
Prise en compte de l'architecture du couvert végétal à différents stades de développement pour le suivi des cultures par télédétection hyperspectrale : cas d'étude du maïs

Romain Démoulin^{*1,2,3}, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry¹, Sidonie Lefebvre^{4,5}, Xavier Briottet³, Karine Adeline³, Zhijun Zhen¹, Matthieu Marionneau, and Valerie Le Dantec¹

¹CESBIO – Université Toulouse III - Paul Sabatier – France

²Université Toulouse III - Paul Sabatier – Université de Toulouse – France

³ONERA / DOTA – PRES Université de Toulouse – France

⁴ONERA / DOTA – Université Paris-Saclay, Université Paris-Saclay – France

⁵ONERA / LMA2S – Université Paris-Saclay, Université Paris-Saclay – France

Résumé

Contexte

Dans la filière céréalière, les agriculteurs décident individuellement quand récolter, si bien que les industriels de l'agroalimentaire doivent prévoir des scénarios de collecte, sans connaître précisément le calendrier de la récolte ainsi que la quantité et qualité du grain. Cette capacité d'anticipation s'avère de plus en plus difficile du fait de sources croissantes d'incertitudes, d'ordre climatique ou endogène à ce secteur d'activité (concurrence internationale, etc.). Un suivi spatial et temporel plus fin permettrait de mieux contrôler la maturité des cultures à l'échelle de la parcelle. La télédétection satellitaire a un fort potentiel pour le suivi des cultures à l'échelle mondiale (couverture globale, coût faible, capacité de revisite). Les prochaines missions hyperspectrales (CHIME, BIODIVERSITY (1), SBG, etc.) permettront l'emploi de nouvelles métriques du développement des cultures. Une approche usuelle consiste à estimer des variables bio-physico-chimiques indicatrices des rendements, par inversion de données satellitaires avec un modèle de transfert radiatif (RTM). En effet, un RTM permet de limiter la collecte de données *in situ*, coûteuse temporellement et financièrement, tout en facilitant la compréhension physique de l'interaction entre le rayonnement solaire et le couvert végétal sur le domaine spectral (0,4 - 2,5) μm , permettant ainsi de développer des méthodes d'inversion applicables à large échelle. Les RTMs les plus utilisés représentent la végétation comme un milieu horizontal homogène (PROSAIL) alors que les parcelles agricoles présentent une hétérogénéité spatiale associée souvent à une situation en pente comme le maïs. D'autres RTMs, comme DART (2), utilisent des représentations 3D réalistes des cultures, avec relief.

Ce travail a deux objectifs : (1) évaluer avec le RTM DART l'influence de la structure 3D de champs de maïs à différents stades de développement sur leur caractérisation par télédétection, et (2) évaluer l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour une estimation plus large de variables bio-physico-chimiques des cultures.

*Intervenant

Données

Le site d'étude comprend des champs de maïs irrigués, au nord de Grosseto (42°49'47,02N 11°04'10,27E), Italie. Deux images hyperspectrales aéroportées HyPlant-DUAL (7 et 30 juillet 2018) ont été acquises durant la campagne ESA FLEXSENSE (3). Des réflectances de surface ainsi que des variables bio-physico-chimiques du maïs ont été mesurées sur le terrain durant les vols. Certaines de ces variables sont des paramètres du RTM : indice de surface foliaire (**LAI**), contenu foliaire en chlorophylle (**Cab**), en caroténoïdes (**Car**), en matière sèche (**Cm**), en protéines (**Cp**), en eau (**Cw**) et réflectance du sol.

Méthodes et résultats

Une analyse globale de sensibilité (GSA) a permis de quantifier l'influence de la géométrie du couvert (pente, orientation des rangées) et des conditions d'éclairement aux configurations du capteur HyPlant (domaine spectral, résolution spatiale). Elle a utilisé 3 Look-Up Tables (LUT) de 5000 simulations DART de champs de maïs 3D du site d'étude simulés à 3 stades de développement (LAI : 0.46, 1.21 et 3.11 m²/m²), et la méthode du critère d'indépendance de Hilbert-Schmitt (HSIC) (4) qui évalue la dépendance entre les paramètres du RTM et le signal hyperspectral simulé. Cette méthode non-paramétrique a été choisie du fait de sa polyvalence, sans connaissances a priori sur les distributions des variables tout en nécessitant une quantité moindre de données.

Les résultats montrent que l'orientation des rangées par rapport à la direction d'éclairement solaire a un impact modéré quand le couvert est peu développé (LAI = 0.46 m²/m²), avec une contribution spectrale de 2.2% à 1320 nm. Cet impact est maximal quand le couvert est intermédiaire (LAI = 1.21 m²/m²; Fig. 1.) avec une contribution de 4.9% à 1314 nm. Pour ces stades, l'humidité du sol est le paramètre qui joue le plus sur la réflectance du couvert et doit donc être considéré pour le suivi précoce des cultures. L'impact de la pente est faible si l'angle de pente est inférieur à 10° ; il est quasi nul pour une direction solaire parallèle aux rangées et maximal pour une direction solaire perpendiculaire. Une analyse plus approfondie des effets de pente est prévue. D'autre part, la réflectance du couvert ne dépend de Cp que si le couvert est assez développé (LAI = 3.11 m²/m²), avec une contribution maximale de 0.26% à 1699 nm, très faible par rapport aux effets de structure. Cela souligne la nécessité de maquettes réalistes (ex : orientation des rangées, agrégation du feuillage, topographie, etc.) pour pouvoir estimer Cp par inversion d'images satellites.

voir pièce jointe

**

Figure 1: Résultats d'analyse globale de sensibilité sur le domaine 400 - 2500 nm pour LAI = 1.21 m² / m²

Une méthode d'inversion a été développée via une étape d'apprentissage d'algorithme de machine learning (ML) à partir d'une LUT DART afin de lier les variables de végétation aux spectres hyperspectraux simulés. Cette méthode a ensuite été appliquée à des images HyPlant pour générer des cartes de variables bio-physico-chimiques qui ont été comparées aux mesures terrain. Ainsi, une LUT de 5000 simulations, représentative des stades de développement et des conditions d'éclairement du site d'étude, a été créée. L'algorithme d'apprentissage automatique utilisé est la Kernel Ridge Regression (KRR), adaptée aux données à grande dimension liées par des relations non-linéaires tout en restant facilement interprétable avec peu d'hyperparamètres. Les premiers résultats d'inversion avec cette méthode feront également l'objet de cette présentation.

(1) X. Briottet et al., "BIODIVERSITY - A new space mission to monitor Earth ecosystems at fine scale", RFPT, vol. 224, n 1, p. 33-58, déc. 2022.

(2) J. Gastellu-Etchegorry, "Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies", RSE, vol. 58, n 2, Art. n 2, nov. 1996.

- (3) G. Candiani et al., " Evaluation of Hybrid Models to Estimate Chlorophyll and Nitrogen Content of Maize Crops in the Framework of the Future CHIME Mission ", Remote Sensing, vol. 14, n 8, Art. n 8, avr. 2022
- (4) A. Marrel et V. Chabridon, " Statistical developments for target and conditional sensitivity analysis: Application on safety studies for nuclear reactor ", Reliability Engineering & System Safety, vol. 214, p. 107711, oct. 2021