IMAGERIE AÉRIENNE PAR DRONE : EXPLOITATION DES DONNÉES POUR L'AGRICULTURE DE PRÉCISION

Nathalie Vigneau[1], Corentin Chéron[1], Aleixandre Verger[2,3], Frédéric Baret[3]

1: AIRINOV SAS, 48 rue René Clair, 75899 PARIS Cedex 18, France

2: CREAF, Cerdanyola del Vallès 08193, Catalonia, Espagne

3: INRA UMR114 EMMAH, Domaine Saint-Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, France

Résumé

La technologie des drones devenant plus accessible et les réglementations nationales encadrant les vols des drones commençant à émerger, de nombreuses sociétés utilisent désormais des drones pour réaliser des acquisitions d'images. Parmi celles-ci AIRINOV® a choisi de se spécialiser dans l'agriculture et offre ses services aux agriculteurs ainsi qu'aux expérimentateurs. AIRINOV® exploite les drones eBee de senseFly®. Le drone a une envergure d'1 m pour un poids de 700 g charge comprise et son vol est entièrment automatique. Le vol est programmé à l'avance puis contrôlé par un auto-pilote connecté à un capteur GPS et à une centrale inertielle embarqués. Ces capteurs enregistrent la position et l'attitude du drone pendant son vol, permettant de géolocaliser les images acquises. Une étude réalisée avec des cibles au sol a permis d'établir que le positionnement absolu des images est de 2,06 m. Toutefois, le recalage sur des points dont on connaît les coordonnées permet d'avoir un géoréférencement avec une précision centimétrique.

En parallèle de l'utilisation des appareils photos classiques (RGB), AIRINOV® utilise un capteur multispectral quadribande. Les longueurs d'onde de ce capteur sont modulables mais sont généralement vert, rouge, red edge et proche infra-rouge. Ces longueurs d'onde permettent non seulement le suivi d'indices de végétation tels que le NDVI mais également l'accès à des variables biochimiques et biophysiques par inversion d'un modèle de transfert radiatif. Une étude menée conjointement avec l'INRA d'Avignon et le CREAF permet d'accéder au Green Area Index (GAI) et au contenu en chlorophylle (Cab) sur colza, blé, maïs et orge. Cet article présente les résultats d'estimation du GAI avec une RMSE de 0,25 et de Cab avec une RMSE de $4,75\ \mu g/cm^2$.

La qualité des estimations combinée à la forte capacité de revisite du drone ainsi qu'à la multiplicité des indicateurs disponibles démontre le grand intérêt du drone pour le phénotypage et le suivi de plateformes d'essais.

Mots clés : agriculture de précision, drone, capteur multispectral, suivi de plateforme expérimentale

Abstract

Nowadays, national regulations governing the flights of the drones are starting to emerge and drone technology is accessible to any kind of users. For this reason a great number of companies employ drones to acquire image data. Among these, AIRINOV adapts this technology to agriculture purposes in order to be usefull for both farmers and research institutions. AIRINOV operates senseFly® eBee drones. The eBee is approximately 1 m-wingspan plane and it weighs 700 g, including the sensor. Flights are automatically operated. The flights are programmed in advance and controlled by an autopilot connected to a GPS sensor and an embedded inertial measurement unit. These sensors record the drone position and attitude during the flight in order to geotag acquired images. A study carried out with ground targets has shown that the absolute positioning of images is approximately 2.06 m. However, the registration of points whose coordinates are known allows to georeference points with a centimeter accuracy.

In parallel with the use of conventional cameras (RGB), AIRINOV employs a 4-channel multispectral sensor. The wavelengths of this sensor are adjustable but are usually green, red, red edge and NIR. These wavelengths allow not only to monitor vegetation indices such as NDVI but also, to obtain biochemical and biophysical variables thanks to the inverse radiative transfer model. A study carried out with INRA and CREAF allows to access to the Green Area Index (GAI) and chlorophyll content (Cab) on rapeseed, wheat, corn and barley. This article presents results concerning wheat and rapeseed GAI estimation with a RMSE of around 0.25 compared with ground measurements and Cab estimation with a RMSE of around $4,75\ \mu g/c^2m$ *compared with ground measurements.*

The quality of the estimated values combined with the drone flight repetitions and the diversity of available indicators demonstrates the great interest about phenotyping and monitoring test platforms by drone.

Keywords : *precision agriculture, UAV, multispectral sensor, experimental platform monitoring*

1. Introduction

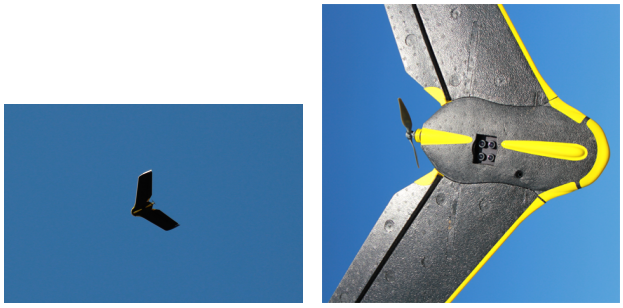
L'intérêt de la télédétection n'est plus à démontrer pour le suivi de parcelles agricoles et la caractérisation de l'état de la végétation. Cette technologie donne accès à de nombreuses données : biomasse, LAI (Leaf Area Index ou indice de surface foliaire), taux de chlorophylle (Cab), etc. (Smith et 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 météo et à son trop grand délai de revisite (Moran, 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.
Il est également possible d'utiliser les images par drone pour réaliser du suivi de plateformes d'essais. La vectorisation des micro-parcelles de l'essai selon la nomenclature utilisée par l'expérimentateur permet l'extraction de données numériques à la micro-parcelle : indices de végétation (NDVI, PRI), variables biochimiques ou biophysiques (LAI, Cab, Qcab). Il est alors possible de reconstruire des courbes de cinétiques : mise en place du couvert avec le LAI par exemple. Plusieurs exemples d'utilisation du drone pour le suivi de plateformes expérimentales sont donnés dans l'article.

2. La proxidétection par drone

2.1. 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® a lié un partenariat avec senseFly® et devient exploitant et revendeur de ses drones eBee (Figure 1).

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).



(1) (2)

FIGURE 1: (1) Le drone eBee® (2) équipé du capteur MultiSpec 4C d'AIRINOV®

2.2. 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 1(2) et 2(2)) alors que le capteur PAR (enregistrant l'illumination ambiante pour la correction en réflectance) est situé sur la face supérieure (Figure 2(1)).

(1) (2)

FIGURE 2: (1) Recto et (2) verso du capteur MultiSpec 4C breveté par AIRINOV®

De manière opérationnelle, le système agrodrone™ 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 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.

2.3. Le vol

Le vol du drone est entièrement automatique. Il est nécessaire de connaître la zone géographique de la parcelle d'intérêt. Une fois ses coordonnées entrées dans l'autopilote (Figure 3), le drone est lancé à la main et suit sa trajectoire (calculée automatiquement) contrôlée par son GPS embarqué 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 45 minutes. 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).

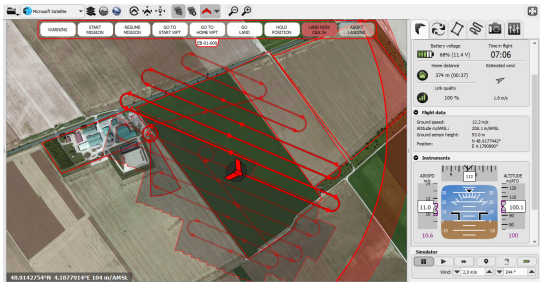


FIGURE 3: Capture d'écran de l'autopilote eMotion de senseFly® montrant un plan de vol.

Le drone enregistre les photos à la fréquence d'une image toutes les 1,5 secondes, ce qui donne par exemple environ 1000 images pour une parcelle de 15 ha à 15 cm de résolution. La position géographique et l'attitude 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 2 à 5 m (précision du GPS embarqué).

Une étude spécifique a été menée avec "l'équipe sol" de l'INRA de Grignon (78) pour estimer la précision absolue de géolocalisation de chaque pixel. Une parcelle agricole de 13 ha près de Versailles (4˚51'N, 1˚51'E) a été survolée avec le drone. 23 cibles ont été disposées au sol (Figure 4). Leur localisation a été mesurée avec un DGPS (Differential Global Positioning System ou GPS différentiel) Trimble® Pathfinder Power. Pour chaque cible, les positions GPS ont été moyennées pendant une minute. La précision moyenne finale était de 1,8 cm en coordonnées X et Y. L'orthomosaïque en sortie des images du drone avait une erreur moyenne 2,06 m et un écart-type de 0,98 m. Afin d'améliorer le positionnement absolu, l'orthomosaïque a été recalée sur 12 des 23 cibles et la précision absolue a été évaluée sur les 11 cibles restantes. Le décalage restant de l'orthomosaïque n'était plus que de 2 cm vers le nord et 0,6 cm vers l'ouest avec un écart-type de 4 cm dans chaque direction, ce qui apparaît comme une très bonne précision au regard de la résolution spatiale de 15 cm.

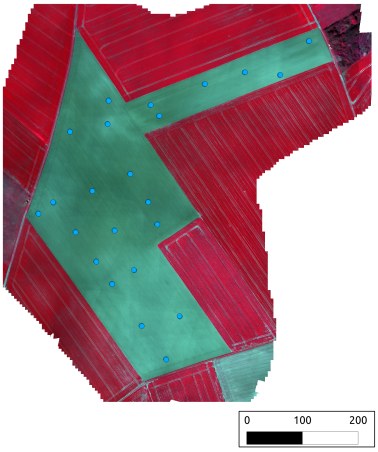


FIGURE 4: Ortho-image (visualisation en fausses couleurs) de la parcelle avec les 23 cibles en bleu.

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 repères 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'agrodrone™, permettent un recouvrement de 80 % dans le sens de déplacement du drone (intrabande) et de 65 % entre les passages (interbande).

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.

2.4. La production d'une carte

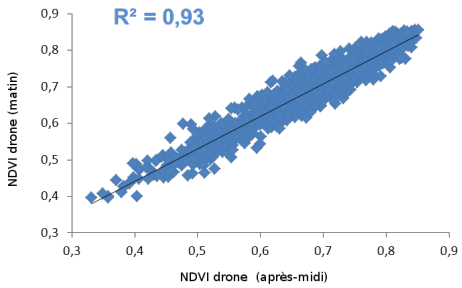
Les photos sont enregistrées à bord du drone sur une carte SD (carte mémoire utilisée génériquement pour les appareils photo) et sont récupérées après l'atterrissage du drone. Il est alors nécessaire de recréer la géométrie de la scène pour pouvoir reprojeter les photos suivant un référentiel géographique 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 recaler les images des bandes entre elles, c'est l'étape de "co-registration". 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.

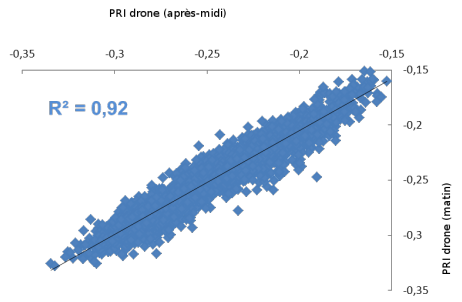
3. L'obtention d'indicateurs agronomiques

3.1. Les indices de végétation

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).



(1)



(2)

FIGURE 5: Estimation de la robustesse du signal sur (1) NDVI et (2) PRI.

La Figure 5 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 avait un coefficient de variation absolu inférieur à 3,7 %.

3.2. L'obtention 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 et d'A. Verger du CREAF) pour l'obtention du GAI (indice foliaire), de Cab (taux de chlorophylle de la feuille) ainsi que du QCab, quantité de chlorophylle intégrée sur l'ensemble du couvert pour 4 des principales cultures rencontrées en France : blé, orge, maïs et colza. Parmi les méthodes d'inversion disponibles, la méthode des LUT (Look Up Table) a été choisie pour sa flexibilité, sa capacité à utiliser la totalité des images existant pour un même point (du fait du recouvrement) ainsi que sa capacité à éviter les mimima locaux (au contraire des algorithmes de convergence itératifs). Le modèle PROSAIL (Jacquemoud et al., 2009), est une combinaison des modèles PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990), modèle des propriétés optiques des feuilles et SAIL (Verhoef, 1984, 1985), modèle de réflectance de la canopée. La méthode d'inversion est détaillée par Verger et al. (2014).

3.2.1. Répétabilité de l'estimation du GAI entre les vols

De même que pour le NDVI et le PRI, la stabilité de l'estimation du GAI a été vérifié avec plusieurs vols réalisés le même jour (un le matin et un l'après-midi). Cette procédure a été répétée pour deux stades du blé (tallage et montaison). La Figure 6 présente les résultats de cette expérimentation. La valeur de RMSE (0,2), de pente (1,14) et d'offset (0,05) montrent la bonne répétabilité des estimations.

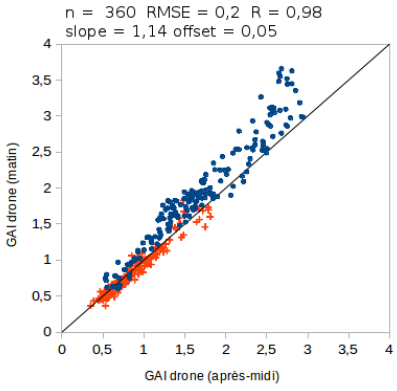
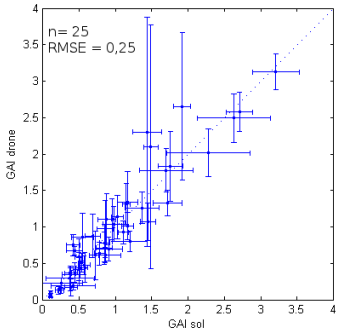


FIGURE 6: Comparaison des estimations de GAI entre le vol du matin et de l'après-midi.

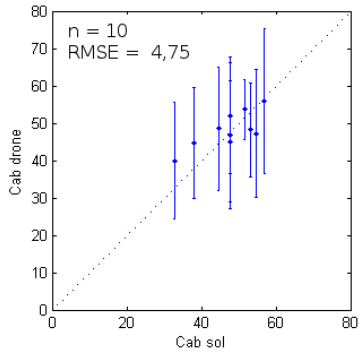
3.2.2. Comparaison des résultats d'estimation de GAI, Cab avec des mesures terrain

Afin de quantifier la qualité des estimations, des mesures au sol de Cab et GAI ont été réalisées. Les mesures de chlorophylle ont été réalisées par prélèvements destructifs et analyse en laboratoire alors que les mesures de GAI au sol ont été faites par traitement de photos prises à 57,5˚(Baret et al., 2010).

La Figure 7 présente la comparaison entre ces mesures au sol et les estimations faites à partir des images du drone. Les estimations de GAI réalisées par drone sont cohérentes avec celles réalisées au sol. La RMSE de 0,25 confirme la qualité de l'estimation. Les écarts-types calculés sur la répétition des estimations drone (pour les différentes images correspondant à la zone de mesure) et des estimations sol (plusieurs photos d'une même zone) sont du même ordre de grandeur. Ceci combinée à la faible valeur de RMSE confirme que les estimations sont équivalentes. De même que pour le GAI, pour la chlorophylle, les résultats d'écart-type et de RMSE montrent la qualité de l'estimation par drone même si le nombre plus resteint d'échantillons nécessiterait une confirmation de ces premiers réultats.



(1)



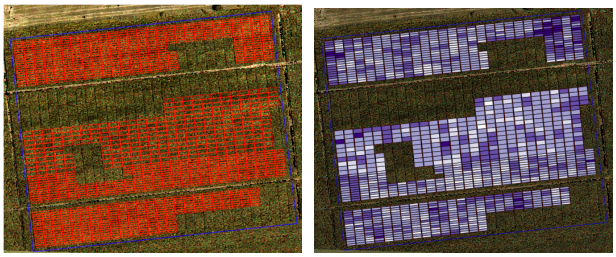
(2)

FIGURE 7: Comparaison entre l'estimation à partir des images du drone et les mesures au sol pour (1) GAI et (2) Cab. Les barres horizontales et verticales correspondent à l'écart-type sur les mesures au sol et par drone, respectivement.

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

4.1. La vectorisation

En plus de la production de cartes, il est possible grâce à un logiciel de SIG (Systèmes d'Informations Géographiques) de vectoriser le parcellaire directement sur les images (Figure 8.(1)). Cette vectorisation permet l'extraction de données statistiques à la micro-parcelle. 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 8.(2)) et permet l'extraction de données au format tableur.



(1) (2)

FIGURE 8: (1) Résultats de la vectorisation de 1356 micro-parcelles de maïs (2 ou 4 rangs) et (2) Visualisation d'une donnée chiffrée par cartographie colorée sur le parcellaire (copyright AIRINOV®)

Ces données sont ensuite directement intégrables dans une base de données qui peut suivre la nomenclature précise des micro-parcelles (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.

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

Le drone couvre 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 ou le taux de chlorophylle sur blé, orge, 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 9 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.

L'acquisition d'images à très haute résolution (THR) (1,5 cm en RGB, 5 cm en multispectral avec l'aile volante et jusqu'à 1 cm en multispectral avec un multirotor) peut également permettre le dénombrement (de pieds de tournesol comme sur la Figure 10), la détection d'adventices

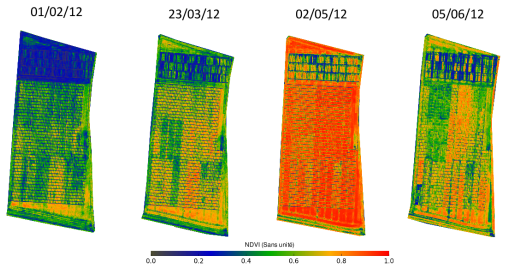


FIGURE 9: Exemples de cartes superposables de NDVI d'une même parcelle au cours du temps.

dans l'inter-rang ou le suivi de dynamique de floraison sur tournesol et colza (Figure 11).

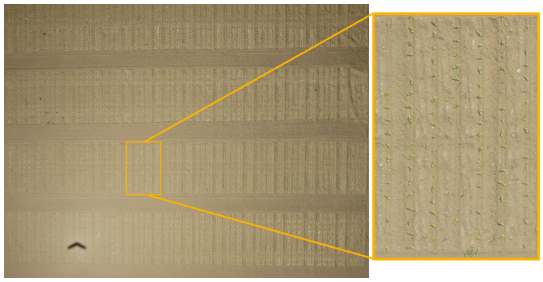


FIGURE 10: Image RGB THR (résolution spatiale de 8,5 mm) d'une plateforme de tournesol illustrant la possibilité du dénombrement de pieds, zoom sur 5 rangs (5x3m).

FIGURE 11: Image RGB THR (résolution spatiale de 8,5 mm) d'une plateforme de colza illustrant la possibilité d'estimation du taux de floraison.

Le géoréférencement des orthophotos produites par AIRINOV® permet un affichage dans des outils de SIG ou dans GoogleEarth (Figure 12). Cette visualisation autorise un affichage de cartes à différentes dates permettant la gestion d'un lot de parcelles.

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.

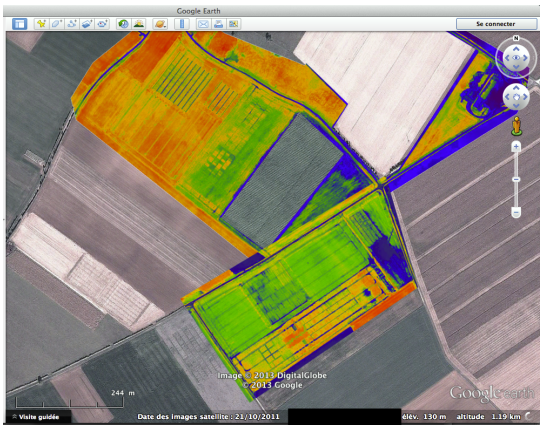


FIGURE 12: Visualisation d'un ensemble de parcelles sous Google Earth (copyright AIRINOV®).

5. La technologie mise au service des agriculteurs

L'objectif d'AIRINOV® est de mettre à disposition des agriculteurs la technologie développée auprès des chercheurs. Les premiers développements technologiques qui ont pu être développés en service commerciaux concernent la fertilisation azotée. AIRINOV® propose un conseil en fertilisation azotée sur colza. À la suite d'un vol en entrée d'hiver et un vol en sortie d'hiver, l'ensemble de la parcelle est cartographiée à la résolution 1x1 m. À partir des indicateurs du drone, la biomasse est estimée en chaque point de la parcelle (Figure 13). Cette valeur de biomasse est ensuite utilisée en entrée de la réglette azote du Cetiom pour l'établissement d'une préconisation à la résolution du mètre carré. Ces valeurs au mètre carré sont ensuite zonées statistiquement de manière à définir une à trois zones homogènes sur la parcelle (Figure 13). Ce zonage, accessible à l'ensemble des exploitants permet d'épandre différemment selon les zones de la parcelle en modifiant leur vitesse. Pour les agriculteurs équipés, AIRINOV® peut également fournir des cartes de modulation automatiques directement intégrables dans les boîtiers (Figure 14). Le système AIRINOV® est ainsi compatible toutes marques.

Après une campagne pilote en 2012-2013 dans le Poitou-Charentes, AIRINOV® a étendu son service de préconisation azotée sur colza à plus de 10 000 ha pour la campagne 2013-2014. Le service est revendu par les coopératives, négoces ou même chambre d'agriculture pour un tarif de 15 €/ha pour les 2 vols.

L'offre en conseil en fertilisation a été étendue au blé pour une campagne pilote de 10 000 ha en 2013.

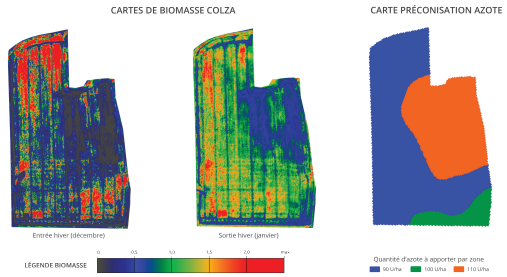


FIGURE 13: Exemple de cartes fournies lors de la campagne colza 2013-2014 : cartes de biomasse et de préconisation azotée.

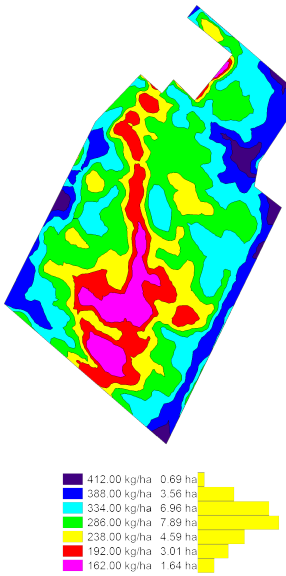


FIGURE 14: Exemple de carte de modulation automatique réalisée sur colza.

6. 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 agrodrone™ 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 météo 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 agrodrone™ 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

Araus, J., Cairns, J., 2014. Field high-throughput phenotyping : the new crop breeding frontier. Trends in Plant Science 19 (1), 52–61.

Baret, F., Solan, B. D., Lopez-Lozano, R., Ma, K., Weiss, M., 2010. Gai estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5˚zenith angle. Agricultural and Forest Meteorology 150, 1393–1401.

Colomina, I., Molina, P., 2014. Field high-throughput phenotyping : the new crop breeding frontier. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, 79–97.

Hartley, R., Zisserman, A., 2004. Multiple View Geometry in computer vision (2nd ed.). Cambrige University Press.

Jacquemoud, S., Baret, F., 1990. Prospect : A model of leaf optical properties spectra. Remote Sensing of Environment 34, 75–91.

Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P., Asner, G., François, C., Ustin, S., 2009. Prospect + sail models : A review of use for vegetation characterization. Remote Sensing of Environment 113, S56–S66.

Kipp, S., Mistel, B., Baresel, P., Schmidhalter, U., 2014. High-througput phenotyping early plant vigour of winter wheat. European Journal of Agronomy 52 (Part B), 271–278.

Moran, M., 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. Remote Sensing of Environment 61, 319–346.

Mulla, D., 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture : Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystem Engineering 114, 358–371.

Pinter, P., Schepers, J., Barnes, E., Moran, M., Daughtry, C., 2003. Remote sensing for crop management. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 69, 647–664.

Rees, W., 2013. Physical Principles of Remote Sensing (3rd ed.). Cambridge University Press.

Smith, R., Adams, J., Stephens, D., Hic, P., 1995. Forecasting wheat yield in a mediterranean-type environment from the noaa satellite. Australian Journal of Agricultural Research 46, 113–125.

Thenkabail, P., 2003. Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical landsat tm images. International Journal of Remote Sensing 24, 2879–2904.

Verger, A., Vigneau, N., Cheron, C., Baret, F., Comar, A., 2014. Estimates of green index from uav over wheat and rapeseed crops. Remote Sensing of Environment under review.

Verhoef, W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling : the sail model. Remote Sensing of Environment, 16, 125–141.

Verhoef, W., 1985. Earth observation modeling based on layer scattering matrices. Remote Sensing of Environment 17, 165–178.