

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, répétibles 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 agrodrome™ 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 %.



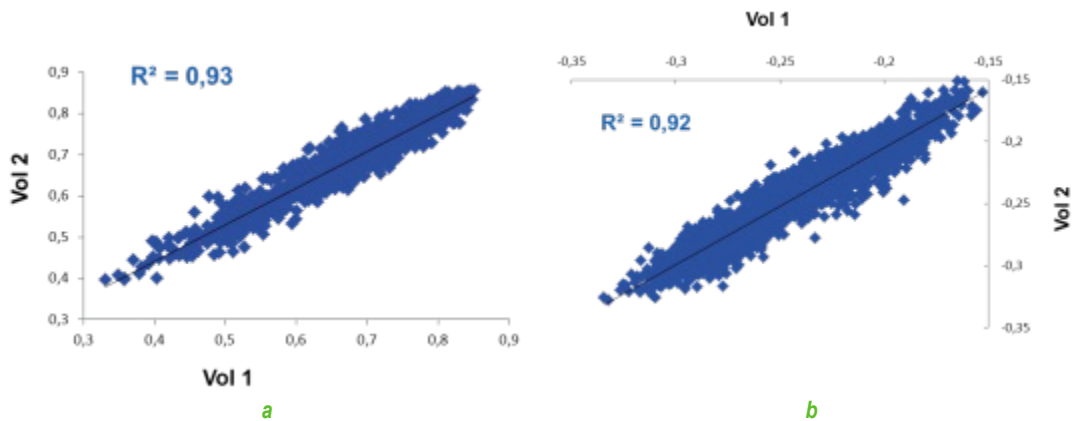


Figure 4. Estimation de la robustesse du signal : a. NDVI, b. PRI (Copyright AIRINOV®).

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.

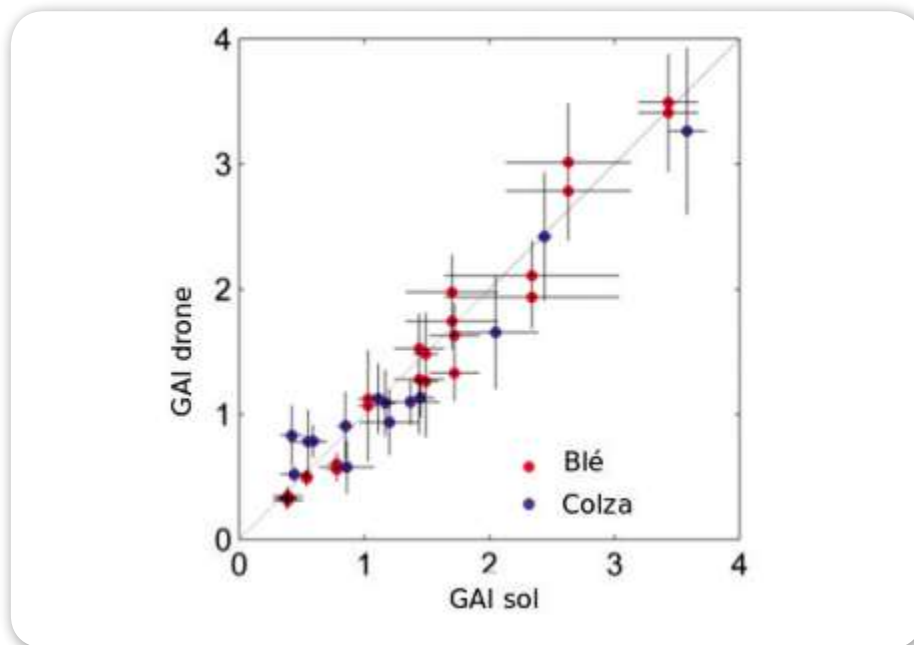


Figure 5. Résultats d'estimation du GAI par drone AIRINOV® en comparaison de mesures réalisées au sol (Copyright AIRINOV®).



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.

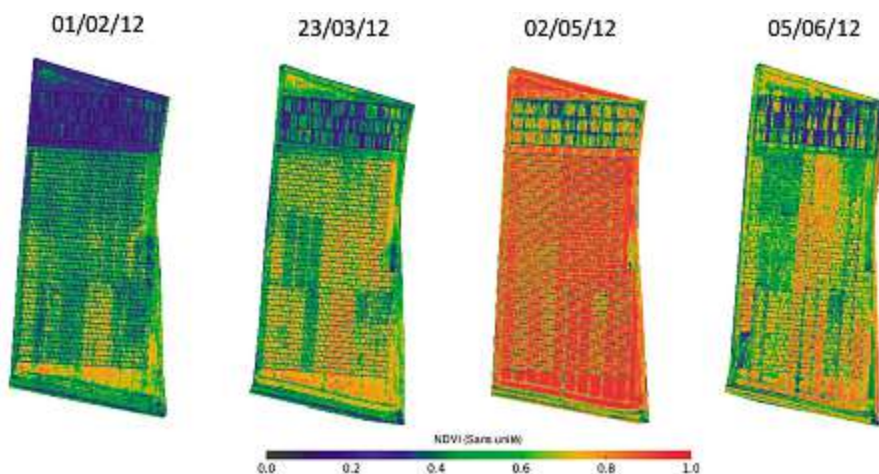


Figure 8. Exemples de cartes superposables de NDVI d'une même parcelle au cours du temps (Copyright AIRINOV®)

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.

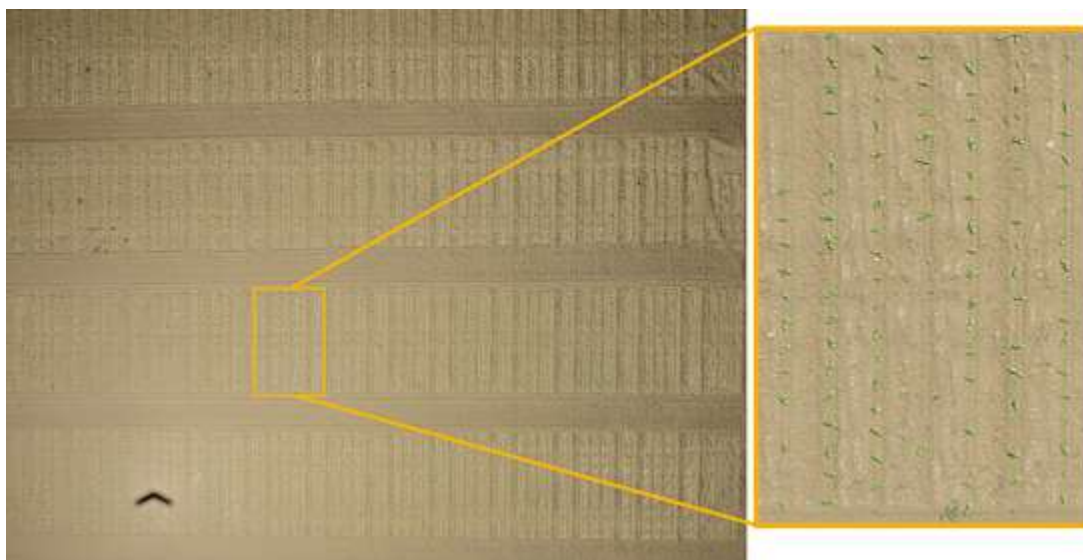


Figure 9. Image RGB THR (résolution spatiale de 8,5 mm) d'une plateforme de tournesol illustrant la possibilité du dénombrement de pieds, zoom sur 5 rangs (5 x 3m) (Copyright AIRINOV®).



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.

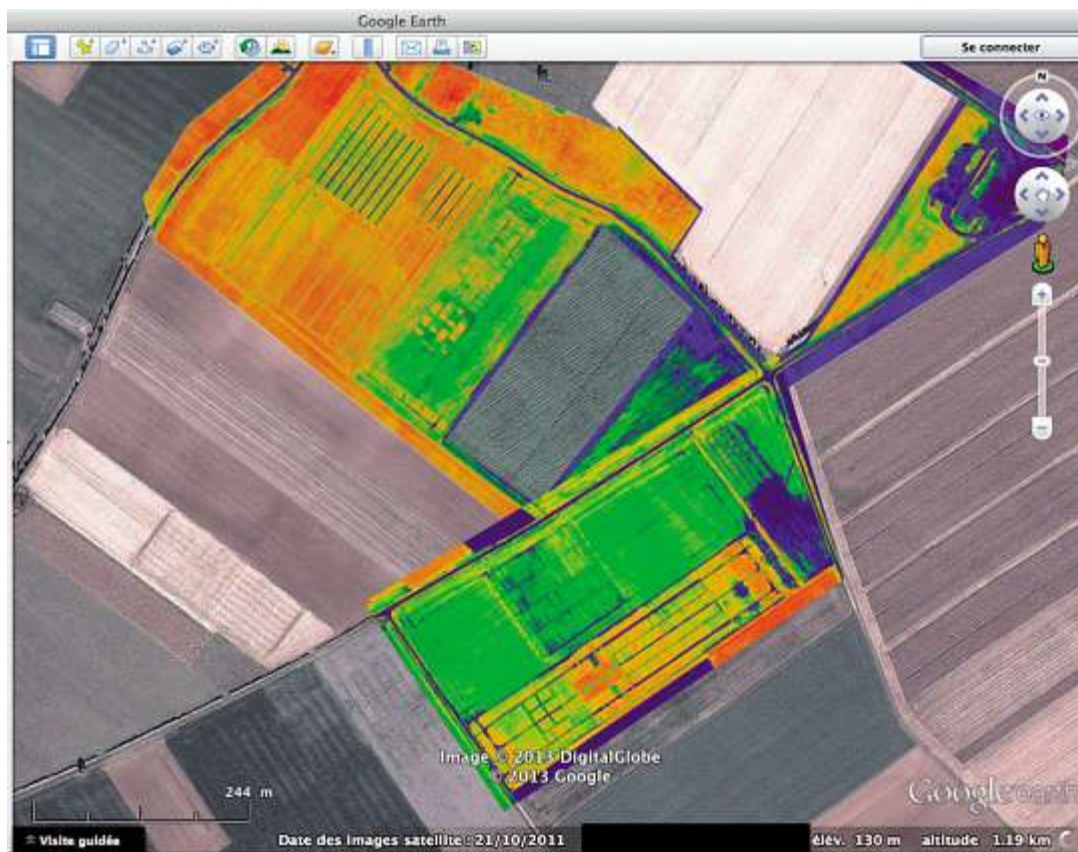


Figure 10. Visualisation d'un ensemble de microparcelles sous Google Earth (copyright AIRINOV®).

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>

