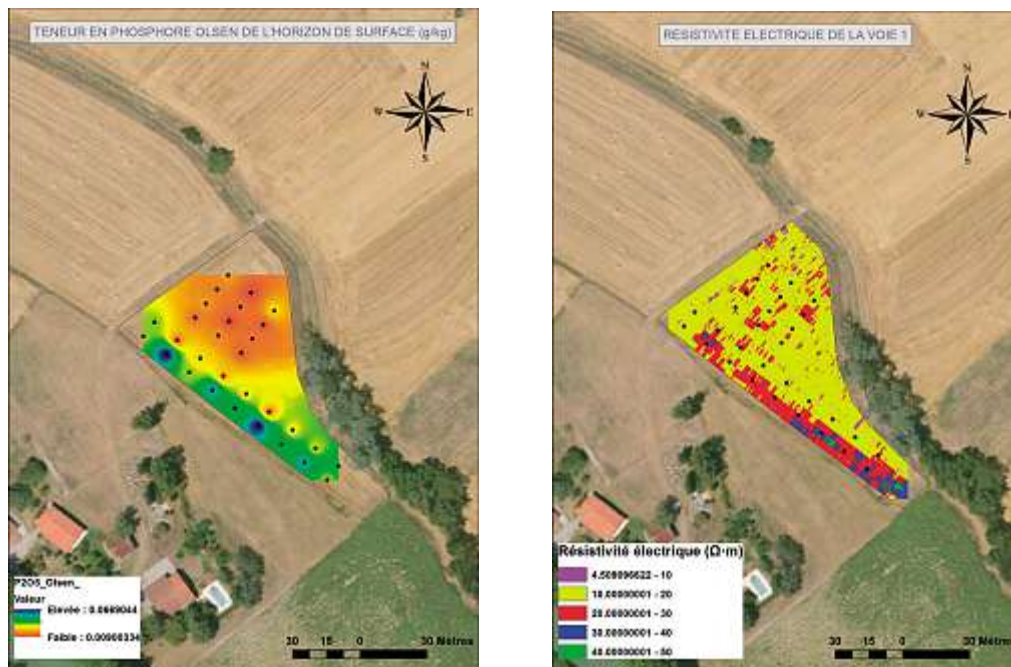


Figure 4. *Résultats de l'interpolation spatiale (IDW) pour la résistivité électrique de la couche 0-50cm et de la teneur en P2O5 Olsen. Copyright « © IGN – BD ORTHO 2010 »*

En examinant la matrice de corrélations présentée en **Tableau 2**, nous pouvons constater que la résistivité voie 1 sur la couche 0-50 cm est faiblement corrélée aux variables physico-chimiques de l'horizon labouré du sol. Nous retrouvons les mêmes tendances que sur l'analyse statistique réalisée sur les points de prélèvement bruts, à savoir un lien avec le sodium échangeable ($r = -0,42$) et le potassium échangeable ($r = 0,38$). Les paramètres calcium échangeable et sables sont très mal restitués ($r = -0,07$ et $r < 0,2$). D'une façon générale l'intensité des corrélations construites à partir de cette modélisation est insuffisante. L'utilisation d'interpolations spatiales constituées sur des jeux de données ayant des densités d'information différentes dégrade la qualité des relations statistiques entre la résistivité de la couche 0-50 cm et les paramètres physico-chimiques du sol.

Si l'on s'intéresse à la voie 2 (0-100 cm) et à la voie 3 (0-150 cm) nous retrouvons des relations statistiques similaires entre les données brutes et les données modélisées. Les principaux paramètres agronomiques liés à la résistivité sont dans les deux cas de figure identiques : potassium (K), sodium (Na), phosphore Olsen, calcaire (CaCO_3). Globalement, la modélisation dégrade légèrement la qualité de la corrélation. Nous pouvons illustrer cela avec le sodium qui est la variable dont la force de liaison est la plus importante dans notre étude. Sur la voie 3 le coefficient de corrélation (r) est de $-0,79$ pour l'analyse sur les données brutes contre $-0,57$ sur l'analyse obtenue à partir des couches thématiques interpolées.

Tableau 2. Matrice de corrélations entre les cellules des couches thématiques interpolées (coefficient de corrélation de Pearson)

Couches thématiques	Résistivité v1	Résistivité v2	Résistivité v3
Résistivité v1	1.00	0.83	0.71
Résistivité v2	0.83	1.00	0.92
Résistivité v3	0.71	0.92	1.00
Argiles	0.01	0.02	0.02
Limons fins	-0.01	-0.03	-0.02
Limons grossiers	-0.13	-0.21	-0.21
Sables fins	-0.01	-0.06	-0.04
Sables grossiers	0.19	0.27	0.33
Carbone organique	0.15	0.23	0.23
Azote total	0.15	0.24	0.24
pH eau	-0.37	-0.50	-0.54
CaCO ₃	-0.31	-0.47	-0.52
P2O5 Olsen	0.40	0.56	0.62
CEC	-0.03	0.05	0.05
Ca éch	-0.07	-0.02	-0.02
Mg éch	0.12	0.25	0.31
Na éch	-0.42	-0.55	-0.57
K éch	0.38	0.50	0.49
Fe éch	-0.12	-0.18	-0.19
Al éch	-0.13	-0.22	-0.26

Dans notre cas d'étude l'utilisation de la résistivité s'est avérée efficace pour rendre compte de l'hétérogénéité de certaines propriétés du sol : la texture de surface, la fertilité et la teneur en carbonate de calcium sur les points de prélèvements bruts. Les relations statistiques établies sur les points de prélèvement sont meilleures que celles établies sur les couches interpolées pour les trois voies. Cependant cette spatialisation d'informations agronomiques permet à l'expérimentateur de cartographier les variations dans l'espace et de faire ressortir des zones homogènes.



Corrélation entre les variables biophysiques (LAI) mesurées au sol et des indices de télédétection agronomiques

L'expression de la végétation est un autre moyen d'évaluer l'hétérogénéité parcellaire. Nous avons donc exploré cette piste en cherchant à mettre en lumière des relations entre nos 138 points de mesures de LAI au sol et les 19 indices de télédétection calculés à partir des images multispectrales obtenues par vol de drone. Pour cela nous avons extrait les valeurs des pixels des différentes couches d'indices de végétation correspondant aux points de mesures au sol. De nombreux indices présentent un intérêt pour prédire la valeur du LAI (coefficient de corrélation de Pearson de 0,8 et plus). Dans nos conditions expérimentales le GVI (green ratio vegetation index, Proche InfraRouge/Vert) est le plus performant pour apprécier cette valeur ($r=0,86$).

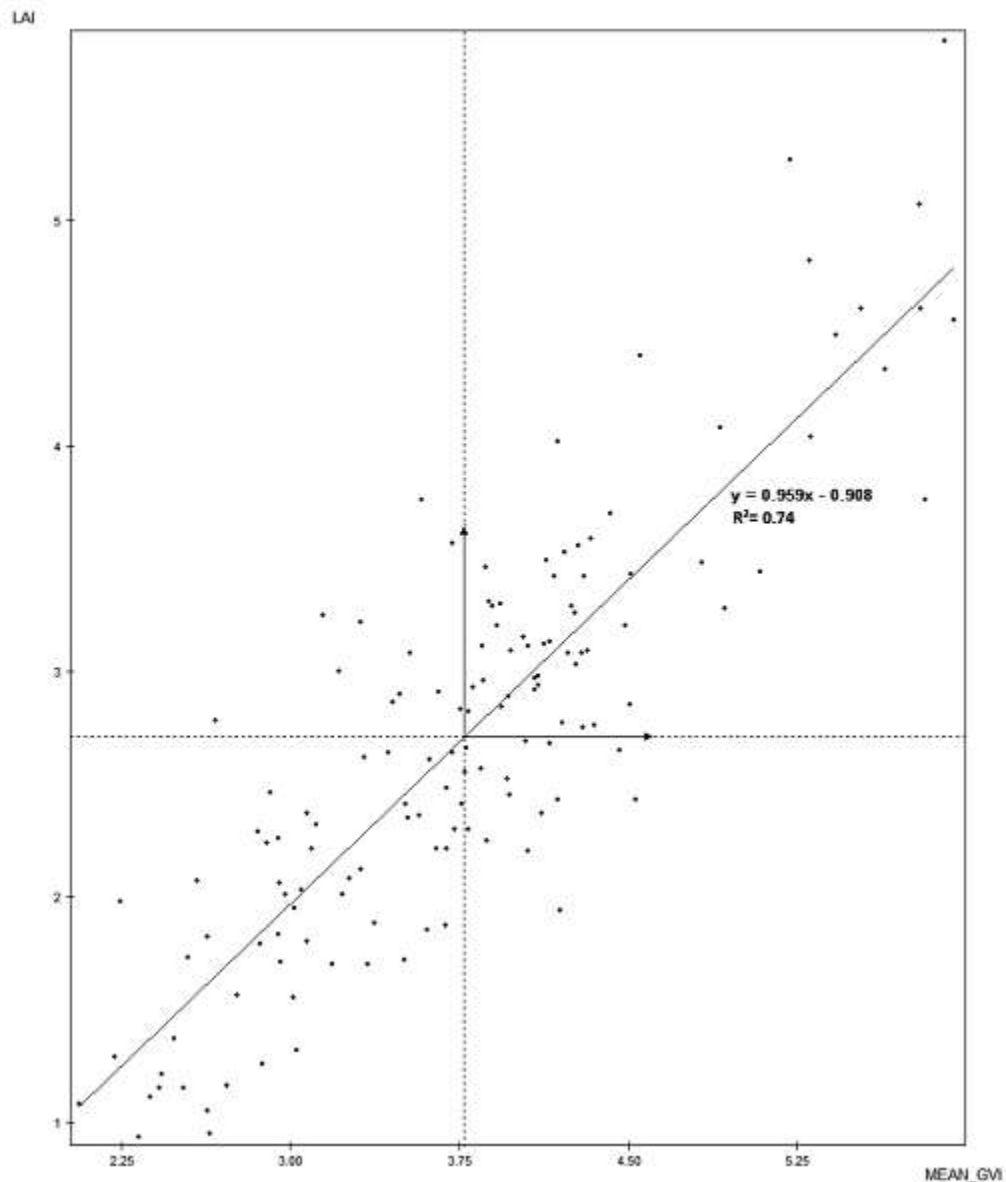


Figure 5. Relation entre l'indice GVI (mesures drone) et l'indice de surface foliaire LAI (mesuré au sol).

Il existe une relation linéaire assez robuste entre le LAI mesuré au sol et le GVI estimé sur les images drone pour les couverts étudiés (Figure 5). La variabilité de la végétation est assez bien prédite dans notre essai. La proxidtection est une solution efficace pour réaliser de la cartographie à haut débit de couverts végétaux prairiaux hétérogènes avec une résolution spatiale d'environ 15 cm.

Discussion et conclusion

L'étude des caractéristiques des sols et de la végétation sont deux approches intéressantes et complémentaires pour appréhender l'hétérogénéité parcellaire.

La résistivité électrique apparente permet de quantifier la variabilité spatiale des potentialités agronomiques d'un sol. Pour que cette méthode soit efficace et permette d'obtenir des relations robustes entre les variables à prédire et les mesures de résistivité, il faut disposer d'un nombre conséquent de points de mesures physico-chimiques (cations, granulométrie, pH, phosphore phytodisponible). Dans notre cas d'étude nous pouvons dire que notre modèle spatial pour les analyses physico-chimiques est construit sur un nombre trop faible de points de mesure. A contrario, il y a beaucoup de points de mesure pour la résistivité avec un modèle spatial robuste en sortie. Ceci a une incidence sur la qualité des relations statistiques établies entre les différents types de variables. Une piste d'amélioration pourrait consister à utiliser d'autres méthodes géostatistiques pour construire des représentations plus fidèles à la réalité mesurée. Ces premiers résultats d'interpolation nous conduisent à nous questionner sur la robustesse des relations statistiques entre des couches issues de modèles construits sur des populations ayant des effectifs de forte amplitude. Ce dernier point mériterait d'être approfondi dans le cadre d'un travail spécifique.

Les relations mises en évidence sur les points de prélèvement bruts (N=30) en comparant deux à deux résistivité et variables physico-chimiques sont plus satisfaisantes. Il serait intéressant de densifier le réseau de points de mesures pour augmenter la qualité de la prédiction. Cette étude a démontré dans son domaine de validité qu'il existe un lien entre la résistivité électrique et des paramètres d'importance qui reflètent la fertilité, la texture et la concentration en calcaire du sol

La télédétection agronomique apparaît très robuste pour caractériser l'état des couverts végétaux. En exploitant les images multispectrales nous avons spatialisé à très haute résolution des valeurs d'indices de végétation capables d'estimer les valeurs de LAI mesurées au sol sur nos couverts. Les relations statistiques sont robustes pour huit indices. Dans nos conditions d'expérimentation l'indice GVI est le plus efficace pour prédire l'indice de surface foliaire (LAI). La relation linéaire produite retranscrit bien la variabilité intraparcellaire de la taille des surfaces d'échange variant de 1 à 6 m² de feuilles par m² de sol dans notre dispositif (**Figure 5**). Ce type d'approche donne des résultats fiables mais nécessite un travail conséquent de construction des équations de prédiction et de validation des modèles. L'étape d'acquisition de données sur le terrain est importante la première année. C'est ensuite le drone qui effectue les mesures de suivi pluriannuel. Il faut cependant réaliser quelques points de contrôle au sol chaque année afin de vérifier la robustesse des prédictions. Au final c'est un gain de temps pour l'expérimentateur en production végétale. Pour mener à bien ce travail, nous avons utilisé des mesures spectrales dans quatre longueurs d'onde. Afin d'aller plus loin dans cette étude, nous envisageons de réaliser selon le même protocole une série de mesures avec un capteur hyperspectral et ainsi avoir accès à un panel d'indices plus important pour améliorer la puissance prédictive de nos équations. Ce criblage se justifie pleinement dans le cas des prairies multispécifiques qui restent des couverts peu étudiés jusqu'à présent à la différence des cultures et forêts.

Cette démarche méthodologique, dans nos conditions d'essai, nous permet de conclure que :

- (i) l'utilisation des outils de géolocalisation et de mesures physiques haut débit apporte une plus-value dans le métier de l'expérimentation. Cette amélioration se traduit par l'intégration de la variabilité parcellaire dans les étapes de conception du plan d'expérience, un gain de cohérence dans l'interprétation des résultats d'expérimentations factorielles ;
- (ii) les outils de statistiques spatiales sont robustes pour caractériser et cartographier l'hétérogénéité des propriétés physico-chimiques des sols ou de certaines variables biophysiques uniquement si les relations sont construites sur un nombre suffisant de points.



Remerciements

Nous remercions Minh Nguyen pour sa contribution à ce travail, Pierre Perrin pour son implication dans le développement des appareils piétons de mesures physiques et l'équipement en centrales d'enregistrements du dispositif d'essai. Nous tenons également à remercier le Laboratoire d'analyses des sols de L'INRA d'Arras pour la réalisation des dosages de caractérisation agronomique des sols. Nous remercions André Gavaland et Laurent Burnel pour leur relecture attentive et leurs conseils avisés.

Références bibliographiques

- Bannari A, Morin D, Bonn F, Huete AR (1995) A review of vegetation indices. *Remote Sens Rev*, **13** : 95-120.
- Baret F (1999) Potentiel de la télédétection pour l'agriculture de précision. L'enjeu français de l'agriculture de précision, 8-11.
- Coquil B, Bordes JP (2005) *FARMSTAR : an efficient decision support tool for near real time crop management from satellite images*. Wageningen Academic Publishers. pp. 873-880.
- Dubois J (2003) L'importance de l'agrégation spatiale lors de l'estimation de l'indice foliaire de peuplements résineux par télédétection. Mémoire de Maîtrise en Sciences de l'environnement, Université du Québec Trois-Rivières, Québec.
- Girard MC, Girard CM (2010) *Traitement des données de télédétection*. 2^e édition, Environnement et ressources naturelles, Dunod.
- Moeys J, Nicoulaud B, Dorigny A, Coquet Y, Cousin I (2006) Cartographie des sols à grande échelle : intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique. *Géotechnique*, **36**, 263-267.
- Séger M, Bourennane H, Mistou MN, Pasquier C, Giot G, Ubertosi M, 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.
- Tucker CJ (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ*, **8**, 127-150.
- Watson DF, Philip G (1985) A refinement of inverse distance weighted interpolation. Une meilleure précision de l'interpolation de la distance inverse pondérée. *Geo-processing* **2**, 315-327.

/ Chapitre 5 /

GPS et SIG

Pour des approches territoriales



Source : Bruno Cargnelutti

Exemple d'utilisation de SIG dans un projet de recherche sur la gestion quantitative de l'eau d'irrigation sur un bassin versant

Denis Baudet¹, Delphine Leenhardt¹

Résumé. L'objet de cet article est d'illustrer un cas d'utilisation de SIG (système d'information géographique) pour spatialiser des données d'origine hétérogène dans le cadre d'un projet de recherche sur la gestion quantitative de la ressource en eau dans une zone de grandes cultures irriguées en Midi-Pyrénées. Dans cette région, la récurrence de situations de crise en période d'étiage pose la question de l'opportunité de modifier les systèmes de culture des territoires concernés. La recherche conduite visait à outiller le gestionnaire de la ressource dans leur activité prospective en tenant compte des points de vue des divers acteurs de terrain. Plus spécifiquement, elle a consisté à développer un prototype d'outil facilitant la construction et l'évaluation de scénarios d'usage du sol (et plus précisément, de systèmes de culture) avec les acteurs des territoires concernés. Le territoire d'étude retenu, situé dans les coteaux de Gascogne (Midi-Pyrénées) correspond à l'ensemble des bassins versants (8 000 km²) des rivières réalimentées par le Canal de la Neste. Dans cet article, nous nous attachons à lister la diversité des données mobilisées (météorologie, carte des sols, enquête RGA-recensement général agricole-, dire d'expert,...), à des échelles et emprises géographiques différentes, à poser les problèmes d'intégration de ces données et à exposer les solutions de spatialisation retenues. Les difficultés rencontrées émanaient du fait que les informations nécessaires devaient être obtenues par croisement de données qui n'étaient pas toutes spatialisées. La démarche et la construction de ce prototype (SPACSS-SPAtial Crop System Scenarii builder and evaluator) a fait l'objet d'un travail de doctorat qui a mobilisé des informaticiens.

Mots clés : base de données, hétérogénéité des données, spatialisation, SIG, Coteaux de Gascogne

Introduction

Pour mettre en œuvre des politiques publiques impactant l'occupation du sol par les cultures, il est utile de décrire la distribution spatiale des systèmes de culture du territoire étudié, d'en construire des alternatives et de les évaluer.

Ainsi, la proposition gouvernementale d'augmenter significativement les surfaces en agriculture biologique (Barnier, 2009) ou la proposition de diminution des surfaces irriguées faite par les opposants à la construction du barrage de Charlas (Mandement, 2004) sont deux exemples pour lesquels les décideurs politiques doivent se poser les questions suivantes : où faut-il favoriser l'implantation de l'agriculture biologique / supprimer des surfaces irriguées ? Comment prendre en compte le point de vue des différents acteurs du territoire pour instruire cette question ?

Pour aider ces décideurs, un travail de Doctorat (Clavel, 2010) a été conduit dans le sud-ouest de la France, où les problèmes de pénurie d'eau sont récurrents et fortement liés aux choix de systèmes de cultures. Ce travail a permis d'initier le développement d'un outil permettant aux utilisateurs (différents porteurs d'enjeu d'un territoire) de représenter et d'évaluer leurs visions sur les distributions de systèmes de cultures qui leur semblent *a priori* souhaitables ou probables dans un contexte donné (Clavel et al., 2012). L'outil comporte quatre éléments essentiels : 1) une description du territoire d'étude en termes de distribution des systèmes de culture et de leurs facteurs de localisation (sols, types d'exploitation, etc.), il s'agit de la « **situation de référence** », 2) une interface pour construire une distribution alternative à la situation de référence, 3) un simulateur pour calculer des variables estimant l'impact de la distribution initiale ou alternative des systèmes de culture, 4) une interface pour construire des indicateurs adaptés aux besoins de l'utilisateur, par agrégation d'une ou plusieurs variables produites par le simulateur sur des unités spatiales adaptées.

1 INRA, UMR 1248 AGIR CS 52627, F- 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France ; Denis.Baudet@toulouse.inra.fr

Dans cet article, nous nous intéresserons au premier élément, la description de la situation de référence (Clavel et al., 2011), qui prend la forme d'une base de données géoréférencée, construite et stockée avec un SIG (système d'information géographique). Nous présenterons d'abord les données qui la composent, puis nous expliquerons en quoi la simple juxtaposition de ces données était insuffisante pour répondre aux besoins de l'outil développé. Nous exposerons ensuite la méthode que nous avons utilisée pour combiner ces données. Enfin nous concluons en présentant les perspectives d'évolution des recherches sur cet outil en lien avec les nouvelles données géographiques disponibles.

La zone d'étude et les données utilisées pour la décrire

La zone d'étude

Le territoire d'étude, situé en Midi Pyrénées au sud de la Garonne, s'étend sur 8 000 km², du sud du plateau de Lannemezan à la plaine de la Garonne. Il est centré sur la ville d'Auch chef-lieu du Département du Gers qui recouvre près de 80 % de cette zone d'étude (**Figure 1**). D'un point de vue climatique, ce territoire est influencé à l'est par le climat méditerranéen, à l'ouest par le climat océanique et au sud par la présence des Pyrénées : on y observe donc des gradients de températures et de précipitations, ces dernières subissant une forte variabilité annuelle et interannuelle. La région est en moyenne marquée par des hivers pluvieux et des étés secs : de mai à octobre, les précipitations sont insuffisantes pour combler l'évapotranspiration. (**Figure 2**).



Figure 1. Le territoire d'étude : système NESTE, (géoportail, BD Ortho, BD Carto- IGN).

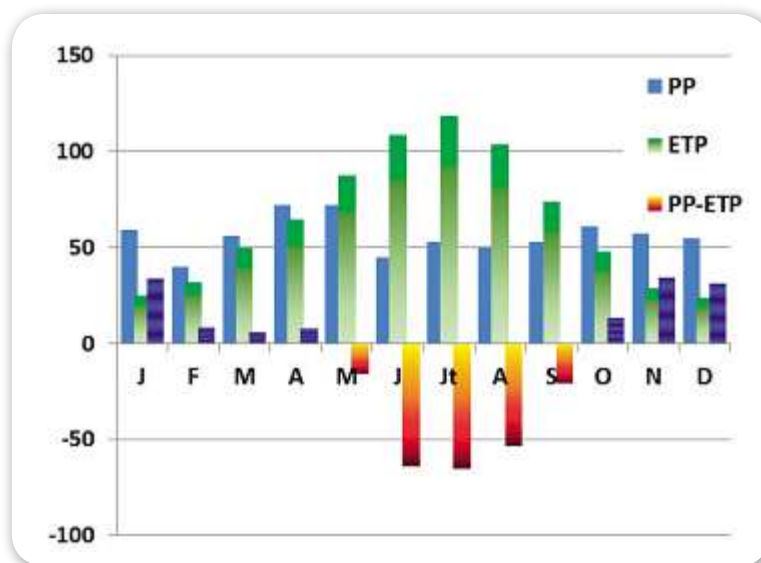


Figure 2. Précipitations (en mm) et ETP (moyennes mensuellement à Auch, 1998-2008).

D'après les données du recensement général agricole (Agreste, 2002), ce territoire comprend 9225 exploitations pour une SAU (surface agricole utile) de 523 982 ha. L'assolement de cette zone est principalement constitué de grandes cultures (63 % de la SAU), de prairies et cultures fourragères (19 %) (Soudais, 2008). Une agriculture irriguée a pu se développer au fil des ans grâce à la construction du « système Neste », un système de barrages de haute montagne, de réservoirs de coteaux et de canaux permettant de réalimenter les rivières gasconnes, conçu puis géré par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG).

Ainsi, en 2000, 45 % des exploitations du territoire pratiquaient l'irrigation et la surface irriguée atteignait 87 400 ha (dont 73 % en maïs). Le développement de l'irrigation, conjugué à un déficit hydrique estival fréquent a rendu cette zone très dépendante de la qualité de gestion du système Neste.

Les sols

Le réseau hydrographique dense et orienté sud-nord (sens d'écoulement) du système Neste confère à ce territoire une alternance d'est en ouest de sols de coteaux, argilo-calcaires, et de sols d'alluvions. Localement, on appelle les sols de coteaux « les terreforts » : les **terreforts**, argileux, ont une bonne réserve utile (RU) due à un fort taux d'argile qui permet de limiter les irrigations ; cependant, leur RU varie selon leur situation dans le relief ainsi que leur pente (de faible à prononcée). Localement on distingue également deux types de sols d'alluvions : les alluvions anciennes appelées **boulbènes**, et les **alluvions récentes**. Les **boulbènes** sont des sols limoneux et légers, donc faciles à travailler mais ils cumulent les inconvénients d'être battants, très hydromorphes et très pauvres chimiquement : la pratique de l'irrigation dans ces sols compense en partie leur faible potentiel agronomique. Les **alluvions récentes** se retrouvent généralement en basses plaines alluviales : ces sols limono-argileux ont une grande réserve utile et une bonne capacité de drainage, ce qui leur confère un meilleur potentiel agronomique que les boulbènes. Sur la partie midi-pyrénéenne du système Neste, ces trois grands types de sols sont décrits par 12 ensembles morpho-pédologiques dans l'étude « Les grands ensembles morpho-pédologiques de Midi-Pyrénées » réalisée par la chambre régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées (CRAMP) (Figure 3).



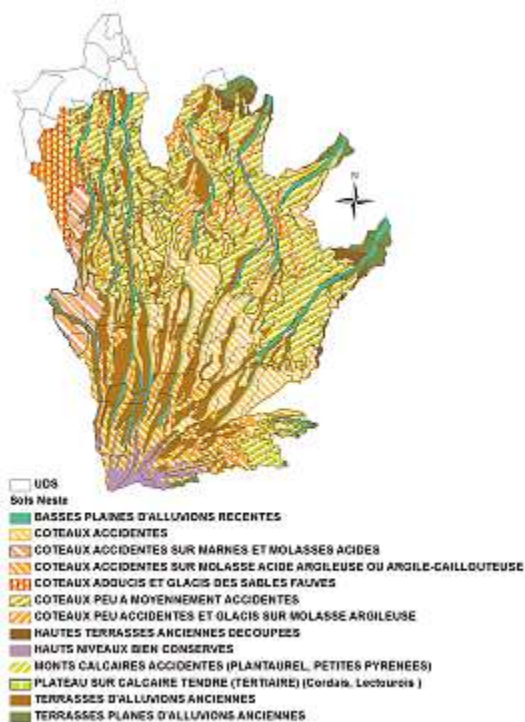


Fig. 3a

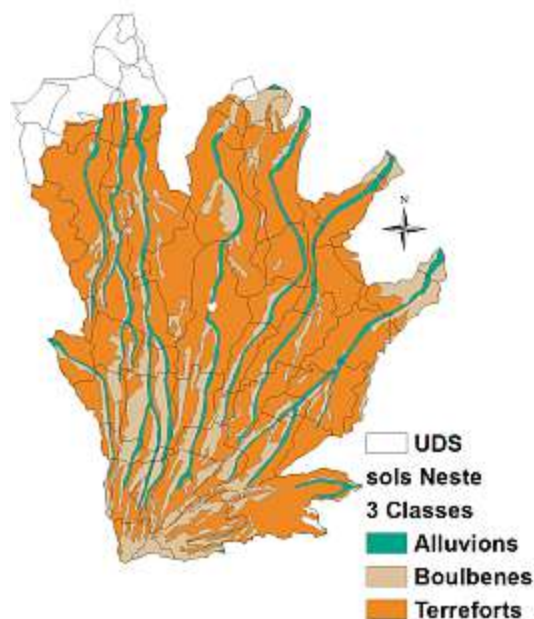


Fig. 3b



Fig. 3c

Figure 3. Les sols de la zone du système Neste : (a) cartographie de la CRAMP (chambre régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées) (b) cartographie selon les trois grands types de sols (c) importance relative des trois types de sols principaux.

Données météorologiques

Nous avons utilisé les données journalières de précipitation, température et évapotranspiration potentielle des séries interpolées aux points de la grille Safran de météo France (12,5 km x 12,5 km). Le SIG nous a permis d'associer à chaque unité de simulation (UDS) via son centroïde le point de grille SAFRAN le plus proche afin d'y affecter les données météorologiques (Figure 4).

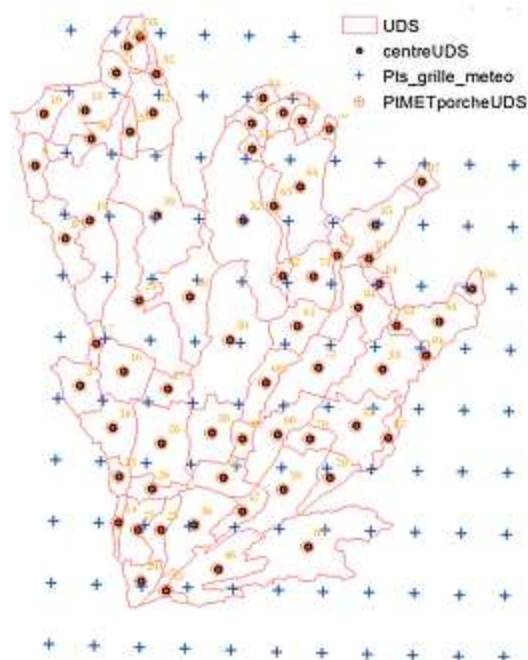


Figure 4 : Association des points de grille météo le plus proche du centroïde de chaque UDS.

Les exploitations agricoles

Une typologie des exploitations (**Tableau 1**) ayant un comportement *a priori* homogène face à des changements en matière de gestion quantitative de ressource en eau a été construite à partir de trois critères identifiés à dire d'expert : la dimension économique des exploitations en UDE (unité de dimension européenne²), leur orientation technico-économique (OTEX), et le ratio surface irriguée sur surface agricole utile (SI/SAU) de l'exploitation pour les exploitations d'OTEX « grandes cultures ».

Tableau 1. Les 10 types d'exploitations résultant des critères choisis pour classer les exploitations recensées dans le RGA (recensement général de l'agriculture) (Soudais, 2008)

Taille économique (UDE)		8 à 40 = petite (p)		40 à 100 UDE = moyenne (m)		> 100 UDE = grande (g)	
		<20 Sec	≥20 Irrigué	<20 Sec	≥20 Irrigué	<20 Sec	≥20 Irrigué
O T E X	Grandes cultures (GC)	GCpS	GCpl	GCmS	GCml	GCgS	GCgl
	Polyculture- Elevage (PE)	PEp		PEm		PEg	
	Autre (AU)	AU					

Afin de rendre compte de la diversité des exploitations de la zone d'étude, nous avons choisi de caractériser chaque type d'exploitation dans chaque PRA (petite région agricole). Il en résulte la description de 240 exploitations types, caractérisées chacune par leur SAU moyenne, la part moyenne de chaque culture au sein de l'assolement, un ou plusieurs types de matériel d'irrigation (Soudais, 2008).

2 UDE - L'unité de dimension européenne sert au calcul de la marge brute standard des exploitations européennes. Une unité de dimension européenne correspond à 1200 euros ou 1,5 ha équivalent blé http://ec.europa.eu/agriculture/rca/methodology1_fr.cfm

Les itinéraires techniques

L'information collectée sur les itinéraires techniques a été réduite aux pratiques d'irrigation du maïs, car, étant donné la part importante du maïs dans les surfaces irriguées (73 %), nous avons estimé que ces pratiques avaient le plus fort impact sur la demande en eau d'irrigation et sur sa variabilité spatiale. Cette information a été collectée auprès d'un conseiller agricole : celui-ci a décrit la variabilité des pratiques en fonction des trois types de sols identifiés sur la zone d'étude, mais a été plus évasif sur l'association entre types de sols et types d'exploitations (**Tableau 2**).

Tableau 2. Relations entre type de sols, type d'exploitation agricole et gestion du maïs irrigué obtenu par expertise

Types de sol	Sol limoneux hydromorphe (boulbènes)	Sols argileux calcaire (terrefort)	Sol d'alluvion
Principales caractéristiques	Faible potentiel agronomique, très hydromorphe	Bon potentiel agronomique, argileux	Très bon potentiel agronomique, bon drainage
Réserve en eau (RU)	Faible	Elevée	Elevée
Topographie dominante	Plat	Pentus	Plat
Situation géomorphologique	Près de cours d'eau	Eloigné de cours d'eau	Près de cours d'eau
Modalités d'irrigation durée de tour d'eau apport d'eau / tour	5 - 6 jours 25 - 30 mm	10 - 15 jours 35 - 45 mm	6 - 8 jours 30 - 35 mm
Type d'exploitation agricole dominant	Cultures irriguées Polyculture élevage	Cultures non irriguées	Cultures irriguées

Nous avons considéré comme négligeable la variabilité spatiale des autres pratiques culturales du maïs (choix de précocité, de date de semis, de fertilisation) et des itinéraires techniques des autres cultures.

Problématique : combiner des données hétérogènes

Les données décrites ci-dessus définissent l'état du système (le territoire étudié) et permettent l'utilisation d'un modèle simulant la croissance des cultures et les décisions des agriculteurs, notamment en matière d'irrigation. Un tel modèle, utilisé sur l'ensemble des parcelles d'un territoire, permet d'estimer la production agricole et l'impact des systèmes de cultures portées par ces parcelles sur la consommation en eau d'irrigation. Néanmoins, pour faire tourner un tel modèle, il est nécessaire de définir des « unités de simulation » correspondant à une combinaison unique [sol X culture X itinéraire technique]. Cette exigence pose problème car :

- les données décrites ci-dessus sont disponibles à des résolutions très différentes : par exemple, les données météorologiques sont disponibles sur des mailles carrées de 12,5 km x 12,5 km tandis que les données sols sont disponibles sur des polygones polymorphes ;
- l'information sur les cultures n'est disponible que via le descriptif des exploitations, lesquelles n'ont comme seul géo-référencement possible que la commune de leur siège (cf. § *les exploitations agricoles*) ;
- les itinéraires techniques ne sont localisés que par leur lien à un type de sol et un type d'exploitation (**Tableau 2**).

Méthode développée

L'enjeu était donc de déterminer les associations entre types de sols et types d'exploitation de manière à accéder aux combinaisons [culture X itinéraire technique X sol] permettant de faire tourner le modèle de simulation. Pour répondre à cet enjeu, nous avons procédé en deux étapes que nous détaillons ci-après.

Le choix d'une « unité de support »

L'unité de support (UDS) est l'unité spatiale sur laquelle est collectée l'information nécessaire pour caractériser le territoire et faire tourner le modèle de simulation, mais aussi sur laquelle sont représentées les sorties du modèle qui seront présentées aux décideurs et aux différents porteurs d'enjeu du territoire. L'objectif du travail était d'estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle du territoire et pour des unités de surface infra qui auraient du sens pour les décideurs et les porteurs d'enjeu. Nous avons considéré que l'estimation de la demande en eau d'irrigation ne requerrait pas un positionnement des parcelles (combinaisons [culture X itinéraire technique X sol]) les unes par rapport aux autres, car il n'y a pas de flux naturel d'eau entre parcelles. Nous avons donc décidé de traiter la question comme un problème agrégatif, sans prendre en compte les relations de compétition sur les ressources en eau, travail, équipement qui existent au sein de chaque exploitation. En conséquence, l'unité de support à retenir n'était pas obligatoirement la parcelle agricole, mais pouvait être une unité de surface plus grande.

Différents zonages du territoire préexistaient. Le premier, un zonage en « unité de gestion de l'eau » (UGest), est utilisé par le gestionnaire (la CACG) pour prendre ses décisions de déstockage de barrage ou de demande de restriction d'eau. Le second, le zonage des régions agricoles et petites régions agricoles (PRA), a été établi sur l'ensemble de la France dès 1946 sur des critères d'homogénéité agro-pédo-climatique. Ces deux zonages nous ont semblé pertinents pour les utilisateurs potentiels de SPACSS (SPAtial Crop System Scenarii builder and evaluator). En conséquence, nous avons choisi comme unités de support (UDS) les unités spatiales résultant du croisement de ces deux zonages (Figure 5).

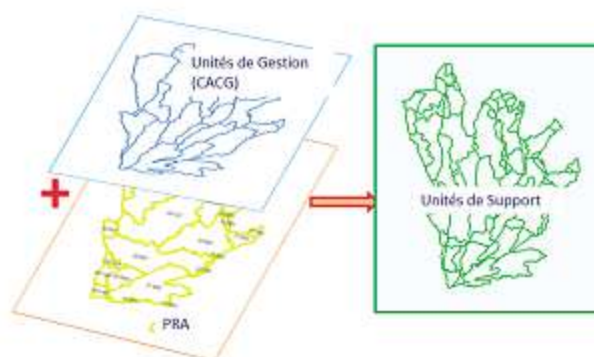


Figure 5. Création des unités de support (UDS) par intersection des petites régions agricoles (PRA) et unités de gestion.

Caractérisation des UDS

L'objectif était non seulement de caractériser les UDS en termes de sols, climat, systèmes de culture, exploitations agricoles, mais aussi d'identifier les unités de simulation correspondant aux combinaisons [culture * itinéraire technique * sol] au sein de chaque UDS.

Pour les données météorologiques, la série climatique du point de grille le plus proche du centroïde de chaque UDS a été affectée à l'ensemble des UDS.

Pour les sols, chaque UDS a été caractérisée par une distribution des trois types de sols principaux identifiés dans le **Tableau 2**. Chaque UDS étant constituée d'un ensemble de communes, une distribution des types d'exploitation (et donc des cultures) est directement affectable à chaque UDS.



Pour reconstituer dans chaque UDS la surface de chaque combinaison [type de sol x type d'exploitation x système de culture], nous avons considéré d'une part les informations prodiguées par l'expert avec plus ou moins de conviction sur les liens entre types de sol et types d'exploitation, et d'autre part un certain nombre de contraintes données par le RGA et par la carte des sols (pour chaque UDS, la somme des SAU des différents types d'exploitation dans un sol ne doit pas dépasser la surface de ce sol ; la somme des SAU d'un type d'exploitation dans l'ensemble des sols ne peut pas dépasser la SAU de ce type d'exploitation). Nous avons donc développé une méthode qui repose sur l'utilisation successive de deux procédures d'allocation, chacune d'elle étant mobilisée selon la nature de l'association entre type de sol et type d'exploitation exprimée par le discours de l'expert. La première procédure consiste en un algorithme déterministe qui permet d'allouer prioritairement des surfaces aux combinaisons type de sol x type d'exploitations identifiées fermement par l'expert (associations considérées comme fortes). La seconde procédure permet de traiter les combinaisons [type de sol] x [type d'exploitation] présentées par l'expert avec moins de conviction tout en respectant les contraintes données par le RGA. Cette procédure consiste à mobiliser une approche statistique non standard (du champ de la théorie des informations) qui permet de résoudre ce problème où le nombre de paramètres à estimer est supérieur au nombre d'observations. Afin d'allouer les exploitations aux surfaces de sol restantes, nous avons utilisé un modèle économique (écrit sous GAMS³) utilisant comme critère d'optimisation le maximum d'entropie et nécessitant de définir a priori la matrice des probabilités de trouver un type d'exploitation k dans un type de sol s .

A chaque combinaison [type de sol x type d'exploitation], ainsi déterminée, a été affectée une conduite de l'irrigation du maïs décrite par le **Tableau 2**. Le reste de l'itinéraire technique du maïs (semis, fertilisation, récolte), ainsi que les itinéraires techniques des autres cultures, ont été considérés comme identiques pour toute l'étendue du territoire d'étude.

Les combinaisons [type de sol] x [type d'exploitation] de chaque UDS et les données qui y sont rattachées ont été stockées dans une base de données relationnelle. Cette base de données, couplée avec un système d'information géographique, permet la visualisation de la distribution des systèmes de culture selon différentes échelles d'agrégation (unité de support, petite région agricole, unité de gestion) et selon les différents facteurs (type de sol, type d'exploitation). Cette diversité des points de vue offerts à l'utilisateur est destinée à faciliter la construction de scénarios alternatifs de distribution de systèmes de culture.

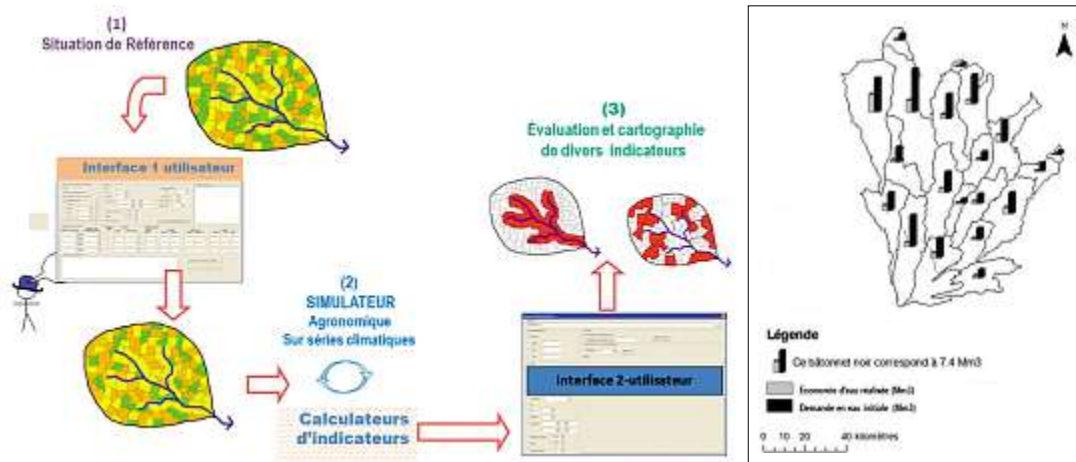


Fig. 6a **Fig. 6b**
Figure 6. (a) Principe du prototype SPACCS (b) Exemple de cartographie d'un indicateur : économie d'eau.

Conclusion

Dans ce travail, l'outil SIG nous a été utile pour la construction de certaines composantes du système d'information et spatialiser les données utilisées. Nous avons pu (i) créer les contours des UDS par intersection de deux autres découpages existants (PRA et unité de gestion CACG) ; (ii) associer des données météorologiques (maillées format

3 GAMS (general algebraic modeling system) est un logiciel de modélisation mathématique.

grille) aux UDS (polygones) ; (iii) utiliser les unités cartographiques de sols pour associer des propriétés agronomiques aux UDS par intersection des deux couches d'informations et (iv) qualifier les UDS en terme de répartition des différents types de sol. Cependant, les données utilisées étaient de nature et résolution très hétérogènes et n'étant pas toujours cartographiable *a priori*, ce qui a pu poser problème. Ainsi, l'information sur les exploitations agricoles ne pouvait être localisée à un niveau plus fin que la commune, tandis que l'information sur les sols était spatialisée pour tout point de l'espace à une certaine résolution. Cette hétérogénéité de l'information rendait inopérante la procédure classique de croisement d'information par des SIG. C'est pourquoi nous avons eu recours à une méthode liant expertise et statistique. Cette démarche, originale, pourrait être appliquée à d'autres types de données dès lors qu'on retrouve cette hétérogénéité de résolutions spatiales. En ce qui nous concerne, elle a néanmoins été rendue caduque avec l'accès à une nouvelle source d'information le RPG (registre parcellaire graphique) qui nous fournit désormais (depuis 2006) des données sur les assolements des exploitations à une résolution et une couverture spatiale compatibles avec celles des cartes de sol. Dans la base du RPG, les cultures et surfaces associées sont disponibles à la résolution spatiale de l'îlot de cultures et, grâce à un identifiant anonyme, les différents îlots d'une même exploitation peuvent être identifiés (Leenhardt et al., 2012). Cette évolution des données auxquelles nous pouvons désormais avoir accès nous a conduit à revoir complètement la forme de l'outil développé pour les gestionnaires de l'eau, en proposant désormais un outil permettant de décrire plus finement la situation de référence et de construire des scénarios plus précis.

Références bibliographiques

Barnier M (2009) Objectif Terres 2020. Pour un nouveau modèle agricole français http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Agirbis_plan.pdf

Clavel L (2010) Développement d'une méthode de construction et d'évaluation de scénarios portant sur la distribution des systèmes de culture de grands territoires. Application à la demande en eau d'irrigation dans le système Neste. Thèse de Doctorat, INP Toulouse. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001099/>

Clavel L, Charron M-H, Therond O, Leenhardt D (2012) A modelling solution for developing and evaluating agricultural land-use scenarios in water scarcity contexts. *Water Resour Manag* **26** : 2625-2641. DOI 10.1007/s11269-012-0037-x

Clavel L, Soudais J, Baudet D, Leenhardt D (2011) Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy* **28** : 57-65.

Leenhardt D, Therond O, Mignolet C (2012) Quelle représentation des systèmes de culture pour la gestion de l'eau sur un grand territoire ? *Agron Environ Soc* **2** : 77-89.

Mandement A (2004) Compte-rendu et bilan du débat public de Charlas. *Revue de l'agence de l'Eau Adour Garonne*, 26-30.

Soudais J (2008) Document de synthèse du travail sur les données DRAF (recensement agricole 2000 et enquête pratiques culturales 2001). Rapport interne INRA, UMR AGIR, 60 p.

Source des données

Les grands ensembles morpho-pédologiques de Midi-Pyrénées, réalisé par la chambre régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées. <http://www.mp.chambagri.fr/-Le-guide-des-sols-.html>

OTEX : cette nouvelle classification des exploitations selon leur spécialisation (orientation technico-économique et leur taille économique s'applique pour la première fois pour la diffusion des résultats du recensement agricole de 2010 : <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/orientation-technico-eco.htm>

Agreste (2002) Recensement général agricole 2000. Cartes thématiques Midi-Pyrénées. CD-Rom, Service régional de la statistique agricole de Midi-Pyrénées.

Données © IGN : BD TOPO.

Données météorologiques : Météo France.



Utilisation du SIG et du GPS pour la création d'une base de données de desserte forestière dans les Pyrénées

Aurélien Pédemay¹, Laurent Burnel²

Résumé. La mobilisation de la ressource forestière pyrénéenne française passe par un état des lieux de l'existant de la voirie interne aux forêts. L'Office des forêts s'est chargé de rassembler et de structurer les données existantes dans une base de données puis de relever sur le terrain les données manquantes sur la zone centrale des Pyrénées, couvrant 50 % du massif. Les outils utilisés et les techniques présentés ont été choisis pour répondre aux nombreuses contraintes d'utilisation en milieu forestier et montagnard. Treize mille km de voiries ont ainsi été cartographiés et décrits, les solutions proposées sont jugées satisfaisantes en termes de précision et de fiabilité.

Mots clés : base de données, GPS, SIG, correction différentielle, desserte, forêt, montagne

Introduction

Dans le cadre du développement économique d'infrastructures pyrénéennes, l'Office national des forêts – via le projet VIAPIR³ – réalise actuellement l'inventaire du réseau de desserte forestière⁴ des Pyrénées françaises.

L'objectif premier est de fluidifier la mobilisation et l'accessibilité des bois au niveau de la chaîne pyrénéenne afin d'assurer notamment l'approvisionnement des entreprises qui transforment le bois. La réalisation d'un état des lieux de la voirie forestière par le tracé des pistes et la description de leur état, est un aspect stratégique déterminant pour l'ensemble des acteurs de la vie d'un massif forestier montagnard.

Le travail consiste à actualiser et structurer les bases de données existantes, à relever sur le terrain les données internes manquantes aux forêts, enfin à considérer leurs connections avec le réseau autoroutier national, départemental et communal.

Les relevés terrain couvrent dans un premier temps 50 % du réseau pyrénéen français, ils sont concentrés dans les Pyrénées centrales (Départements des Hautes Pyrénées, de la Haute Garonne et de l'Ariège) pour avoir une continuité dans la base de données. Seules les communes de montagne sont concernées selon la définition de la DATAR⁵ des Pyrénées.

En complément de cette zone centrale, trois secteurs jugés comme les plus intéressants d'un point de vue connaissance de la desserte forestière ont été relevés dans les Départements les plus excentrés des Pyrénées. (**Carte 1**).

Une première phase de collecte des données existantes puis de concertation entre usagers, professionnels et collectivités, a permis de dégager les axes structurants d'une base de données « desserte forestière » opérationnelle et actualisable.

Outre les classiques attributs définissant le revêtement, l'état et la largeur des pistes, est apparue la nécessité de renseigner le statut juridique et de faire l'inventaire de tout ce qui pouvait entraver la circulation sur ces routes : points noirs, virages, fermeture physique, réglementation de tonnage, etc.

La deuxième phase concerne la digitalisation des données et la constitution de la base de données par le biais de relevés terrain (**Carte 2**). C'est celle qui nous intéresse dans le cadre de ce travail et nous allons détailler les outils, leur fonctionnement et les procédés qui ont contribué à la création de ces données.

1 Office national des forêts, Direction territoriale Sud-Ouest, 23 bis, boulevard Bonrepos, F-31000 Toulouse, France

2 INRA DYNAFOR 1201, 24, chemin de Borde Rouge, Auzeville CS 52627, F- 31326 Castanet-Tolosan, France ; laurent.burnel@toulouse.inra.fr

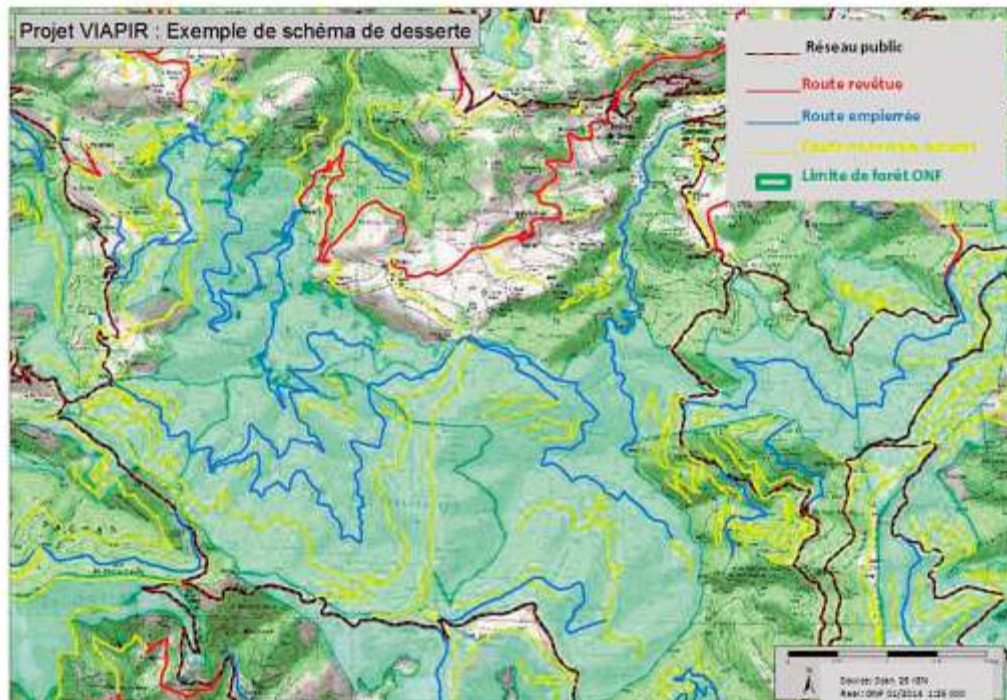
3 VIAPIR = voie pyrénéenne

4 Desserte forestière : ce sont les voies d'accès aux parcelles forestières utilisables par les engins forestiers. Exemples : routes forestières, pistes de débardage, etc.

5 DATAR : Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale.



Carte 1. Délimitation des quatre zones : Zone centrale, Haute Soule (64), Pays de Sault (11), Vallespir (66).



Carte 2. Zoom sur le réseau de desserte (en couleur sur la carte).



Le protocole de relevé

Le support géographique du linéaire de la base de données retenu est la BD_TOPO⁶ de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) enrichie des attributs relevés sur le terrain et/ou récoltés à travers les diverses sources d'information.

Avant la récolte sur le terrain, il faut dans un premier temps récupérer et faire la synthèse des données déjà disponibles sur un secteur ; elles sont issues d'études déjà réalisées : publiques, environnementales, etc. Ensuite on effectue un contrôle visuel sur ortho-photo afin de rajouter le tracé de pistes éventuelles. Enfin on établit depuis le bureau le trajet théorique optimal qui sera effectué lors de la campagne de relevés. Ce trajet réalisé en véhicule tout terrain doit néanmoins rester flexible et adaptable en fonction des conditions de terrain changeantes, des nouveaux éléments de desserte non prévus ou encore de la sécurité à respecter.

L'utilisation du SIG (système d'information géographique) couplé à un GPS (global positioning system) permet de visualiser en temps réel des couches d'informations complémentaires, de consulter et modifier la base de données, et de renseigner les attributs nécessaires.

Principes d'utilisation du GPS

Le fonctionnement du système GPS repose sur un calcul de distance entre les satellites et le récepteur GPS (**Schéma 1**) selon les principes suivants :

- la vitesse de propagation du signal envoyé par les satellites est connue, elle est égale à la vitesse de la lumière ;
- le temps de parcours du signal entre les satellites et le récepteur GPS est mesuré grâce à une synchronisation des horloges ;
- la distance (satellite-récepteur) est égale au temps de trajet multiplié par la vitesse de la lumière ;
- chaque mesure de distance sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite et sur laquelle se trouve l'utilisateur. La position de l'utilisateur est l'intersection des différentes sphères.

Trois satellites sont donc nécessaires pour obtenir une position. Mais en pratique, l'utilisation de quatre satellites est préférable pour obtenir une position X, Y, Z acceptable.

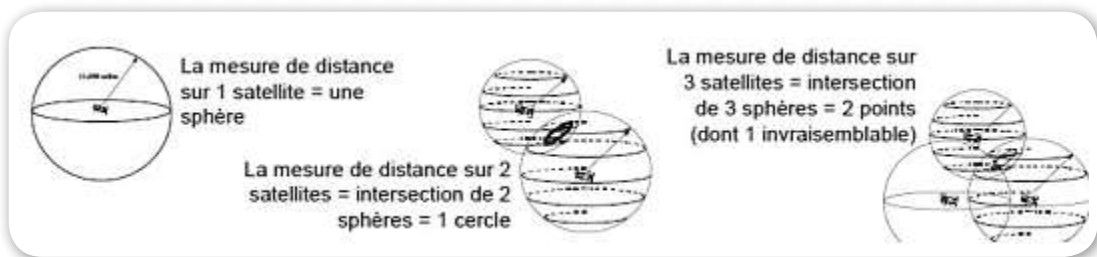


Schéma 1. Principes de fonctionnement du GPS.

On peut distinguer trois types de facteurs affectant la précision :

✓ les erreurs liées au système

on peut avoir des erreurs ou des décalages liés aux horloges des satellites ou bien aux orbites des satellites. Malheureusement, il n'y a aucun moyen pour les utilisateurs de corriger ces erreurs, toutefois cinq stations de contrôle situées sur ou à proximité du continent américain, ont pour but de vérifier et corriger éventuellement ces problèmes d'orbites ou d'horloges.

⁶ La BD TOPO[®] est une base de données vectorielle de référence, fournissant une information en trois dimensions sur des données administratives, sur les transports, sur les éléments naturels, etc.

Il peut aussi arriver que les stations de référence (utilisées pour la correction différentielle) tombent en panne. Les fichiers de correction ne sont plus téléchargeables et il faut, lorsque cela est possible, changer de station de référence ;

✓ les erreurs liées à la géométrie et la disposition des satellites

Il faut d'abord veiller à disposer des quatre satellites nécessaires pour obtenir une position 3D acceptable, la précision augmente avec un nombre croissant de satellites détectables à un instant « t ».

La position des satellites entre eux peut également affecter cette précision : il est spécifié sur chaque GPS par le PDOP (positional dilution of precision) précisant le « coefficient d'affaiblissement de la précision ». Le PDOP permet de savoir si une position évaluée au sol est fiable ou non : plus ce PDOP est faible (< 6) meilleure est la précision.

L'élévation d'un satellite joue aussi son rôle dans la précision. En effet, le signal d'un satellite « bas » sur l'horizon doit voyager sur une plus grande distance à travers l'atmosphère, provoquant ainsi une baisse de la force du signal et une réception retardée par le récepteur GPS ;

✓ et les erreurs liées au couvert forestier et au milieu montagnard !

Un des problèmes majeurs qui se pose pour les relevés de terrain du projet VIAPIR est de travailler en milieu forestier (Piedallu et Gégout, 2002) et montagnard. Dans ces conditions le GPS peut être perturbé par deux phénomènes (Lejeune, 2001) (**Schéma 2**) :

- *le trajet multiple* : la mesure de la distance ainsi que la précision des positions, sont souvent altérées lorsque le signal du satellite n'arrive pas directement au récepteur GPS, mais après réflexion sur un obstacle proche comme l'arbre ;
- *la perte de signaux* : le couvert forestier et/ou l'encaissement de certaines vallées peuvent empêcher ou diminuer la réception des signaux de certains satellites.

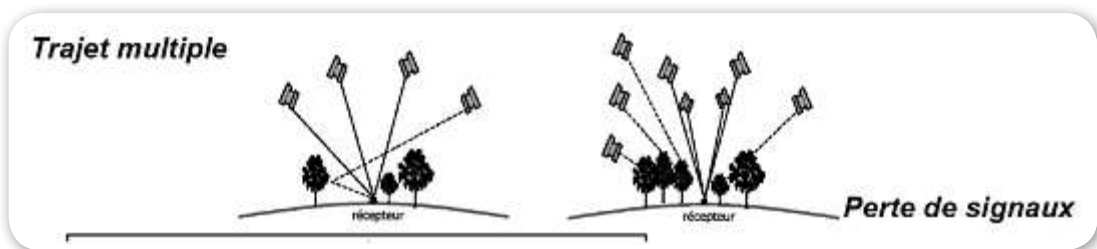


Schéma 2. Illustration de deux problèmes majeurs rencontrés lors de l'utilisation du GPS en forêt.

Des solutions pour pallier ces problèmes

Lors de la préparation du terrain

On peut estimer à l'avance en un lieu et à une heure donnée le nombre de satellites et leur géométrie (PDOP). Il est possible de charger sur le GPS des fichiers « éphémérides » qui contiennent la position de tous les satellites GPS disponibles. Grâce à ces informations, le GPS est capable de les localiser plus rapidement.

Il est également possible de configurer le récepteur GPS afin que celui-ci ne puisse enregistrer les positions qu'en dessous d'une certaine valeur du PDOP, ou encore de ne pas prendre en compte les satellites en dessous d'un certain degré d'élévation.



D'un point de vue matériel

On peut utiliser une antenne externe munie d'un plan absorbant ou encore une antenne « choke ring » permettant ainsi de limiter au maximum la perte de satellites et le multi-trajet. De plus si l'on positionne l'antenne au dessus de l'utilisateur cela facilite la réception (**Photo 1**).

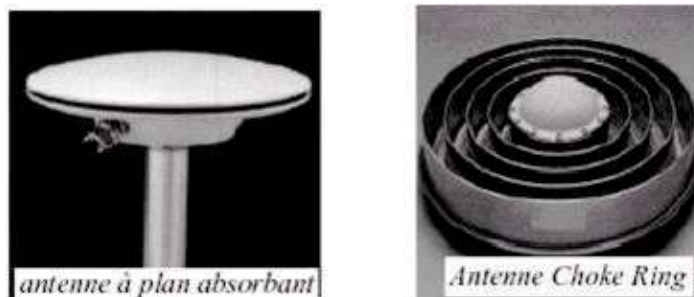


Photo 1. Illustration de deux types d'antennes (Photo A. Pédemay, ONF, 2013).

Le mode différentiel ou post traitement

Le positionnement relatif ou différentiel permet d'obtenir de meilleures précisions inférieures à 3 m sous couvert forestier avec des GPS « Trimble® ».

Deux positionnements sont calculés rigoureusement au même instant :

- *un au niveau d'une station de référence* dont les coordonnées X, Y et Z sont connues précisément. Il existe de nombreuses stations de référence sur le territoire, l'idéal est de se baser sur une station située à moins de 100 km de sa zone de levés. On peut consulter les stations à l'adresse <http://rgp.ign.fr>, et y récupérer les fichiers de référence pour effectuer la correction différentielle ;
- *un autre au niveau du récepteur GPS*. La station de référence calcule les corrections à effectuer sur les valeurs enregistrées par le GPS sur le terrain. La plupart du temps le logiciel de traitement de données du GPS contient une fonction permettant d'effectuer ce traitement. *Il faut noter que les GPS grand public (type Garmin®) ne peuvent utiliser cette méthode* (Nguyen The et al., 2004).

En l'absence de correction différentielle en temps réel, plusieurs positions peuvent être calculées sur le récepteur GPS pendant un certain temps, puis une moyenne est faite afin d'obtenir une position unique qui se rapprocherait de la position « vraie ». Sachant cela, il peut s'avérer judicieux lorsque les conditions sont difficiles de prendre un nombre élevé de positions (entre 20 et 30) afin de minimiser le risque d'erreur.

L'initialisation⁷ du GPS est également un point important. En effet les récepteurs GPS affinent en permanence leur position par rapport aux derniers levés effectués. Aussi il est déconseillé d'enregistrer les premières positions affichées par le récepteur qui peuvent être éloignées de la position actuelle. Ceci est d'autant plus vrai si la date ou la position géographique des derniers levés effectués est très éloignée de la position actuelle. *C'est pourquoi il ne faut pas lors des campagnes de relevés éteindre le récepteur entre l'enregistrement de deux points, mais au contraire le laisser fonctionner en permanence.*

Enfin la technologie « Floodlight » développée par Trimble apporte une réelle avancée car elle permet une utilisation combinée des constellations américaines (GPS) et russes (GLONASS - global navigation satellite system). Des algorithmes avancés permettent aussi une meilleure stabilité de poursuite des satellites à faibles signaux, évitant ainsi les pertes de signaux ou pics occasionnés par un suivi satellitaire irrégulier. Les chances de recevoir un signal de qualité par un nombre accru de satellites sont grandement augmentées.

Lors de ce travail et depuis l'utilisation de cette technologie, nous avons été rarement confrontés à l'absence de signal des satellites.

7 Initialisation du GPS : calcul du positionnement du GPS lors du démarrage ou lors d'un déplacement par exemple.

Description du matériel

Pour mener à bien la campagne de relevés terrain diverses options de matériels ont été étudiées. Le choix final s'est porté sur un GPS de précision métrique accompagné d'un SIG embarqué (Voir **Photo 2**).

Le GPS est un GéoXT 6000 Trimble doté de la technologie « Floodlight ».

Pour le SIG embarqué nous avons utilisé une tablette PC équipée d'ArcMap10.

Le lien entre le GPS et le SIG embarqué se fait par trames NMEA (National marine electronics association). Les trames émises par le récepteur GPS sont récupérées par le PC via Bluetooth. Ce lien permet d'obtenir en temps réel son positionnement sur le SIG embarqué facilitant ainsi le repérage et la navigation sur le terrain. L'utilisation du GPS est donc double puisqu'il sert aussi à effectuer les levés d'éléments nouveaux : équipements, point noirs ou segments de desserte.



Photo 2. Illustration du matériel utilisé (Photo A.Pédemay, ONF, 2013).

Conclusion


Au premier trimestre 2004, la campagne de levés terrain sur la zone test est quasi terminée, elle représente 13000 km de voies recensés. Cette solution s'est avérée globalement performante et fiable, permettant même un gain de temps par rapport aux estimations initiales.

La précision après correction différentielle s'avère tout à fait satisfaisante, de l'ordre de 1 ou 2 mètres, mais il peut arriver qu'un point soit mal positionné, l'imprécision n'excédant pas 5 mètres d'écart.

Toutefois, quelques limites sont à signaler :

- la perte de signaux satellitaires reste possible malgré la technologie « floodlight », mais il suffit en général d'attendre quelques secondes pour retrouver de bonnes conditions de levés et ce même en terrain difficile ;
- le système demeure sensible et peut s'avérer instable sur le terrain : multiples bugs, problèmes de connexion des appareils entre eux, problèmes de batterie, perte de données ;



- 
- la saisie peut être difficile du fait de l'environnement « terrain » (intempéries, mouvements de la voiture, etc.) y compris sur une tablette PC sensée faciliter le travail sur le terrain. Cela peut notamment engendrer des erreurs topologiques, des erreurs de découpage, de remplissage des tables, etc.

Il est donc important de multiplier les sauvegardes et de veiller à contrôler régulièrement les sources d'erreur citées ci-dessus.

Références bibliographiques

Lejeune P (2001) *Les possibilités d'utilisation du matériel GPS en forêt*. Note technique forestière de Gembloux n° 3, 10 p.

Piedallu C, Gégout JC (2002) Etude de la précision du système GPS en milieu forestier. *Rev Forest Fr* LIV : 429-442.

Nguyen The N, Ginet C, Giraud A, Bouvet A (2004) Calcul des surfaces. Atouts et limites des récepteurs GPS « Grand Public ». *Rev Forest Fr* LVI : 529-536.



Contributions des GPS et du SIG pour l'étude du comportement animal : illustration avec l'étude de la dispersion natale du jeune chevreuil en agro-écosystème

Bruno Cargnelutti¹, Lucie Debeffe¹, Nicolas Morellet¹

Résumé. Dans le cadre d'une étude sur le rôle de l'hétérogénéité de l'espace sur le fonctionnement et la structuration de populations d'ongulés sauvages, nous nous sommes intéressés à la dispersion natale chez le chevreuil juvénile. Cette dispersion est un processus biologique dont la conséquence est un éloignement géographique plus ou moins important par rapport au lieu de naissance. Ainsi, depuis 2003, des jeunes chevreuils ont été équipés de collier GPS (global positioning system) et suivis intensivement durant cette phase d'instabilité spatiale. L'objectif est d'appréhender d'une part les mécanismes proximaux qui sous-tendent ce comportement et d'autre part, à plus long terme, les causes ultimes de la dispersion natale. Qui dispersent, quand, comment et surtout qu'est-ce qui motive les disperseurs dans la sélection de leur nouveau domaine de vie ? Notamment, l'hypothèse NHPI (natal habitat preference induction) postule que le jeune est imprégné des caractéristiques paysagères de son domaine natal et que ces dernières influeraient sur la sélection de son futur domaine vital adulte. Afin de tester cette hypothèse et de mieux comprendre ce processus complexe, nous avons croisé les données géo référencées issues des colliers GPS des juvéniles disperseurs avec les informations spatiales de nos SIG (système d'information géographique).

Mots clés : chevreuil, SIG, GPS, dispersion natale

Introduction

Depuis plusieurs décennies, il est notoire de constater en Europe une considérable augmentation des populations d'ongulés sauvages de plaine (sanglier (*Sus scrofa*), cerf (*Cervus elaphus*), chevreuil (*Capreolus capreolus*)). Cette poussée démographique a eu pour corollaire une extension géographique des populations et la colonisation de nouveaux habitats. Ainsi, le chevreuil, originellement considéré comme forestier, est aujourd'hui présent dans la plupart des écosystèmes européens (Boiseaubert et Boutin, 1988). Cette espèce occupe aujourd'hui aussi bien les habitats très forestiers que des milieux intermédiaires comme le bocage, les agro-écosystèmes, et même les pelouses de l'étage alpin. Pour les scientifiques, les gestionnaires de la faune sauvage, voire les aménageurs gestionnaires du paysage (trame verte par exemple) figurent parmi leurs enjeux actuels la compréhension du fonctionnement spatial et de la dynamique démographique de ces populations dans leurs nouveaux habitats. Plusieurs études ont montré chez le chevreuil que la survie et le devenir des jeunes individus sont des paramètres importants à considérer. En effet, si les chevreuils adultes présentent une forte sédentarité, qui se traduit par l'occupation fidèle d'une même portion d'espace durant de nombreuses années, que l'on nomme le domaine vital (Benhamou, 1998), il n'en va pas de même des juvéniles qui peuvent présenter un comportement erratique, durant leur deuxième printemps, lorsqu'ils quittent leur domaine natal pour s'installer sur leur futur domaine d'adulte. Il est primordial de s'intéresser et d'approfondir les connaissances concernant ce comportement, car la dispersion natale est un des processus cruciaux permettant d'aborder et de comprendre le fonctionnement spatial d'une population. La dispersion natale est l'émigration d'un jeune de son domaine de naissance, vers ce qui sera son futur domaine d'adulte, sans qu'il y ait superposition entre les deux entités spatiales (Debeffe, 2013). Faute de moyen technique adapté, ce processus biologique, commun à la plupart des êtres vivants, reste peu étudié.

Jusqu'au début des années 2000 les chevreuils étaient équipés de colliers émetteurs de type VHF (very high frequency). La collecte des informations spatialisées se faisait par radiopistage manuel et impliquait plusieurs opérateurs devant travailler de façon synchrone (Janeau, 1998). Cette méthode, lourde et chronophage, n'autorisait

1 INRA, CEFS, Chemin de Borde Rouge, Auzeville, CS 52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France ; Bruno.Cargnelutti@toulouse.inra.fr

le suivi simultané que d'un nombre limité d'animaux ; par ailleurs, d'autres contraintes comme le terrain (relief, possibilité d'accès), la météo (orage) perturbaient voire limitaient les suivis. Faute de pouvoir réaliser des suivis réguliers et intensifs, les informations recueillies, trop fragmentaires, se résumaient souvent à des jeux de données correspondant d'une part au domaine vital de départ et d'autre part à celui d'installation. Le chercheur ignorait alors tout ou presque du trajet emprunté et de sa complexité et ce manque d'information ne permettait pas la reconstitution de trajectoires de dispersion. Cependant, le chemin de dispersion n'est certainement ni linéaire ni aléatoire et le paysage, compte tenu de sa structure, de son hétérogénéité, avec présence ou non de corridors ou d'une plus ou moins forte connectivité, peut entraver ou faciliter la dispersion, voire orienter le flux migratoire vers un axe privilégié (Gérard et al., 1992). Lors de ce périple, l'individu est amené à traverser des paysages variés, à explorer des lieux qui lui sont inconnus, et à un moment donné, il devra prendre une décision, celle de stopper sa progression et d'établir son nouveau domaine de vie. Ce choix est crucial pour l'individu et ne sera pas sans conséquence sur son devenir et celui de ses descendants. Une question alors se pose, pourquoi cet endroit précis plutôt qu'un autre ? Une théorie récente NHPI (natal habitat preference induction) avance que les stimuli, paysagers notamment, reçus par un individu au cours de sa vie juvénile au sein du domaine maternel (pré-dispersion) augmentent la probabilité de sélectionner un habitat (post-dispersion) contenant des stimuli comparables. L'adaptation de la technologie GPS (global positioning system) au service de l'écologie animale est une opportunité inestimable. L'acquisition automatisée des données est continue, synchronisée pour tous les individus de l'échantillon suivi et avec peu de perte d'information. Le traitement de ces informations géo-localisées avec des logiciels de SIG (système d'information géographique) permet maintenant d'aborder dans le détail et de mieux comprendre certains processus biologiques telle la dispersion natale.

Les résultats présentés ici sont issus des recherches menées par l'équipe Ecologie des populations, du laboratoire Comportement et Ecologie de la Faune sauvage (UPR 0035, INRA Toulouse). L'objectif fondamental de l'équipe est d'identifier et de prévoir le rôle de l'hétérogénéité de l'espace sur le fonctionnement et la structuration de populations d'ongulés sauvages. Dans ce travail concernant la dispersion chez le chevreuil dans un paysage fragmenté, nous testons sur un échantillon d'individus juvéniles la théorie de l'induction de préférence pour l'habitat natal (Debeffe, 2013).

Matériels et méthodes

Site d'étude

La zone d'étude, d'une superficie de 100 km², occupe l'étage collinéen de la région naturelle du Bas Comminges (N 43°28 et E 0°85). Elle fait partie d'un site atelier labellisé LTSER (long term socio ecological research) des coteaux de Gascogne). C'est un paysage hétérogène de coteaux à vocation polyculture élevage où les prairies représentent plus de 36 % de la surface, les parcelles cultivées 32 % et le reste est occupé par des productions non agricoles, des bosquets, des haies et des friches (24 %). Dans cet ensemble, hormis deux massifs forestiers d'environ 600 ha, les formations boisées se présentent sous forme de petites parcelles (surface moyenne 3 ha) gérées par les agriculteurs (Balent, 1996).

Capture et suivi télémétrique

Les chevreuils sont capturés en période hivernale (janvier-février) en agro écosystème mais aussi en milieu forestier. Au cours de ces battues les animaux sont poussés vers un dispositif de filets verticaux (Cargnelutti, 2007). Avant d'être relâché, chaque individu est pesé, sexé, et son âge est estimé par observation des dents de la mandibule, ce qui permet notamment de distinguer les chevreuils adultes des juvéniles ; sont aussi réalisés divers prélèvements (sang, peau, fèces...). Au début de cette étude (1996) les chevreuils étaient équipés de collier émetteur de type VHF et la prise de données se faisait par radiopistage manuel, chaque individu étant localisé hebdomadairement entre une et trois fois tout au long de l'année. Depuis 2003 la plupart des animaux capturés reçoivent un collier GPS Lotek model 3300, 12 canaux (**Photo 1**), c'est-à-dire que l'appareil est capable d'acquérir simultanément les signaux de douze des satellites de la constellation GPS (au total, une trentaine de satellites en orbite autour de la Terre). L'ensemble des géo-localisations réalisées (4 000 à plus de 5 000 par collier) est stockée



Photo 1. Femelle équipée d'un collier GPS.

en mémoire interne, l'utilisateur ne pouvant en disposer qu'à la récupération de l'appareil. Un système programmé (système Drop-off) permet l'ouverture automatique du collier et à l'utilisateur de le récupérer, d'accéder aux données et de le reprogrammer pour une nouvelle campagne de terrain. Un émetteur VHF intégré permet de suivre l'animal par radiopistage classique, mais aussi de retrouver le collier après son ouverture. Le collier complet pèse environ 385 g, ce qui représente en moyenne 1,7 % à 2,4 % de la masse des chevreuils, respectivement pour les adultes et les juvéniles (Debeffe, 2013). L'autonomie de l'appareil permet de couvrir un cycle annuel (janvier à mi-décembre). Si cet équipement est idéal pour des individus sédentaires, il n'en va pas de même pour les juvéniles dispenseurs qui peuvent parcourir de longues distances en peu de temps ; en effet, la faible portée de l'émetteur VHF (très variable en fonction de la topographie) permet difficilement de retrouver ceux qui se sont trop éloignés. Pour pallier ce problème, les juvéniles sont équipés depuis 2010 d'un nouveau modèle de collier GPS Lotek Small WildCell qui présente l'avantage d'être compatible avec le réseau GSM (global system for mobile communications). Ainsi, chaque collier envoie par SMS, directement au laboratoire sur un ordinateur équipé d'un modem, les informations temporelles (date, heure) et spatiales (latitude, longitude) des points qu'il a réalisés. Les déplacements des chevreuils sont observés presque en temps réel et ainsi le contact radio peut-être conservé et la récupération de l'appareil assuré.

Quel que soit le type de collier, l'acquisition des données est régulière, avec une fréquence plus intense durant les phases biologiques sensibles. Ainsi, dans le cas du suivi des juvéniles, une localisation est réalisée par heure durant les mois de mars, avril et mai, couvrant ainsi largement la période de dispersion (environ 70 % des géolocalisations) et une toutes les 6 heures les autres mois.

Le système d'information géographique

Le SIG et les traitements des données ont été réalisés sous différentes versions du logiciel Arcview d'ESRI. Nous disposons de deux bases de données : la première, nommée parcellaire agricole, concerne notre site d'étude *stricto sensu*. Elle a été élaborée par digitalisation des images raster de la BD ORTHO (IGN - Institut national de l'information géographique et forestière) de 2010, ayant une résolution de 50 cm. Cette base de données où chaque



polygone est identifié comme parcelle agricole (blé, maïs, prairie, ...), entité naturelle (bois, friche, lande, haie,...) ou élément anthropisé (route, bâtiment, ...), est réactualisée annuellement au cours de campagnes de relevés de terrain. La seconde, complémentaire au site atelier, est issue de la BD TOPO version 2.1 de l'IGN. Cette dernière base de données géographiques couvre une surface beaucoup plus vaste que la précédente et permet de renseigner l'occupation du sol pour les chevreuils qui dispersent sur de longues distances. Le paysage est décrit plus succinctement en termes de milieu ouvert, d'entités naturelles (bois et haies) et d'infrastructures humaines (route et bâti).

La sélection de l'habitat

Le domaine vital d'un individu sédentaire (**Figure 1**) peut se synthétiser sous la forme d'un polygone correspondant à une probabilité de présence (i.e. 90 %, 50 %, ...) sur une certaine aire, celui d'un juvénile disperser comprend trois entités, le domaine natal (pré-dispersion), la trajectoire de dispersion et le domaine d'installation (post-dispersion). L'étude de la sélection de l'habitat a été réalisée en considérant ces trois entités. Compte tenu des surfaces explorées durant la phase de dispersion, les analyses ont été effectuées avec le SIG issu de la BD TOPO. La composition du domaine natal est obtenue en réalisant une intersection entre le polygone représentant le domaine natal et la couche habitat du SIG, la même procédure est appliquée pour le domaine post-dispersion. La comparaison de la composition, en termes d'habitats, des différents domaines vitaux permet d'estimer leur degré de similitude. En ce qui concerne la trajectoire de dispersion, nous l'avons encadrée par une zone tampon d'une largeur de 100 m, correspondant au double du seuil de détection potentiel d'un congénère quel qu'il soit (Debeffe, 2013). Au sein de ce buffer, 200 localisations aléatoires ont été générées (**Figure 2**), chacune étant le barycentre d'un domaine vital virtuel d'une surface équivalente à celle du domaine post-dispersion (**Figure 3**). Ces domaines virtuels ont permis d'échantillonner les habitats potentiellement disponibles sur la trajectoire de dispersion.

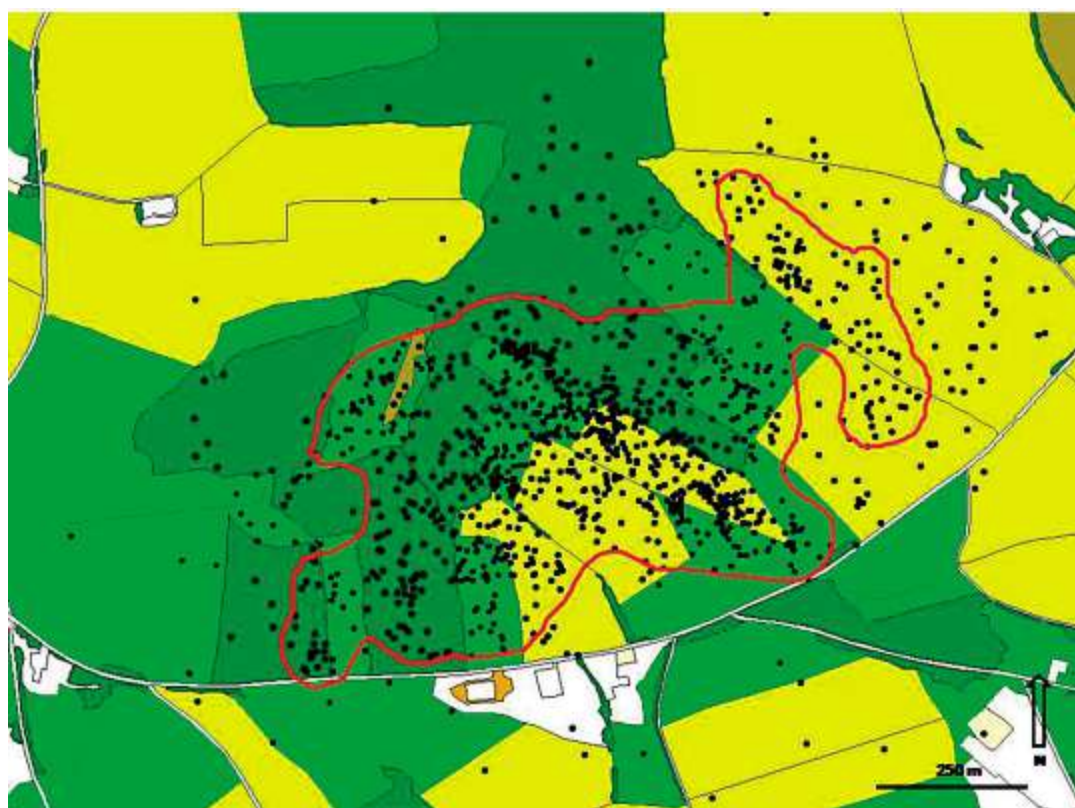


Figure 1. Exemple de représentation du domaine vital avec 90 % de présence de l'animal. Les polygones vert sombre représentent les habitats boisés (bosquets, haies), les polygones blancs l'infrastructure routière et les espaces anthropisés, et les autres couleurs la matrice agricole. Chaque point noir est une localisation GPS, le polygone du domaine est délimité par le trait rouge.

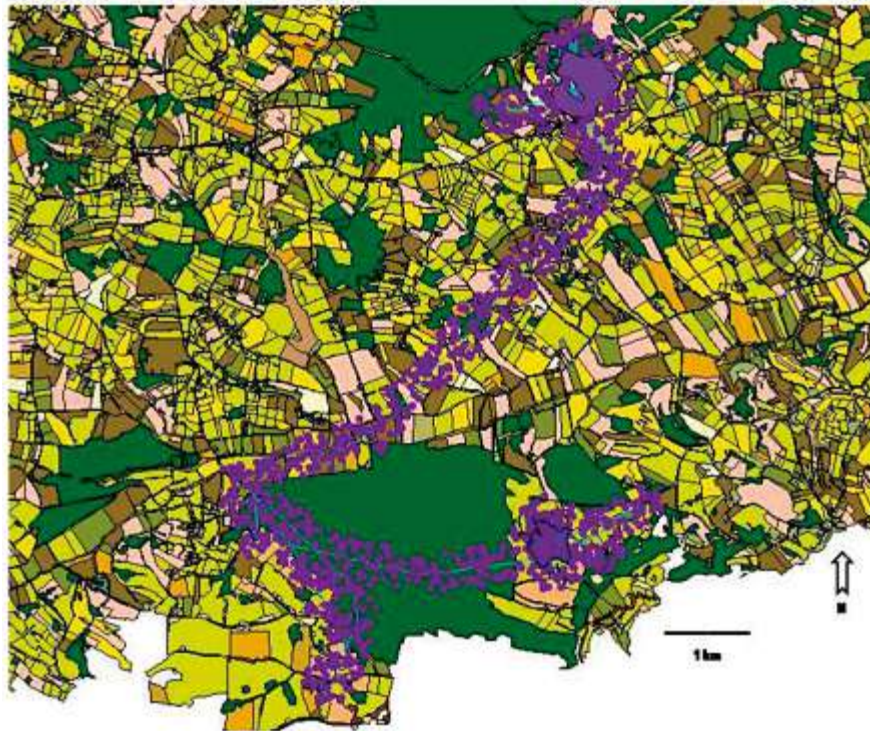


Figure 2. Exemple de trajectoire de dispersion ; en violet les points aléatoires. Les polygones verts sombres représentent les habitats boisés (bosquets, haies), les autres couleurs la matrice agricole.

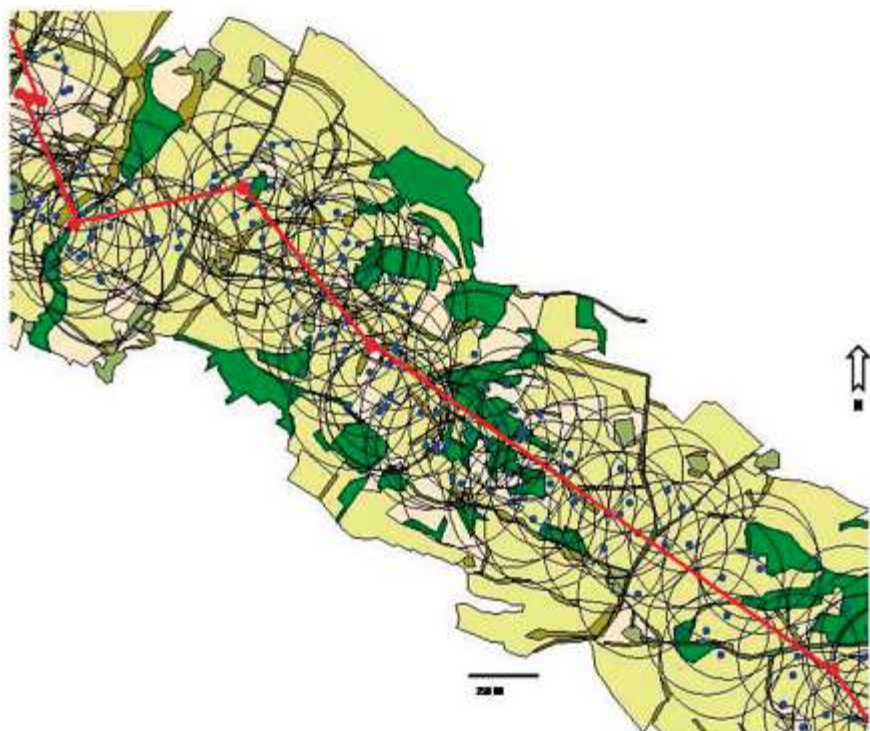


Figure 3. Etude de la sélection de l'habitat durant le trajet de dispersion (exemple du mâle juvénile 280). Polygones verts : habitats boisés. Jaune : matrice agricole. Trait rouge : trajectoire de l'animal. Points rouges : localisations GPS du chevreuil. Points bleus : points témoins tirés au sort dans la zone tampon encadrant la trajectoire. Cercle noir : zone tampon correspondant aux domaines témoins.



Résultats

Entre 2003 et 2011, 76 juvéniles ont été équipés de collier GPS. Un tiers (25/76) s'est engagé dans un processus de dispersion ; à noter quatre individus atypiques qui ont regagné leur site natal plusieurs mois après l'avoir quitté. La période de dispersion principale se situe en avril-mai (le départ le plus précoce a été observé le 30 mars et le plus tardif fin mai). Cette phase erratique, durant laquelle l'individu explore l'environnement à la recherche d'un nouveau domaine vital, dure environ 15 à 20 jours et la distance moyenne entre les deux domaines, pré dispersion et post dispersion, est de 24 km (+/- 17,3 km) avec un maximum connu de plus de 51 km. Globalement, les trajectoires de dispersion sont nettement orientées vers l'ouest. Il n'apparaît pas de biais de dispersion en faveur d'un sexe en particulier : les mâles dispersent autant que les femelles.

En ce qui concerne la théorie du NHPI, un petit tiers des individus disperseurs s'installe sur un domaine vital post-dispersion très similaire à celui de leur naissance. La majorité, 56 %, ne présente pas de sélection d'habitat en particulier et enfin, le reste (12 %) semble éviter les habitats qui composaient leur domaine natal. On observe pour la sélection du domaine post-dispersion une différence entre les sexes. En effet, ce sont les femelles et notamment celles qui ont une forte masse corporelle qui adoptent de préférence un habitat identique à celui de leur site de naissance. La durée de dispersion est significativement plus longue pour les individus adoptant une stratégie neutre (ni attirance ni aversion vis-à-vis de l'habitat natal).

Discussion

C'est au début des années soixante que sont apparus les premiers équipements radio destinés à la faune sauvage (Zimmermann et al., 1976 ; Janeau, 1998) et cette avancée technologique a été vécue par les biologistes comme une révolution. Plus besoin de passer de longues heures à l'affût, dans l'hypothétique espoir d'entrapercevoir l'animal convoité. Le radiopistage permettait de retrouver facilement un individu particulier, mais aussi de le suivre plus ou moins longtemps. Cependant, ces premiers équipements radio, pour la plupart imaginés et bricolés par les utilisateurs, étaient lourds, volumineux et n'étaient certainement pas sans incidence sur le comportement des animaux équipés (Zimmermann et al., 1976). Afin de répondre à la demande croissante des biologistes, un marché s'est rapidement développé. Actuellement, quelle que soit l'espèce étudiée, il existe au moins un émetteur qui lui est adapté. Ainsi, avec des durées de fonctionnement plus ou moins longs (de quelques jours à plusieurs années en fonction de la capacité de la pile qui l'alimente et de la puissance de l'émetteur) il est possible d'équiper aussi bien des éléphants que des chiroptères. Dès le milieu des années quatre vingt dix, avec l'adaptation d'équipement GPS destiné à la faune sauvage, une autre révolution technologique se profilait. Imaginé à des fins militaires, la technologie GPS a immédiatement séduit les biologistes qui ont su profiter de cette opportunité en la mettant au service de leur science (Janeau et al., 1998). Elle offre une combinaison d'avantages intéressants, plusieurs individus peuvent être suivis simultanément, en permanence, partout sur la planète et avec un pas de temps qui peut être relativement court (10 min dans notre cas). L'automatisation de la géo-localisation, ouvre de nouvelles perspectives de recherche, et des processus biologiques jusqu'alors connus mais très mal étudiés par manque d'informations peuvent maintenant être abordés dans leur globalité. La dispersion natale des chevreuils juvéniles en est un bon exemple. En suivant avec beaucoup de finesse les trois étapes (pré-dispersion, dispersion et post-dispersion) de ce processus complexe, nous sommes en mesure de répondre à certaines questions : qui disperse, quand, sur quelle distance et quelle est la durée de cette phase erratique. Nous savons maintenant que seulement un tiers des juvéniles s'engagent dans un processus de dispersion et que les individus qui présentent une bonne qualité phénotypique ont une probabilité de disperser plus importante que les autres. Cependant, bien que les données GPS analysées avec les SIG aient permis une progression considérable de notre connaissance de la biologie du chevreuil, notamment dans le domaine de la sélection et de l'utilisation de l'habitat, il reste encore beaucoup de questions sans réponse. Dans le cas de la théorie du NHPI, l'empreinte de l'habitat du domaine natal est sensée jouer un rôle dans le choix du domaine vital d'installation. Ainsi, des stimuli positifs retournés par l'habitat natal, devraient inciter l'individu à préférer un habitat identique à celui de sa naissance, avec en corollaire une durée de dispersion plus courte et une limitation des risques encourus. Nous avons observé une importante variabilité interindividuelle dans les stratégies de sélection d'habitats post-dispersion. Afin d'expliquer la stratégie différentielle constatée entre les sexes, Debeffe (2013) avance un argument biologique en relation avec la reproduction, l'intérêt de la femelle serait de s'installer dans un habitat favorable assurant une certaine prospérité alimentaire pour sa descendance future. Ainsi, nous constatons que les chevrettes les plus lourdes, originaires d'un habitat riche (agro-système), valident la théorie du NHPI en orientant leur choix vers un environnement

similaire à celui de leur naissance. En conséquence, cette expérience pré-dispersion ne défavorise pas ces émigrantes par rapport aux sédentaires natives d'un même type habitat. Dans le cas des mâles, le choix du site serait plus en relation avec la structure de la population et notamment la densité de femelles ; en effet comme l'ont montré certaines études ce que privilégie le mâle au sein de son territoire est plus la disponibilité en partenaires sexuelles potentielles que la qualité intrinsèque de l'habitat.

Cette étude préliminaire, tout en apportant un nouvel éclairage sur la dispersion natale, met l'accent sur l'importance de la variabilité interindividuelle au cours des différentes phases de la dispersion, ce qui souligne la complexité de ce processus biologique. L'apport d'informations complémentaires, avec de nouveaux animaux équipés, devrait permettre d'approfondir nos connaissances concernant les facteurs proximaux qui pilotent la dispersion natale. Cependant, avec une meilleure autonomie des récepteurs GPS, nous pourrions envisager des suivis sur le long terme, couvrant plusieurs cycles biologiques, ce qui nous permettrait de mieux appréhender les causes ultimes de ce processus de dispersion, au travers de la survie et du succès reproducteur de ces individus.

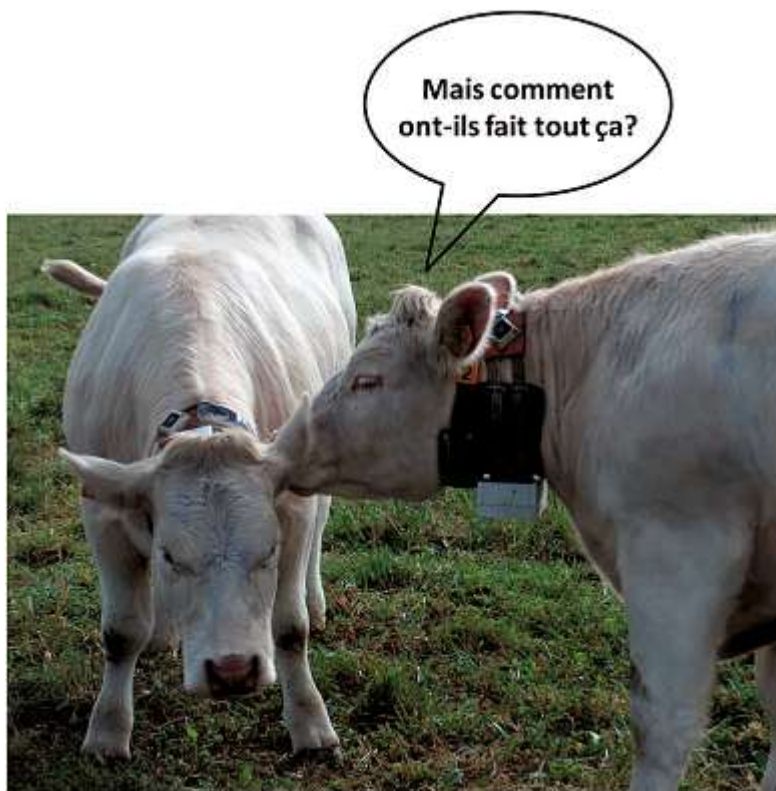
Que ce soit pour un usage global, comme par exemple les déplacements transocéaniques des tortues luths, ou au niveau local pour suivre les périples d'individus de telle ou telle espèce, l'outil GPS est devenu incontournable pour nombre d'études concernant la faune sauvage. Outre la qualité de la géo-localisation, les équipements récents intègrent quantité de capteurs électroniques qui les rendent presque « intelligents ». Ainsi, certains appareils munis de capteurs de proximité peuvent, dès lors qu'un appareil similaire pénètre dans leur sphère de détection, modifier leur fréquence d'acquisition, mémoriser les informations concernant le contact (qui, quand, durée, ...), récupérer les données contenues dans l'autre appareil, voire même informer, via un réseau de communication *ad-hoc*, l'utilisateur de l'événement. Ces équipements, capables de travailler en réseau, ouvrent encore de nouvelles perspectives de recherche, comme par exemple les relations interindividuelles inter ou intra-espèces (les relations sociales, les relations prédateurs-proies,...). Dans un registre plus appliqué et concernant des espèces conflictuelles, comme l'ours par exemple, les utilisateurs peuvent être prévenus de la présence d'individus équipés à proximité de secteurs sensibles (pastoralisme) et ainsi anticiper leurs déprédations. La géo-localisation satellitaire, avec l'usage du GPS, a complètement modifié les façons de travailler (Klein et al., 2006) et, dans de nombreuses études, elle a supplanté le radiopistage manuel terrestre. Cependant, cette dernière technique de localisation n'est pas pour autant abandonnée. En effet l'investissement dans des colliers GPS est très onéreux (environ 2 000 euros pour un modèle de base, contre 200 à 300 euros pour un émetteur VHF), et pour certaines espèces animales il n'existe pas d'équipement GPS adapté et le recours au radio pistage manuel sur le terrain reste alors indispensable pour retrouver un animal équipé.

Références bibliographiques

- Balent G (1996) La forêt paysanne et l'aménagement de l'espace rural. *Etudes et Recherches INRA, Département de Recherches sur les systèmes agraires et Développement* **29** : 7-14.
- Benhamou S (1998) Le domaine vital des mammifères terrestres. *Revue d'Ecologie (Terre et vie)* **53** : 309-335.
- Boisaubert B, Boutin JM (1988) *Le chevreuil*. Hatier, Paris, 236 p.
- Cargnelutti B (2007) Influence de l'hétérogénéité du paysage sur l'occupation de l'espace de chevreuils (*Capreolus capreolus*) vivant en milieu fragmenté. Diplôme EPHE, Université Montpellier II.
- Debeffe L (2013) La dispersion chez le chevreuil européen *Capreolus capreolus* dans un paysage fragmenté. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III.
- Gérard J F, Cargnelutti B, Spitz F (1992) Relation entre anisométrie de l'occupation de l'espace et dispersion : un exemple chez le sanglier du sud-ouest de la France. *Mammalia* **56** : 177-187.
- Janeau G (1998) Localisation de balise radio-émettrice VHF portée par des mammifères terrestres : principes, précision, limites et contraintes. *Arvicola* : 11-18.
- Janeau G, Angibault JM, Cargnelutti B, Joachim J, Pepin D, Spitz F (1998) Le global positioning system (GPS) et son utilisation (en mode différentiel) chez les grands mammifères : principes, précision, limites, contraintes et perspectives. *Arvicola* : 19-24.
- Klein F, Gendner JP, Storms D, Hamann JL, Saïd S, Michallet J, Pfaff E (2006) Le GPS et l'étude des ongulés sauvages. *Faune sauvage* : 31-38.
- Zimmermann F, Gérard H, Charle-Dominique P (1976) Le radio-tracking des vertébrés : conseils et techniques d'utilisation. *Revue d'Ecologie (Terre et vie)*, **30** : 309-346.



/ Chapitre 6 /
**Retour d'expérience
des organisateurs
et des participants**



Source : Francis Decuq

Approche pour organiser une école technique

Leçons tirées des écoles techniques GPS-SIG organisées à Auzeville en 2012 et 2013

Daphné Frullini¹, Clémentine Galès¹, Christine Péresse¹, Geneviève Santoro², André Gavaland²

Résumé. L'Unité expérimentale Grandes Cultures du Centre INRA de Toulouse-Auzeville a organisé sur deux années successives, 2012 et 2013, une école technique dédiée aux outils de géolocalisation (GPS-global positioning system) et de cartographie numérique (SIG-système d'information géographique). Ces manifestations ont pu se dérouler dans de bonnes conditions et être fructueuses grâce à une synergie positive entre le comité d'organisation et l'équipe Formation permanente de Centre. Le présent article fait l'état des points essentiels de l'organisation de ces événements. Il souligne l'importance de raisonner en amont les besoins pédagogiques et la logistique et met l'accent sur les points forts des deux sessions et les améliorations apportées en seconde session à la lumière de l'expérience acquise en première session. Enfin il synthétise la perception des agents formés vis-à-vis des apports des écoles et des outils abordés, GPS et SIG.

Mots clés : école technique, logistique, animation, ateliers de réflexion, GPS, SIG

Introduction

L'Unité expérimentale Grandes Cultures du Centre INRA de Toulouse-Auzeville a organisé en mars 2012 et mars 2013, une école technique GPS-SIG (global positioning system- système d'information géographique). En effet, l'utilisation des outils de géolocalisation et de cartographie se multiplie dans le domaine de la recherche agronomique et les technologies embarquées évoluent rapidement et se développent dans les Unités de l'INRA. L'organisation d'une école est apparue comme un moyen intéressant pour permettre aux agents des Unités expérimentales d'acquérir un niveau de connaissance suffisant pour juger de l'intérêt de développer l'usage de ces outils dans leurs activités. L'objectif était par conséquent d'initier les participants aux outils de géolocalisation par GPS et de cartographie numérique par SIG dans une optique d'utiliser ces outils pour la conduite des expérimentations dans le secteur végétal mais aussi animal. Les quelques cinquante agents formés sur ces deux sessions venaient majoritairement des Unités expérimentales.

Le montage de ces deux écoles techniques a été rendu possible grâce à une synergie positive entre le comité d'organisation et l'équipe Formation permanente du Centre de Toulouse (FPL) complété par un soutien en ingénierie de formation de la Formation permanente nationale (FPN). Cet article, rédigé avec la préoccupation de capitaliser les savoir-faire organisationnels, réunit les points essentiels de l'organisation de ces événements en distinguant les points forts des deux sessions et les points améliorés en seconde session à la lumière de l'expérience acquise en première session. Il souligne l'importance de raisonner l'organisation en amont. Enfin il synthétise la perception des agents formés vis-à-vis des GPS et des SIG et de leur mise en œuvre opérationnelle dans leurs Unités.

Le déroulé de l'organisation des deux écoles techniques GPS-SIG

Ces deux écoles techniques ont été organisées suivant le même schéma général :

- ✓ une organisation en sept séquences qui ont permis de couvrir à la fois les principes généraux des GPS, SIG et de l'agriculture de précision, et leurs applications pour la gestion d'un domaine agricole ou d'un site expérimental ainsi que les conséquences possibles en terme d'organisation informatique au niveau Unité ou Centre ;
- ✓ une succession d'exposés magistraux par des spécialistes des domaines concernés ;

1 INRA, UAR0061, Services Déconcentrés d'Appui à la Recherche, Equipe Formation permanente
24, Chemin de Borde Rouge-Auzeville, F-31326 Castanet-Tolosan, France

2 INRA, UE0802, Unité expérimentale Grandes Cultures Auzeville 24, Chemin de Borde Rouge, F-31326 Castanet-Tolosan, France ;
andre.gavaland@toulouse.inra.fr

- ✓ des ateliers pratiques pilotés par des fournisseurs d'équipements ou des agents INRA et conduits en petits groupes soit en extérieur sur le Domaine expérimental d'Auzeville pour de la prise de données avec des récepteurs GPS, piétons ou embarqués, soit en salle pour assurer le transfert de ces données du GPS vers l'ordinateur et leur traitement avec des logiciels SIG ;
- ✓ des ateliers de réflexion pour amener les participants à échanger entre eux, à s'approprier le vocabulaire technique et à intégrer les applications des outils abordés dans le contexte propre de leur Unité et de leur métier.

A l'issue de la première session, l'analyse des questionnaires d'évaluation des participants a permis de corriger et d'ajuster certaines phases du déroulé de la formation mais aussi de conserver les contours de la formation dans son ensemble. Nous dressons ci-dessous le bilan des éléments de l'organisation qui ont été conservés sur les deux sessions, puis des aménagements mis en place pour la seconde session.

Une organisation pédagogique et logistique en amont

La préparation des deux écoles techniques a nécessité une organisation pédagogique et logistique, notamment l'organisation en amont de plusieurs réunions entre le comité d'organisation constitué de cinq agents INRA, tous formés et utilisateurs confirmés de GPS et / ou SIG, et la FP sur la définition des objectifs de formation et l'analyse des besoins des participants, l'élaboration du programme et le choix de méthodes pédagogiques appropriées, le choix des intervenants et d'une réunion en aval d'élaboration d'un questionnaire d'évaluation de la formation.

De même, l'anticipation des besoins logistiques a permis d'alléger l'organisation de l'école (inscriptions, reproduction, hébergement, etc.). Citons à titre d'exemple l'hébergement des participants avec la pré-réservation de chambres permettant aux participants d'être hébergés dans un hôtel facile à réserver via la centrale de réservation, et facile d'accès : à proximité de l'INRA d'Auzeville et accessible par transport en commun.

Nous présentons ci-contre une version simplifiée de notre rétro-planning intégrant notre retour d'expérience sur les 9 mois de mise en œuvre. Il est à l'usage des futurs organisateurs de ce type d'école technique.

Les points forts de la mise en œuvre de la formation

- ✓ **Un effectif limité à 25 agents formés par session.** Malgré une demande beaucoup plus importante (plus de 40 agents préinscrits à chaque session), cet effectif nous semble approprié pour respecter les conditions d'efficacité d'une action de formation en permettant notamment le suivi individuel des participants. La phase de préinscription a été gérée par la FPL en lien avec le comité d'organisation, sous la forme d'une enquête sur leurs attentes, en ligne (logiciel libre LimeSurvey).
- ✓ **Un programme répondant aux attentes.** Le comité d'organisation s'est assuré que les intervenants internes et externes participeraient également à l'ensemble de leur séance et que le contenu de leurs présentations respectives était conforme aux attentes et pertinent dans la chronologie des exposés. De même la préparation des ateliers pratiques a nécessité une réflexion approfondie pour en définir les objectifs, le contenu, la taille et l'homogénéité des groupes, et le timing. Avec des séquences en extérieur (présentation et manipulation des GPS piétons et embarqués) et en salle (transfert de données du GPS vers l'ordinateur, visualisation et premières manipulations ou analyses de ces données sous SIG), leur déroulement a nécessité une forte implication des organisateurs et une logistique informatique en salle.
- ✓ **Un moment de convivialité.** Un dîner organisé dans un restaurant en salle privative a rassemblé presque tous les participants. Ceci démontre que ce moment de détente était attendu. L'ambiance qui y a régné nous fait penser qu'il a été très apprécié.
- ✓ **La création d'ateliers de réflexion.** Ces ateliers en sous-groupes de huit à dix personnes ont été l'occasion pour les agents de s'exprimer et d'échanger librement sur leur perception et leurs attentes vis-à-vis des GPS et des SIG et de situer ces outils dans leur propre contexte professionnel.

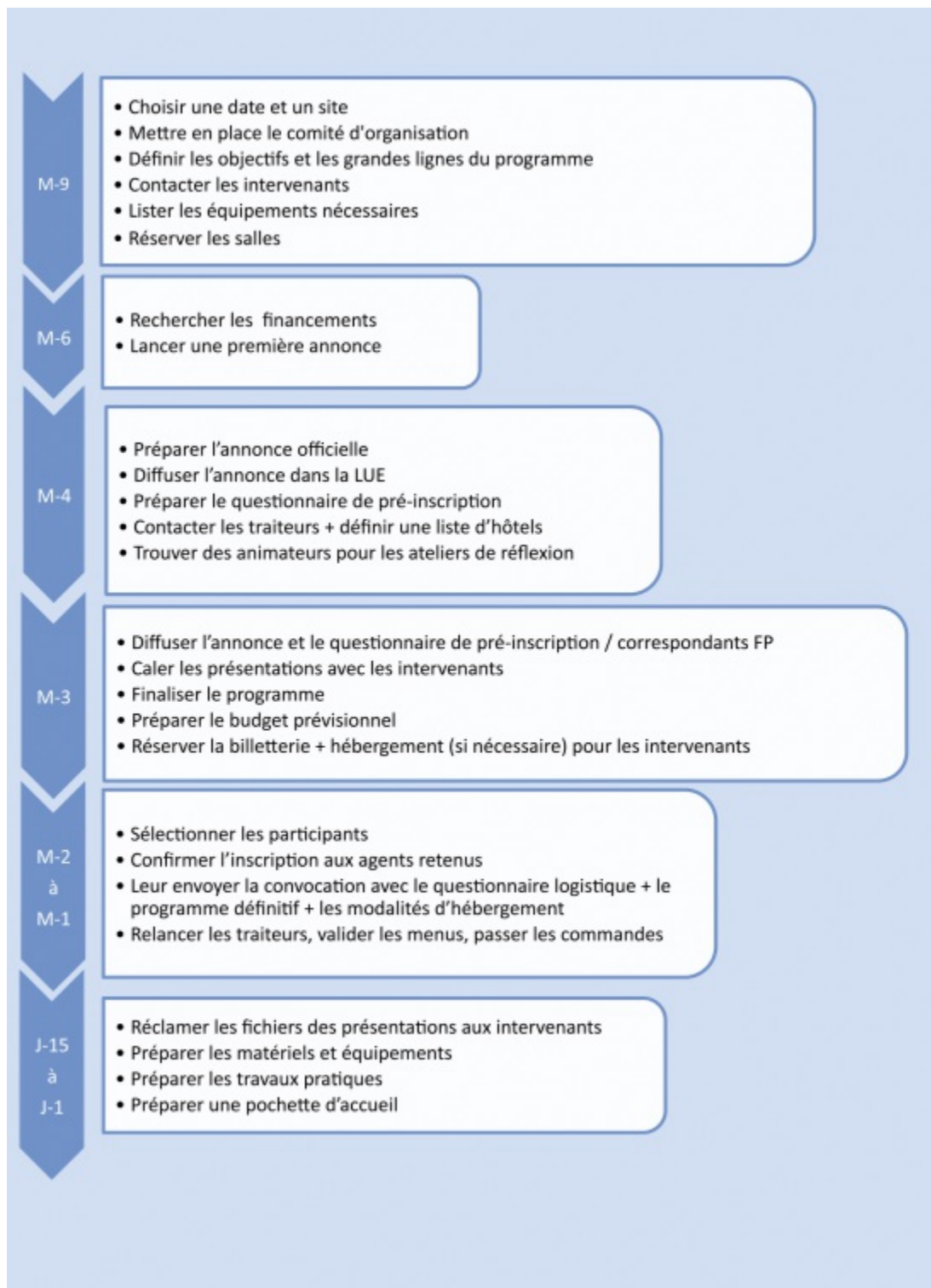


Figure 1. Rétroplanning.

LUE : Lettre des Unités expérimentales, publiée par la CNUE, Commission nationale des Unités expérimentales



Les améliorations apportées en seconde session

- ✓ **Un étalement de l'école technique sur trois journées au lieu de deux.** En 2012, afin de limiter le temps consacré à la formation par les participants, pour l'essentiel en activité dans des Unités expérimentales, l'école a été organisée sur deux journées entières consécutives. Pour tenir compte des retours des participants de la 1^{re} session qui ont perçu un contenu trop dense et un manque de temps pour pouvoir échanger, nous avons étalé le déroulement de l'école de 2013 sur trois jours, soit cinq demi-journées, du mercredi 16 h au vendredi 16 h. Cette formule nous a permis de gagner en souplesse dans la gestion du programme et de ménager plus de temps pour les échanges entre participants et avec les intervenants. Elle a été appréciée par les participants de la seconde session et ne nous a pas valu des critiques de leur part.
- ✓ **Le nombre de présentations magistrales perçu comme trop important par les participants de la session de 2012, a été réduit de 13 à 8.** Les présentations retirées du programme ont été transformées en séances de posters. Cette nouvelle organisation a allégé le programme et favorisé les échanges entre participants et auteurs des posters.
- ✓ **Il a été demandé aux participants de se présenter.** Sur suggestion de la FP nationale, il a été demandé à chaque participant de préparer une diapositive de présentation (qui je suis, où je travaille, quelle est mon activité). Nous avons projeté ces présentations le 1^{er} soir pendant un apéritif dînatoire au cours duquel chaque participant a pu se présenter devant le groupe. Même si certains agents n'ont pas l'habitude de parler en public, aucun d'eux n'a refusé cet exercice, signe qu'ils sont venus à la formation avec une posture de participation et d'échange, favorisée par une ambiance détendue et bienveillante.
- ✓ **Un choix prioritaire des participants pour trois ateliers pratiques sur les six affichés dans le programme.** Lors de la première session, les participants ont suivi l'ensemble des six ateliers. Cette organisation a généré un timing serré, notamment pour le passage entre ateliers. Pour la seconde session, il a été demandé aux participants, lors de la confirmation de leur inscription, d'émettre trois vœux. Naturellement, des réajustements ont été nécessaires, certains ateliers étant plus demandés que d'autres. Nous avons également souhaité une mixité dans les groupes entre les participants utilisant des GPS et ceux qui n'en utilisaient pas, pour favoriser le dialogue et l'apprentissage et confronter les points de vue. La difficulté a été d'imaginer une logique qui permette de fusionner de manière aisée les six groupes constitués pour les ateliers de terrain du début d'après-midi en quatre groupes pour les ateliers en salle de début de soirée du J2 tout en respectant le plus possible les vœux émis en amont.



Figure 2. Déroulement d'un atelier GPS en extérieur (photo A. Gavaland).

- ✓ **La nomination de « chefs de groupe ».** Au sein du comité d'organisation, des « chefs de groupe » identifiés par un code couleur ont été affectés à un groupe de participants. Ils avaient la responsabilité de guider leur groupe vers les différents ateliers suivant une séquence pré-établie.
- ✓ **Une plus grande souplesse dans les horaires des sessions pratiques.** Il s'est avéré difficile pour les animateurs d'ateliers de respecter rigoureusement le timing prévu. Cette souplesse introduite dans la 2^e session a permis d'éviter qu'une séance ne soit interrompue de manière abrupte avant qu'elle ne soit achevée.



Figure 3. Déroulement d'un atelier en salle (photo A. Gavaland).

L'implication d'un grand nombre d'agents

Le Tableau ci-dessous détaille par fonction le nombre de personnes qui se sont impliquées dans la préparation et/ou le déroulement de l'école technique.

Personnes mobilisées pour l'école, par catégorie	Nombre
Organisateurs	5 INRA (3 sont également intervenants)
Intervenants salle	9 dont 5 INRA, 1 IDGEO, 1 Géosys*, 1 ONF, 1 Airinov
Intervenants ateliers pratiques	6 dont 2 INRA et 4 fournisseurs de matériels GPS
Logistique terrain	5 INRA
Animateurs posters	5 INRA
Animateurs d'ateliers	3 INRA
Logistique administrative	3 INRA
TOTAL	33 personnes pour 50 agents formés

* remplacé par un ingénieur d'Astrium en 2013.



Au total 33 personnes ont contribué à ces événements. Cependant, seuls cinq membres du comité d'organisation ont participé à l'intégralité de la conduite des deux écoles. La majorité des 33 agents mobilisés est intervenue principalement pendant le déroulement des écoles techniques. Mais leur contribution n'en est pas moins essentielle et c'est l'implication de toutes ces personnes qui a permis le succès des deux écoles techniques.

Focus sur les ateliers de réflexion

Les participants ont été répartis entre trois ateliers de 8 ou 9 personnes, auxquels se sont ajoutés un animateur et une personne ressource désignés par le comité d'organisation. Les ateliers devaient plancher pendant une heure sur une seule et même question, centrale par rapport au thème de l'école technique : « Que peut apporter l'utilisation des GPS et des SIG dans mon Unité expérimentale ? »

Cette question visait à ce que les agents i) définissent les besoins auxquels les outils (GPS et SIG) répondent, ii) précisent la valeur ajoutée de ces outils et iii) identifient les difficultés et contraintes de leur mise en œuvre.

Les organisateurs ont veillé à ce que dans chaque atelier soient présents à la fois des utilisateurs plus ou moins confirmés et des non utilisateurs.

L'animateur a été choisi pour son rôle de « candide ». Les missions qui lui ont été assignées sont les suivantes :

- ✓ introduire l'atelier et préciser le rôle de la personne ressource : apporter un appui technique aux participants pour traiter la question posée ;
- ✓ organiser la discussion en garantissant que tous les points soient abordés, que tous les participants s'expriment et en évitant la monopolisation éventuelle de la parole ;
- ✓ recadrer les discussions en fonction de ce qui a déjà été dit : la transcription sur un tableau des éléments apportés a facilité ce recadrage et a permis de structurer les propos et d'en préparer la synthèse ;
- ✓ préciser les conditions de restitution de l'atelier et désigner les rapporteurs.

La restitution des travaux des trois ateliers en séance plénière a occupé au total 30 à 40 minutes. Ce moment très riche a permis de mesurer le niveau d'appropriation par les participants de la formation. Il a fait ressortir les attentes et les questionnements des participants. La synthèse des ateliers a permis en particulier aux organisateurs d'envisager la suite des écoles techniques pour atteindre l'objectif visé : la mise en œuvre opérationnelle des GPS et des SIG dans les Unités expérimentales.



Figure 4. Restitution des ateliers de réflexion (photo A. Gavaland).

Quelle perception des GPS et SIG suite aux écoles techniques ?

La synthèse des ateliers de réflexion et des évaluations *a posteriori* permettent de dresser ci-dessous la liste des principaux enseignements des deux écoles techniques.

Les participants ont inscrit l'école technique dans une action de veille technologique sur les GPS et les SIG. Elle leur a donné l'occasion d'acquérir le vocabulaire dédié à ces outils, d'échanger avec les collègues sur les expériences ou les projets envisagés et de prendre des contacts avec les fournisseurs.

Ils ont reconnu unanimement que les GPS permettent d'améliorer la précision des travaux et des expérimentations ainsi que la fiabilité des résultats. Ils facilitent le jalonnage et permettent l'enregistrement de la position d'éléments qu'il est nécessaire de repérer sur les sites expérimentaux (bornes, positions de capteurs, obstacles, etc).

Les SIG facilitent la mise à jour des plans parcellaires et permettent une visualisation rapide d'un ensemble d'informations par la réalisation de cartes thématiques (assolement, position des essais dans les parcelles, etc.). Les agents ont perçu le grand intérêt qu'ont les SIG pour croiser plusieurs couches d'informations telles que les données de milieu (sol), de conduite des parcelles et de position géographique des essais, et l'édition de cartes thématiques. Toutes ces fonctionnalités facilitent et enrichissent les échanges entre les expérimentateurs et leurs partenaires scientifiques. L'acquisition de la maîtrise de ces outils est perçue comme plutôt facile.

Les principales difficultés de mise en œuvre dans les Unités expérimentales concernent le coût d'acquisition et l'absence de compétences. Les agents ont exprimé leurs inquiétudes vis-à-vis de dysfonctionnements possibles (bugs informatiques) et du saut qualitatif requis pour dépasser le niveau d'utilisation basique. Les outils d'enregistrement des itinéraires techniques sont perçus comme une contrainte pour passer au SIG. Changer de logiciel de traçabilité des itinéraires techniques est une décision importante pour une Unité expérimentale à cause des nombreux engagements que l'Unité doit respecter vis-à-vis des réglementations agricoles et environnementales. Ce choix nécessite une réflexion de fond car il ne peut être remis en cause fréquemment. Les agents souhaiteraient une compatibilité entre SIG et logiciel de traçabilité, ce qui n'est pas immédiat : les logiciels du commerce sont assez peu interopérables. Une difficulté exprimée par la majorité des participants réside dans le choix de la solution adaptée : logiciel libre vs logiciel du commerce ? Solution unique SIG + traçabilité des itinéraires techniques vs deux logiciels compatibles ?

Conclusion

Les écoles techniques GPS-SIG de 2012 et 2013 à Auzeville ont pu être organisées et atteindre leur objectif grâce à une synergie positive entre le comité d'organisation et l'équipe Formation permanente du Centre de Toulouse, complétée par un soutien en ingénierie de formation de la Formation permanente nationale.

L'objectif fixé semble atteint : les quelques cinquante participants formés ont pu développer leurs connaissances sur les outils étudiés et s'initier à leur utilisation. Tous ont intégré le fait que l'acquisition des outils GPS et SIG et des compétences associées contribue à la démarche qualité. Les conditions, disponibilités en moyens financiers et en compétences dans ou autour de l'Unité, doivent être réunies pour passer du stade initiation au stade opérationnel.

Les écoles techniques constituent l'occasion de créer des moments de concertation entre les Unités expérimentales autour de questions partagées sur le choix des outils et leur utilisation. Les agents ont souligné l'importance de pérenniser ces moments d'échanges en faisant vivre un réseau approprié, de type communauté métier, comme cela se fait en informatique avec les PEPI, « partage d'expériences et des pratiques en informatique ».



Annexe

Conditions et modalités pratiques pour l'utilisation des données IGN pour des missions d'Enseignement et Recherche

Denis Baudet¹

Depuis mars 2009, la **licence d'enseignement** et la **licence de recherche** proposées par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) permettent aux personnes exerçant des activités dans ces domaines d'accéder gratuitement aux données de l'IGN et aux services du Géoportail.

Le bénéfice de cette gratuité est ouvert à toutes les activités :

- ✓ d'**enseignement initial** délivré par les organismes d'enseignement public et les établissements d'enseignement privés sous contrat avec l'Etat,
- ✓ de **recherche publiable** (sans restriction de confidentialité) et dont tous les résultats sont aisément accessibles à toute personne qui en fait la demande, aux seuls coûts de mise à disposition et sans délai.

Les données et services concernés

Le catalogue de l'IGN est accessible gratuitement aux organismes remplissant les conditions d'éligibilité « recherche et enseignement ».

Les données concernées sont les bases de données de l'IGN, sur l'ensemble de la France.

[Découvrir le catalogue IGN>>](#)

L'accès aux données et services

Sont possibles :

- ✓ la livraison gratuite par téléchargement sur Internet et la livraison sur support physique. Cette dernière implique des frais de mise à disposition ;
- ✓ l'accès gratuit au travers d'un logiciel aux services INSPIRE ou aux services du Géoportail.

A savoir

La licence d'enseignement et la licence de recherche **n'autorisent pas un usage des données dans le cadre d'activités de prestations de services, y compris en matière de formation continue, ni d'activités éditoriales de supports pédagogiques** (livres, CD, DVD...) distribués par les réseaux traditionnels de vente, ni de diffusion de contenus pédagogiques par des sites ouverts et accessibles à tout public. Les organismes, bénéficiaires ou non d'une licence d'enseignement et/ou de recherche, qui souhaitent couvrir de tels usages pourront acquérir une licence d'exploitation des données de l'IGN.

Inscription

Pour accéder aux données et services, vous devez **créer un compte « enseignement et recherche »** sur l'**espace professionnel**.

Pour bénéficier de la **gratuité des données** vous devez envoyer par courrier à l'IGN l'**acte d'acceptation** signé (téléchargeable en ligne). Vous serez averti ultérieurement par mail de l'avancement de votre demande d'éligibilité. Dès validation de celle-ci, vous pourrez télécharger les données du RGE®

1 INRA, UMR 1248 AGIR CS 52627, F- 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France ; Denis.Baudet@toulouse.inra.fr





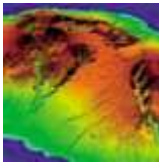
Les données et services disponibles

L'ensemble du catalogue de l'IGN est accessible aux conditions « enseignement et recherche », à savoir :

BD ORTHO®, BD TOPO®, BD PARCELLAIRE®, BD ADRESSE®, le RGE ALTI, ROUTE ADRESSE®, POINT ADRESSE®, les SCAN IGN, BD CARTO®, BD NYME®, BD ALTI®, ROUTE 500®, ROUTE 120®, RGE® ALTI, SCAN Historique®, ORTHO HR, BD ORTHO® Historique, BD Forêt, FranceRaster® et Contours...Iris®.

Bases de données du référentiel à grande échelle (RGE®)

L'État a confié à l'IGN le développement du référentiel à grande échelle (RGE®). Pour ce faire, il fait appel à ses moyens propres ainsi qu'à des partenariats avec des producteurs principalement de la sphère publique. Le RGE® est constitué de quatre composantes : orthophotographique, topographique et altimétrique, parcellaire, adresse et altimétrique.

 <p>BD ORTHO® La composante orthophotographique du RGE®</p>	 <p>BD TOPO® La composante topographique du RGE®</p>	 <p>BD PARCELLAIRE® La composante parcellaire du RGE®</p>
 <p>BD ADRESSE® La composante adresse du RGE®</p>	 <p>RGE® ALTI La composante altimétrique du RGE®</p>	

En pratique

Le site professionnels.ign.fr propose un outil de prévisualisation des données IGN avant téléchargement.

Le site professionnels.ign.fr propose également des fonctions accessibles après création d'un compte sur le site.

Pour passer une commande sur le site, vous devez au préalable ouvrir **un compte et être identifié** et envoyer une demande d'éligibilité à l'accès gratuit aux données du RGE (cf. modalité au paragraphe Inscription ci-dessus)

Si vous n'êtes pas identifié, vous pourrez sélectionner des données, les mettre au panier et en calculer le prix éventuel mais vous ne pourrez pas accéder à la phase de validation de la commande.

Votre commande est validée directement pour les commandes gratuites, ou après réception du paiement pour les commandes à titre onéreux.

La livraison des données se fait directement sur le site, à partir de votre espace personnel par Internet, via un serveur sécurisé.

Conditions d'utilisation des produits et données IGN

Les textes de référence qui régissent l'utilisation des données et services IGN sont accessibles sur le site IGN via le lien ci-dessous.

[>>http://professionnels.ign.fr/tarifs-conditions](http://professionnels.ign.fr/tarifs-conditions)

Vous y trouverez entre autres :



Conditions d'utilisation

Consultez les conditions générales des licences d'utilisation des données et des géoservices au format PDF.

- Conditions d'utilisation des licences et des services de l'IGN
- Conditions générales de la licence ouverte version 1.0

Extrait des conditions d'utilisation des données géographiques numériques IGN

LES LICENCES D'UTILISATION DES DONNÉES IGN

...

LICENCES DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT (R&E)

Les licences de Recherche et d'Enseignement (R&E) accordent les mêmes droits que la licence standard, pour un usage restreint respectivement :

aux activités d'enseignement initial délivré par les organismes d'enseignement public et les établissements d'enseignement privés sous contrat avec l'État,

aux activités de recherche publiables (sans restriction de confidentialité) et dont tous les résultats sont aisément accessibles à toute personne qui en fait la demande, aux seuls coûts de mise à disposition et sans délai.

Les licences de Recherche et d'Enseignement (R&E) n'autorisent pas un usage des données dans le cadre d'activités de prestations de services, y compris en matière de formation continue, ni d'activités éditoriales de supports pédagogiques (livres, CD, DVD...) distribués par les réseaux traditionnels de vente, ni de diffusion de contenus pédagogiques par des sites ouverts et accessibles à tout public.

Les organismes, bénéficiaires ou non d'une licence d'enseignement et/ou de recherche, qui souhaitent couvrir de tels usages pourront acquérir une licence d'exploitation des données de l'IGN.

...

PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

1. L'accès de l'organisme éligible aux données de l'IGN n'emporte pas acquisition des droits de propriété de l'IGN. La concession accordée relève d'un simple droit d'utilisation des données selon les modalités définies par les présentes conditions générales et par la licence.

...

2. Les mentions obligatoires suivantes doivent figurer sur toute représentation des données quel qu'en soit le support : • copyright « © IGN – Année d'édition ou de référence des données géographiques de l'IGN » et éventuellement, tout autre copyright affectant les données.

RESPONSABILITÉ

Le licencié s'engage, sans restriction d'aucune sorte, à **respecter et à faire respecter par les utilisateurs les présentes conditions générales et les termes de la licence qui lui a été concédée...**

Le licencié doit prendre toutes dispositions utiles, techniques et contractuelles, pour garantir le respect par les utilisateurs finaux et les prestataires de service des droits qui leur sont concédés. Il lui appartient à ce titre de **les informer explicitement des présentes conditions générales.**



Autres liens utiles

Une des missions fixée à l'IGN par l'État est d'améliorer et d'accélérer l'utilisation publique et privée des résultats de l'Institut.

A ce titre, l'IGN met à votre disposition des **logiciels gratuits** qu'il développe dans le cadre de ses activités de recherche, développement et production.

Vous y trouverez des outils :

- ✓ SIG pour des fonctions limitées (visualisations : **IGNmap**, ...),
- ✓ des outils (**Circé**) de transformation de coordonnées d'un système dans un autre (i.e. Lambert 2 étendu vers Lambert 93),
- ✓ de comparaisons de deux cartes (vecteur ou raster) à des dates différentes.

Allez voir sur cette page <http://professionnels.ign.fr/logiciels>

Index des auteurs

<i>Ancelin J.</i> ,	71	<i>Goutiers V.</i> ,	132
<i>Bataillon P.</i> ,	94	<i>Grignard L.</i> ,	53
<i>Barbet M.</i> ,	110	<i>Hanocq J.-F.</i> ,	105
<i>Baret F.</i> ,	105	<i>Iyer J.</i> ,	79
<i>Barthe N.</i> ,	87	<i>Jones G.</i> ,	100
<i>Baudet D.</i> ,	19, 143, 177	<i>Labrie G.</i> ,	79
<i>Bernier S.</i> ,	19	<i>Ladet S.</i> ,	9, 19, 28, 36
<i>Bertuzzi P.</i> ,	5	<i>Lahaye R.</i> ,	9, 28, 36
<i>Bourennane H.</i> ,	117	<i>Laurent P.</i> ,	132
<i>Burger P.</i> ,	105	<i>Leenhardt D.</i> ,	143
<i>Burnel L.</i> ,	152	<i>Liévin J.-F.</i> ,	105
<i>Busvelle E.</i> ,	100	<i>Mistou M.-N.</i> ,	117
<i>Campergue D.</i> ,	105	<i>Morellet N.</i> ,	159
<i>Cantelaube P.</i> ,	58	<i>Munoz L.</i> ,	87
<i>Cargnelutti B.</i> ,	159	<i>Note P.</i> ,	65, 79
<i>Carles M.</i> ,	58	<i>Paoli J.-N.</i> ,	100
<i>Comar A.</i> ,	105	<i>Pasquier C.</i> ,	117
<i>Cousin I.</i> ,	117	<i>Pastuszka P.</i> ,	5
<i>Daumard F.</i> ,	105	<i>Pédemay A.</i> ,	152
<i>Debeffe L.</i> ,	159	<i>Péresse C.</i> ,	169
<i>Décuq F.</i> ,	110	<i>Perrin P.</i> ,	105
<i>Dumont B.</i> ,	110	<i>Renard M.</i> ,	5
<i>Duthoit S.</i> ,	19	<i>Romier C.</i> ,	53
<i>Egal D.</i> ,	110	<i>Salis G.</i> ,	100
<i>Faroux R.</i> ,	123	<i>Santoro G.</i> ,	169
<i>Farruggia A.</i> ,	110	<i>Schmit O.</i> ,	71
<i>Frullini D.</i> ,	169	<i>Séger M.</i> ,	117
<i>Galès C.</i> ,	169	<i>de Solan B.</i> ,	105
<i>Gavaland A.</i> ,	5, 47, 87, 94, 169	<i>Ubertosi M.</i> ,	117
<i>Gée C.</i> ,	100	<i>Vigneau N.</i> ,	123
<i>Giot G.</i> ,	117	<i>Villette S.</i> ,	100
<i>Gobin B.</i> ,	100	<i>Wysocinski H.</i> ,	79



Table des matières

Avant-propos

L'apport des GPS et SIG à la conduite de dispositifs expérimentaux :
vers l'émergence de la communauté métier GéoExpé
A. Gavaland, P. Bertuzzi, M. Renard, P. Pastuszka / p. 5

GPS et SIG – Concepts de base

Les principes du positionnement par satellite : GNSS
R. Lahaye, S. Ladet / p. 9

Les concepts de base des systèmes d'information géographique (SIG) : les données et les fonctions générales
S. Bernier, S. Duthoit, S. Ladet, D. Baudet / p. 19

Les concepts de base des SIG nomades
R. Lahaye, S. Ladet / p. 28

Les réseaux de correction différentielle
R. Lahaye, S. Ladet / p. 36

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

GPS et SIG pour l'aide à la gestion d'un domaine expérimental
A. Gavaland / p. 47

Satellites et agriculture de précision
L. Grignard, C. Romier / p. 53

Le registre parcellaire graphique : des données géographiques pour décrire la couverture du sol agricole
P. Cantelaube, M. Carles / p. 58

Calcul et gestion par SIG des surfaces épandables
P. Note / p. 65

SIGMA, un websig sur mesure de gestion des données des expérimentations-système
J. Ancelin, O. Schmit / p. 71

GPS piéton ou embarqués – Pour l'arpentage, l'aide à la conduite ou le pilotage des essais

Les solutions mobiles d'arpentage : de la solution topographique à la solution cartographique
J. Iyer, H. Wysocinski, G. Labrie, P. Note / p. 79

Les GPS embarqués sur machines agricoles
N. Barthe, L. Munoz, A. Gavaland / p. 87

Gestion des données d'un semoir d'expérimentation à déclenchement par GPS
P. Bataillon, A. Gavaland / p. 94

Une pulvérisation localisée par robot
C. Gée, G. Salis, E. Busvelle, B. Gobin, G. Jones, J.-N. Paoli, S. Villette / p. 100

Un prototype de rampe de phénotypage haut débit au champ piloté par GPS-RTK
P. Burger, F. Daumard, P. Perrin, D. Campergue, J.-F. Liévin, J.-F. Hanocq, F. Baret, B. de Solan, A. Comar / p. 105

Utilisation des données spatiales obtenues par un GPS embarqué pour établir une carte de fréquentation des parcelles
F. Décuq, A. Farruggia, M. Barbet, D. Egal, B. Dumont / p. 110



Couplage GPS-SIG – Pour la caractérisation du milieu expérimental et le suivi des essais au champ

- La mesure de résistivité électrique : un outil d'aide à la cartographie des sols
L'exemple de l'Unité expérimentale d'Epoisses
M. Séger, H. Bourennane, M.-N. Mistou, C. Pasquier, G. Giot, M. Ubertosi, I. Cousin /p. 117
- Proxidtection par drone au service du suivi expérimental
N. Vigneau, R. Faroux /p. 123
- Quelle plus-value pour le suivi des essais au champs de l'exploitation des informations géo-localisées
des capteurs de proxi et télédétection avec des méthodes géomatiques ?
V. Goutiers, P. Laurent /p. 132

GPS et SIG – Pour des approches territoriales

- Exemple d'utilisation de SIG dans un projet de recherche sur la gestion quantitative de l'eau d'irrigation
sur un bassin versant
D. Baudet, D. Leenhardt /p. 143
- Utilisation du SIG et du GPS pour la création d'une base de données de desserte forestière dans les Pyrénées
A. Pédemay, L. Burnel /p. 152
- Contributions des GPS et du SIG pour l'étude du comportement animal : illustration avec l'étude
de la dispersion natale du jeune chevreuil en agro-écosystème
B. Cargnelutti, L. Debeffe, N. Morellet /p. 159

Retour d'expérience des organisateurs et des participants

- Approche pour organiser une école technique
Leçons tirées des écoles techniques GPS-SIG organisées à Auzeville en 2012 et 2013
D. Frullini, C. Galès, C. Péresse, G. Santoro, A. Gavaland /p. 169

Annexe

- Conditions et modalités pratiques pour l'utilisation des données IGN pour des missions d'Enseignement
et Recherche
D. Baudet /p. 177

