

# Utilisation des données satellites Sentinel-2 pour quantifier la production d'herbe et de biomasse

P. Dusseux<sup>1-4</sup>, E. Michel<sup>2</sup>, A. Airiaud<sup>2</sup>, T. Guyet<sup>3</sup>, H. Nicolas<sup>4</sup>, P. Pattier<sup>4</sup>

1 : Univ. Grenoble Alpes, CNRS, PACTE, 38000 Grenoble, France. [Pauline.dusseux@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:Pauline.dusseux@univ-grenoble-alpes.fr)

2 : Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, 44000 Nantes, France

3 : Institut Agro, IRISA-UMR 6974 CNRS, 35000 Rennes, France

4 : Institut Agro, SAS-UMR 1069 CNRS, 35000 Rennes, France

## Résumé

*L'herbe pâturée est l'aliment qui coûte le moins cher dans une ration et la bonne gestion de l'herbe passe entre autre par une connaissance des quantités disponibles. Afin de simplifier et d'automatiser ces mesures d'herbe, et ainsi contribuer au maintien voire au développement du pâturage, le projet HERDECT s'est attaché à construire des méthodes d'estimation de la biomasse des prairies à partir d'outils de télédétection (d'acquisition à distance) et à en estimer la faisabilité opérationnelle.*

*Cette recherche présente une comparaison de méthodes de régression sur plusieurs variables extraites des images Sentinel-2 avec des données terrains afin de développer des modèles de prévision de hauteur d'herbe et de biomasse sur pied. Un ensemble de données expérimentales de terrain, collectées sur 18 sites majoritairement situés dans la partie Ouest de la France métropolitaine, a été utilisé pour évaluer la capacité des modèles produits à estimer la hauteur d'herbe et la biomasse des prairies.*

*Les estimations biomasses et hauteurs d'herbe obtenues grâce au satellite ont été comparées aux données terrain issues des fermes du projet HERDECT et du réseau « pousse de l'herbe ». Les résultats présentés montrent une qualité de la prévision intéressante pour un usage de masse.*

## Introduction

L'herbe pâturée est l'aliment qui coûte le moins cher dans une ration de bovins et les prairies constituent 1/3 de la surface agricole utile en France. En moyenne, en élevage bovin lait, 51% de la SAU est en prairies ce qui représente 56 ha d'herbe (37 ha de STH et 19 ha de prairies temporaires et artificielles) (CNIEL, 2018). Une bonne gestion de l'herbe passe entre autres par une connaissance des quantités disponibles (Huyghe et Delaby, 2013). Un suivi de la croissance de l'herbe et l'estimation d'indicateurs de productivité de l'herbe sont donc utiles pour optimiser la gestion des prairies dans le temps. En particulier, ces informations aident à identifier les parcelles prioritaires pour le pâturage, éviter le surpâturage ou encore à identifier les parcelles à faucher pour constituer du stock fourrager. Faire ces mesures sur le terrain est coûteux en temps : il est recommandé de faire 30 mesures /ha sur l'ensemble des parcelles du circuit de pâturage, en effectuant le même circuit dans la parcelle, et ce toutes les semaines en période de pousse (RMT prairie demain, 2016). Afin de simplifier et d'automatiser ces mesures d'herbe, et ainsi contribuer au maintien voire au développement du pâturage, le projet CASDAR HERDECT s'est attaché à construire des méthodes d'estimation de la hauteur d'herbe et de la biomasse des prairies à partir d'outils de télédétection d'acquisition d'images et à en estimer la faisabilité opérationnelle.

Les données de télédétection offrent des possibilités intéressantes pour le suivi de la végétation de l'échelle locale à régionale comme en témoignent les récents progrès majeurs dans le domaine spatial en lien avec la précision (spatiale et spectrale) des données, leur fréquence et leur accès (Weiss *et al.*, 2020). Cependant, alors qu'une diversité d'outils d'aide à la décision construits à partir de données de télédétection sont déjà bien établis et en fonctionnement pour les cultures (Bégué *et al.*, 2018), peu sont adaptés ou ont été construits pour les prairies et pâturages. En effet, la production d'herbe n'est pas linéaire au cours d'une année, et contrairement aux cultures, il y a plusieurs récoltes (par fauche ou pâturage) et repousses par an. Plusieurs facteurs influencent la productivité des prairies : les saisons, les conditions pédoclimatiques et météorologiques, les espèces prairiales présentes et les itinéraires techniques pratiqués. Aussi, la forte diversité des familles botaniques, espèces et variétés induit des fonctionnements et usages divers au cours de l'année et selon les lieux. Ainsi, pour acquérir des références en dynamique sur cette diversité de situations, des données à hautes résolutions spatiale et temporelle sont alors nécessaires pour le suivi des prairies.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer la capacité des données de télédétection Sentinel-2 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>) à estimer la hauteur d'herbe et la biomasse (sur pied ou cumulée sur une période donnée) des prairies dans le but de construire un outil d'aide à la décision à destination des organismes agricoles et/ou des agriculteurs apportant des informations sur la quantité d'herbe disponible pour chaque parcelle d'une exploitation à une fréquence hebdomadaire. Les outils mobilisés et les résultats obtenus sont présentés dans cet article.

## 1. Matériel et méthodes

### 1.1. Les sites d'étude et les données terrain

L'étude a été menée sur des exploitations agricoles expérimentales et commerciales situées en France métropolitaine de 2017 à 2020 (Figure 1a). 18 sites, majoritairement situés dans la partie Ouest de la France, ont participé à la collecte de données dont 5 fermes expérimentales (Trévarez en Bretagne, Blanche Maison en Normandie, Derval et Thorigné d'Anjou en Pays de la Loire, et Theix en Auvergne). Des mesures de hauteur d'herbe ont été réalisées chaque semaine sur les différents sites en utilisant des herbomètres à plateau de type grasshopper version 4 (Figure 1b). Les sites ne disposant pas de cet outil ont utilisé un herbomètre de type Jenquip. Les mesures ont été effectuées dans chaque paddock du circuit de pâturage à raison de 50 mesures/ha. Le type d'herbomètre employé ne semble pas avoir d'effet sur la variabilité résiduelle. En parallèle des prélèvements ont été réalisés tout au long de la saison de croissance de l'herbe afin de mesurer la quantité de biomasse présente dans les parcelles. Une partie de ces données de terrain ont permis d'étalonner les modèles d'estimation de hauteur d'herbe et de biomasse et d'autres ont été utilisées pour évaluer la capacité des modèles produits à estimer la hauteur d'herbe et la biomasse des prairies. Les données acquises en 2017, 2018 et 2019 ont été utilisées pour la modélisation et les données acquises en 2020 ont été utilisées pour l'évaluation des estimations produites par les modèles. Les différentes mesures et travaux de modélisation ont été réalisés dans le cadre du projet CASDAR HERDECT mobilisant différents partenaires techniques, scientifiques et financiers (Figure 1c).

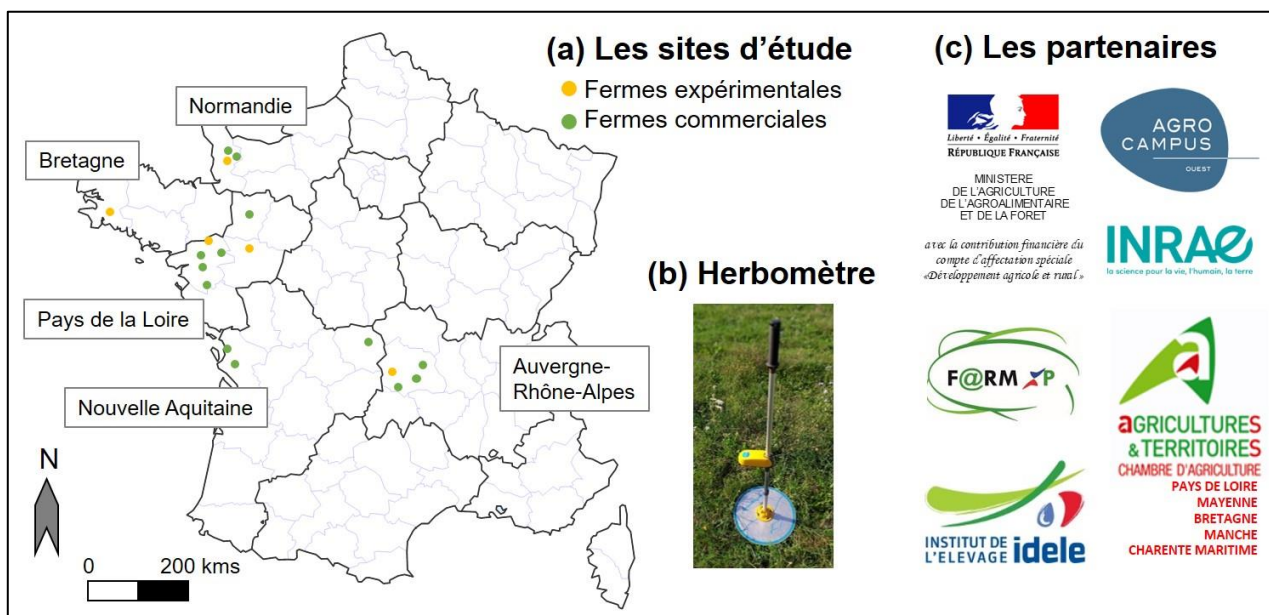


FIGURE 1 – Le réseau de parcelles mobilisées dans le casdar Herdect (2017-2021) : Localisation des sites d'étude (a), illustration d'un herbomètre (b) et liste des partenaires de l'étude (c)

### 1.2. Les images satellite Sentinel-2

Les images Sentinel-2 L2A, évaluées dans cette étude, sont des données à hautes résolutions spatiale (10 et 20m), temporelle (acquisition tous les 5 jours) et spectrale (10 bandes spectrales) (Figure 2). Elles sont fournies par le pôle de données et de services surfaces continentales Theia (<https://www.theia-land.fr/>) et sont prétraitées et disponibles en temps quasi-réel, permettant l'estimation de la hauteur d'herbe et de la biomasse des prairies avec un délai adapté aux activités agricoles.

La différence moyenne entre la date d'acquisition d'une image et la mesure au sol correspondante est de 2 jours sur toute la période d'étude (avec un maximum de 9 jours en mars au début de la période de croissance) et de 1,5 jours en période de forte croissance de l'herbe (avec un maximum de 4 jours).

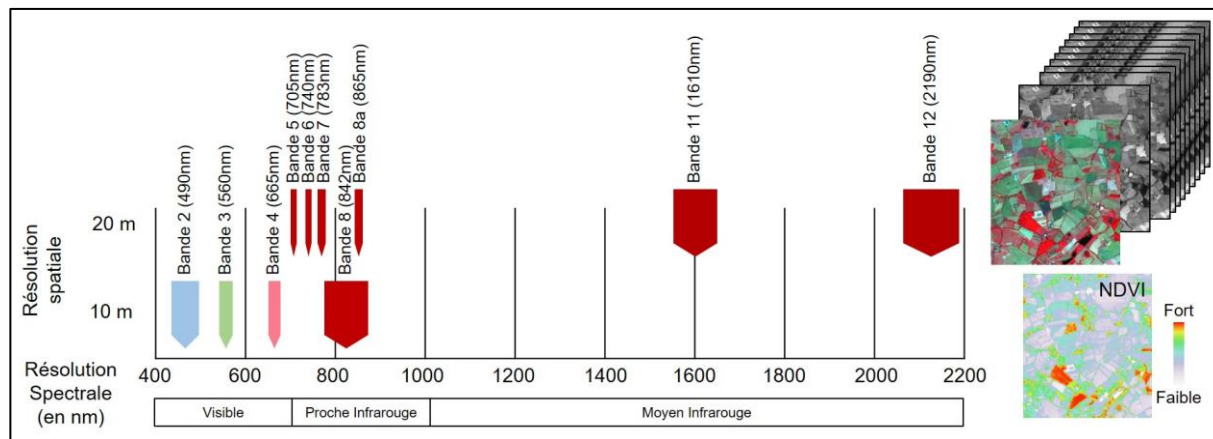


FIGURE 2 – Caractéristiques des images satellites Sentinel-2 et illustration des différentes bandes spectrales d'une image et du calcul d'un indice de végétation (le NDVI)

De nombreuses études montrent l'intérêt des données de télédétection pour le suivi des prairies (Dusseux *et al.*, 2019 ; Ali *et al.*, 2016). Principalement, l'indice de végétation NDVI, calculé à partir des bandes spectrales du rouge (B4) et du proche-infrarouge (B8), est utilisé pour estimer la biomasse des prairies. Cependant, cet indice a tendance à saturer et donc à sous-estimer la quantité d'herbe quand le couvert est dense. La multiplication récente des capteurs, l'amélioration de leurs caractéristiques (spatiales, spectrales et temporelles) et l'essor de leur mise à disposition a ouvert de nouvelles perspectives notamment sur le développement de nouvelles méthodes se basant sur des indicateurs et indices plus pertinents. Ainsi, des recherches ont mis en évidence l'intérêt d'utiliser d'autres indices basés sur des bandes spectrales différentes et notamment les bandes spectrales étroites du red-edge et du proche infrarouge (Mutanga et Skidmore, 2004). Sentinel-2 présente l'avantage d'acquérir de l'information dans quatre bandes spectrales de ces spectres (Bandes 5, 6, 7 et 8a) (Figure 2). L'utilisation de statistiques basées sur les indices de végétation est l'une des méthodes les plus utilisées et les plus simples pour estimer la hauteur d'herbe et la biomasse des prairies (Verrelst *et al.*, 2015a). Cependant, la précision de l'estimation basée sur ces indices dépend très fortement du choix du ou des indices considérés. Afin de déterminer les bandes spectrales et les indices les plus intéressants, Verrelst *et al.*, (2015b) propose de calculer toutes les combinaisons de bandes possibles en fonction de différentes formules d'indices. Cette méthode permet d'évaluer toutes les bandes spectrales disponibles selon différentes formules d'indices comprenant chacune deux ou trois bandes spectrales. Afin de tester la capacité de toutes les bandes spectrales disponibles à estimer la hauteur d'herbe et la biomasse des prairies, toutes les combinaisons possibles ont été testées sur la base de cinq formules d'indices à deux ou trois bandes spectrales (Tableau 1).

TABEAU 1 - Indices retenus et formules associées ;  $b_i$ ,  $b_j$ , et  $b_k$  correspondent aux bandes spectrales utilisées parmi les 10 bandes Sentinel-2 à disposition

Combinaison	Formule	Nombre de combinaisons
ND( $b_i, b_j$ )	$(b_i - b_j) / (b_i + b_j)$	90
SR( $b_i, b_j$ )	$b_i / b_j$	
mSR( $b_i, b_j, b_k$ )	$(b_i - b_k) / (b_i - b_j)$	720
3BSI( $b_i, b_j, b_k$ )	$(b_i - b_k) / (b_i + b_k)$	
3BSITian( $b_i, b_j, b_k$ )	$(b_i - b_j - b_k) / (b_i + b_j + b_k)$	
CVI( $b_i, b_j, b_k$ )	$(b_i * b_j) / (b_k^2)$	

### 1.3. La modélisation

La méthodologie de la modélisation comporte trois principales étapes (Figure 3). La première porte sur la sélection d'indices. L'objectif étant d'identifier, parmi tous les indices calculés, les plus pertinents. Une multitude de sélection d'indices est évaluée et le meilleur modèle est sélectionné et apporte donc la sélection des indices optimaux. Plusieurs méthodes de régression (linéaire, réseaux de neurones, machine learning) sont ensuite testées à partir de cette sélection d'indices. Enfin, le modèle montrant les meilleurs résultats est

sélectionné puis évalué sur l'ensemble des données. L'ensemble de la méthodologie est répété plusieurs fois afin d'évaluer la méthodologie sur des ensembles d'apprentissage aléatoires.

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) sont calculés afin d'évaluer l'erreur de prédiction.

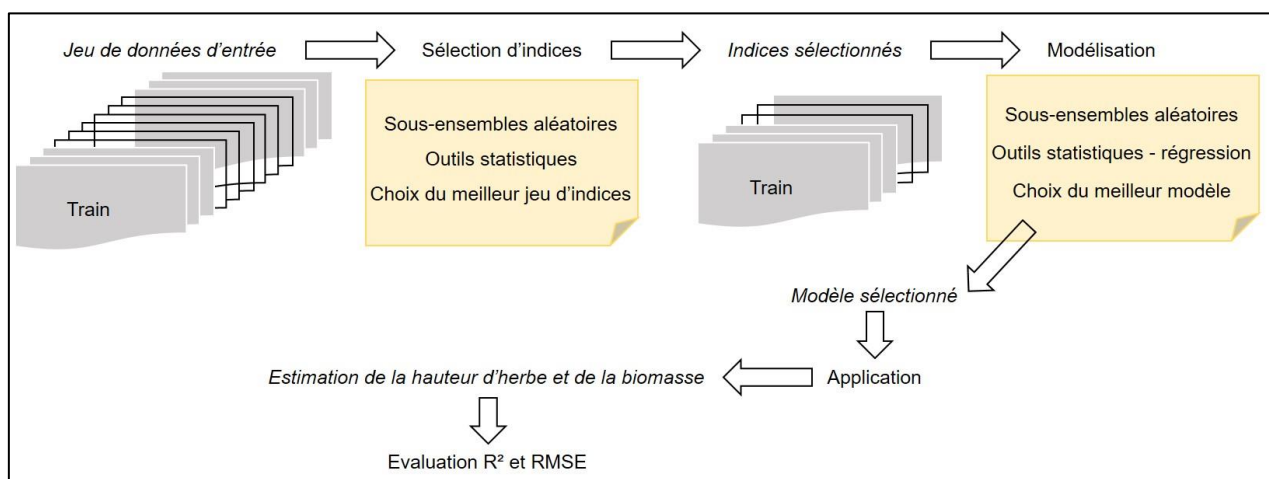


FIGURE 3 – Méthodologie globale pour la modélisation

## 2. Résultats et discussions

La méthodologie générale et la réflexion ont été menées dans un premier temps pour l'estimation de la hauteur de l'herbe et dans un deuxième temps pour l'estimation de la biomasse. Cette dernière demandant un investissement important sur le terrain pour la récolte, le jeu de données récolté au sol est beaucoup plus mince que celui de la hauteur d'herbe (environ 400 points utilisables contre plus de 1000 pour la hauteur).

Les résultats présentés dans ce papier portent seulement sur l'expérimentation et l'application pour l'estimation de la hauteur de l'herbe.

### 2.1. Expérimentation avec les mesures de hauteur d'herbe

L'expérimentation est basée sur les données acquises en 2017 et 2018. A chaque étape de la modélisation, le jeu de données a été scindé en deux, avec 75% pour la calibration et 25% pour la validation. Les résultats de  $R^2$  et de RMSE présentés dans cette partie correspondent aux valeurs obtenues sur les données de validation, soit en moyenne soit au maximum.

Sur un ensemble de plus de trois mille indices calculés, les résultats, comparant données simulées et données mesurées de hauteur d'herbe, montrent une capacité limitée des indices pris un à un à estimer précisément la couverture végétale. En effet, le  $R^2$  est inférieur à 0,6 (Figure 4a) et l'erreur moyenne associée est supérieure à 2,2 cm. Les indices les plus performants sont majoritairement des indices à trois bandes utilisant les bandes spectrales étroites Sentinel-2 de l'infrarouge et du red-edge et les bandes spectrales du moyen infrarouge (Figure 4b).

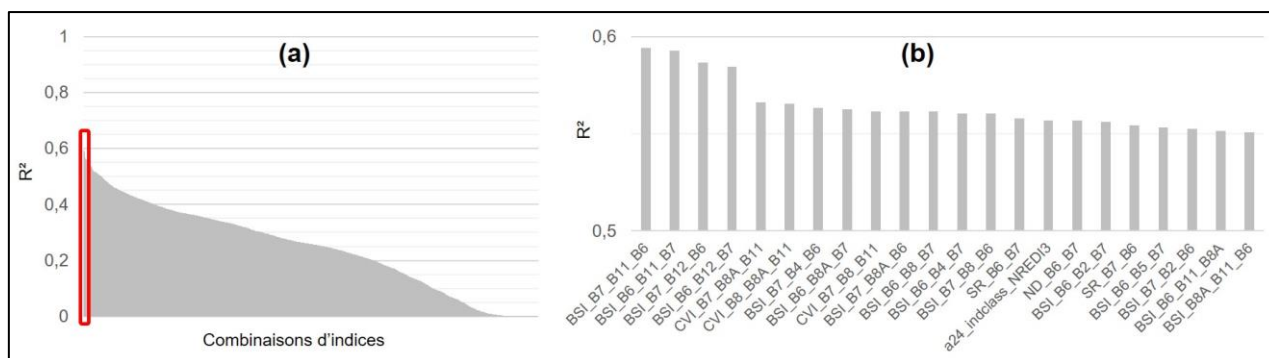


FIGURE 4 – Coefficient de corrélation entre la hauteur d'herbe et les combinaisons de bandes. Prises une par une pour tous les indices calculés (a) et pour les corrélations supérieures à 0,55 (b)

Nous avons donc ensuite évalué la capacité d'une sélection d'indices pour estimer plus précisément la hauteur de l'herbe et la biomasse. En utilisant la sélection d'indices la plus performante (environ 60 combinaisons considérées), que nous appelons dans la suite du texte 'le modèle', le coefficient de corrélation entre la hauteur d'herbe mesurée au sol et celle estimée a atteint 0,79 avec une RMSE de 1,53 cm (Figure 5a). Les erreurs augmentent avec la hauteur de l'herbe. Ce résultat s'explique par le fait qu'au-dessus de 12 cm de hauteur d'herbe les mesures herbomètre au sol sont moins fiables. Elles sont aussi moins présentes dans notre jeu de données, car dans la plupart des cas, l'herbe est pâturée entre 8 et 12 cm, hauteur herbomètre. Aussi on peut observer une légère sur-estimation des faibles hauteurs et une sous-estimation des hauteurs plus importantes (Figure 5b). Les indices composés de trois bandes spectrales sont majoritaires dans le modèle (Figure 5c) ainsi que les bandes spectrales à spectre étroit du red-edge et du proche infrarouge (Figure 5d).

A partir de ce modèle, des estimations de hauteur d'herbe sont réalisées chaque semaine dès qu'une image satellite est disponible sur les sites puis ces estimations sont ensuite transférées aux agriculteurs afin d'estimer la production/réserve d'herbe et l'état de la végétation à l'échelle de l'exploitation. L'évaluation des estimations est présentée dans la partie suivante.

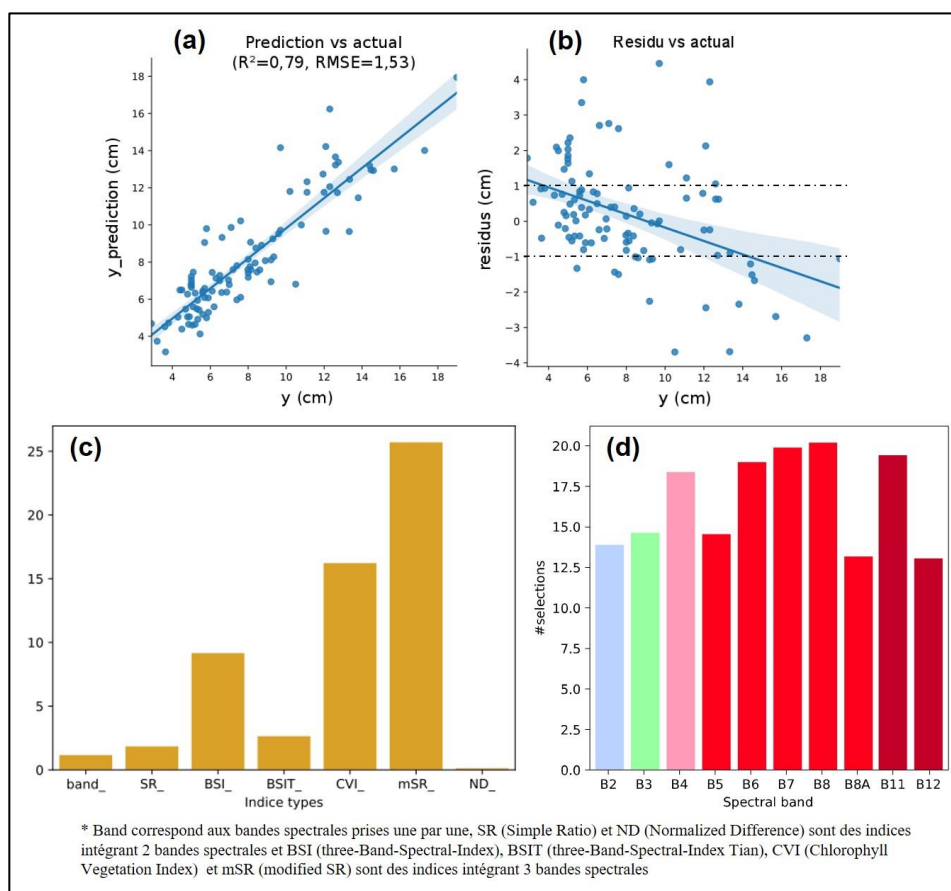


FIGURE 5 – Valeurs estimées de hauteur d'herbe *versus* valeurs mesurées (a), les résidus (b), nombre moyen d'implication d'un type d'indice dans les entités sélectionnées (c) et nombre moyen d'implication d'une bande spectrale dans les entités sélectionnées (d)

## 2.2. Mise en application pendant l'année 2020 dans des fermes expérimentales et des fermes du réseau pousse de l'herbe

En 2020, les estimations de hauteur d'herbe et de biomasse obtenues grâce au satellite ont été comparées aux données terrain issues des fermes expérimentales du projet HERDECT et du réseau « pousse de l'herbe » afin de tester la robustesse du modèle d'estimation de la pousse de l'herbe. Afin de faciliter le suivi et le traitement des données, le nombre de fermes suivi en 2020 a été réduit à 8. Seulement les résultats obtenus pour l'estimation de la hauteur de l'herbe sont présentés dans ce papier.

Les fermes pour lesquelles les estimations ont été réalisées (Figure 6a) se distinguent entre elles par leur contexte pédoclimatique et la conduite des prairies. Ces 8 fermes sont réparties sur le Grand Ouest (Bretagne, Normandie, Pays de la Loire) et la Nouvelle Aquitaine. Les animaux y pâturant diffèrent selon les sites (bovin allaitant, bovin laitier, ovin), tout comme la sévérité du pâturage (hauteur de sortie allant de 3 à >5cm) et les

compositions botaniques et âges des prairies. Ces exploitations font partie du réseau « pousse de l’herbe ». De fait, chaque semaine des mesures de hauteur d’herbe y sont effectuées à raison de minimum 30 mesures herbomètre par hectare. Les parcelles mesurées font majoritairement parties du circuit de pâturage. Finalement les données acquises sur le terrain intègrent de la diversité ce qui va permettre de tester la robustesse du modèle d’estimation de la pousse de l’herbe.

Parallèlement aux mesures effectuées sur le terrain, des hauteurs d’herbe ont été estimées par satellite. La principale difficulté rencontrée est la temporalité de ces estimations. En effet, si les mesures terrain sont effectuées à date fixe chaque semaine, les estimations satellitaires sont, elles, obtenues de manière beaucoup moins prévisibles et réparties inégalement à l’échelle de l’année : les facteurs limitant l’acquisition d’image sont les nuages puisqu’ils complexifient voire rendent impossible leurs traitements et par conséquent l’estimation de la croissance d’herbe.

A titre d’exemple, sur le site de la ferme de Derval (44), sur la période allant du 21 février au 28 mai 2020, 40 images satellites ont été obtenues. Sur ces 40 images, seulement 10 présentent un taux de clarté permettant leur exploitation. Les autres images sont inexploitable du fait de l’ennuage : taux de clarté généralement inférieur à 50% et/ou localisation des nuages sur le site d’étude. Malgré le peu d’estimations disponibles à l’échelle de l’année (environ une dizaine par site), des comparaisons de hauteur terrain avec des hauteurs estimées par satellite ont été effectuées. La Figure 6b présente l’estimation de la pousse moyenne d’herbe sur une parcelle de la Ferme Expérimentale de Derval (44). Cette parcelle fait partie des 20% des exemples qui fonctionnent le mieux sur la ferme de Derval. On notera qu’il y a eu un pâturage le 28 mars et le 21 mai. Les estimations du modèle sont cohérentes avec les données mesurées au sol, cependant, au vu de la difficulté à obtenir des images valorisables, il est impossible d’effectuer une courbe complète de la pousse de l’herbe.

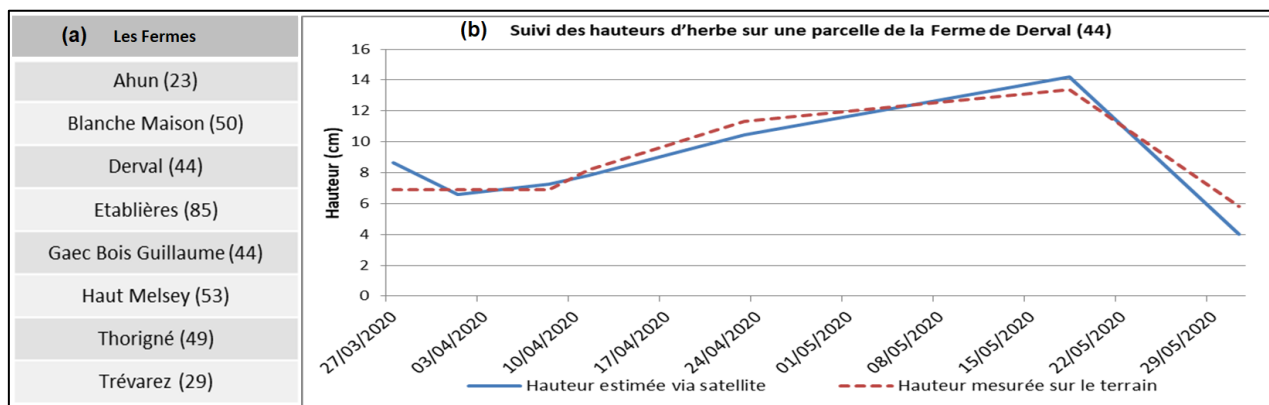


FIGURE 6 – Liste des fermes pour lesquelles les hauteurs estimées par satellite ont été comparées aux hauteurs mesurées sur le terrain (a), comparaison des hauteurs estimées et mesurées sur une parcelle de la Ferme de Derval (44) (b)

A l’échelle des 8 sites suivis en 2020 (concernant des fermes expérimentales et des fermes du réseau pousse de l’herbe (figure 6b)), 529 estimations de hauteur d’herbe via le satellite ont été couplées à des hauteurs mesurées au sol. La Figure 7a reprend l’ensemble de ces données. La corrélation entre ces mesures est encourageante ( $R^2=0,54$ ). Toutefois des écarts persistent.

Plusieurs pistes peuvent être évoquées pour expliquer ces écarts, d’une part la fiabilité du modèle et d’autre part la justesse et la représentativité des mesures de hauteur réalisées à l’herbomètre.

Comme on l’observe sur le graphique 7a, plus les hauteurs d’herbe sont importantes et plus le satellite semble les sous-estimer. Toutefois, au-delà de 15 cm herbomètre la comparaison des hauteurs estimées et mesurées est à nuancer car la fiabilité des mesures herbomètre est moindre. La tendance des sous-estimations des hauteurs, par les drones, a également été mis en évidence dans la publication de Surrault *et al.*, 2018.

La Figure 7b illustre la répartition des écarts entre les hauteurs mesurées au sol et estimées par satellite selon les classes de hauteurs. Les classes 6-9 cm et 9-12 cm sont bien représentées. En revanche peu de données composent la classe 12-15cm. On observe 2 courbes de Gauss pour les classes 6-9 cm et 9-12 cm, respectivement centrées sur des écarts compris entre 0-1 cm et 1-2 cm. Le modèle a donc tendance à sous-estimer les hauteurs. La majorité des écarts sont compris entre -1 et 2 cm, ce qui indique une certaine pertinence du modèle.

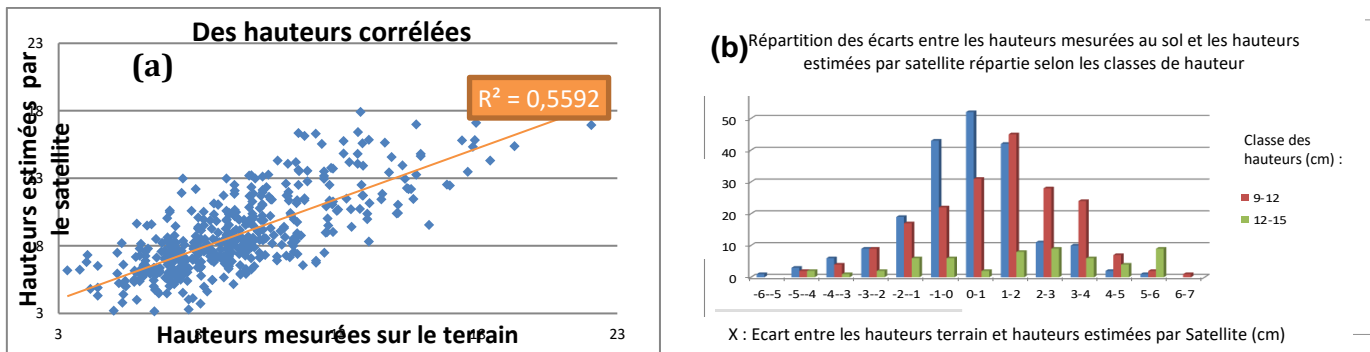


FIGURE 7 – Corrélation entre les hauteurs mesurées au sol et estimées via satellite (a), écart type entre les hauteurs mesurées et estimées selon les classes de hauteurs (b)

## Conclusion et perspectives

Les modèles construits ont pour vocation à être utilisés dans des outils éleveurs d'aide à la gestion du pâturage. Plusieurs scénarios d'utilisation du modèle satellite sont possibles : l'intégration du modèle dans un outil déjà existant comme par exemple HappyGrass (<https://www.happygrass.fr/Pages/Presentation>), PâturPlan (<http://www.orne-conseil-elevage.fr/orne-nos-innovations/paturplan.html>) ou la création d'un nouvel outil d'aide à la décision (type application). La finalité de l'outil est de fournir des indicateurs de pilotage de l'herbe aux éleveurs et conseillers afin d'optimiser la valorisation de l'herbe.

Coupler les données hauteur d'herbe au besoin alimentaire du troupeau permettrait d'obtenir des indicateurs indispensables pour une gestion fine du pâturage : la quantité d'herbe disponible par parcelle, les parcelles à pâturer en priorité (hauteur importante), le nombre de jour d'avance, les parcelles à débrayer, l'estimation de la productivité des prairies.

Ces indicateurs peuvent être illustrés comme sur la Figure 8, avec une cartographie des parcelles et le code couleur établis selon la quantité d'herbe disponible, des courbes de production et des indications chiffrées.



FIGURE 8 - Preuve de concept de l'application HERDECT

## Références bibliographiques

- Ali I., Cawkwell F., Dwyer E., Barrett B., Green S. (2016). "Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management—a review", *Journal of Plant Ecology*, doi:10.1093/jpe/rtw005.
- CNIEL, (2018). "Le pâturage des vaches laitières françaises : état des lieux de la pratique pour l'ensemble des territoires français (synthèse)", <https://cniel-infos.com/Record.htm?idlist=1&record=10214494124920326769>, 24p.
- 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*, 919, doi.org/10.4000/cybergeo.33245.

- Huyghe C., Delaby L., (2013). "Prairies et systèmes fourragers – Pâturage, ensilage, foin", *Agriproduction*, Editions France Agricole, 530p.
- Mutanga O., Skidmore A.K. (2004). "Narrow band vegetation indices over-come the saturation problem in biomass estimation", *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3999-4014, doi:10.1080/01431160310001654923.
- RMT prairies demain, (2016). "Protocole de la mesure de la croissance de l'herbe", 4p, ISBN : 978-2-36343-799-0
- Surrault F., Barre P., Escobar-Gutierrez A.J., Roy E. (2018). "Le drone, un nouvel outil au service de la sélection pour estimer la hauteur des plantes fourragères". *Fourrages* n°236. 281-288.
- Verrelst J., Camps-Valls G., Munoz Mari J., Rivera J.P., Veroustraete F., Clevers J.G., Moreno J., (2015a). "Optical remote sensing and the re-trieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties—a review", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 273–290, doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.05.005.
- Verrelst J., Rivera J.P., Veroustraete F., Munoz Mari J., Clevers J.G., Camps-Valls G., Moreno J., (2015b). "Experimental sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods – a comparison", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 260–272, doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.04.0.
- Weiss M., Jacob F., Duveiller G. (2020). "Remote sensing for agricultural applications : A meta-review", *Remote Sensing of Environment*, 236, doi:10.1016/j.rse.2019.111402.