

La télédétection pour la gestion des prairies et des fourrages

H. Nicolas¹

1 : Institut Agro – Agrocampus Ouest ; INRAE- UMR SAS

Introduction

Les prairies occupent en Europe un tiers de la SAU (Eurostat, 2016), avec une augmentation des surfaces de prairies temporaires par rapport aux prairies permanentes. Elles possèdent un rôle important d'une part sur le plan économique avec la production de biomasse et de protéines pour les animaux au pâturage et pour les stocks de fourrages (Vigneau-Loustau et Huyghe, 2008) et d'autre part sur le plan environnemental avec une contribution à la régulation des flux d'azote, des polluants et du carbone, en lien avec la qualité de l'eau, des sols et de l'air (Vertès et *al.*, 2010 ; Soussana et Lüscher, 2007 ; Sullivan et *al.*, 2010). Au regard de ces multiples fonctions la diminution des surfaces en prairies pose problème par exemple pour le stockage de carbone (Pellerin et *al.*, 2019), la préservation de la biodiversité (Carrère, 2012). Par ailleurs l'évolution du climat, avec l'augmentation avérée de la fréquence de sécheresses estivales par exemple, modifie la production des prairies voire leur pérennité.

L'identification des places, rôles et types de prairies dans les systèmes de production ainsi que des pratiques et caractéristiques associées (par exemple niveau de production, répartition intra-annuelle et variabilité inter-annuelle de biomasse disponible) sont des enjeux de plus en plus importants, à la fois pour les éleveurs et pour les gestionnaires territoriaux. La gestion des prairies implique un recours à un ensemble de méthodologies qui considèrent l'exploitation dans son ensemble : les résultats techniques et économiques peuvent être améliorés tout en accroissant les performances environnementales. L'adaptation de ces techniques de gestion des prairies nécessite des informations précises et nombreuses, obtenues à différentes échelles spatiales, de la parcelle au territoire, et à différentes échelles temporelles, du pas de temps quasi journalier à l'échelle interannuelle.

L'importance des surfaces concernées et la difficulté d'accéder à ces données par des suivis de terrain et des mesures directes rendent le recours à des données de télédétection particulièrement pertinent (Dusseux et *al.*, 2019). Dans ce contexte, le domaine scientifique de la télédétection permet d'obtenir des informations spatiales et temporelles sur les caractéristiques physiques et biologiques des surfaces continentales. Cela inclut l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de ces surfaces.

1. La télédétection

La télédétection permet l'acquisition d'informations à distance, sans contact avec la surface. Ces informations sont acquises sous forme de mesures et d'images obtenues à l'aide de plateformes spatiales ou aéroportées. Elle permet une observation homogène, exhaustive, répétée et sans interférence entre l'observateur et l'objet d'étude.

L'information est transmise entre la surface et le capteur de télédétection sous forme d'ondes électromagnétiques (OEM) caractérisées par leur longueur d'onde.

Trois principaux domaines de télédétection se différencient avec les longueurs d'ondes qui les caractérisent (figure 1).

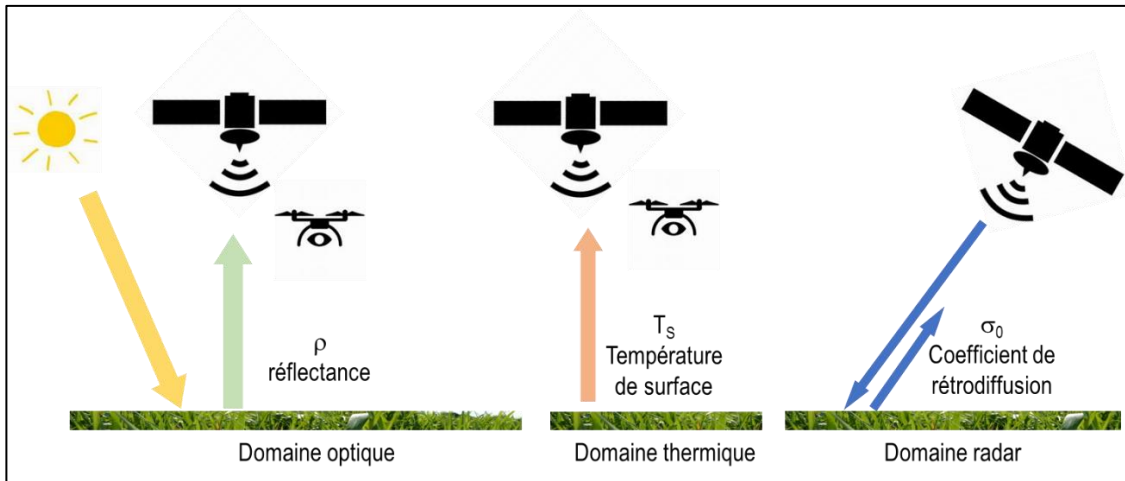


Figure 1 - Les domaines de la télédétection

- **Le domaine optique** s'étend de $0.35 \mu\text{m}$ à $2.5 \mu\text{m}$. L'information mesurée est le rayonnement solaire réfléchi par la surface, qui est traduit en coefficient de réflexion ou réflectance. Ces valeurs varient fortement avec les différents types de surface et permettent d'obtenir une signature spectrale caractéristique de chaque objet au sol (figure 2). Le domaine optique est divisé en quatre sous domaines spectraux pour tenir compte de la signature spectrales des différentes surfaces.

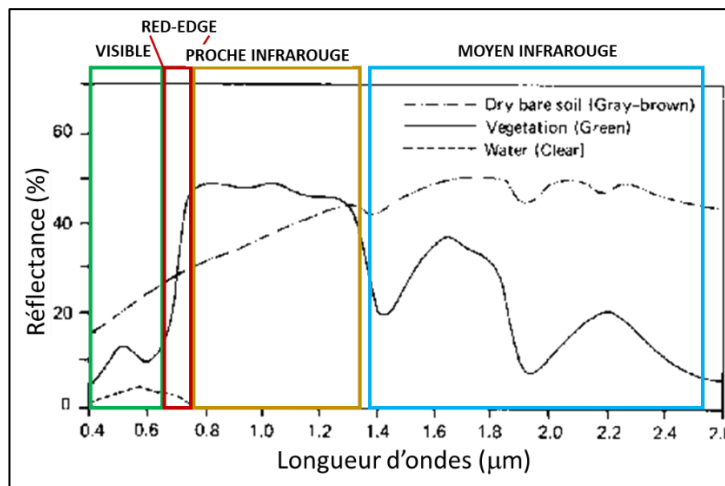


Figure 2 - Les gammes spectrales du domaine optique

Le Visible [$0.35 \mu\text{m} - 0.68 \mu\text{m}$] est sensible à la teneur en pigments foliaires des plantes, tels que les Chlorophylles a et b. Le proche infrarouge [$0.76 \mu\text{m} - 1.35 \mu\text{m}$] est lié d'une part à la structure cellulaire des feuilles représentée par le nombre moyen d'interfaces air/paroi cellulaires dans le mésophylle et d'autre part à la structure des couverts végétaux représentée principalement par l'indice de surface foliaire et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. Entre le visible et le proche infrarouge, le Red-Edge [$0.69 \mu\text{m} - 0.75 \mu\text{m}$] correspond à l'augmentation forte de la réflectance des plantes dans cette partie du spectre de réflectance. Il est sensible à l'état physiologique de la végétation en intégrant la teneur en pigments foliaires, la structure cellulaire des feuilles et celle des couverts végétaux. Le moyen infrarouge [$1.36 \mu\text{m} - 2.60 \mu\text{m}$] est sensible principalement à la teneur en eau de la végétation et du sol.

Les signatures spectrales du domaine optique permettent de calculer des indices de végétation en combinant plusieurs valeurs de réflectance (Rouse et *al.*, 1973 ; Gao, 1996 ; McFeeters, 1996, Qi et *al.*, 1994, Wu et *al.*, 2008, Clevers et Gitelson, 2013). Elles sont également utilisées pour l'estimation de traits structuraux Indice foliaire (LAI), Fraction absorbée du rayonnement actif pour la photosynthèse (fAPAR), Fraction verte (FVC) et biochimique (contenu en chlorophylle) de la végétation, par inversion de modèles de transferts radiatifs comme PROSPECT-SAIL (Jacquemoud et *al.*, 2009). Ces modèles s'appuient (i) sur les caractéristiques spectrales de réflexion et de transmission de composants biophysiques des feuilles (PROSPECT) (ii) sur des paramètres de structure des couverts végétaux tels que l'indice foliaire et l'angle moyen des feuilles (SAIL) et (iii) sur les caractéristiques spectrales du sol et sur la configuration d'acquisition

des données (Figure 3). Ce modèle est ensuite inversé par réseau de neurones pour estimer les variables biophysiques à partir des valeurs de réflectance (Weiss et Baret, 2016).

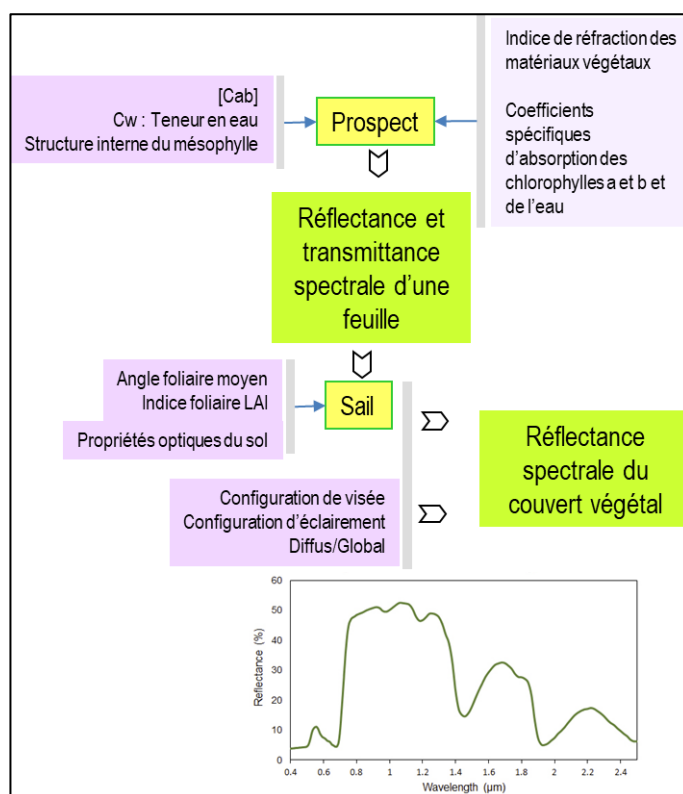


Figure 3 - Description du modèle de transferts radiatifs PROSAIL

Ces paramètres permettent, d'une part, de reconstituer l'évolution de la végétation des parcelles et des pratiques agricoles du fait de leur sensibilité à la densité et à l'état de la végétation, et, d'autre part, d'estimer la productivité des prairies (Dusseux *et al.*, 2019).

La télédétection dans le domaine optique ne permet d'acquérir des informations que de jour et, pour les images satellitaires, en l'absence de nuages.

Les vecteurs de télédétection satellitaire dans le domaine optique répondent à trois critères : (1) la résolution spatiale, (2) la résolution spectrale et (3) la résolution temporelle ou temps de revisite. De nombreux satellites optiques sont disponibles, parmi lesquels Sentinel-2. La constellation de deux satellites Sentinel-2 A&B permet l'acquisition d'images à haute résolution spatiale (10m et 20m), couvrant l'ensemble du domaine spectral optique (10 bandes) avec en particulier le red-edge. Le temps de revisite en France est de 3 à 5 jours.

Les vecteurs aériens comme les drones peuvent être équipés de capteurs multispectraux de précision avec les bandes spectrales d'intérêt pour l'étude de la végétation. Des capteurs hyperspectraux, caractérisés par un nombre de bandes élevé (supérieur à 15 bandes et pouvant aller jusqu'à 300 bandes) couvrant l'ensemble du domaine optique avec une forte résolution spectrale, deviennent également accessibles.

- **Le domaine thermique** se situe dans l'intervalle [8 µm– 14 µm] et permet d'accéder à la température de surface. Ce domaine spectral renseigne sur le stress hydrique et l'évapotranspiration des surfaces. Les informations dans ce domaine sont accessibles de jour comme de nuit en l'absence de nuages. Plusieurs satellites produisent des images thermiques de résolution kilométrique avec un temps de revisite inférieur à la journée ; seul le satellite Landsat8 produit des images à moyenne résolution (100m) avec un temps de revisite de 16 jours. Dans le domaine infrarouge thermique également, des capteurs sont disponibles pour une utilisation avec des vecteurs de type drone.

- **Le domaine radar** se situe dans la partie des micro-ondes du spectre électromagnétique [0.75 cm – 100 cm] divisé en bandes spectrales (Ka, K, Ku, X, C, S, L, P) classées par longueurs d'ondes croissantes. Il s'agit d'une méthode active de télédétection : le capteur émet une onde incidente et mesure le retour de cette onde rétrodiffusée par la surface. Ce domaine spectral permet l'acquisition de jour comme de nuit

et est insensible aux nuages. Les données radar renseignent principalement sur la géométrie, la rugosité et l'humidité de la surface (Cloude et Pottier, 1996 ; Lee et Pottier, 2009). Les capteurs radars sont principalement satellitaires, couvrant les bande X à L, en particulier la constellation de deux satellites Sentinel-1 A&B, en bande C, avec une résolution jusqu'à 10m et un temps de revisite de 6 jours.

L'obtention de données de télédétection satellitaires est largement facilitée depuis quelques années avec le déplacement du modèle économique de l'image vers les services produits à partir de ces images. En Europe, le programme Copernicus a été spécialement conçu pour répondre aux besoins des utilisateurs : les images Sentinel-2 sont libres d'accès, facilement téléchargeables et prêtes à l'emploi après un prétraitement géométrique et des effets de l'atmosphère sur certaines régions du globe.

2. La télédétection et la gestion des prairies et des fourrages

L'objectif développé ici est d'identifier l'apport de la télédétection pour une gestion durable des prairies en privilégiant l'approche agronomique. Plusieurs échelles spatiales et temporelles d'analyse sont utilisées pour répondre à ces enjeux. L'analyse interannuelle des prairies est conduite soit (1) sur de larges territoires, nécessitant des données à moyenne résolution spatiale, de type hectométrique (250m) (Lecerf, 2008, Si et al., 2012) ou bien soit (2) plus localement à l'échelle des paysages ou de parcelles agricoles avec des données à haute résolution spatiale, de type décamétrique. Cependant, pour les analyses intra-annuelles et le suivi des parcelles de prairies, les échelles temporelles requises sont courtes, allant de quelques jours à l'échelle bimensuelle et seules les images de télédétection à haute résolution (décamétrique) et très haute résolution spatiale (métrique) sont utilisables (Foerster et al., 2012).

La gestion des prairies par télédétection doit prendre en compte leur complexité, avec des dynamiques temporelles variables en liaison avec des pratiques culturales diversifiées. A l'échelle européenne, on distingue deux catégories de prairies (Commission Régulation EU N°796/2004) :

- Les prairies permanentes qui sont des surfaces herbacées ressemées naturellement ou cultivées, pâturées et/ou fauchées, non retournées pendant au moins 5 années.
- Les prairies temporaires sont des surfaces herbacées de 5 ans maximum, semées, pâturées et/ou fauchées et qui entrent dans des rotations culturales

La composition floristique des prairies est également variable avec les contextes pédoclimatiques, les pratiques et les objectifs des agriculteurs comme par exemple le choix des espèces semées. Enfin, la structure des couverts végétaux de prairies est liée à la conduite culturale, les parcelles fauchées étant généralement plus homogènes avec des hauteurs de végétation plus élevées avant la fauche, alors que les parcelles pâturées sont plus hétérogènes avec des couverts végétaux fréquemment moins développés en hauteur mais plus denses, en particulier près du sol.

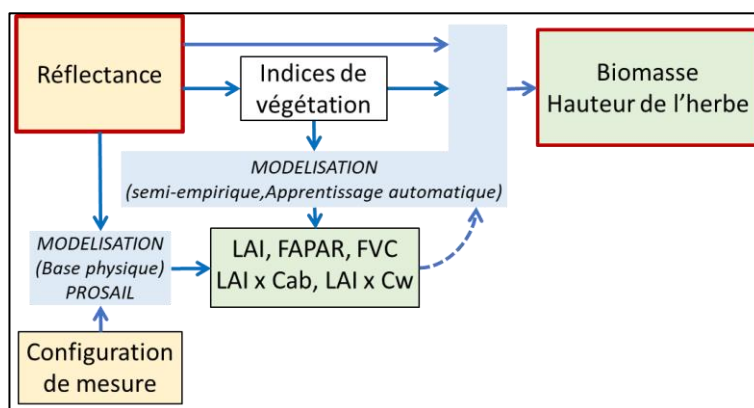


Figure 4 : Méthodes d'estimation de variables biophysiques par télédétection dans le domaine optique (LAI : Leaf Area Index, Cab : Chlorophyll a&b Content, Cw Water Content, FAPAR : Fraction on Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FVC : Fractional Vegetation Cover).

Les méthodes d'analyse par télédétection actuelles s'appuient le plus souvent sur le domaine optique. Dans ce domaine spectral, les données d'entrée – les valeurs de réflectance – sont utilisées pour estimer les variables biophysiques d'intérêt, parmi lesquelles la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fraction absorbée du rayonnement solaire actif pour la photosynthèse, la teneur en chlorophylle a et b et la teneur en eau dans un pixel et la fraction de couverture végétale (Figure 4). L'établissement d'un modèle d'estimation de variable

biophysique nécessite de disposer d'observations au sol en nombre suffisant et de grande précision, représentatives de la variabilité temporelle et spatiale et de la complexité de la surface étudiée. Des méthodes semi-empiriques, d'apprentissage automatique, à base physique ou mixtes sont utilisées. Les méthodes d'apprentissage automatique ou « machine learning » – Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), Réseaux de neurones (RN) – permettent d'« apprendre » à partir des observations au sol par des approches mathématiques et statistiques. Les méthodes à base physique s'appuient sur une modélisation des transferts radiatifs dans les couverts végétaux avec une compréhension des interactions entre les ondes électromagnétiques et la végétation puis les variables biophysiques sont restituées par inversion de ces modèles physiques.

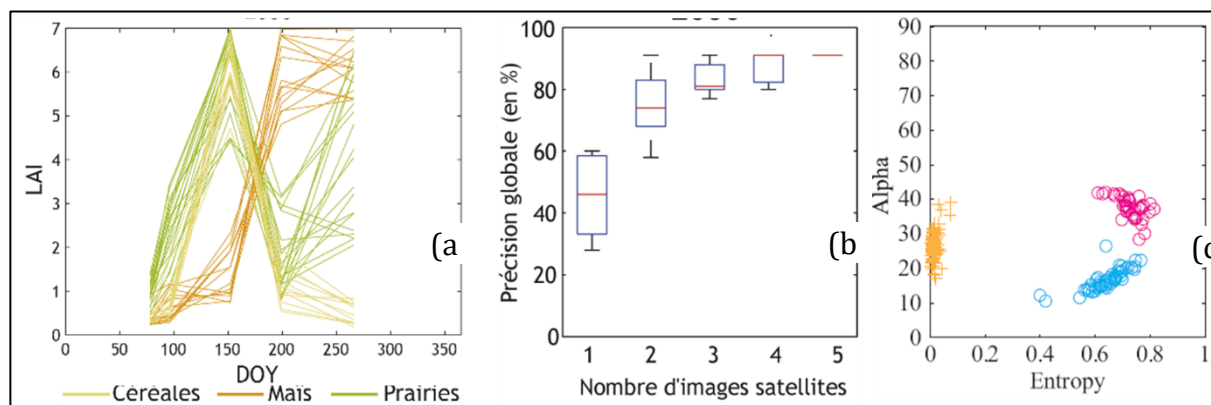


Figure 5 - Evolution de l'indice de surface foliaire (a) sur trois types d'occupation du sol (prairie, maïs, blé), Précision globale de la discrimination des surfaces en fonction du nombre d'images utilisées (b), Relation entre deux indicateurs polarimétriques appliqués aux trois types d'occupation du sol (c) (Dusseux et *al.*, 2014 et 2019)

En fonction des variables étudiées, plusieurs modèles peuvent être nécessaires pour représenter la variabilité des couverts végétaux au cours de leur cycle végétatif. L'utilisation de séries temporelles de variables biophysiques telles que l'indice de surface foliaire issues d'images de télédétection acquises à plusieurs stades phénologiques des cultures accroît sensiblement la précision des résultats (Figure 5a), de même que le nombre d'images utilisées sur des périodes stratégiques pour la culture (Figure 5b).

Les valeurs de réflectance issues des images du domaine optique sont plus fortement influencées par les strates supérieures de la végétation. En complément de ces données, l'utilisation d'indicateurs polarimétriques issus d'images radar, en particulier l'entropie, apportent une précision supplémentaire basée sur la structure des couverts végétaux (Figure 5c).

Enfin, la robustesse des modèles est évaluée sur des données indépendantes et une estimation de la précision est associée à chaque modèle.

L'utilisation de séries temporelles de variables biophysiques telles que l'indice de surface foliaire issues d'images de télédétection acquises à plusieurs stades phénologiques des cultures accroît sensiblement la précision des résultats (Figure 5a), de même que le nombre d'images utilisées (Figure 5b). Enfin, l'utilisation d'indicateurs polarimétriques issus d'images radar, apportent une précision supplémentaire basée sur la structure des couverts végétaux (Figure 5c). L'entropie, notée H , représente le degré de désordre aléatoire statistique de la rétrodiffusion : une valeur d'entropie faible ($H=0$) correspond à une cible pure et une valeur d'entropie élevée ($H=1$) correspond à une cible distribuée. L'angle α représente le type de mécanisme de diffusion dominant, allant d'une rétrodiffusion de surface ($\alpha = 0$) à une rétrodiffusion de volume ($\alpha = 90^\circ$).

Le mode de gestion des prairies est également accessible par télédétection : l'utilisation de séries temporelles d'images de variables biophysiques telles que l'indice de surface foliaire (Dusseux et *al.*, 2019) permettent de distinguer les parcelles pâturées, fauchées ou mixtes (Figure 6). Le nombre d'images disponibles améliore sensiblement la précision des résultats.

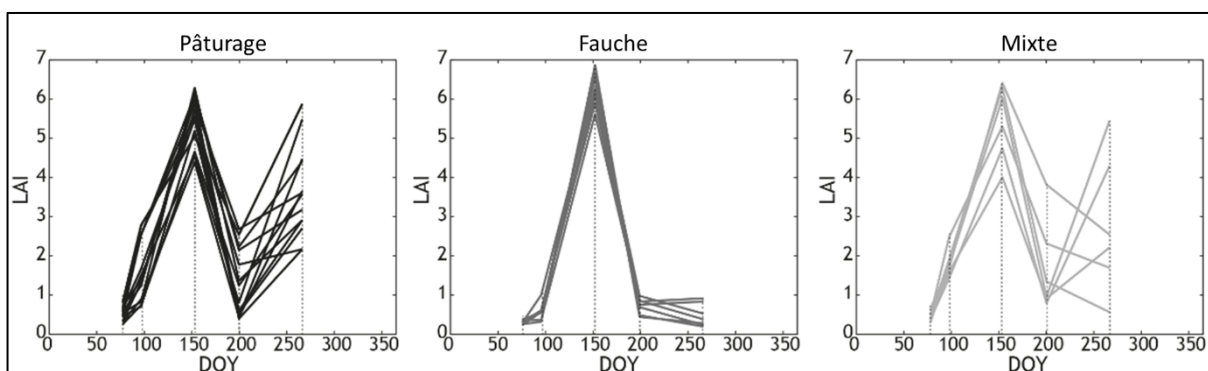


Figure 6 - Modes de gestion des prairies par série temporelle l'indice de surface foliaire (LAI) (année 2006) (Dusseux et *al.*, 2019)

Dans le contexte à large échelle des changements climatiques, la télédétection permet d'analyser les conséquences sur les prairies. Zhou et *al.*, (2021) ont quantifié l'évolution de la biomasse des prairies en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique à partir de données à moyenne résolution. De même Gomez-Gimenez et *al.*, 2017 ont cartographié à l'aide d'images optiques à très haute résolution spatiale le mode d'usage des prairies comme la fréquence et l'intensité des pâturages ainsi que la fertilisation.

Dans un contexte agronomique, l'impact de l'augmentation des sécheresses sur les prairies a fait l'objet d'analyses de télédétection à moyenne et haute résolution spatiale. Un indice de production fourragère (IPF) est défini pour évaluer les pertes subies dans une zone géographique définie. Cet indice s'appuie sur une variable biophysique, la fraction de couverture végétale (FVC Fractional vegetation cover) complétée par données exogènes relatives aux conditions climatiques et à la phénologie des prairies (Roumiguie, 2016). Il donne accès à des applications dans le domaine assurantiel.

Plus précisément, des études sont en cours pour développer une méthode d'estimation de la hauteur d'herbe et de la biomasse sèche des prairies, à haute résolution spatiale et permettant un suivi des parcelles agricoles à une fréquence bimensuelle. Cette étude (Dusseux et *al.*, 2021) s'appuie sur des méthodes d'apprentissage automatique, combinant des observations au sol nombreuses et réparties sur de larges territoires avec les données Sentinel-2 sous forme de réflectance ou d'indices de végétation. L'objectif est de proposer au monde professionnel un service numérique pour une gestion raisonnée des prairies.

Les drones équipés de capteurs multispectraux sont principalement utilisés sur des sites expérimentaux composés de microparcelles. Des études sont conduites pour l'estimation de la biomasse des prairies (Agrocampus-Ouest et CRA des Pays de la Loire) et de la hauteur de l'herbe (Surault et *al.*, 2018).

3. Les perspectives

Les principales évolutions vont provenir de nouveaux capteurs et vecteurs de télédétection. Les satellites européens Sentinel 1, 2 et 3, avec un temps de revisite inférieur à 5 jours, des images prétraitées, gratuites et faciles d'accès ont permis un développement important de l'usage de la télédétection. Les futurs satellites vont accentuer encore ce développement des apports de la télédétection avec la fourniture de données plus fréquentes à de très hautes résolutions spatiales. A titre d'exemple, en 2021, deux satellites seront lancés avec des caractéristiques permettant une analyse fine et précise des surfaces continentales :

- La constellation de 4 satellites Pleiades Néo couvrira l'ensemble de la surface terrestre deux fois par jour, avec une résolution spatiale de 30cm et des bandes spectrales adaptées à l'étude de la végétation, comme le red-edge.
- Le satellite EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) va produire des images hyperspectrales (262 bandes spectrales couvrant le visible, le proche et le moyen infrarouge). La résolution spatiale sera de 30m et la fréquence de revisite de 4 jours. De même, le satellite PRISMA, opérationnel depuis 2020, permet de disposer d'images hyperspectrales à 30 m de résolution.
- Un satellite CNES-ISRO dans l'infrarouge thermique avec un temps de revisite de 3 jours et une résolution spatiale de 60-80m. Les données thermiques, associées aux données optiques permettront de quantifier le stress hydrique et de mettre en œuvre des méthodes de gestion de l'irrigation.

D'autres constellations de satellites sont prévues, telles que celle de la compagnie privée Urthe Corp. Des constellations de nanosatellites sont également envisagées, pour un fonctionnement en synergie avec les satellites déjà existants.

Au sujet des vecteurs aériens tels que les drones, des capteurs multispectraux et hyperspectraux sont déjà transportables. Ils permettent des études fines de télédétection à résolution centimétrique sur des secteurs limités. Cependant, le renforcement de la réglementation complexifie leur usage.

Ces futurs vecteurs –satellites et drone– et capteurs –multi/hyper-spectraux, radar, thermiques– vont donner accès à de nouvelles informations nombreuses et complexes. La fréquence de passage plus élevée des satellites permettra d'obtenir une régularité plus grande dans les séries temporelles de données, en particulier aux périodes critiques pour la gestion des prairies. L'utilisation de plusieurs satellites en synergie améliorera la précision dans les applications. A titre d'exemple, l'utilisation de données radar en complément des données optiques permettra une régularité dans l'obtention des données et une meilleure précision des analyses par rapport aux seules données optiques (Mercier, 2021).

Sur le plan méthodologique, la science des données spatiales donne progressivement accès à de nouvelles méthodes de traitement des données massives avec une précision accrue. Cependant, la généralisation des nouvelles méthodologies de traitement des données de télédétection doit s'appuyer sur une compréhension des interactions entre les surfaces étudiées, les prairies, et les ondes électromagnétiques.

La télédétection apporte des informations sur de larges territoires et permet de restituer des variables d'intérêt pour l'agronomie et l'écologie. La principale variable d'intérêt est la biomasse des prairies et des études sont en cours pour analyser les potentialités de la télédétection pour apporter des informations sur la valeur fourragère des prairies.

Pour répondre plus précisément aux besoins des gestionnaires et des agriculteurs, des données complémentaires peuvent être utilisées, en particulier des données climatiques spatialisées et des données pédologiques. Un exemple est l'assimilation de données de télédétection dans des modèles de croissance, tel que STICS Prairie, (Rugé et *al.*, 2006, Baumont et *al.*, 2021), qui apporte des précisions supplémentaires et permet une meilleure continuité temporelle des informations spatiales produites.

Le développement de services numériques pour la gestion des prairies est un enjeu majeur. Les produits issus de la télédétection vont permettre d'obtenir des informations à l'échelle de la parcelle sur de vastes territoires à un pas de temps compatible avec les besoins des gestionnaires. Actuellement, la variable principale à quantifier spatialement et à diffuser sous forme de service numérique est la biomasse prairiale.

Les services numériques futurs doivent répondre aux besoins des utilisateurs en identifiant clairement leurs attentes et présenter un intérêt économique. La conception de ces services est organisée en étroite collaborations entre différents acteurs des domaines de la recherche, du développement et des gestionnaires des prairies. L'information produite par ces services numériques doit être facilement accessible par les utilisateurs et être associée à une estimation de sa précision.

Conclusion

La télédétection donne accès à des informations spatiales et temporelles d'intérêt majeur pour l'étude de la végétation, en particulier pour les systèmes complexes que sont les prairies dans des contextes d'agronomie et d'écologie. Les technologies de télédétection évoluent rapidement, pour les vecteurs, les capteurs embarqués et induisent le développement de nouvelles méthodologies en science des données pour le développement d'applications. Cependant, la télédétection seule ne répond que partiellement aux besoins : la production d'informations par télédétection nécessite une synergie avec les sciences utilisatrices en agronomie et en écologie, pour pouvoir répondre précisément aux besoins des gestionnaires. L'association de la télédétection avec d'autres sources d'informations est nécessaire pour un meilleur ciblage, une robustesse améliorée et une plus grande précision des applications à destination des gestionnaires.

Glossaire

Angle α : indicateur polarimétrique indiquant le mécanisme de diffusion radar

Cab : Contenu en Chlorophylle a & b

Cw : Contenu en eau

FAPAR, Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

Fraction verte (idem FVC)

FVC : Fractional Vegetation Cover (ou fCOVER, ou Fraction verte)

H : Entropy = indicateur polarimétrique représentant le degré de désordre aléatoire

IFP : indice de production fourragère

LAI : Leaf area Index = indice de surface foliaire

SVM : Support Vector Machine

RF : Random Forest

RN : Réseau de Neurones

Références Bibliographiques

- Baumont M., Bonnard A., Piquemal B., Deswarte J.-C., (2021). Associer la télédétection à un modèle de culture pour prédire la biomasse du maïs. Actes des Journées de Printemps de l'AFPF, 24-25 mars 2021. 27-32
- Clevers J.G.P.W., Gitelson A.A., (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 344-351.
- Cloude S.R., Pottier E., (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 498-518. <https://doi.org/10.1109/36.485127>
- Dusseux P., Corpetti T., Hubert-Moy L., Corgne S., (2014). Combined use of multi-temporal optical and radar satellite images for grassland monitoring. *Remote Sensing*, 6, 6163-6182. <https://doi.org/10.3390/rs6076163>
- Dusseux P., Corpetti T., Hubert-Moy L., (2019). L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires : Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France. *Cybergeo : European journal of geography* <https://doi.org/10.4000/cybergeo.33245>
- Dusseux P., Michel E., Airiaud A., Guyet T., Nicolas H., Pattier P., (2021). Utilisation des données satellites Sentinel-2 pour quantifier la production d'herbe et de biomasse. Actes des Journées de Printemps de l'AFPF 2021, 24-25 mars 2021. 19-26
- Foerster S., Kaden K., Foerster M., Itzerott S., (2012). Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.89, 30-40. DOI : 10.1016/j.compag.2012.07.015
- Gao B. (1996.) NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gomez-Gimenez M., de Jong R., Della-Peruta R., Keller A., Schaepman M.E., (2017). Determination of grassland use intensity based on multi-temporal remote sensing data and ecological indicators. *Remote Sensing of Environment*, 198, 126-139.
- Jacquemoud S., Verhoef W., Baret F., et al., (2009). PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, Supp 1, S56-S66 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.026>
- Lecerf R., (2008). Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne), Thèse de Géographie, Université de Rennes 2, 325p.
- Lee J-S, Pottier E., (2009). Polarimetric Radar Imaging : From Basics to Applications, 1sted edn. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA
- Mercier A., (2021). Evaluation of Sentinel-1 & Sentinel-2 time series for the identification and characterization of ecological continuities, from wooded to crop-dominated landscapes. Thèse de doctorat, Université de Rennes2, 194p.
- McFeeters S.K., (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425- 1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., et al., (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 48, 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Roumiguie A., (2016). Développement et validation d'un indice de production des prairies basé sur l'utilisation de séries temporelles de données satellitaires – Application à un produit d'assurance en France. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 244p.
- Rouse J.W.J., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA, Washington, DC, USA.
- Rugot F., Novak S., Granger S., (2006). Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, 186, 241-256.
- Si Y., Schlerf M., Zurita-Milla R., Skidmore A., Wang T., (2012). "Mapping spatio-temporal variation of grassland quantity and quality using MERIS data and the PROSAIL model". *Remote Sensing of Environment*, Vol.121, 415-425. DOI : 10.1016/j.rse.2012.02.011
- Soussana J.-F., Lüscher A., (2007). "Temperate grasslands and global atmospheric change : a review". *Grass and Forage Science*, Vol.62, n°2, 127-134.
- Sullivan C. A., Skeffington M. S., Gormally M. J., Finn J. A., (2010). "The ecological status of grasslands on lowland farmlands in western Ireland and implications for grassland classification and nature value assessment". *Biological Conservation*, Vol.143, n°6, 1529-1539. DOI : 10.1016/j.biocon.2010.03.035
- Surault F., Roy E., Escobar-Gutiérrez P., Barre P., (2018). « Le drone, un nouvel outil au service de la sélection des plantes fourragères ». *Fourrages*, 236, 281-288
- Vigneau-Loustau L., Huyghe C., (2008). Stratégies fourragères. *France Agricole Editions*, 336 p
- Vertès F., Benoit M., Dorioz J.M., (2010). "Couverts herbacés pérennes et enjeux environnementaux (en particulier eutrophisation) : atouts et limites". *Fourrages*, 202, 83-94
- Weiss M., Baret F., (2016). S2ToolBox Level2 products : LAI, FAPAR, FCOVER. Rapport S2ToolBox Level2 product algorithms v1.1, 55p.
- Wu C., Niu Z., Tang Q., Huang W., (2008). Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices : modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1230-1241.
- Zhou W., Li H. et al., (2021) Remote sensing inversion of grassland aboveground biomass based on high accuracy surface modeling. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107215>