

Etat de Lieu

Mise en Place d'un Processus Complet de Collecte, de Traitement et d'Exploitation des Données Multispectrales

Felipe AGUIAR MARTIN

Août 2023

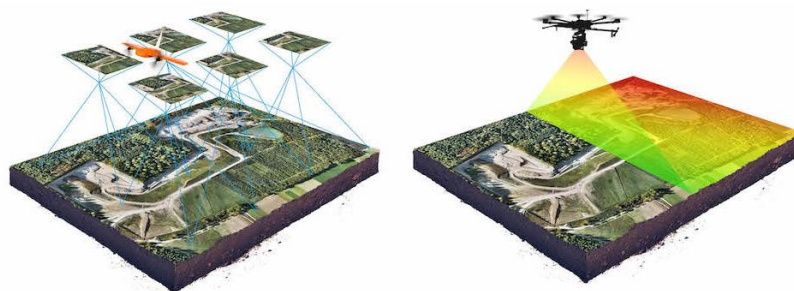
Table de Matières

| | |
|---|----|
| Généralités | 3 |
| Drone | 3 |
| Les analyses | 3 |
| Stress de végétation | 4 |
| Mauvaises herbes | 5 |
| Vigueur végétale | 6 |
| Prédiction de Production ou Calcule de Biomasse | 6 |
| Études de terrain (exposition au soleil, pente, courbe de niveau et direction d'écoulement) | 6 |
| Occitanie | 7 |
| Grandes cultures agricoles | 8 |
| Calendrier des cultures | 8 |
| Les principales cultures | 9 |
| Télédétection | 10 |
| Les ondes radiométriques | 10 |
| Résolution spatiale | 11 |
| Résolution radiométrique | 12 |
| Résolution spectrale | 13 |
| Résolution temporelle | 13 |
| Calibration radiométrique (Correction Radiométrique) | 13 |
| Calibration géométrique (Correction Géométrique) | 14 |
| Correction Atmosphérique | 14 |
| Correction Radiométrique | 15 |
| Orthorectification | 15 |
| Egalisation Radiométrique | 15 |
| Glissement, brouillage fusion et alignement d'images multispectrales | 16 |
| Les conditions optimales pour la collecte de données | 16 |
| Capteur Multispectral | 17 |
| Les bandes et les signatures spectrales | 17 |
| Le sol | 18 |
| Indices de végétation | 20 |
| Références | 23 |

Généralités

Drone

Les images matricielles drone, aériennes et satellitaires fournissent des données de grande qualité. Le choix entre ces options dépend de divers paramètres, principalement liés à l'échelle de travail et à la résolution d'image requise. Les drones, qu'ils soient équipés de capteurs actifs ou passifs, connaissent une utilisation croissante pour l'analyse en télédétection, en particulier dans le domaine de l'agriculture. Leur valeur repose sur leur capacité à collecter efficacement des données à haute résolution, à s'adapter à différents types de terrains, de la vitesse de collecte et de la possibilité d'une grande périodicité de passage (Neupane, K. et al., 2021).



Une grande variété de capteurs peut être utilisés conjointement avec les drones (multispectral, hyperspectral, thermique, LiDAR et autres). Ceux-ci ont été récemment mis en service et ont déjà fait de grands progrès dans les techniques de collecte de données géospatiales (Sona, G., et al., 2016). L'un des grands avantages de l'utilisation des données générées par les drones réside dans l'absence de correction atmosphérique des données, puisque les vols sont effectués à basse altitude, en comparant les altitudes de satellites. De plus, il est possible d'esquiver la présence de nuages et de profiter de la grande précision de géolocalisation avec l'utilisation de stations GNSS RTK ou de traitements PPK. (De Castro, A. I. et al., 2018).

| | Spatial Resolution | Field of View | Usability | Payload Mass | Cost for Data Acquisition |
|------------|--------------------|---------------|-----------------|------------------|---|
| UAV | 0.5–10 cm | 50–500 m | very good/easy | can be limited | very low |
| Helicopter | 5–50 cm | 0.2–2 km | pilot mandatory | almost unlimited | medium |
| Airborne | 0.1–2 m | 0.5–5 km | pilot mandatory | unlimited | high |
| Satellite | 1–25 m | 10–50 km | - | - | very high, particularly for high-res stereo imagery |

Figure 1 - Comparaison de drone avec d'autres capteurs de données (Candiago, S., et al., 2015).

Encore par rapport aux satellites, même avec les nouvelles technologies de nanosatellites avec des capteurs de haut niveau, haute résolution spatiale, haute résolution temporelle et stockage de dates anciennes dans les catalogues, les drones finissent par avoir de plus grands avantages comme : la facilité d'utilisation de plusieurs types de capteurs, haute résolution radiométrique, spectrale, géométrique et spatiale (Maes, W. H., et al., 2019).

Les analyses

L'un des grands défis et besoins pour lesquels les drones à capteur multispectral fonctionnent est la recherche d'anomalies de croissance des plantes (Kotchi, S. O., 2004).

Parmi les analyses : l'analyse de la vigueur et de la santé de la végétation, identification des mauvaises herbes et analyse des contraintes végétales. Mais aussi, suivi de la hauteur des cultures, analyses de terrain, planification de l'irrigation des cultures, comptage des plantes, géoréférencement des terres agricoles (Rani, A. L. K. A., et al., 2019).

L'une des caractéristiques les plus importantes pour effectuer des analyses sur différents types de cibles est la bonne compréhension des signatures spectrales des différentes cibles. À partir de ces connaissances, des calculs d'analyses détaillées et particulières des cibles sont élaborés.

Bien que la signature spectrale générique de la végétation soit connue : basses fréquences bleues et rouges, vert légèrement inférieur et infrarouge assez élevé ; toutes les plantes ne présentent pas le même motif, en plus d'avoir une variation par le stade de croissance auquel elles se trouvent. Cependant, cette différence de fréquence est la raison principale pour laquelle nous observons les feuilles vertes et la raison pour laquelle les fréquences rouge et infrarouge sont utilisées pour l'indice de végétation le plus connu, le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (SEOS).

Sur les possibilités d'études et la relation avec les types de capteurs de captage passif, diverses sont les possibilités à dépendre avec lequel on travaille, sachant qu'ils présentent un usage complémentaire (Maes, W. H., et al., 2019).

| Application | | Type of sensor/camera | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|
| | | RGB | Multispectral (broad band) | Hyperspectral (narrow band) | Thermal |
| Drought stress | Detection in early stages | – | – | S ^b | HS |
| | Long-term consequences | – | HS | HS | S |
| Pathogen detection | Detection in early stages | – | – | HS | HS |
| | Severity of infection | HS | HS | HS | S |
| Weed detection | Spectral discrimination | – | S | HS | – |
| | Object based | HS | HS | – | – |
| Nutrient status | | S | HS | HS | S |
| Growth vigor | Growth stage | HS | – | – | – |
| | Canopy height and biomass | HS | HS | – | – |
| | Lodging | HS | – | – | S |
| Yield prediction | | S | HS | – | – |

^aAbbreviations: HS, highly suited; S, suited.
^bCalculation of sun-induced fluorescence from hyperspectral data.

Figure 2 - Résumé des capteurs (Maes, W. H., et al., 2019).

En outre, sur les possibilités d'application du capteur multispectral, les différentes études peuvent être faites en fonction des caractéristiques phytomorphologiques d'analyse et des comportements phénologiques. Par exemple, les cultures de végétation dense et de faible taille de céréales présentent des difficultés d'analyse individuelle des plantes et une analyse plus générale de la zone de plantation est nécessaire. Alors que les plantations de fruits de grande taille sont plus faciles à travailler plante par plante.

Stress de végétation

Le principe qui rend possible l'analyse de l'agriculture à partir d'images multispectrales est dû à la modification des conditions optimales et à l'adaptation des structures des plantes. Ces altérations physiologiques ont une interférence directe avec le support d'entretien et de formation des structures végétatives. Lorsque ces structures ont un changement, il est perceptible par les images multispectrales. (SEOS).

Parmi les principales causes de stress végétatif, on trouve : manque d'eau, carence en nutriments, concentration élevée en composés chimiques dangereux, acidité ou salinité extrêmes du sol, infections fongiques, bactériennes ou virales, attaques d'insectes ou d'autres organismes, températures extrêmes, asphyxie des racines ou manque de place pour le développement correct des racines, manque de lumière, dégât structurels causés par les conditions météo, compétition avec d'autres plantes pour l'accès des sources, et autres.

Chaque plante est adaptée à un type d'environnement. Ses caractéristiques morphologiques, son calendrier de croissance, son mode de floraison, sa température et son humidité optimal, son besoin de nutriments et de pH de sol, sa densité et l'aire foliaire, et de nombreux autres paramètres environnementaux (Monteith, J. L. et al., 1987).

Le fait est que beaucoup de ces particularités peuvent interférer avec les caractéristiques de la capture de données de la végétation par des capteurs couplés à des drones, en plus de refléter les paramètres de traitement des données (Robertson, M. J., 1991). En plus, compte tenu également des conditions climatiques et des sols locaux, qui jouent un rôle important dans la croissance végétative, la même espèce végétale peut avoir des variétés dans différents endroits (Kotchi, S. O., 2004).

L'utilisation de drones pour la détection de la sécheresse est bien appliquée, que ce soit avec des capteurs multispectraux, hyperspectraux ou thermiques. Cependant, en fonction du type de capteur, il sera possible de détecter la problématique hydrique à l'avance de la cause ou seulement après les conséquences d'un tel stress. Dans le cas de l'utilisation de capteurs multispectraux, les preuves détectées sont de conséquence à la sécheresse sur le terrain, sur les analyses de santé de la végétation (Maes, W. H., et al., 2019).

L'une des principales conséquences du stress sur les plantes est la réduction de la taille de la surface foliaire et de l'activité chlorophyllienne. Comme la feuille est l'organe responsable de la capture d'énergie et aussi de l'évapotranspiration (processus nécessaires pour la puissance de captage d'énergie et la régulation du bien-être de la plante). Quand une plante est stressée, elle réagit à la réduction de la surface foliaire qui, finalement, affecte sa croissance et finalement sa production (Heuer, B. et al., 1998).

Une alternative à l'utilisation de capteurs multispectraux est l'utilisation de capteurs thermiques pour la détection de stress thermique, par exemple. Utilisé pour la respiration et la transpiration des plantes, les stomates s'ouvrent et se ferment principalement à partir de la température et de la concentration en eau de la plante (Katerji, N. et al., 2002). Après la fermeture des stomates d'une plante souffrant de sécheresse ou de températures élevées, les stomates se ferment et la température augmente, permettant de détecter par des capteurs thermiques l'accumulation de chaleur dans les cultures et mettant en évidence les régions de sécheresse (Luquet, D., 2002).

Déjà pour la détection des agents pathogènes et la gestion de la pesticides, l'utilisation de capteurs multispectraux, peuvent être utilisés dans des situations généralistes. Des études de vérification de la santé du champ agricole permettent de délimiter les zones stressées. Si l'on identifie ultérieurement la cause d'un tel stress par les agents pathogènes, l'utilisation de données de santé est valide (Maes, W. H., et al., 2019).

Pour le capteur hyperspectral, il est possible d'obtenir avec beaucoup plus de précision la cause du stress par les pathogènes, car il peut interpréter le changement dans la composition chimique de la plante et l'analyse de certaines longueurs d'onde que le multispectral n'atteint pas (Mahlein, A. K., 2016).

Comme pour beaucoup d'autres études sur le stress végétal, l'analyse multispectrale n'a que des réponses à des conséquences de basse santé végétale. Pour les analyses de nutriments, c'est pareil. Trois sont les principaux nutriments présents dans le sol d'importance à la nutrition végétale : azote (N), phosphore (P) et potassium (K), également connus sous le nom de groupe NPK. Bien que le capteur multispectral identifie la santé générale de la culture, le seul qui peut effectuer une analyse chimique est le capteur hyperspectral (Domingues Franceschini, M. H., et al., 2017).

Mauvaises herbes

Malgré les difficultés à distinguer les différentes végétations dans les cultures, à certains moments, l'utilisation d'images de capteurs multispectraux est utilisée pour trouver et cartographier les mauvaises herbes avec une précision maximale (Zisi, T., et al., 2018).

Pour une meilleure détection des mauvaises herbes, une possibilité est de classer les résultats des indices de végétation et de créer un masque végétal. Ensuite, à l'aide de données de hauteur, obtenues à partir du modèle numérique de hauteur (calculé par les modèles de surface et de terrain), filtrer uniquement les mesures qui appartiennent aux mauvaises herbes. (El Imanni, H. S., et al., 2023).

Pour faire la classification, deux méthodes sont les plus utilisées : type K-nearest neighbors (KNN) et Random Forest (RF), qui a la fin génère aussi des résultats de preuves d'efficacité statistique de Overall Accuracy (OA) et le Kappa statistique (k), aussi avec la matrice d'erreur, de chaque méthode (RF > KNN). Depuis quelques études, la méthode RF a été mieux classifiée les champs végétaux, mais il faut aussi chercher savoir si les résultats de F1 score et accuracy sont pertinents (El Imanni, H. S., et al., 2023).

Vigueur végétale

L'analyse de la vigueur de la végétation est une méthode couramment utilisée dans l'agriculture pour évaluer la santé et le développement des cultures. Comme le plus adopté pour les études de la végétation, l'Indice de végétation par différence normalisée (NDVI), qui utilise la bande rouge et infrarouge proche, est utilisé pour quantifier la couverture végétale et détecter les variations de croissance sur les parcelles cultivées. Cette analyse fournit des informations essentielles pour optimiser la gestion des cultures, l'irrigation, la fertilisation et pour prendre des décisions éclairées sur le rendement et la santé des cultures (Seelan, S. K., 2003).

Prédiction de Production ou Calcul de Biomasse

Pour prédire le rendement d'une culture, il est essentiel d'établir des liens entre les valeurs des indices de végétation à des stades spécifiques de croissance de la culture et les données historiques de production antérieure. Cela permet d'améliorer la précision des estimations. En ce qui concerne la modélisation de l'estimation de la production, il est recommandé d'intégrer d'autres variables afin d'accroître la fiabilité des résultats. Ces variables incluent les conditions climatiques, les données météorologiques, les caractéristiques du sol et les pratiques culturales, entre autres.

Un exemple en la matière est le projet de surveillance agricole "Mars Crop Yield Forecasting System (MYCFS)". Ce projet rassemble des données statistiques sur les cultures à l'échelle mondiale en utilisant des images satellites et des modèles de prédiction qui intègrent des données climatiques. À une échelle plus locale, cette approche peut être affinée davantage en utilisant des drones avec des périodicités adaptées à chaque culture et objectif (SEOS).

Lorsqu'on vise à évaluer le rendement et la biomasse d'une plante, une approche courante consiste à combiner la hauteur de la plante avec les indices de végétation obtenus à l'aide de capteurs multispectraux. Cette combinaison permet de calculer la biomasse ainsi que la vigueur de croissance (Du, M., et al., 2017). Cependant, il est essentiel de noter que malgré la simplicité apparente de cette approche, elle requiert des données multi-temporelles pour construire une base de données qui puisse servir de fondement à la prédiction en utilisant des modèles parmi les différentes variables disponibles.

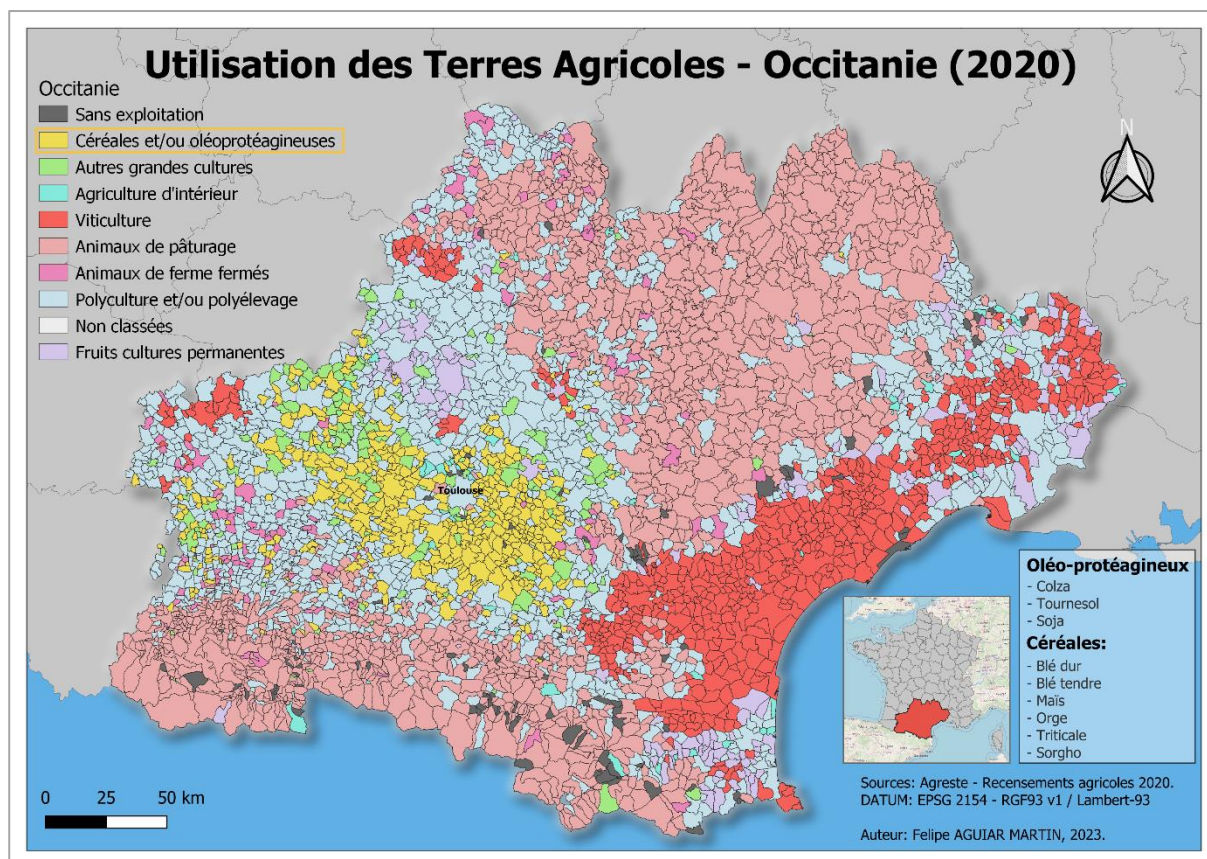
Études de terrain (exposition au soleil, pente, courbe de niveau et direction d'écoulement)

Les analyses de terrain se basent principalement sur les données altimétriques du modèle numérique du terrain (MNT). Ces données peuvent être utilisées pour renforcer les explications concernant les résultats potentiels des études d'analyse des cultures, ainsi que pour fournir un aperçu de la zone où les plantations agricoles sont établies. En intégrant les données altimétriques, les analyses gagnent en précision et en contexte géographique, ce qui facilite une compréhension plus complète des caractéristiques des cultures et de leur environnement (Caloz, R. et al., 1996).

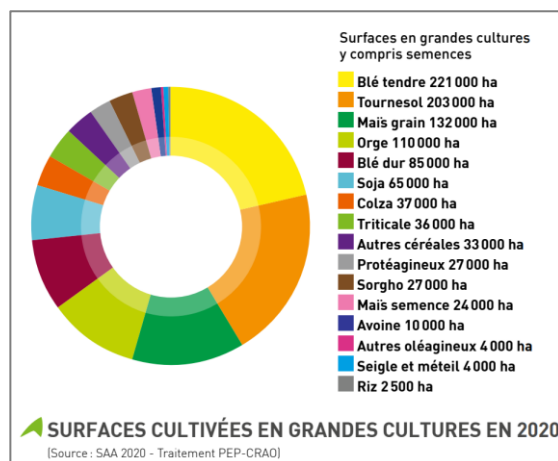
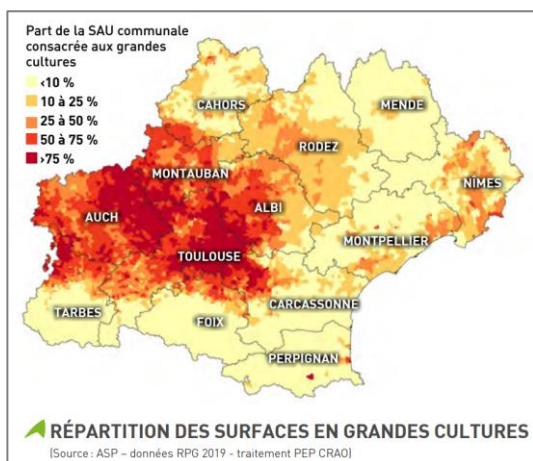
Occitanie

La région administrative de l'Occitanie, située au sud-ouest de la France, est constituée par le regroupement de 13 départements dont Toulouse c'est le chef-lieu. Avec une superficie de 72 724 km² et une population de 6 101 005 habitants, selon les données de l'Insee de 2023, l'Occitanie est située au milieu de deux massifs montagneux (les Pyrénées et le Massif central). Son climat est divisé en trois principales catégories : méditerranéen, océanique et montagnard.

La région Occitanie est une force majeure dans la production agricole française, générant en moyenne 4 millions de tonnes de céréales par an, dont 1,3 million de tonnes de blé et 1,4 million de tonnes de maïs, contribuant ainsi à une valeur ajoutée totale de 1,8 milliard d'euros pour la région. Les cultures principales comprennent le blé, le maïs, l'orge, le triticale, le sorgho, le soja, le tournesol et le colza. De plus, grâce aux ports de Port-Vendres, Port-la-Nouvelle et du Port de Sète, la région bénéficie d'avantages significatifs en termes de transport et d'exportation de produits bruts (Passion Céréales, 2020).



La région bénéficie de nombreux avantages en matière de climat et de superficie, propices à l'agriculture de diverses cultures. L'Occitanie se distingue comme l'une des principales régions productrices de France. Avec une superficie agricole utilisée (SAU) de plus d'un million d'hectares dans la région, elle représente un quart de la production biologique nationale. Globalement, la région se démarque dans la production agricole française en tant que leader pour les cultures de soja et de sorgho, et se positionne en deuxième place pour les cultures de blé dur, de tournesol, de maïs et de riz (Chambre d'Agriculture, 2021).



Grandes cultures agricoles

Le terme "grandes cultures agricoles" en France désigne les cultures de céréales, d'oléagineux et de protéagineux, qui ont occupé plus d'un million d'hectares en 2020, dont 14% étaient des cultures biologiques. Ces types de cultures ont contribué à hauteur de 880 millions d'euros, soit 13% de la production agricole de la région occitane en 2020, avec une répartition par ordre de céréales, d'oléagineux et de protéagineux (SAA, 2020).

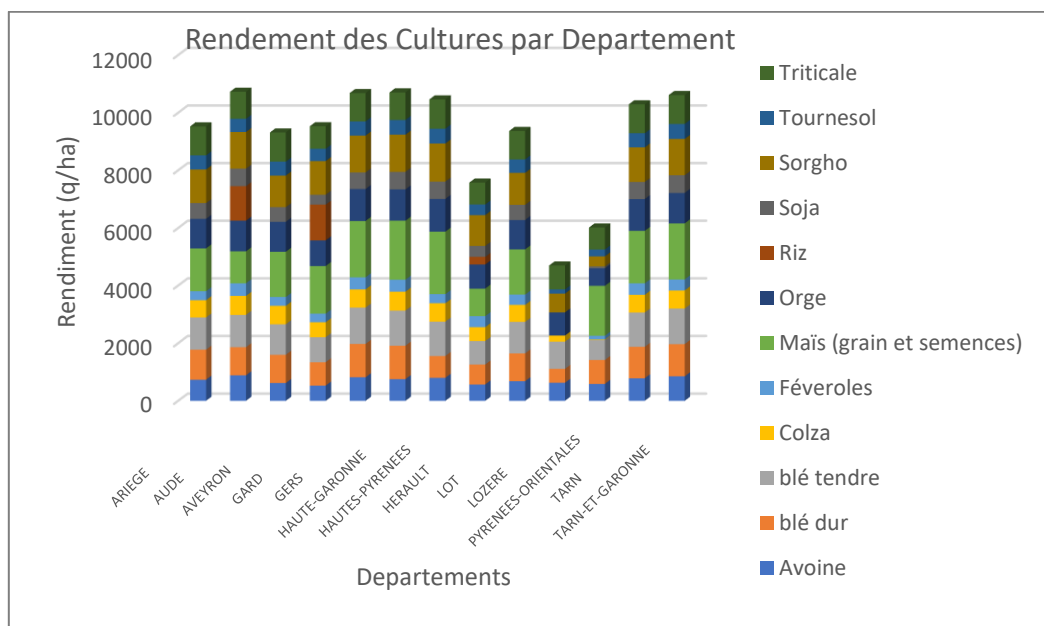


Figure 3 - Production végétal par département. Source : Visionet.franceagrimer

Calendrier des cultures

En raison de la diversité physiologique et des particularités régionales, des calendriers de culture spécifiques sont appliqués à chaque culture agricole, en fonction des caractéristiques biologiques propres à chaque plante et du climat de la région.

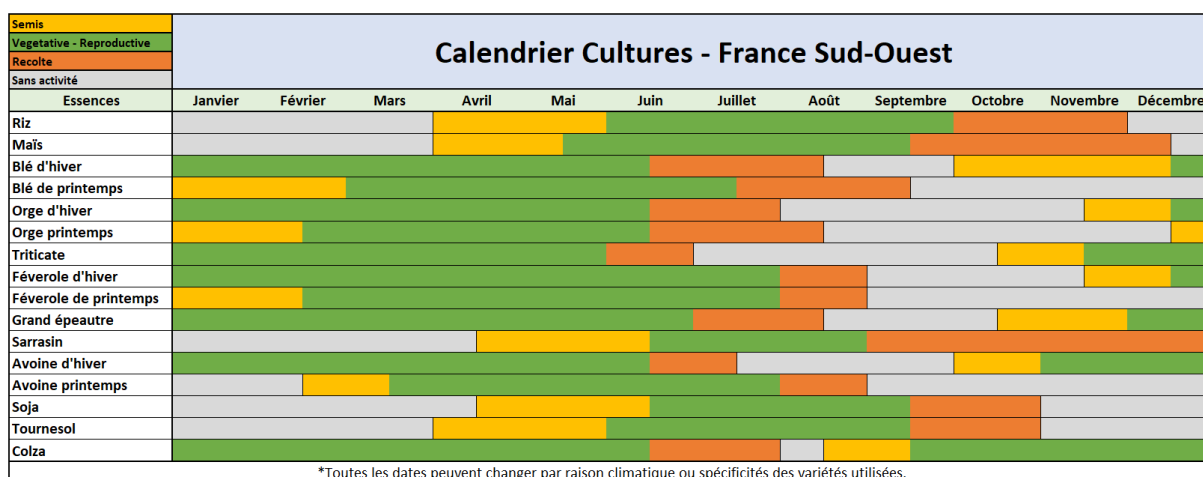
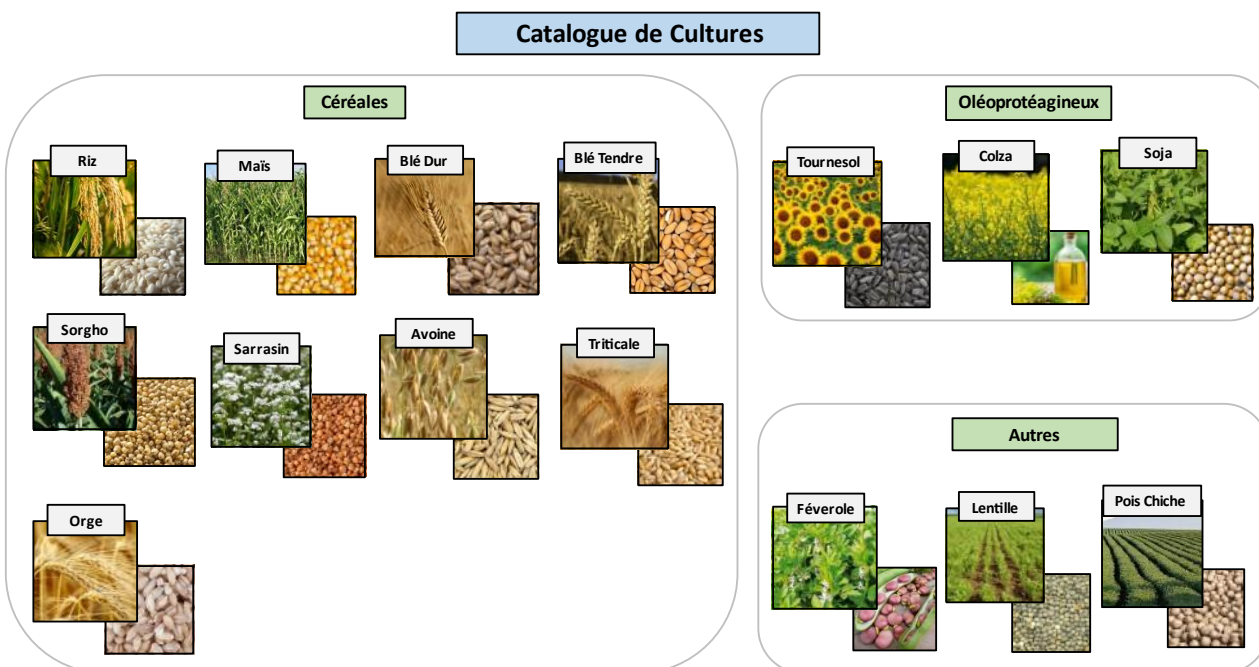


Figure 4 - Calendrier de Culture. Sources : Blé dur Sud-Ouest 2022 Arvalis Institut du Végétal; Passion Cereales; Agricultures & Territoires - Chambres d'Agriculture.

Les principales cultures

Evidement que chaque type de plante présente ses propres particularités. Chaque plante possède un mode de croissance distinct, se développant à des stades variés. De plus, elles présentent types et périodes de floraison spécifiques et requièrent des besoins nutritionnels particuliers. Chaque plante connaît également une période de croissance maximale et s'épanouit dans des conditions environnementales favorables qui lui sont spécifiques



En raison de ces caractéristiques, entre autres, il devient essentiel de mener une étude préalable sur la culture. Cette démarche vise à déterminer les meilleures périodes pour la collecte de données, et à permettre une meilleure compréhension des résultats pouvant être obtenus dans la végétation

Télédétection

Les ondes radiométriques

Les capteurs captent des bandes de données générées par des ondes électromagnétiques à différentes longueurs d'onde. Dans la plage de 0,4 à 0,7 micromètre (μm), nous trouvons les ondes du visibles (RGB). Ensuite, entre 0,7 et 0,8 μm , se situe la limite du spectre du bord rouge. Enfin, les ondes infrarouges (proche infrarouge et moyen infrarouge) s'étendent de 0,8 à 1 μm et de 1 à 2,5 μm . Au-delà de 2,5 μm jusqu'à 1 mm, on trouve les rayonnements thermiques, tandis que les rayonnements micro-ondes s'étendent de 1 mm à 13 mm (Gaussorgues, G., 1999).

En ce qui concerne le capteur multispectral, il fonctionne généralement dans la plage allant du visible au proche infrarouge. Les rayonnements électromagnétiques sont captés en raison des différences d'énergie de radiance et d'irradiance réfléchies par les cibles, un phénomène appelé réflectance. La composition de la cible influe sur les longueurs d'onde qui sont plus ou moins réfléchies. C'est à partir de là que la mesure, la classification et la détermination de la composition de la cible deviennent possibles (Gaussorgues, G., 1999).

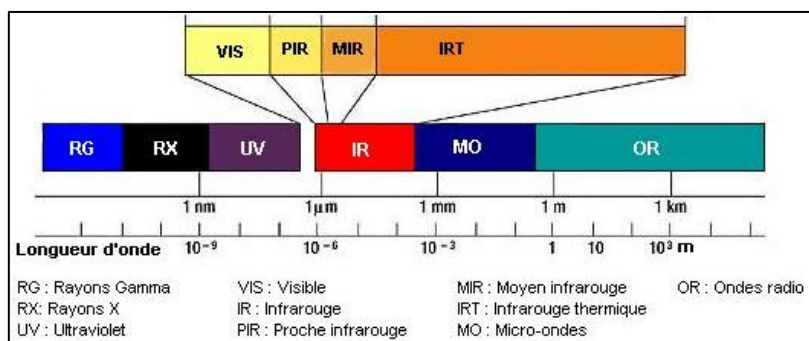
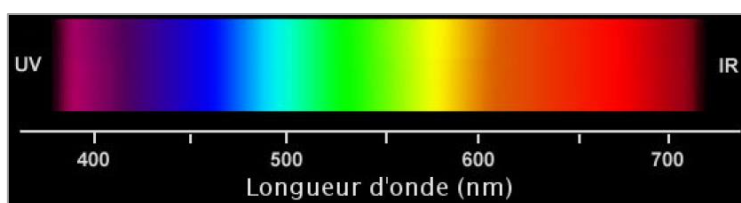
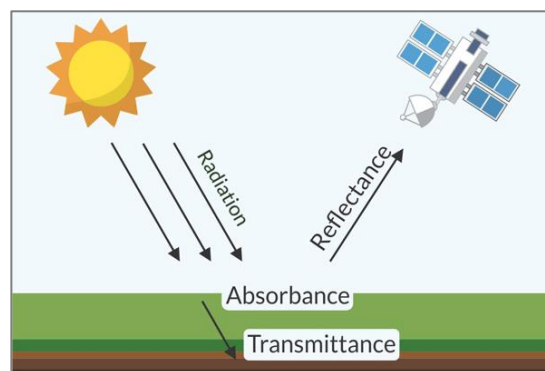
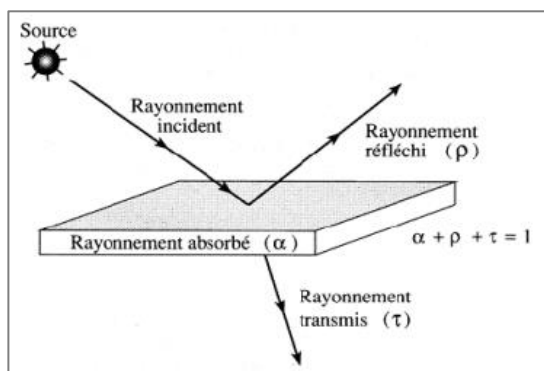


Figure 5 - (Kotchi, S. O., 2004).

Les capteurs ont la capacité de capturer diverses formes d'énergie en fonction de leur type. D'une part, ils peuvent capturer l'énergie émanant directement du corps de la cible, comme les ondes thermiques. D'autre part, ils peuvent également capter l'énergie réfléchie provenant d'autres sources, telles que les ondes LiDAR ou les rayons solaires. Il est important de noter que chaque type de mesure nécessite un type de capteur différent et des méthodes de captation variées (Cavayas, F. 2017).



Le processus de formation des ondes lumineuses implique que le soleil agisse en tant qu'émetteur d'énergie, les cibles agissant en tant qu'intermédiaires après avoir reçu cette énergie, et enfin les capteurs agissant comme récepteurs finaux. Selon la cible, elle peut adopter trois comportements distincts, générant ainsi des données variées : réflectance (rayonnement réfléchi), absorbance (rayonnement absorbé) et transmittance (rayonnement transmis). L'utilisation de ces différents types de données dépend du type de capteur utilisé. Par exemple, les capteurs thermiques utilisent des données d'absorbance, tandis que les capteurs multispectraux se basent sur les données de réflectance, ainsi que sur la transmittance. Cependant, cette dernière est généralement considérée comme nulle, étant donné que la plupart des objets sont opaques au rayonnement solaire (Cavayas, F. 2017).

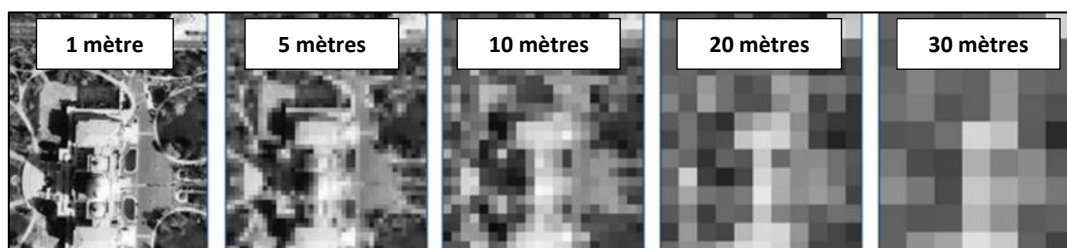


Les capteurs multispectraux jouent un rôle essentiel en capturant des données d'images matricielles basées sur la réflectivité des rayons solaires. Ils ont la capacité de séparer des segments spécifiques de longueurs d'onde à la fois dans la bande visible et non visible. Grâce à l'utilisation croisée de données entre ces segments, des indices spectraux sont calculés. En ce qui concerne les capteurs multispectraux, ils ciblent particulièrement les longueurs d'onde du proche infrarouge (qui se reflètent bien dans la végétation) et du rouge (qui montre une réflectivité basse dans la végétation). Cette distinction significative dans la réponse de la végétation à ces longueurs d'onde permet de calculer de nombreux indices de végétation (Kogan, F. N., 1995).

L'analyse différentielle des objets repose souvent sur l'utilisation d'une astuce majeure : la différence de signature spectrale de la cible. Cette signature spectrale est influencée par trois facteurs majeurs : les facteurs physiques (taille, forme, texture, température, etc.), les facteurs chimiques (composition, couleur, présence d'oxydes, etc.) et les facteurs environnementaux (humidité, pression atmosphérique, présence de gaz, etc.). Ces éléments convergent pour créer un changement distinct dans la signature spectrale. Cela permet la détection différenciée des différents objets de désir en fonction de leurs caractéristiques spécifiques (Maes, W. H., 2019).

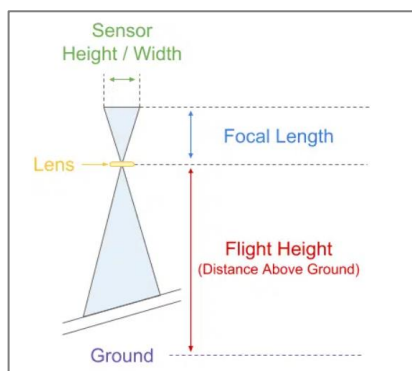
Résolution spatiale

La résolution spatiale correspond à l'unité minimale d'échantillonnage capturée pour représenter une image numérique qui reflète la réalité à une échelle donnée. Cette donnée, en conjonction avec un bon contraste d'image, permet de déterminer si une cible sera visible ou non sur le sol. Il est important de noter qu'un objet peut être détecté à une certaine résolution spatiale, mais il pourrait ne pas être identifiable en raison de sa taille par rapport à l'échelle de l'image (Cavayas, F. 2017).



La résolution des images aériennes est exprimée par le terme Ground Sample Distance (GSD). Trois facteurs majeurs influencent cette résolution : la qualité de la caméra, l'altitude de vol et les caractéristiques du sol.

En ce qui concerne la qualité de la caméra et le calcul de la résolution d'image, plusieurs informations sont à prendre en considération : le nombre de mégapixels échantillonnés par le capteur, l'ouverture de la caméra, la distance focale, la présence de stabilisation, le type d'obturateur et la taille du capteur.



Enfin, il convient de noter que les caractéristiques du sol ainsi que la hauteur de vol peuvent avoir une incidence sur la qualité de l'image, étant donné que la distance par rapport au sol et le relief jouent un rôle dans la capacité d'observation détaillée. Pour ce faire, il est essentiel de maîtriser la contre-mesure en ajustant la distance focale du capteur, ce qui redéfinit à la fois la résolution d'image et l'étendue de la zone imagée (Edgard G. B. Trindade, 2022).

Résolution radiométrique

La résolution radiométrique se rapporte à la diversité de nuances de couleurs présentes dans l'échantillonnage des images numériques. À mesure que la résolution radiométrique s'accroît, davantage de contraste et d'informations distinctes deviennent visibles dans l'image (Cavayas, F. 2017).

| Resolution (bits) | Quantités de nuances des couleurs possibles |
|-------------------|---|
| 8 | 256 |
| 16 | 65 536 |
| 32 | 4 294 967 296 |
| 64 | 18 446 744 073 709 551 616 |

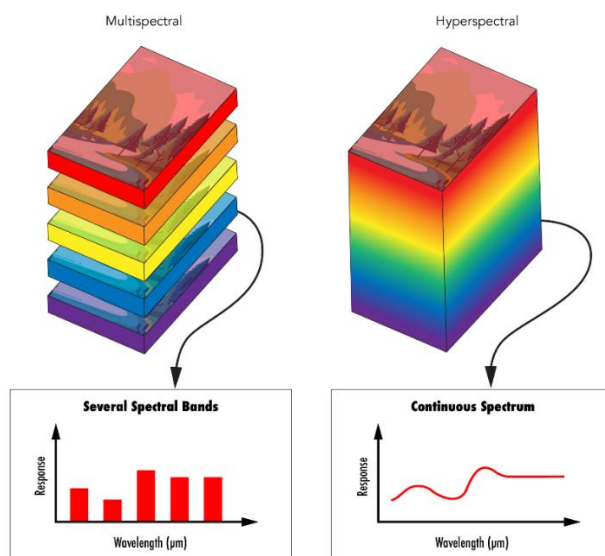
De plus, lors de l'enregistrement des données dans un fichier, il est nécessaire de sélectionner un format de données approprié. Le choix du format dépend principalement de la taille et de la qualité des informations générées, ainsi que du type et de la qualité de l'équipement de lecture auquel le lecteur aura accès pour consulter les données ultérieurement.

Tableau 1 - Types de Données numérique.

| Types de Données | | |
|------------------|----------------------------|--|
| Data type | Description | Value/Range |
| bool | Boolean stored as a byte. | True or False |
| int | Default integer type. | Same as C long; normally either int64 or int32. |
| intc | Identical to C int. | Normally int32 or int64. |
| intp | Integer used for indexing. | Same as C ssize_t; normally either int32 or int64. |
| int8 | Byte. | -128 to 127 |
| int16 | Integer. | -32768 to 32767 |
| int32 | Integer. | -2147483648 to 2147483647 |
| int64 | Integer. | -9223372036854775808 to 9223372036854775807 |
| uint8 | Unsigned integer. | 0 to 255 |
| uint16 | Unsigned integer. | 0 to 65535 |
| uint32 | Unsigned integer. | 0 to 4294967295 |
| uint64 | Unsigned integer. | 0 to 18446744073709551615 |
| float | Shorthand for float64. | |
| float16 | Half precision float. | sign bit, 5 bits exponent, 10 bits mantissa |
| float32 | Single precision float. | sign bit, 8 bits exponent, 23 bits mantissa |
| float64 | Double precision float. | sign bit, 11 bits exponent, 52 bits mantissa |
| complex | Shorthand for complex128. | |
| complex64 | Complex number, | two 32-bit floats (real and imaginary components) |
| complex128 | Complex number, | two 64-bit floats (real and imaginary components) |

Résolution spectrale

La résolution spectrale concerne la quantité de fréquences contenues dans une représentation. Cette représentation peut être composée de groupements (bandes) ou même d'une représentation tridimensionnelle complète de la signature spectrale entière de la cible, connue sous le nom de "data cube". Les capteurs hyperspectraux fournissent ce type de données sans limites en bandes et avec une grande représentation de fréquences (haute résolution spectrale), tandis que les capteurs multispectraux proposent un ensemble d'environ une demi-douzaine de bandes (basse ou moyenne résolution spectrale) (Cavayas, F. 2017).



Résolution temporelle

La résolution temporelle se réfère à l'intervalle entre les prises de données, par exemple : plus l'écart entre les dates des images capturées est grand, plus la résolution temporelle est faible. En d'autres termes, elle indique la fréquence à laquelle l'équipement de capture est utilisé dans une zone pour la collecte de données (Cavayas, F. 2017).

Calibration radiométrique (Correction Radiométrique)

Lorsqu'un drone équipé de capteurs multispectraux est utilisé, le capteur de luminosité ou une image d'étalonnage est employé pour ajuster le rayonnement réfléchi et corriger d'éventuelles erreurs de réflectance du capteur. Ces données sont prises en compte pendant la journée de vol, et les algorithmes sont ensuite utilisés pour ajuster la perception des ondes radiométriques en fonction de la luminosité au moment du vol (Cavayas, F. 2017).

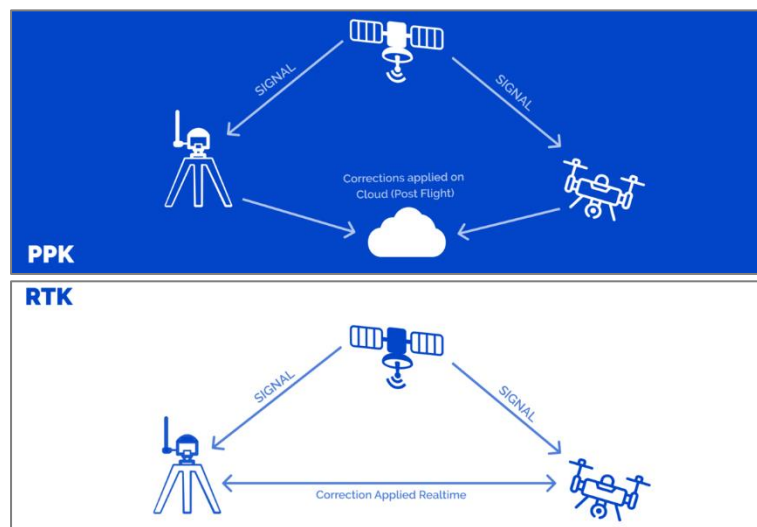


Figure 6 - Panneau d'étalonnage radiométrique et capteur de lumière solaire.

Les données générées par le drone à partir du capteur de lumière solaire intégré dans le drone et enregistrant les informations de luminosité pendant les prises de vue, jouent un rôle crucial. Ces données sont utilisées pour corriger la radiation solaire enregistrée par la caméra et effectuer une compensation pendant le traitement des images. Cette démarche vise à obtenir des données plus précises et plus cohérentes dans l'ensemble du processus.

Calibration géométrique (Correction Géométrique)

La précision géographique est cruciale pour les études multitemporelles. Le géoréférencement peut être réalisé de deux manières principales : en temps réel (Real-Time Kinematic - RTK) où le drone reçoit des corrections en temps réel d'une station GNSS fixe pour une localisation précise, ou post-traité (Post-Processed Kinematic - PPK) où les données de localisation enregistrées sont corrigées ultérieurement pour obtenir des coordonnées précises. Ces méthodes assurent une localisation précise des données collectées par le drone (Assmann, J. J., et al. 2018).



De plus, l'utilisation de points de contrôle au sol (ground control points - GCP) implique des points de repère précis avec des marquages au sol. Ces points servent de référence pour corriger les erreurs de positionnement dans les images. En utilisant les coordonnées précises des GCP, le logiciel de traitement géoréférence les images, améliorant ainsi la précision géographique des données (Assmann, J. J., et al. 2018).

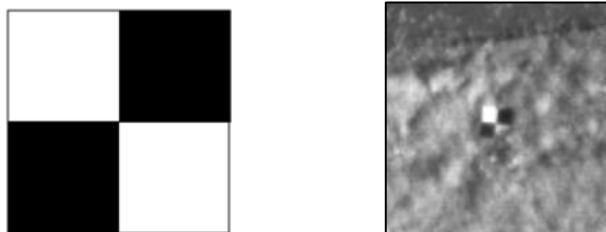


Figure 7 - Exemple de GCP (Assmann, J. J., et al. 2018).

Correction Atmosphérique

Bien que ce ne soit pas un problème directement lié aux captures de données par drone grâce à l'altitudes de vol qui ne sont pas influencées par les gaz atmosphériques, il existe deux types de réflectance à considérer : la réflectance TOA (Top-of-Atmosphere), qui englobe les mesures de rayonnement provenant de l'atmosphère avant tout

effet atmosphérique, et la réflectance BOA (Bottom-of-Atmosphere), qui concerne les données corrigées pour prendre en compte les effets atmosphériques et la distance entre l'objet et le capteur. Cette correction permet d'obtenir des valeurs plus précises des propriétés de surface des objets observés (PEDDLE, Derek R., 2001).

Correction Radiométrique

Pour quantifier les données, les rayonnements lumineux sont d'abord exprimés sous forme de nombres digitaux (ND), liés à la résolution radiométrique. Ensuite, ces données sont converties en réflectance en prenant en compte les corrections nécessaires (comme la correction atmosphérique ou la calibration radiométrique) et les caractéristiques spécifiques des capteurs et des bandes spectrales. Les données de réflectance sont exprimées en pourcentage, car elles représentent une proportion relative d'énergie qui a atteint la cible et a été renvoyée. Ce processus assure des valeurs comparables et significatives pour l'analyse des propriétés des matériaux et des surfaces (PEDDLE, Derek R., 2001).

Orthorectification

En raison de la projection conique des objectifs des caméras, les images peuvent subir des distorsions de perspective, notamment sur les bords, et une absence d'angle de vue direct (nadir) pour les cibles éloignées du centre. Pour corriger cela, les images sont prises avec un chevauchement élevé entre les photos pour capturer différentes perspectives. En analysant ces images avec un traitement approprié, une image finale est générée, visant à placer les éléments dans une perspective la plus perpendiculaire possible et sans distorsion.

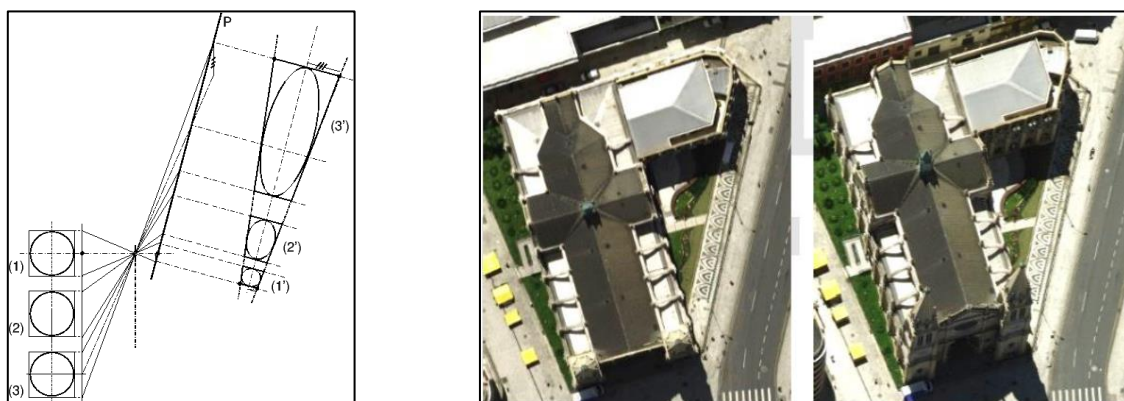
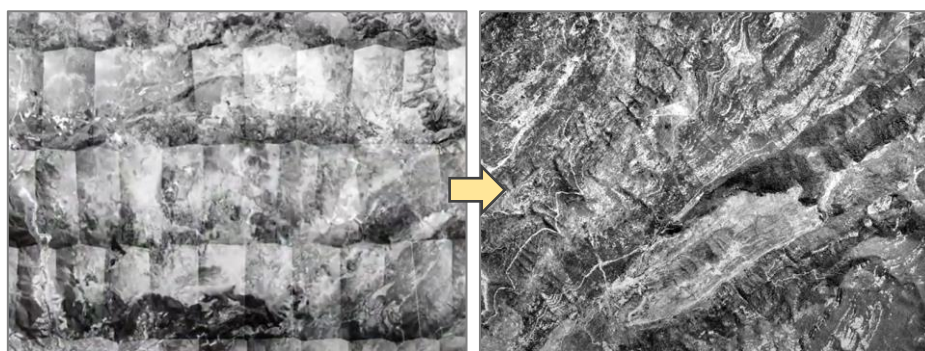


Figure 8 - Déformation de la perspective (Source : Associação Nacional de Empresas de Aerolevantamentos - ANEA)

Surtout lors de vols à haute altitude ou dans des zones présentant des variations importantes de relief ou des objets de grande taille, l'effet de distorsion de la perspective est encore plus marqué. Pour résoudre cela, les images sont corrigées en utilisant des modèles numériques de terrain (MNT) et des informations géométriques de l'image. Cette correction vise à représenter la surface terrestre de manière précise, sans distorsion, améliorant ainsi la précision et l'alignement des données géospaciales (Aguiar, V. X., 2022).

Egalisation Radiométrique

Le traitement d'égalisation radiométrique corrige les différences de luminance entre images capturées à différents moments et conditions lumineuses. Il ajuste les valeurs de pixel, notamment sur les bords, pour normaliser les variations de luminosité. Cette cohérence améliorée entre les données facilite la fusion d'images adjacentes.



Glissement, brouillage fusion et alignement d'images multispectrales

Le traitement de correction de glissement et d'interférence d'images multispectrales implique l'alignement et l'ajustement des images pour corriger les variations de position, d'orientation et d'échelle. Cela assure une meilleure superposition et cohérence entre les images, même entre différentes bandes. De plus, en cas de problèmes persistants liés à la vitesse de vol, des vols croisés peuvent être réalisés pour obtenir plus de données et résoudre les problèmes (Assmann, J. J., et al. 2018).

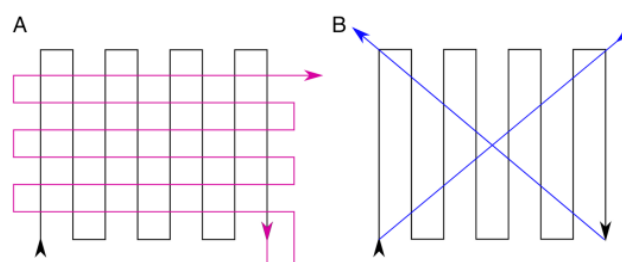


Figure 9 - (Assmann, J. J., et al. 2018).

Les conditions optimales pour la collecte de données

Les paramètres de vol englobent les informations techniques et environnementales essentielles pour optimiser la qualité de la collecte de données. Ils incluent des éléments tels que la zone de chevauchement entre les images, le moment idéal dans la journée pour le vol en fonction du capteur, les conditions météorologiques, l'altitude de vol, la vitesse, et d'autres facteurs. Ces paramètres jouent un rôle crucial pour prévenir les problèmes lors de la capture des images nécessaires pour les analyses ultérieures (Assmann, J. J., et al. 2018).

Les conditions climatiques optimales pour le capteur multispectral, par exemple, comprennent des journées avec peu de nuages et des vents en dessous de 25 km/h (Salamí, E., et al., 2014). Les vols sont recommandés autour de midi solaire, avec une marge de 2 à 3 heures, et le capteur doit être positionné perpendiculairement au sol, avec un chevauchement d'au moins 75% entre les images capturées (Assmann, J. J., et al. 2018).

En règle générale, la période de l'année présentant la plus grande activité végétative de chaque culture est idéale pour la collecte de données multispectrales. Cependant, le choix dépend largement des objectifs spécifiques des études à réaliser.

| Meilleures conditions pour la capture de données multispectral | | |
|--|--|---|
| Paramètres | | Observations |
| Horaire | Midi solaire (± 2 ou 3 heures) | Ensoleillement minimum acceptable |
| Angle solaire | Minimum 30° | Aussi perpendiculaire que possible |
| Climat | Ensoleillé Rafales maximum de 25 km/h | Peu de vents, nuages, neige, pluie et brouillard. |
| Altitude | Entre 40 et 100 mètres d'altitude | Aussi près que possible, en fonction de l'objectif du travail et de la hauteur de vol autorisé |
| Date | Champ agricole avec végétation | Il dépend de la culture, de la région et du but du travail |
| Angle | Plus perpendiculaire possible | Nadir (90%) pour avoir moins de distorsion |
| Chevauchement | Minimum 75% | Valeur élevée car elle évite la perte de données en cas d'échec de capture d'image et améliore la formation d'ortho-image |
| Vitesse | De 5 à 10 mètres par seconde | Dépend du type de terrain de travail |
| Résolutions | Entre 2 et 15 cm | Pour atteindre l'objectif du travail, il est crucial de prêter attention à la relation entre la résolution et l'échelle de travail. |
| *Les paramètres peuvent changer par rapport des influences externes. | | |

Selon les recommandations de la marque DJI, les vols avec le quadricoptère DJI Mavic 3M RTK, équipé d'un capteur RVB CMOS 4/3 de 20 MP et de 4 capteurs multispectraux de 5 MP (vert, rouge, rouge et proche infrarouge), nécessitent une attention particulière à l'altitude de vol choisie en fonction de la zone de vol. Cette altitude peut avoir un impact sur les résultats obtenus, par exemple, un vol à 50 mètres du sol produit des images avec une résolution de 2,4 cm/pixel (El Imanni, H. S., et al., 2023), tandis qu'un vol à 217 mètres d'altitude offre une résolution de 5,73 cm pour la partie visible et de 10 cm pour le multispectral (DJI Mavic 3M, 2023). De plus, les paramètres de traitement des données doivent être pris en compte, car ils peuvent également influencer la résolution du produit final.

Capteur Multispectral

Il existe de nombreux types de capteurs pour la capture de données géographiques. Parmi eux, le capteur multispectral est largement utilisé pour l'agriculture de précision et l'analyse de la végétation. Ce type de capteur est spécialement conçu pour détecter sélectivement différentes fréquences d'ondes, permettant ainsi le calcul de paramètres de santé des plantes. Lorsqu'utilisées avec une résolution temporelle et spatiale adéquate en fonction de l'échelle de travail, ces données peuvent fournir des informations précieuses pour surveiller la santé des cultures et même prévoir des informations sur la parcelle étudiée (Kotchi, S. O., 2004).

Les bandes et les signatures spectrales

Les bandes spectrales sont constituées de regroupements de fréquences d'ondes qui servent à distinguer les couleurs visibles ou invisibles. Habituellement exprimées en Hertz (Hz), ces fréquences d'onde sont également mesurées en micromètres (μm, 10⁻⁶ mètres) pour les basses fréquences.

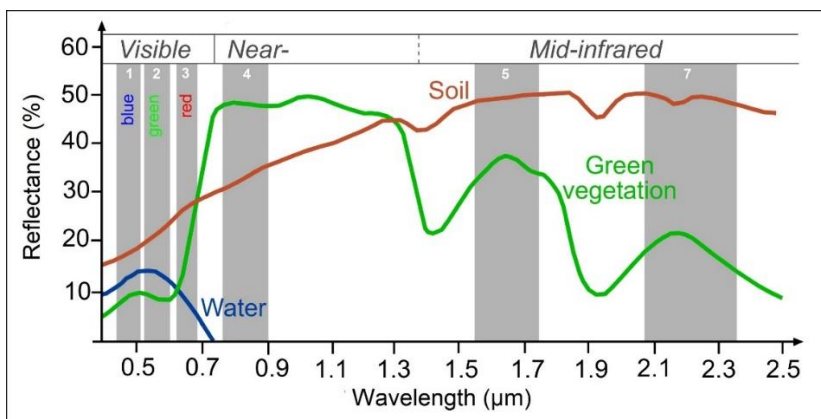
$$c = \lambda \times f$$

c = vitesse de la lumière ; **λ** = longueur d'onde ; **f** = fréquence

La relation entre la fréquence et la longueur d'onde de la lumière est inversement proportionnelle, étant donné que la vitesse de la lumière est une constante. À mesure que la fréquence augmente, la longueur d'onde diminue, et vice versa. Cette relation joue un rôle clé dans la caractérisation des propriétés spectrales des matériaux. En effet, différentes substances présentent des comportements distincts de réflectance et d'absorption à des fréquences ou longueurs d'onde spécifiques de lumière. C'est cette interaction entre la signature spectrale des cibles et les fréquences lumineuses qui permet aux capteurs de détecter et d'analyser des matériaux en se basant sur leurs propriétés spectrales uniques.

| Bandes DJI Mavic 3M | |
|-------------------------|-------------|
| Bande | Fréquence |
| Vert (G) | 560 ± 16 nm |
| Red (R) | 650 ± 16 nm |
| Red edge (RE)b | 730 ± 16 nm |
| Infrarouge proche (NIR) | 860 ± 26 nm |

Chaque longueur d'onde est sensible à des matériaux spécifiques. Lorsqu'on capture dans plusieurs bandes, le rayonnement électromagnétique avec la plus grande réflectance pour la végétation inclut le bord rouge et le proche infrarouge. En ce qui concerne les sols, l'infrarouge moyen est généralement optimal, sauf exceptions, tandis que l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) est idéal pour détecter l'eau (Zisi, T., et al., 2018).



Après avoir ajusté et adapté les données de réflectance acquises, elles peuvent être utilisées pour générer des interprétations individuelles ou des calculs inter-bandes.

Le sol

L'identification du sol repose sur la détection de sa composition ou de la concentration des matériaux. Plusieurs facteurs influencent la réflectivité des sols, tels que leur texture, leur état de surface, leur composition, leur humidité, leur teneur en oxyde de fer, en matière organique, et autres. (Cavayas, F. 2017).

| Comparaison des Réflectances des Sols | |
|--|-------------|
| Les caractéristiques du sol | Réflectance |
| Grossière | ↑ |
| Pales (+ limon) | |
| - Humidité | |
| - Matière organique | |
| - Labourés | |
| + Oxyde de fer | ↓ |
| Fine | |
| Foncé (+ argile) | |
| + Humidité | |
| + Matière organique | |
| + Labourés | |
| - Oxyde de fer | |
| *Réflectance plus fort dans l'infrarouge que dans le visible | |

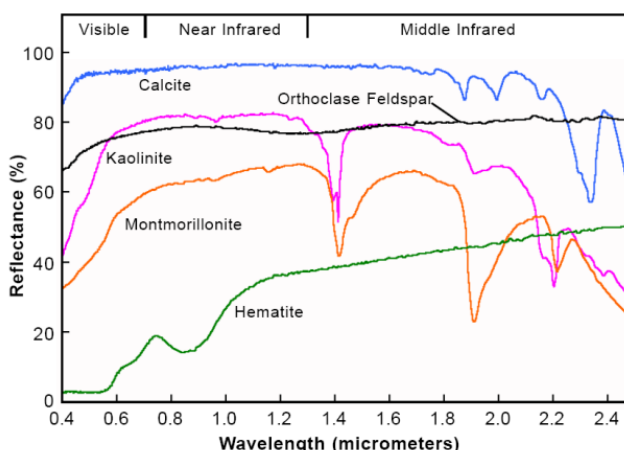


Figure 10 – Différences de la réflectance par rapport la composition (Cavayas, F. 2017, e Analyse spectrale ENVI).

La présence de matière organique en quantité suffisante, par exemple à un minimum de 2%, se manifeste par une coloration plus sombre du sol et une réflectance plus faible à toutes les fréquences, notamment aux hautes fréquences (Krishnan, P., et al., 1980).

La végétation

L'identification de la végétation est principalement basée sur l'évaluation de l'état de la surface des feuilles, laquelle est directement influencée par la santé de la plante, son activité chlorophyllienne et sa concentration en eau. En présence d'une végétation saine, les fréquences du bord du rouge et du proche infrarouge sont fortement réfléchies, tandis que dans le spectre de la lumière visible, elles sont largement absorbées.

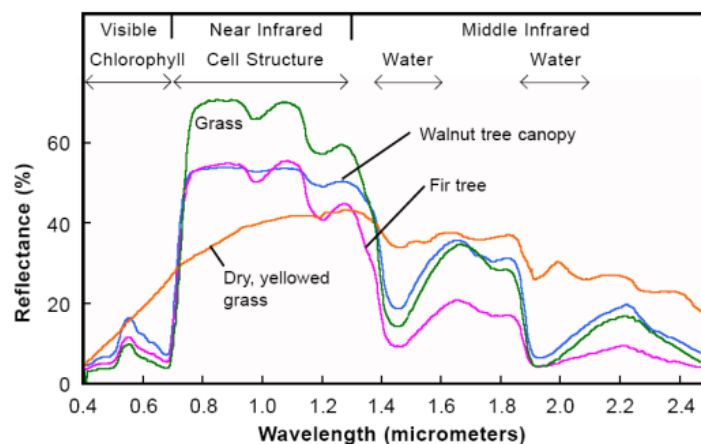


Figure 11 - (Analyse spectrale ENVI)

L'analyse de l'histogramme permet d'évaluer la santé et l'activité chlorophyllienne des plantes, ce qui conduit à une déduction de leur vigueur. Par le biais d'analyses temporelles ou spatiales sur des parcelles complètes, il devient possible d'identifier les zones ou les périodes de l'année caractérisées par une productivité variable, mettant en évidence à la fois les zones à faible productivité et celles soumises à un stress particulier (Cavayas, F. 2017).

L'eau

La perception de l'eau à travers les données de réflectance diffère de celle des autres éléments, étant fondée sur l'absence de réflectance (avec une exception lorsque les fréquences infrarouges courtes - SWIR). L'eau à l'état liquide affiche une faible réflectance dans le spectre visible, qui devient encore plus faible dans l'infrarouge proche. Une méthode courante pour caractériser différents corps d'eau consiste à identifier la concentration de matières en suspension, qui diffèrent dans la réflectivité (Cavayas, F. 2017).

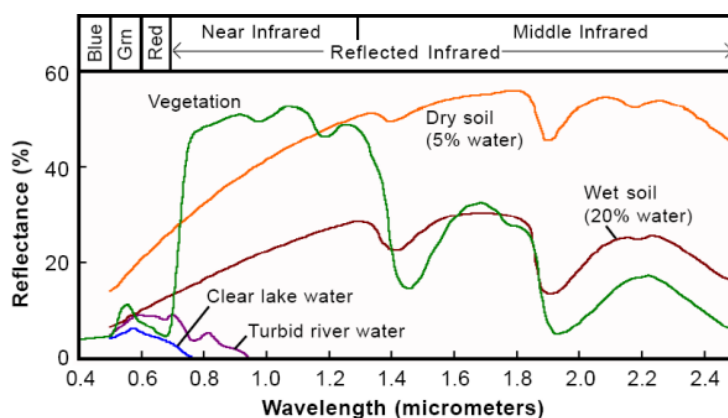


Figure 12 - (Analyse spectrale ENVI)

Matériaux artificiels

En règle générale, les matériaux artificiels présentent une faible réflectance dans les fréquences du proche infrarouge, tandis que leur réflectance varie dans d'autres bandes spectrales en fonction de leur composition et de leur surface. Typiquement, leur identification se fait par élimination, une fois que les cibles bien connues sont identifiées, sauf dans les cas où des analyses spécifiques sont entreprises pour les distinguer en profondeur.

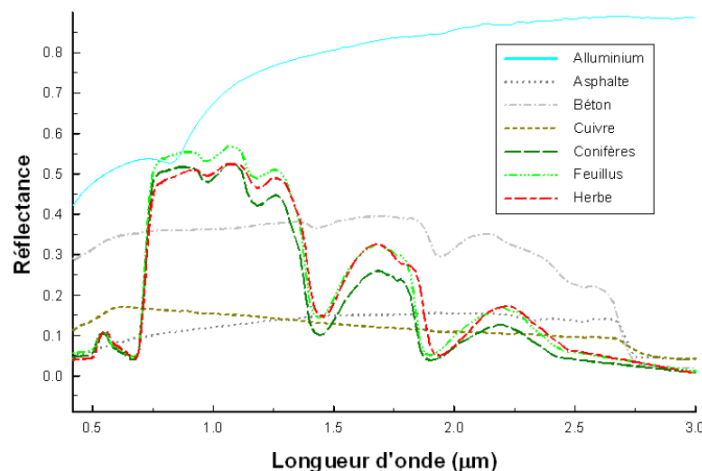


Figure 13 - Signature spectrale des différents matériaux (Cavayas, F. 2017).

Indices de végétation

L'analyse végétale est fréquemment abordée par l'utilisation d'indices de végétation (IV), qui se concentrent sur les fréquences où la végétation réagit de manière significative, notamment le bord rouge et le proche infrarouge. Ces données peuvent être combinées avec d'autres réponses spectrales pour créer des indices pertinents (Ferreira, L. G., et al., 2008).

L'utilisation fréquente de capteurs multispectraux, qui différencient les différentes bandes du spectre, vise principalement à identifier la santé des plantes et à détecter les altérations résultant d'anomalies dans la culture.

Pour des analyses plus avancées qui exploitent les mesures radiométriques, une approche étudiée consiste à évaluer les variations spatiales et temporelles, ce qui permet de mieux comprendre l'activité photosynthétique de la végétation à différentes étapes de croissance. Ces mesures sont étroitement liées à la vigueur et à la santé des cultures. Les données préalablement collectées jouent un rôle essentiel dans la prédiction de la production agricole, par exemple. Ces calculs impliquent fréquemment des combinaisons linéaires de divers facteurs (Caloz, R. et al., 1996).

NDVI

Le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), indice de végétation plus largement connu qui analyse en général la santé de la végétation, travaille dans la gamme de valeurs comprises entre -1 et 1, où généralement les valeurs positives et supérieures à 0,6 indiquent une croissance végétative en pleine croissance et une activité chlorophyllienne élevée, des valeurs comprises entre 0,4 et 0,6 indiquent une croissance végétative médiane comprise entre 0,2 et 0,4 indicateur végétal à faible croissance, entre 0 et 0,2 indique un végétal mort ou nu et en dessous de 0 indique un matériel non végétal tel que le sol nu. Cependant, ces valeurs peuvent varier et s'adapter en fonction des différentes études et contextes. (Pettorelli, N., et al., 2005 et Goward, S. N., et al., 1991).

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

GNDVI

Le Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) est un indice de végétation axé sur la réflectivité dans la bande verte du spectre électromagnétique, au lieu de la bande rouge. Il varie entre 0 et 1, et il est utilisé pour évaluer la santé et la densité de la végétation. Des valeurs élevées indiquent une végétation saine et dense, tandis que des valeurs plus faibles peuvent suggérer une végétation moins vigoureuse ou d'autres types de surfaces (Hunt, E. R., et al., 2008).

$$GNDVI = \frac{(PIR - V)}{(PIR + V)}$$

SAVI

Le Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) est un dérivé du NDVI, conçu pour atténuer l'effet de la couverture du sol dans les données de végétation. Échelonné de -1 à 1, il élimine les effets du sol nu, de la saturation végétale et de l'humidité dans l'analyse de la végétation, où des valeurs négatives et inférieures indiquent une végétation moins présente. Intégrant la variable "L" entre 0 et 1, le SAVI s'adapte aux conditions de couverture du sol et de végétation, avec une valeur élevée de L (proche de 1) adaptée aux zones denses en végétation, et une valeur basse (proche de 0) aux zones à faible couverture végétale (Huete, A. R., 1988 et Qi, J., et al., 1994).

$$SAVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R + L)} \times (1 + L)$$

NDRE

Le Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) est une alternative au classique NDVI, conçue pour évaluer aussi la santé et la densité de la végétation en mettant en évidence les variations liées à la concentration de chlorophylle et aux changements physiologiques des plantes. Il se base sur les données de fréquences du bord rouge (RE) du spectre électromagnétique, plutôt que sur la bande rouge (R). Le NDRE est largement utilisé pour analyser la végétation en mi-saison et en fin de saison.

Ces valeurs typiques se situent dans la plage de -1 à 1. Les valeurs élevées et positives du NDRE sont indicatives d'une concentration élevée de chlorophylle et d'une végétation vigoureuse, tandis que les valeurs plus basses peuvent être liées à une concentration réduite de chlorophylle et à une végétation moins robuste.

$$NDRE = \frac{(PIR - BR)}{(PIR + BR)}$$

NDWI

Le Normalized Difference Water Index (NDWI), fréquemment employé pour détecter les masses d'eau, peut aussi être utilisé pour surveiller les variations dans la teneur en eau des feuilles. Pour identifier les étendues d'eau, il utilise les bandes verte et infrarouge proche, tandis que pour surveiller les changements dans la teneur en eau des feuilles, il recourt aux longueurs d'onde du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR). En termes d'interprétation des valeurs, une plage de -1 à 0 représente une surface réfléchissante sans végétation ni teneur en eau, tandis que les valeurs positives indiquent la saturation en eau (Gao, B. C., 1996).

$$NDWI = \frac{(PIR - SWIR)}{(PIR + SWIR)}$$

GCI

Le Green Chlorophyll Vegetation Index (GCI) c'est une indice de vegetation qui mesure le teneur en chlorophylle des feuilles, puisque ce teneur indique la santé de la plante et **peut indiquer le degré de stress** de la plante.

$$GCI = \left(\frac{PIR}{V} \right) - 1$$

CVI

Le Chlorophyll vegetation index (CVI) est utilisé pour évaluer la quantité de chlorophylle présente dans les plantes. Le CVI permet de détecter la santé et la vigueur des végétaux, car une concentration élevée de chlorophylle est associée à une croissance optimale.

$$CVI = \left(\frac{PIR \times R}{V^2} \right)$$

Références

- Squire, G. R., Ong, C. K., & Monteith, J. L. (1987). Crop Growth in Semi-Arid Environments. In *Proceedings of the International Pearl Millet Workshop: 7-11 April 1986, ICRISAT Center, India* (p. 219). The Institute.
- Robertson, M. J. (1991). Water extraction by field-grown grain sorghum.
- Kotchi, S. O. (2004). *Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge : Application à la culture de la pomme de terre* (Doctoral dissertation, Université Laval).
- Seelan, S. K., Laguet, S., Casady, G. M., & Seielstad, G. A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote sensing of environment*, 88(1-2), 157-169.
- Katerji, N., Bruckler, L., & Debaeke, P. (2002). L'eau, l'agriculture et l'environnement. Analyse introductive à une réflexion sur la contribution de la recherche agronomique. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, (46), 39-50.
- Luquet, D. 2002. Suivre de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique - analyse expérimentale et modélisation 3d de la variabilité des températures au sein d'une culture en rang de cotonniers : Institut National Agronomique Paris-Garignon, Paris.
- Caloz, R., & Puech, C. (1996). Hydrologie et imagerie satellitaire. *Précis de télédétection : vol. 2 : applications thématiques, Bonn F.*, 161-195.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Neupane, K., & Baysal-Gurel, F. (2021). Automatic identification and monitoring of plant diseases using unmanned aerial vehicles: A review. *Remote Sensing*, 13(19), 3841.
- De Castro, A. I., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Jiménez-Brenes, F. M., Csillik, O., & López-Granados, F. (2018). An automatic random forest-OBIA algorithm for early weed mapping between and within crop rows using UAV imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 285.
- Zisi, T., Alexandridis, T. K., Kaplanis, S., Navrozidis, I., Tamouridou, A. A., Lagopodi, A., ... & Polychronos, V. (2018). Incorporating surface elevation information in UAV multispectral images for mapping weed patches. *Journal of Imaging*, 4(11), 132.
- El Imanni, H. S., El Harti, A., Bachaoui, E. M., Mouncif, H., Eddassouqui, F., Hasnai, M. A., & Zinelabidine, M. I. (2023). Multispectral UAV data for detection of weeds in a citrus farm using machine learning and Google Earth Engine: Case study of Morocco. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100941.
- Gaussorgues, G. (1999). Infrared thermography. Principles, technologies, applications. La thermographie infrarouge. Principles, technologies, applications.
- Heuer, B., & Nadler, A. (1998). Physiological response of potato plants to soil salinity and water deficit. *Plant science*, 137(1), 43-51.
- Sona, G., Passoni, D., Pinto, L., Pagliari, D., Masseroni, D., Ortuani, B., & Facchi, A. (2016). UAV multispectral survey to map soil and crop for precision farming applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 1023-1029.
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136.

- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote sensing*, 7(4), 4026-4047.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Assmann, J. J., Kerby, J. T., Cunliffe, A. M., & Myers-Smith, I. H. (2018). Vegetation monitoring using multispectral sensors—Best practices and lessons learned from high latitudes. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(1), 54-75.
- Salamí, E., Barrado, C., & Pastor, E. (2014). UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. *Remote Sensing*, 6(11), 11051-11081.
- Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in plant science*, 24(2), 152-164.
- Mahlein, A. K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant disease*, 100(2), 241-251.
- Du, M., & Noguchi, N. (2017). Monitoring of wheat growth status and mapping of wheat yield's within-field spatial variations using color images acquired from UAV-camera system. *Remote sensing*, 9(3), 289.
- De Fertilizantes, C. C. P. (1994). *Informações anuais-IAN*. Rio de Janeiro, Comissão de Valores Mobiliários.
- Statistique agricole annuelle (SAA), La statistique, l'évaluation et la prospective du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2020
- Krishnan, P., Alexander, J. D., Butler, B. J., & Hummel, J. W. (1980). Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 44(6), 1282-1285.
- Edgard G. B. Trindade; "O Que é GSD No Mapeamento Aéreo Com Drones?" *GéoSense*; 2022. Source < <https://geosense.net.br/2022/09/15/o-que-e-gsd-no-mapeamento-aereo-com-drones/> > Accédé en 04/2023.
- Rani, A. L. K. A., Chaudhary, A. M. R. E. S. H., Sinha, N., Mohanty, M., & Chaudhary, R. (2019). Drone: The green technology for future agriculture. *Harit Dhara*, 2(1), 3-6.
- Ferreira, L. G., Ferreira, N. C., & Ferreira, M. E. (2008). Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 30(4), 379-390.
- Goward, S. N., Markham, B., Dye, D. G., Dulaney, W., & Yang, J. (1991). Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High-Resolution Radiometer. *Remote sensing of environment*, 35(2-3), 257-277.
- Passion Céréales, mai 2020 / Création : God Save The Queen / Rédaction : Séance Publique / Iconographie : De Bouche à Oreilles Crédits photos : Fotolia (Adrien Roussel, chris32m arenysam, pincasso, Artem Shadrin, PHB.cz).
- DOMINGUES FRANCESCHINI, Marston Héracles, BARTHOLOMEUS, Harm, VAN APELDOORN, Dirk, et al. Correction : Domingues Franceschini, MH; et al. Intercomparison of Unmanned Aerial Vehicle and Ground-Based Narrow Band Spectrometers Applied to Crop Trait Monitoring in Organic Potato Production. *Sensors* 2017, 17, 1428. *Sensors*, 2017, vol. 17, no 10, p. 2265.
- Chambre d'Agriculture - AGRI'SCOPIE OCCITANIE, 2021. Sur < <https://occitanie.chambre-agriculture.fr/productions-techniques/cultures/grandes-cultures/agricopie-2021-grandes-cultures/> >
- Institut national de la statistique et des études économiques (Insee), Estimation de la population au 1^{er} janvier 2023, 2023.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.

Hunt, E. R., Hively, W. D., Daughtry, C. S., McCarty, G. W., Fujikawa, S. J., Ng, T. L., ... & Yoel, D. W. (2008, November). Remote sensing of crop leaf area index using unmanned airborne vehicles. In *Proceedings of the Pecora* (Vol. 17, pp. 18-20).

Science Education through Earth Observation for High Schools (SEOS). Sur: <https://seos-project.eu/agriculture/agriculture-c00-p02.fr.html>. Accès en: 12/04/2023.

SRINIVASA RAO, Ch, VENKATESWARLU, B., WANI, Suhas P., et al. Benefits from micro and secondary nutrients: impacts on farm income and livelihoods in rainfed tribal and backward regions of Andhra Pradesh. 2011.

PRIMICERIO, Jacopo, DI GENNARO, Salvatore Filippo, FIORILLO, Edoardo, et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 2012, vol. 13, no 4, p. 517-523.

Calmettes, S., Réjaud, D., Dubosc, N., Roubière, M., GRANDES CULTURES 2022 : LA FILIÈRE EN DYNAMIQUE - LES DOSSIERS D'AGRI'SCOPIE, réalisation PEP Occitanie et Chambre d'Agriculture, 2022.

Chambres d'Agriculture d'Occitanie, L'économie agricole en Occitanie, Production du Pôle Economie et Prospective, 2023.

RENZDÖRFFER, G. J., ENGEL, A., et TEICHERT, B. The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, vol. 31, no B3, p. 1207-1214.

Cavayas, F., TÉLÉDÉTECTION NUMÉRIQUE - Typologie des images numériques, 2017, Sur <https://docplayer.fr/55187903-Module-1-typologie-des-images-numeriques-francois-cavayas-geo2522-teledetection-numerique.html>

DJI Mavic 3M, Voyez davantage, travaillez plus intelligemment, 2023. Sur: <https://ag.dji.com/fr/mavic-3-m>

PEDDLE, Derek R., WHITE, H. Peter, SOFFER, Raymond J., et al. Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data. *Computers & geosciences*, 2001, vol. 27, no 2, p. 203-213.

QI, Jiaguo, CHEHBOUNI, Abdelghani, HUETE, Alfredo R., et al. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 1994, vol. 48, no 2, p. 119-126.