

NOTE DE SYNTHÈSE : CAPTEURS EMBARQUÉS SUR DRONE EN AGRICULTURE

Note de synthèse 2022 – Capteurs embarqués sur drones en agriculture par Maël ZWICKERT

I.	INTRODUCTION	3
II.	DRONES ET AGRICULTURE	4
III.	TYPES DE CAPTEURS UTILISÉS	4
1.	Capteur RVB	6
2.	Capteur multispectral et hyperspectral	7
3.	Capteur thermique	10
4.	Capteur LiDAR	11
IV.	LES APPLICATIONS.....	12
•	Cartographie des propriétés des sols en agriculture.....	12
•	Agriculture de précision : carte de prescription et de préconisation NPK (= azote,phosphore, potassium).....	12
•	Prévision des rendements	12
•	Tour de plaine.....	12
•	Capteur RVB :	13
•	Capteur multispectral :.....	13
•	Capteur hyperspectral :.....	13
•	Capteur thermique :	13
•	Capteur LiDAR :	13
V.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	14

Note de synthèse 2022 – Capteurs embarqués sur drones en agriculture par Maël ZWICKERT

I. INTRODUCTION

Le développement de l'activité drones au cours de cette dernière décennie, a constitué une véritable révolution en matière d'acquisition de données aéroportées. Volant à seulement quelques dizaines de mètres du sol, ils offrent des résolutions spatiales, spectrales et temporelles (cf. figure 1) jusqu'ici encore jamais atteintes avec des vecteurs aériens classiques (avions, hélicoptères, satellites, etc.). L'altitude d'acquisition des données n'est pas le seul facteur différenciant. En effet, s'ajoute l'évolution des capteurs ainsi que des plateformes qui les embarquent sur la dernière décennie. Ces facteurs sont à la source de l'obtention de données plus robustes et de plus grande résolution. L'accroissement de la résolution temporelle est, elle, rendue possible par la facilité de déploiement du vecteur drone en comparaison à ses homologues. Enfin, les hauteurs de vol des drones, souvent placées en dessous des nuages, est un autre facteur facilitant l'acquisition de données à haute temporalité. Aujourd'hui, les drones sont utilisés dans tous les secteurs de l'économie, notamment en agriculture pour lequel les enjeux économiques et environnementaux sont grands. Le panel d'applications est vaste, comme développé plus bas.

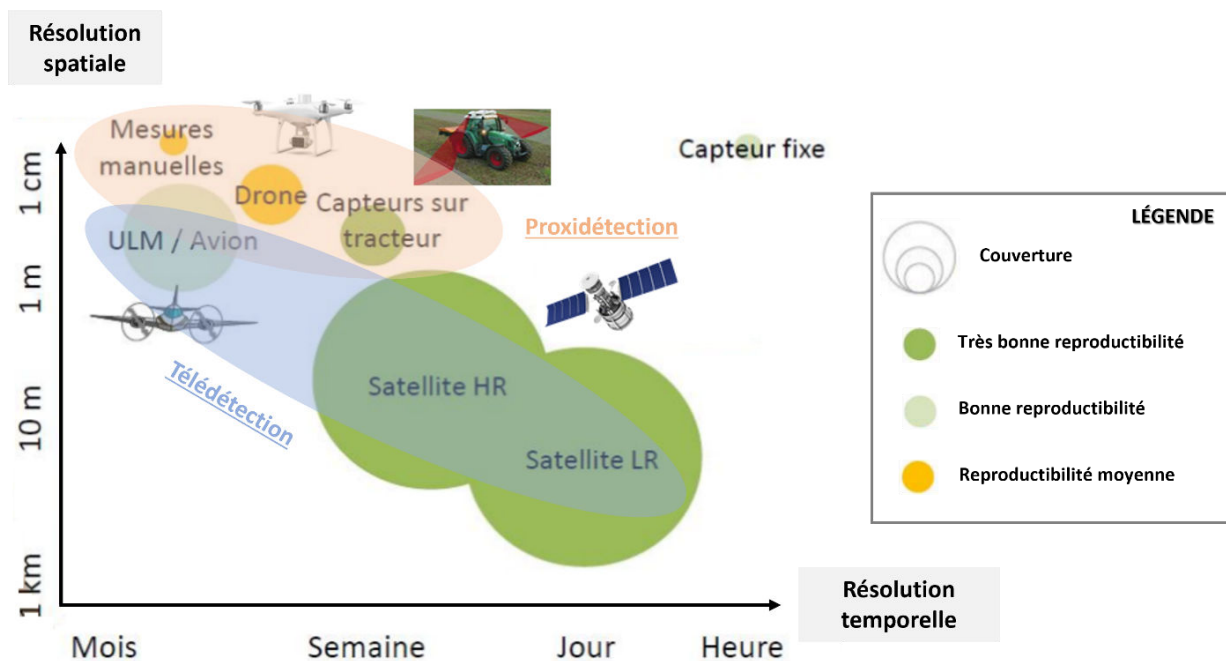


Figure 1 : Diagramme comparatif des résolutions temporelles et spatiales associées aux différents vecteurs aériens

II. DRONES ET AGRICULTURE

Le développement et l'essor des drones au cours de la dernière décennie, a marqué une nouvelle ère pour la télédétection en particulier dans le secteur de l'agriculture. En collectant des données sur l'état et la structure des cultures ainsi que du sol, ils participent à la mise en œuvre de l'agriculture de précision. Pour rappel, l'agriculture de précision peut se définir comme : « Une stratégie de gestion qui rassemble, traite et analyse les données spatiales, temporelles et individuelles, et les combine avec d'autres informations pour orienter les décisions de gestion modulée relatives à la plante ou à l'animal en vue d'améliorer l'efficacité des ressources, la productivité, la qualité, la rentabilité, et la durabilité de la production agricole » (2019, ISPA). En résumé, le concept d'agriculture de précision consiste en une segmentation des parcelles agricoles en plusieurs zones ou blocs, ces différentes zones recevant une gestion technique différenciée de la part de l'exploitant. *In fine*, l'application principale est de moduler l'apport d'intrants au sein de ces zones. L'exploitant agricole a le choix entre plusieurs stratégies : maintenir ou élever le rendement pour atteindre des quotas de production, ou privilégier la qualité de sa production. Selon la stratégie adoptée, il pourra choisir d'apporter plus ou moins d'intrants au sein de ces zones. Enfin, l'objectif derrière la pratique de l'agriculture de précision, est de réaliser des économies d'intrants et de préserver l'environnement en diminuant les doses apportées. L'une des conditions préalables à sa mise en œuvre, est la connaissance des variations spatiales des facteurs édaphiques ainsi que de l'état des cultures en place. C'est ici où interviennent les drones : ils offrent des données de télédétection de hautes résolutions, à l'échelle et au moment requis. Ces données sont obtenues par différents capteurs embarqués sous le drone et développés plus en détail ci-dessous.

III. TYPES DE CAPTEURS UTILISÉS

Seulement quatre types de capteurs recouvrent presque la totalité des applications de télédétection par drone en agriculture de précision : le capteur RVB (Rouge-Vert-Bleu ou RGB), le capteur multispectral, le capteur hyperspectral et le capteur thermique. On peut ajouter à ces 4 capteurs le LiDAR, qui fonctionne différemment en recourant à des faisceaux laser. Les hauteurs de vol sont comprises entre 1 et 120 m (hauteur maximal légale autorisée par la réglementation française à ce jour). Les longueurs d'ondes des capteurs s'étendent sur une variété de spectres (cf. figure 2) avec une résolution spectrale pouvant descendre jusqu'à 10 nm (capteur hyperspectral). La résolution spatiale du capteur multispectral varie de 3 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 de planification de vols (*ex* : DJI Pilot 2) et sous le contrôle d'un opérateur télépilote certifié. Les débits de chantier du drone permettent de couvrir l'ensemble d'une plateforme expérimentale en quelques minutes, garantissant l'homogénéité des données.

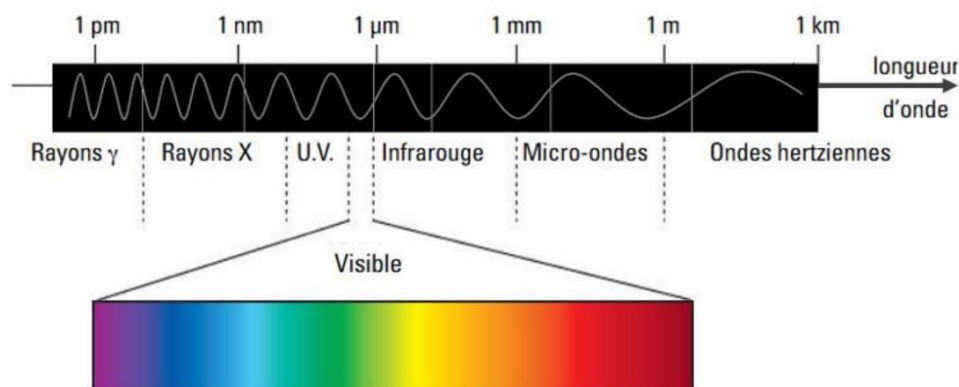


Figure 2 : Représentation du spectre électromagnétique et ses principaux domaines (avec : UV = ultraviolet)

Note de synthèse 2022 – Capteurs embarqués sur drones en agriculture par Maël ZWICKERT

Pour être embarqués sur un drone, les capteurs nécessitent d'être bien intégrés à celui-ci. C'est pourquoi, les constructeurs proposent aujourd'hui leur propre gamme de capteurs associés avec le drone. Ces derniers peuvent être directement intégrés (*ex* : le DJI Mavic 3 Enterprise) ou proposés en nacelles stabilisées à venir fixer sous le drone (*ex* : la DJI P1 sur le DJI Matrice 300 RTK). Ces drones « plateformes » son capable d'accueillir des charges utiles de plusieurs kilos.



Figure 3 : Le drone DJI Mavic 3E avec ses capteurs intégrés (RGB, multispectral ou thermal). (source : DJI)

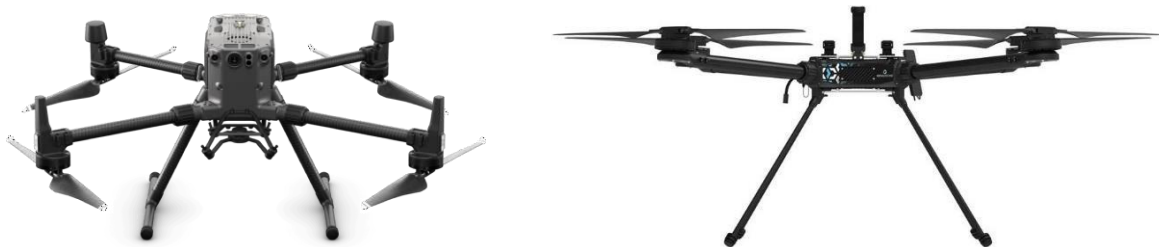


Figure 4 : Les drones « plateformes », le DJI Matrice 300 RTK (à gauche) et le Tundra d'Hexadrone (à droite). (source : DJI)

1. Capteur RVB

Les capteurs RVB (Rouge-Vert-Bleu) ou visibles sont des capteurs classiques comme on les retrouve sur nos téléphones portable ou appareils photos. Leur dénomination « visible » vient du fait qu'il capturent des photos dans le spectre visible (380-700nm, cf. figure 2), le même auquel sont sensibles nos yeux. Ce sont les capteurs les plus économiques (100 – 10 000€), dotés d'une haute résolution spatiale mais d'une résolution spectrale relativement faible. Ces capteurs sont utilisés pour calculer certains indices de végétation (IV), pour générer des Modèles Numériques d'Élévation (MNE) ainsi que des orthophotographies hautes résolutions (cf. figure6). Parmi les caméras RVB, on retrouve les caméras RVB « modifiées » pour lesquelles le filtre rouge a été retiré et remplacé par un filtre proche infrarouge. Ces capteurs "remplissent des fonctions similaires aux capteurs multispectraux à canaux uniques, mais sont moins précis et les données générées plus relatives.



Figure 5 : Capteur RVB DJI P1 adapté pour le DJI Matrice 300 RTK (source : DJI)



Figure 6 : Orthophotographie RVB d'un champ de Maïs

2. Capteur multispectral et hyperspectral



*Figure 7 : Exemple de capteur multispectral (gauche) et hyperspectral (droite)
(source : DJI et Headwall)*

Les capteurs multispectraux et hyperspectraux diffèrent des caméras RVB en matière de spectres d’acquisition. Ces derniers vont collecter des données allant des ultraviolets jusqu’à l’infrarouge moyen (ou MWIR : Mid-wave infrared) soit entre environ 250nm et 5000nm (cf. figure 8 ci-dessous).

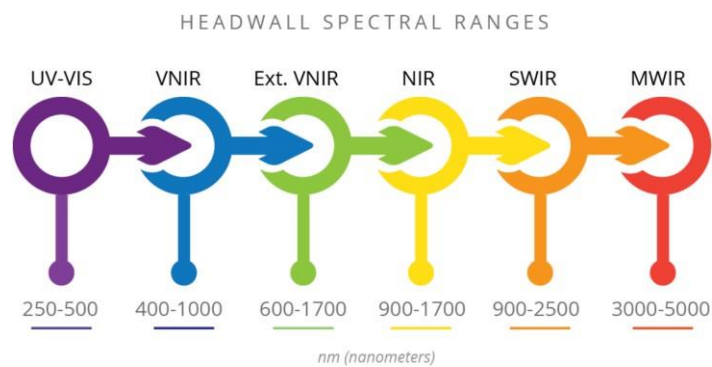


Figure 8 : Types d’imageries spectroscopiques et leurs longueurs d’ondes des capteurs hyperspectraux et multispectraux (source : Headwall)

La principale différence entre l’imagerie multispectrale et l’imagerie hyperspectrale est le nombre de bandes et la largeur de ces dernières. L’imagerie multispectrale fait généralement référence à des groupes de 3 à 10 bandes. L’imagerie hyperspectrale est, elle, constituée de bandes beaucoup plus étroites (10-20 nm). Une image hyperspectrale peut donc contenir des centaines de bandes. Un capteur hyperspectral peut s’apparenter à un scalpel dans le spectre électromagnétique. La figure suivante illustre bien la différence entre ces deux technologies de capteurs :

Note de synthèse 2022 – Capteurs embarqués sur drones en agriculture par Maël ZWICKERT

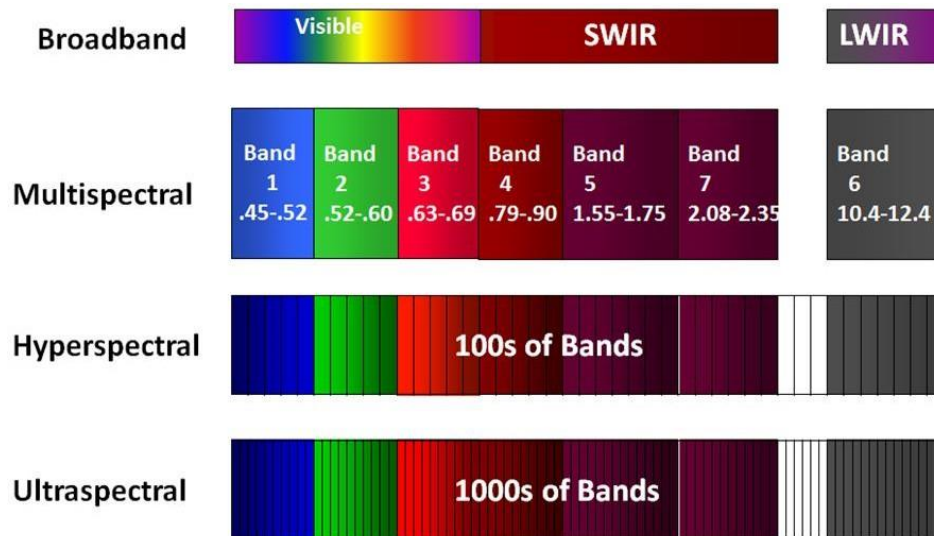


Figure 9 : Représentation comparative des imageries multispectrale, hyperspectrale et ultraspectrale dans le spectre électromagnétique (source : Altigator)

En matière de coût, le capteur multispectral s'élève à quelques milliers d'euros (2500 à 30000€ environ), tandis que le capteur hyperspectral s'élève entre 25 et 300 000€. Les applications vont varier entre ces 2 types de capteurs : le capteur multispectral est utilisé en agriculture pour calculer des indices de végétation qui prennent la forme d'orthophotographies multispectrales 2D hautes résolutions (cf. figure 11) ; le format de sortie des données hyperspectrales sont, elles, représentées par un volume 3D du terrain (cf. figure 10)

L'indice commun le plus communément utilisé en analyse multispectrale est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), construit à partir des canaux rouge et proche infrarouge. Sa formule qui est la suivante : $NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$, permet d'attribuer une valeur entre -1 et 1 à chaque pixel de l'image. Pour faciliter l'interprétation des indices de végétation, il est possible de recourir à des palettes de couleurs comme illustré dans les figures 11 et 12.

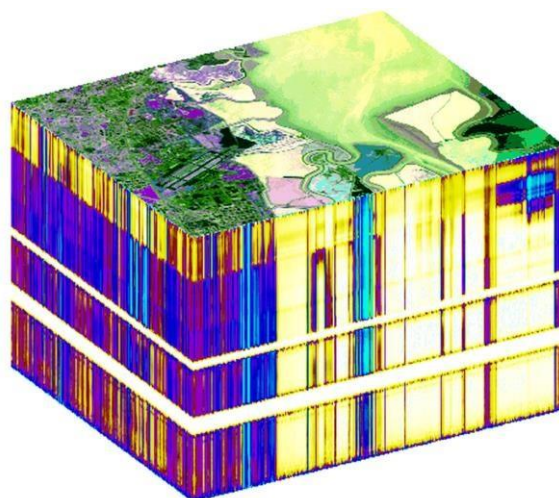


Figure 10 : Représentation cubique des données hyperspectrales (source : rdworldonline)

Note de synthèse 2022 – Capteurs embarqués sur drones en agriculture par Maël ZWICKERT

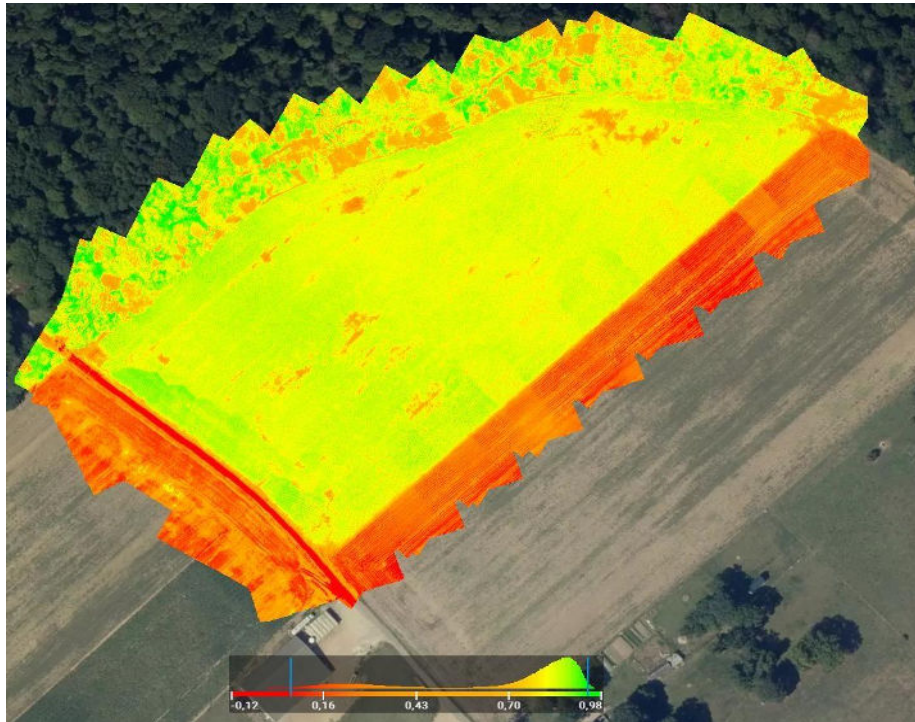


Figure 11 : Exemple d'une orthophotographie multispectrale colorisée. Interprétation : vert = forte biomasse, rouge = faible biomasse.

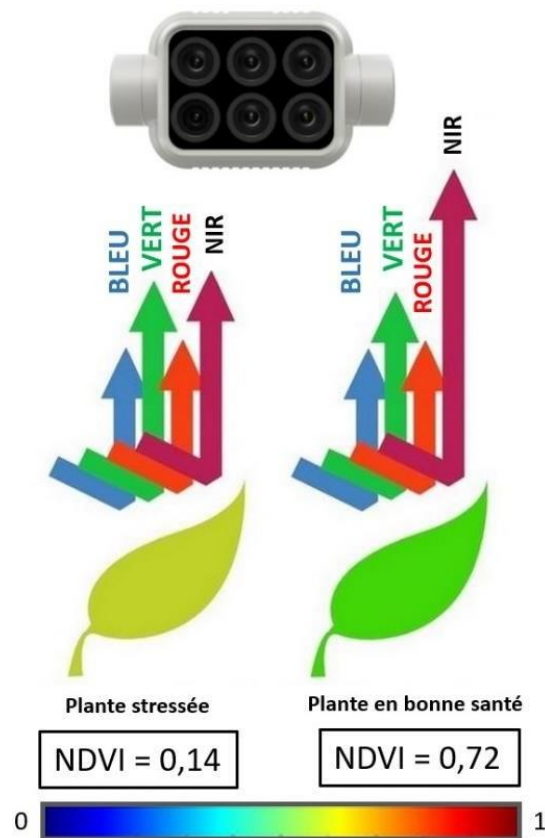


Figure 12 : L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et son interprétation

3. Capteur thermique

Le capteur thermique est un capteur de plus faible résolution (souvent de 640 x 512 pixels, ou 0,33 MP) avec une seule bande mesurée par un capteur microbolométrique sensible dans la région infrarouge à grandes ondes (7-12 mm). Pour cela, il utilise une lentille spécialisée qui captant les fréquences infrarouges. Les caméras thermiques pour drones peuvent détecter la température de surface de nombreux objets à quelques exceptions. Par exemple, les objets très brillants et réfléchissants n'absorbent pas beaucoup de chaleur, ils ont ce que l'on appelle une faible émissivité. Ils sont donc difficiles à détecter par ce type de capteur. Les objets à forte émissivité comme le bois, le béton et même les individus sont faciles à scanner. Le capteur thermique peut être utilisé pour extraire la température de la canopée lorsque celui-ci est qualifié de « radiométrique » (renseignement de données de température). Comme pour le capteur multispectral et hyperspectral, le fichier de sortie des données du capteur thermal prend la forme d'une orthophotographie :

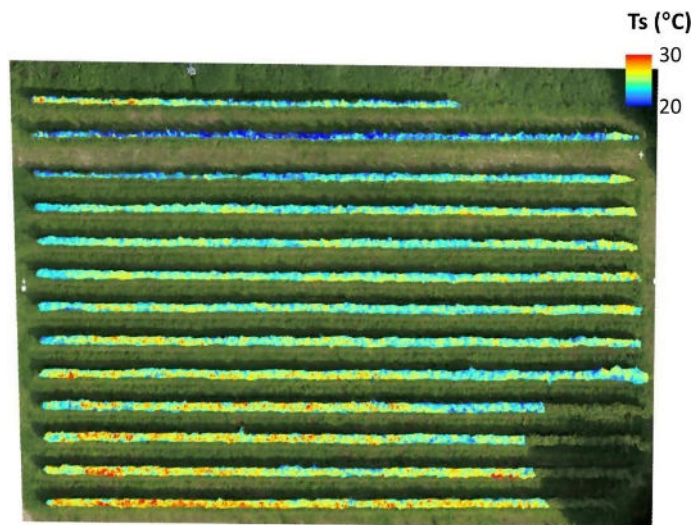


Figure 13 : Orthophotographie thermique colorisée (source : Drones Imaging)

Les capteurs thermiques sont plus onéreux que les capteurs RGB, se situant sur une gamme de prix similaire aux capteurs multispectraux (2500 à 30 000€ environ).

4. Capteur LiDAR



Figure 14 : Capteur LiDAR DJI L1 (source : DJI)

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est un système de mesure par télémétrie laser permettant de cartographier ou plutôt représenter des zones au travers d'un nuage de points dense 3D (cf. figure 16). Il utilise le principe de télédétection laser par télémétrie. Il envoie une impulsion de lumière (écho) dans différentes directions autour de lui et mesure le temps que cette impulsion a mis pour revenir jusqu'au récepteur. Toute impulsion laser émise, rencontre de multiples surfaces de réflexion lorsqu'elle se déplace. Elle va donc se diviser en autant d'échos en retour qu'il y a de surfaces réfléchissantes. La distance de chaque laser envoyé sur les matières environnantes (végétation, constructions, peintures, etc.) est ensuite couplé avec l'orientation et l'inclinaison du LiDAR pour pouvoir positionner chaque point relevé dans un espace en 3D. Comme le LiDAR est capable d'envoyer un grand nombre de faisceaux laser par seconde, celui-ci créé un nuage de points très rapidement. Les capteurs actuels embarqués sur drone proposent jusqu'à 3 échos, permettant d'atteindre les parties sous-jacentes de la canopée (*ex* : branches, sol, etc tel qu'illustré par la figure 15). La technologie embarquée sur les LiDAR font de ces capteurs parmi les plus chères du marché (environ 10 000€ pour le capteur DJI L1).



Figure 15 : Modèle 3D de culture obtenu à partir de données LiDAR

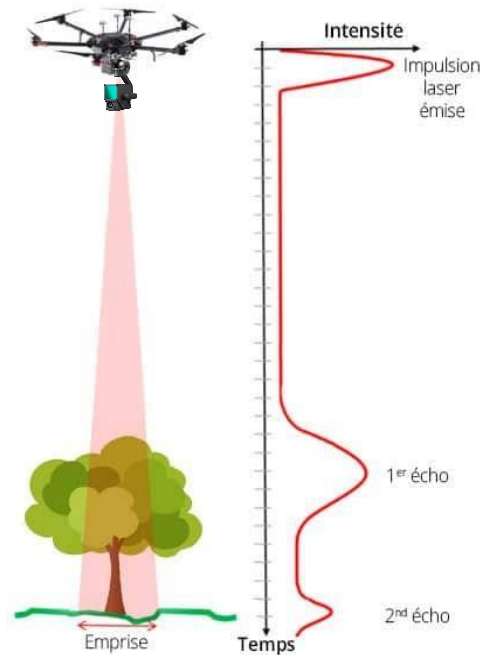


Figure 16 : Illustration du fonctionnement d'un capteur LiDAR (source : Escadrone)

IV. LES APPLICATIONS

Les applications sont nombreuses et presque illimités dès lors que l'on considère que chaque culture / variété renvoie une signature spectrale différente selon son stade de croissance, son état sanitaire *etc.* C'est d'autant plus le cas pour l'analyse multispectrale qui est le capteur le plus utilisé dans la recherche agronomique. Si l'on prend justement l'exemple de ce capteur, le traitement des données permet d'accéder à des variables agronomiques telles que la couverture foliaire (LAI), le taux de chlorophylle sur les cultures de colza, blé et maïs ainsi qu'à des indices de végétation comme cité plus haut. 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 (NDVI, courbes de LAI par variété, cinétique de stade, *etc.*). D'une façon générale, voici une liste d'applications pour les 4 capteurs précisés plus haut :

- Cartographie des propriétés des sols en agriculture
 - Cartographie des cultures
- Agriculture de précision : carte de prescription et de préconisation NPK (= azote, phosphore, potassium)
 - Suivi des essais agronomiques au champ
- Prévion des rendements
 - Teneur en carbone organique des sols
- Tour de plaine

Capteurs embarqués sur drone en agriculture

Et plus spécifiquement aux capteurs eux-mêmes :

- **Capteur RVB :**
 - Détection de maladies
 - Détection d'adventices
 - Comptage de plants/pieds
 - Développement foliaire et évaluation du taux de couverture verte
 - Suivi de dégâts (gibier / climatiques)
 - Photogrammétrie : modèle tridimensionnel de culture
 - MNS (Modèle Numérique de Surface)
 - Suivi de troupeau
 - Suivi de culture (pieds et plants morts/improductifs)

- **Capteur multispectral :**
 - Evaluation de l'état sanitaire des cultures (détection carences NPK, stress hydrique, teneur en chlorophylle, etc.)
 - Détection d'adventices
 - Suivi d'essais micro-parcelles (types de traitement, etc.)

- **Capteur hyperspectral :**
 - Stress hydrique
 - Phénotypage

- **Capteur thermique :**
 - Température de la canopée des cultures (→ suivi du stress hydrique)
 - Détection de gibiers

- **Capteur LiDAR :**
 - Modèle tridimensionnel de culture
 - MNT (Modèle Numérique de Terrain) et MNS (Modèle Numérique de Surface) : pour connaître le relief d'un terrain (utile à un chantier d'irrigation) et/ou d'une culture (mesure de l'indice de canopée, modèle tridimensionnelle de culture pour suivre le développement...).

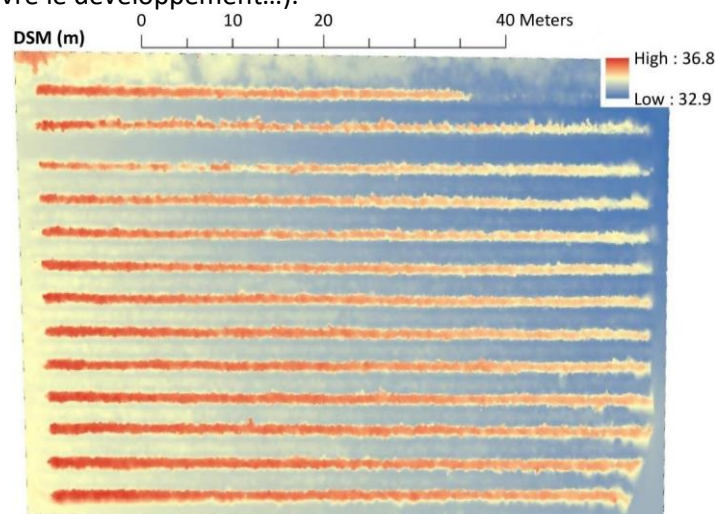


Figure 17 : Exemple d'un MNS

Capteurs embarqués sur drone en agriculture

Le schéma suivant résume les applications agricoles de chaque capteur et plus largement les usages des drones dans l'agriculture (intégration des Add-On « Outils ») :

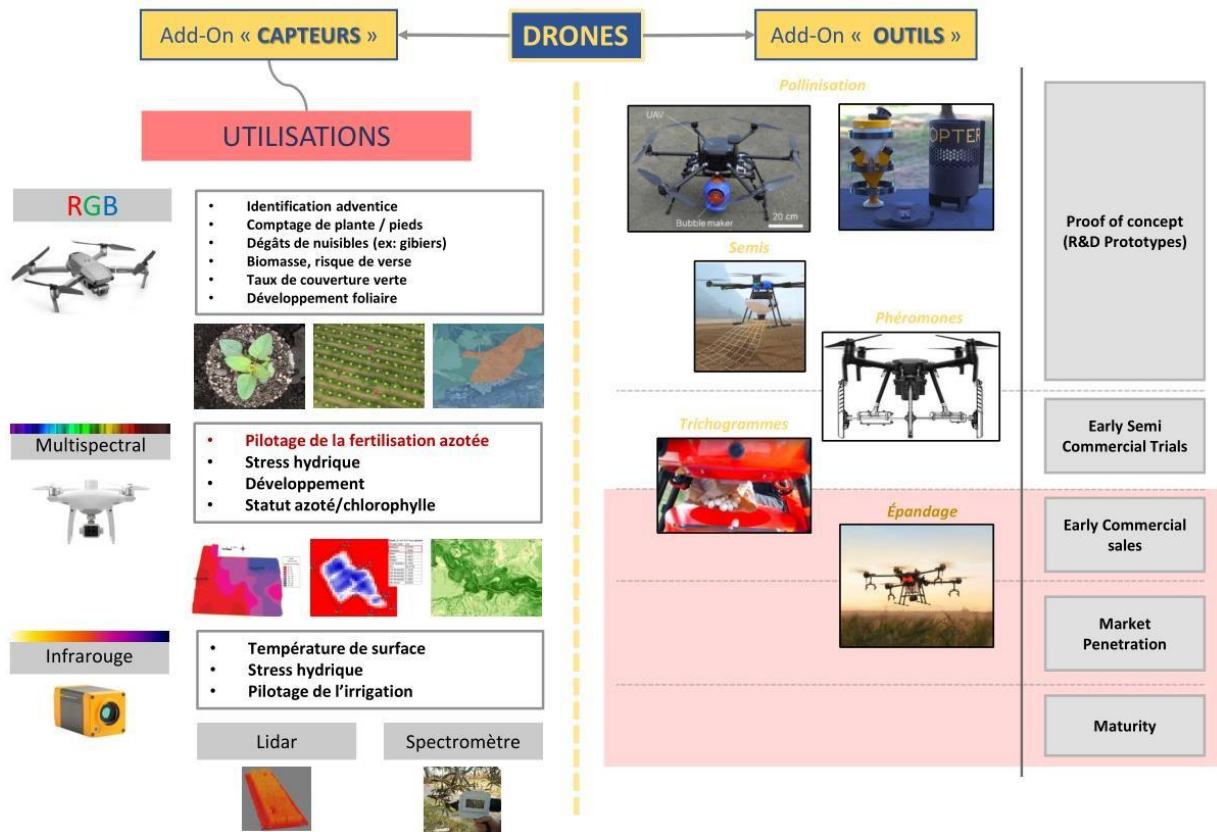


Figure 18 : Schéma résumant les types de capteurs et Add-on « Outils » embarqués sur drone et les applications associées

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Aujourd'hui, les capteurs embarqués sur drone fournissent des informations précieuses sur l'état des cultures et les propriétés des sols permettant la pratique de l'agriculture de précision. Les données qu'ils collectent prennent plusieurs formats en sortie : données numériques brutes, photos, orthophotographies 2D, modèle 3D, MNS/MNT, etc. Leur but est d'aider les exploitants agricoles, techniciens et agronomes à la prise de décision au champ et au choix des meilleurs itinéraires techniques. Mais leurs usages ne s'arrêtent pas uniquement à la production de données, les images acquises en direct servent aussi à des applications de détection comme la découverte de gibiers, le suivi de troupeau ou la levée de doutes via de simples survols. À ce jour, les recherches et services proposés, se concentrent sur l'exploitation des données intégrées dans des modèles agronomiques ou de l'analyse d'image (machine learning, deep learning, etc.). La complémentarité des capteurs est sur ce qu'il faut miser pour proposer des services toujours plus adaptés au terrain et à la réalité des agriculteurs. Les technologies ne cessent d'évoluer, et les performances des capteurs deviennent de plus en plus intéressantes à exploiter.