

Végéphy – 24^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
ORLÉANS – 3, 4 et 5 DÉCEMBRE 2019

**ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE ET DE LA BIOMASSE DU BLE ET DES ADVENTICES PAR IMAGERIE
VISIBLE ET MACHINE LEARNING : VERS UN NOUVEL INDICATEUR NON DESTRUCTIF DE LA
COMPÉTITION CULTURE-ADVENTICE ?**

C. GEE ⁽¹⁾, E. DENIMAL⁽²⁾, N. BOULARD ⁽¹⁾, A. LARMURE ⁽¹⁾

⁽¹⁾ AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon,
christelle.gee@agrosupdijon.fr

⁽²⁾ Agrosup Dijon, Service Système d'Information appui à la Recherche et Enseignement Supérieur, 26
Bd Dr Petitjean, 21000 DIJON, France, emmanuel.denimal@agrosupdijon.fr

RÉSUMÉ

Cette étude propose d'estimer précocement par imagerie deux variables clés dans la gestion des cultures et dans la compétition culture-adventices : l'indice foliaire (LAI) et la biomasse aérienne sèche (BM). Une expérimentation a été conduite au champ pendant la phase végétative d'une culture de blé. Pour chaque peuplement (culture de blé, adventices), les taux de couverture du sol par la végétation (TC_c , TC_w) ont été déduits du traitement d'image basé sur une technique de machine learning. LAI et BM ont été mesurés de façon destructive. Puis, une calibration a été réalisée entre TC et LAI d'une part et entre TC et BM d'autre part. Ce travail pourrait, à terme, faciliter le diagnostic de l'agriculteur dans sa gestion durable de la flore adventice avec la création d'un nouvel indicateur non destructif de la compétition culture-adventices construit à partir de simples images visibles.

Mots-clés : adventices, biomasse, nuisibilité, image visible, machine learning

ABSTRACT

This study proposes to estimate very early the leaf area index (LAI) and aerial dry biomass (BM) of crop and weeds by an image approach (RGB images). A field experiment was conducted during the vegetative phase of wheat. For each stand (crop, weeds), the vegetation cover ratios (TC_c , TC_w) were deduced from visible images and machine learning techniques. LAI and BM were measured with destructive methods. Then, a calibration was performed between TC and LAI and between TC and BM. This work could facilitate the diagnosis of the farmer for a sustainable weed management because it aims to create a new non-destructive indicator of crop-weed competition using simple visible images.

Keywords: weed, biomass, harmfulness, visible image, machine learning

INTRODUCTION

De nombreux travaux sont conduits sur la gestion et la maîtrise des adventices en système de culture : c'est un sujet d'étude primordial puisqu'elles affectent les performances de la culture (qualité et quantité) et donc la rentabilité des exploitations agricoles. L'apparition de résistance aux herbicides nécessite de repenser les autres moyens de lutte contre ces infestations (Darmency, 1990). Les principaux leviers d'action reposent sur la limitation de la compétition pour les ressources (azote, éléments minéraux et lumière) par la perturbation du cycle de vie de l'adventice (levée, croissance, reproduction). Différents travaux, s'appuyant sur des méthodes traditionnelles d'observation, explorent cette compétition entre adventices et culture en expérimentant différents itinéraires techniques notamment en testant différentes variétés ou différentes densités de semis (colza : Fried, 2007 ; Blé : Lecomte *et al*, 2000 ; Munier-Jolain, 2005). Ces raisonnements nécessitent de pouvoir estimer au mieux la nuisibilité des adventices sur une culture donnée (P. Caussanel, 1989). Toutefois, de récentes études ont remis en question l'utilisation de la densité d'adventices (nombre de pieds/m²) comme indicateur de la nuisibilité (Cordeau *et al*, 2016 ; Bastiaans and Kropff, 2017). En effet, le nombre de pieds/m² ne rend pas aussi bien compte de la pression des adventices sur la culture que d'autres variables, car il dépend des espèces, des stades de développement et des ressources disponibles. Les biomasses ou les indices foliaires relatifs de la flore adventice et de la culture semblent plus représentatifs de ce rapport de compétition à un instant donné (Cordeau *et al*, 2016). En agriculture de précision, les nouvelles technologies telles que l'imagerie embarquée dans un drone (Vigneau *et al*, 2014 ; Peña *et al*, 2013) sont de plus en plus utilisées pour fournir des cartes instantanées de biomasse de culture, de préconisation azotée ou pour de la reconnaissance d'adventices en culture sarclée, qui se caractérisent par un inter-rang important. Il existe également des approches terrestres, à l'aide de robot (Berge *et al*, 2012) par exemple, qui explorent la reconnaissance d'adventices pour une pulvérisation localisée. Cependant, en culture de blé, il y a encore peu d'études par imagerie du couvert végétal pour du phénotypage au champ (Liu *et al*, 2017 ; Svensgaard *et al*, 2014) ou pour de la détection automatique d'adventices (Wu *et al*, 2011). Les difficultés à étudier la flore adventice par imagerie sur le rang en culture de blé peuvent s'expliquer par les densités de semis élevées, les inter-rangs de faible largeur et le tallage plus ou moins important du blé compliquant la discrimination culture/adventices. Or il n'en demeure pas moins que cette nuisibilité varie à la fois dans l'espace et le temps. L'arrivée des techniques de machine (Pflanz *et al*, 2018) et deep learning (Bah *et al*, 2018) semblent prometteuses. Ainsi, l'utilisation d'outils numériques pour gérer la double variabilité (temporelle et spatiale) apparaît indispensable et semble réalisable grâce à la combinaison de modèles de culture prédictifs (variabilité temporelle) et de nouvelles technologies telles que l'imagerie (variabilité spatiale).

L'objectif de cette étude est d'explorer la possibilité d'utiliser l'imagerie visible pour un diagnostic rapide de la compétition entre un peuplement de blé et un peuplement d'adventices. Pour atteindre cet objectif, une première étape consiste à corréliser les données issues de l'approche « image » (taux de couverture du sol par la végétation) aux données « destructives » d'indice foliaire et de biomasse.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

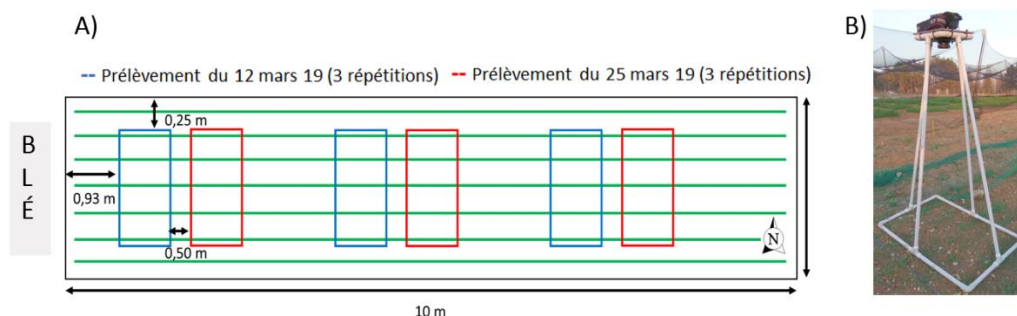
Dispositif expérimental

L'expérimentation se déroule au champ sur le site expérimental d'AgroSup Dijon à Dijon (21) en France (sol profond argilo-calcaire) durant la période de novembre 2018 à juillet 2019. Du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.), variété APACHE, a été semé le 19 novembre 2018, à une densité de 345 g/m² sur une micro-parcelle (10m x 1,20m ; 7 rangs ; inter-rang de 0,15m) (figure 1). Avant le semis du blé, du maïs avait été implanté pendant 3 ans, puis un travail du sol superficiel a été réalisé. La flore adventice naturellement présente sur la micro-parcelle d'étude n'a pas été désherbée ; deux apports d'azote ont été réalisés : 51 kg N/ha au tallage et 102 kg N/ha à la montaison.

Les mesures et prélèvements ont été réalisés à deux dates : le 12/03/2019 au stade 3 feuilles et pendant tallage le 25/03/2019.

Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental : A) la micro-parcelle avec les quadrats de mesures et de prélèvements. Les bleus correspondent au prélèvement (P1) du 12 mars 2019, les rouges correspondent au prélèvement (P2) du 25 mars. B) Système d'imagerie : un appareil photo RGB fixé sur un bâti de la taille d'un quadrat.

Figure 1: Experimental set-up: A) a micro-plot with the sampling quadrats. The blue ones correspond to sample of date 1 (P1), the red ones correspond to sample of date 2 (P2). B) Imaging system: a RGB camera fixed to a frame of similar size as quadrat.



Les mesures et les prélèvements ont été effectués avec des quadrats de 45cm x 76cm (0,342 m²). Pour chaque date, 3 répétitions ont été réalisées. Le positionnement des différents quadrats de mesures et prélèvements dans la micro-parcelle est présenté en figure 1A. Pour chaque répétition de chacune des dates, deux méthodes de mesure ont été réalisées :

- une méthode dite « destructive » avec prélèvements du blé et des adventices présents dans le quadrat. Dans la démarche de ce travail, l'approche destructive sert de référence ;
- une deuxième méthode dite « numérique » avec acquisition d'image.

Méthode de mesure destructive : mesure de l'indice foliaire (LAI) et de la biomasse aérienne sèche (BM)

A chaque date, la totalité de la flore présente dans le quadrat a été prélevée. Trois variables ont été mesurées séparément pour le peuplement de blé d'une part et celui d'adventices d'autre part :

- le nombre de plantes par unité de surface ;
- l'indice foliaire (en anglais Leaf Area Index, LAI) via un planimètre. Le LAI [m²/m²] est défini comme l'aire des faces supérieures des feuilles contenues dans un volume située au-dessus d'un mètre carré de surface de sol ;
- la biomasse aérienne sèche par unité de surface (BM), via une pesée après séchage à l'étuve 48h à 80°C.

L'identification des adventices a été réalisée par des agronomes, experts de la flore adventice de l'INRA (UMR Agroécologie).

Méthode de mesure numérique : mesure de Taux de Couverture du sol par la végétation (TC)

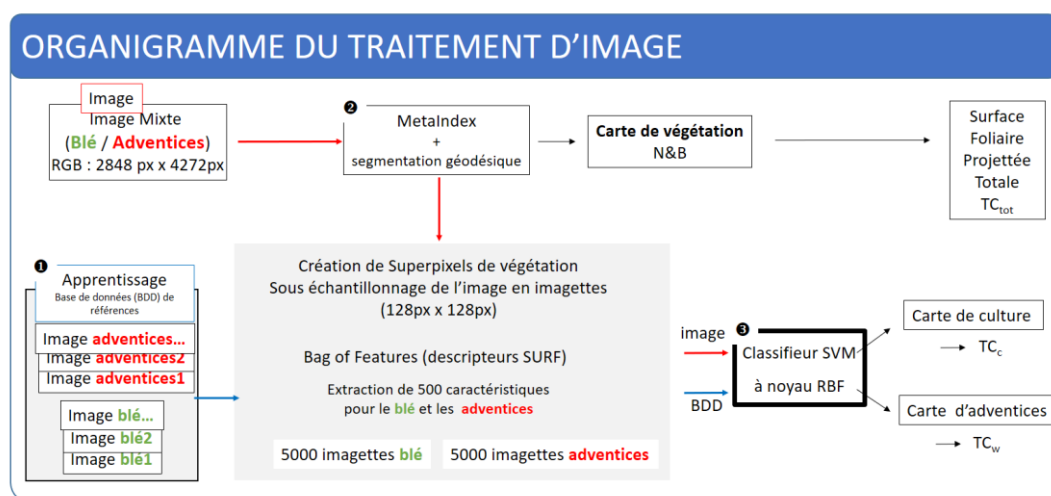
Le dispositif d'acquisition d'images est présenté en figure 1B. Il s'agit d'un appareil photo RGB numérique Canon EOS 450D reflex avec une focale de 35mm et 12 Mpixels (Nombre de pixels dans l'image : 2848 x 4272). L'appareil est fixé verticalement sur un bâti à une hauteur de 1m permettant d'avoir une scène photographiée correspondant à la dimension d'un quadrat. Enregistrées au format RAW puis compressées au format JPG, les images sont ensuite corrigées pour prendre en compte les variations de l'illuminant lors de chaque acquisition (corrections radiométriques et vignetage). Une mire colorimétrique et un damier N&B ont été utilisés. Pour chaque mesure, deux images sont réalisées : une image 'mixte', contenant les peuplements blé et adventices, réalisée avant le prélèvement des plantes, et une image 'adventices' réalisée après le prélèvement de la culture de blé. En dehors des zones de prélèvements et de mesures, six images 'blé' ont été réalisées après avoir enlevé les adventices. Ces images 'adventices' et 'blé' serviront à alimenter la base de données images

lors de la phase d'apprentissage du classifieur. Au total, ce sont 18 images qui ont été enregistrées et associées aux prélèvements de la méthode destructive.

Dans l'image, pour déterminer le taux de couverture du sol par la végétation 'culture' (TC_c) et 'adventices' (TC_w) et construire une carte de culture et d'adventices, il est nécessaire au préalable de faire un classement des pixels de l'image en trois classes : culture, adventices et non-végétation. L'organigramme du traitement est présenté en figure 2 et se résume en trois étapes : 1) la création d'une base de données images (BDD) sur les adventices et la culture. Les variables influentes (500) de chaque peuplement sont alors identifiées grâce à la technique de Bag of Visual Words (BoVW) (Pflanz *et al*, 2018) et l'utilisation de descripteurs SURF (Bay *et al*, 2006). Cette base d'images permet d'entraîner le classifieur pour lui apprendre à distinguer les deux familles culture et adventices (phase d'apprentissage). 2) la segmentation de l'image RGB initiale pour créer une image de végétation. Pour ce faire, un nouvel indice de végétation, MetaIndex, est proposé. Il repose sur un vote majoritaire des résultats issus de six indices (ExG, ExR, MExG, CIVE, HSVDT, VEG) couramment utilisés dans la littérature (Meyer *et al*, 2008 ; Wei Guo *et al*, 2013 ; Baniaich *et al*, 2019). Précisément, il faut quatre indices sur les six, pour décider de la classe (végétation ou autre) du pixel. Cette méthode est complétée par une segmentation géodésique pour affiner les résultats et obtenir une carte de végétation. 3) une classification supervisée reposant sur une technique de machine learning. Le classifieur utilisé repose sur un algorithme de type SVM (Support Vector Machine) avec un noyau à fonction de base radiale (type gaussien). Lors de la phase de test, une image RGB est présentée au classifieur. Cette image a subi au préalable quelques traitements avec notamment la création de super-pixels de végétation (Bah *et al*, 2018) pour lesquels les variables influentes de chaque peuplement sont extraites. Ensuite la classification de ces variables permet, en s'appuyant sur la phase d'apprentissage présentée ci-dessus, de construire une carte de culture, une carte d'adventices et de calculer le taux de couverture du sol par chacun des peuplements, culture et adventices ; ce taux se définit comme étant le rapport du nombre de pixels de feuilles de culture vs. adventices de l'image de végétation par le nombre de pixels total de l'image. A noter que la prise d'image verticale présente l'avantage de ne pas surestimer la valeur du taux de couverture (TC). Ce taux étant toujours inférieur à l'unité, les comparaisons avec le LAI pourraient devenir problématiques lors d'études réalisées à des stades avancés de développement de végétation. Ainsi, en travaillant à un stade jeune de la végétation, on évite ces désagréments.

Figure 2 : Schéma descriptif de la méthode de traitement d'images suivie pour calculer le taux de couverture de sol par la végétation (TC_{tot} , TC_c et TC_w) à partir de l'image.

Figure 2: Flowchart of the image processing method followed to calculate the vegetation cover ratios (TC_{tot} , TC_c et TC_w) from the image.



A l'issue du traitement de chaque image, et pour chaque peuplement (blé et adventices), trois mesures de taux de couverture du sol par la végétation (TC) sont calculées : TC_{tot} pour la végétation totale, TC_c pour la culture de blé et TC_w adventices.

RÉSULTATS

Caractérisation des peuplements blé et adventices.

Les adventices les plus fréquemment trouvées étaient des dicotylédones annuelles avec majoritairement la *Veronica hederifolia* (Véronique à feuilles de lierre) et la *Fumaria officinalis* (Fumeterre officinale). Le tableau I présente les deux principales espèces végétales de la micro-parcelle et leurs densités. L'historique de la parcelle (culture précédente et travail du sol) semble avoir eu un effet prépondérant sur l'émergence de certaines adventices, peu spécifiques à la culture du blé (aucune monocotylédone).

Tableau I : Caractérisation des espèces (culture et principales adventices) et de leurs densités (moyenne, écart-type) à chaque date de mesure.

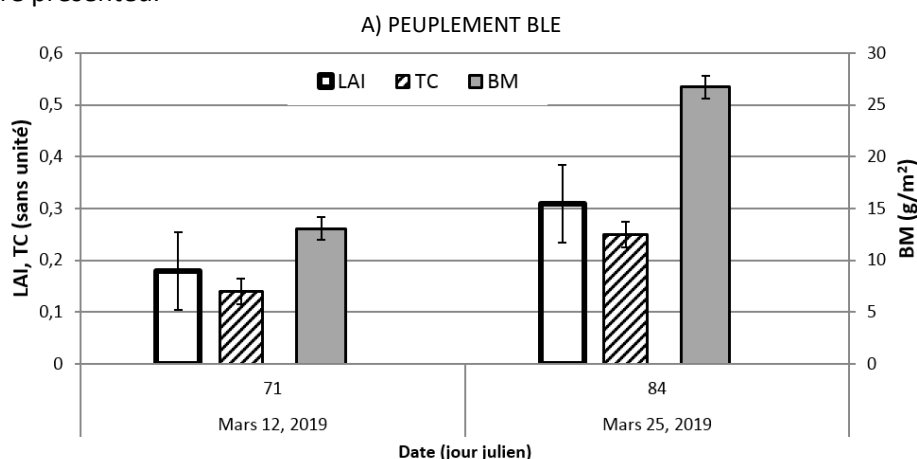
Table I: Culture and main weed species and their density at each sampling date.

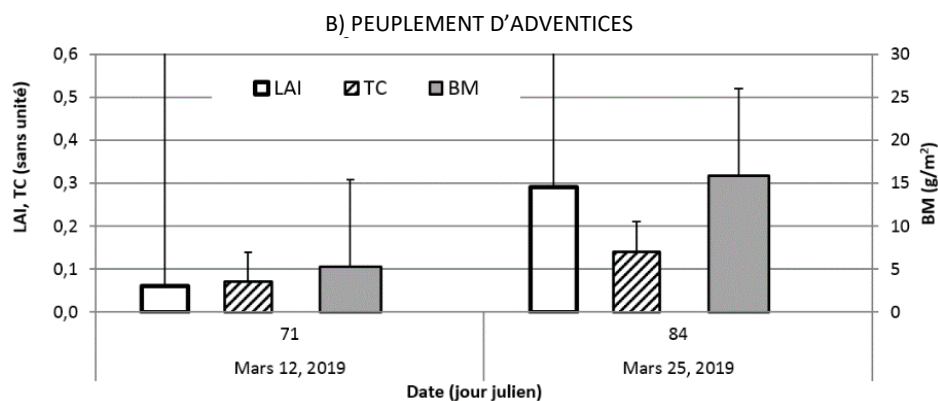
	NOM	NOM LATIN	Densité (plantes/m ²) Date 1 : 12/03/2019	Densité (plantes/m ²) Date 2 : 25/03/2019
CULTURE	Blé tendre d'hiver	<i>Triticum aestivum</i> L.	342 ± 31	330 ± 85
ADVENTICES	Véronique à feuilles de lierre	<i>Veronica hederifolia</i>	32 ± 13	8 ± 2
	Fumeterre officinale	<i>Fumaria officinalis</i>	5 ± 2	1 ± 0

Par la suite, l'ensemble des adventices a été considéré comme un seul peuplement. Pour chacun des peuplements « culture de blé » et « adventices », l'évolution des trois variables, LAI, BM et TC est présentée en figure 3. Pour les deux peuplements, blé et adventices, les trois variables augmentent entre les deux dates, ce qui est cohérent avec la croissance des peuplements. Dans le cas des adventices, la variabilité à chaque date est beaucoup plus élevée que pour la culture de blé. Ceci est révélateur d'un peuplement « adventices » assez hétérogène pour la répartition spatiale des plantes dans la parcelle.

Figure 3 : Evolution des trois variables : Indice foliaire (LAI), taux de couverture du sol par la végétation (TC) et biomasse aérienne sèche (BM) pour le peuplement blé (A) et d'adventices (B). Pour chacune des deux dates sont représentées les valeurs moyennes et écarts-types.

Figure 3: Evolution of the three variables: Leaf Area Index (LAI), vegetation cover ratio (TC) and aerial dry biomass (BM) for wheat (A) and weed (B) stand respectively. At both date, means and standard deviations are presented.





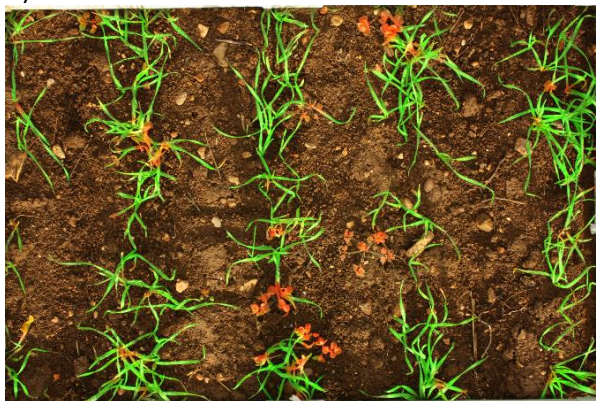
Taux de couverture du sol par la végétation (TC) issu de l'approche numérique.

La figure 4 représente, aux deux dates de mesures, les résultats du traitement de l'image pour discriminer la culture du peuplement adventices. Pour les deux dates de l'étude, il ressort que l'algorithme de machine learning est capable de distinguer le blé, des adventices présentes sur le rang. De plus, les feuilles de culture débordant sur l'inter-rang sont bien identifiées comme de la culture et non des adventices. L'algorithme développé semble donc assez performant concernant sa capacité à reconnaître les classes adventices et culture avec un faible taux d'erreur pour chaque classe.

Figure 4 : Résultats de la classification (blé/adventices) par machine learning pour une image prise A) lors de la première date de prélèvement (12 mars 2019) et B) lors de la deuxième date prélèvement (25 mars 2019).

Figure 4: Results of the (wheat/weeds) classification by machine learning for an image taken A) at the first sampling date (March 12, 2019) and B) at the second sampling date (25 March 2019).

A)



B)



Pour les trois images prises aux deux dates de prélèvement, les taux de couverture du sol par la végétation ont été calculés et sont présentés dans le tableau II. Dans le cas de l'image de la figure 4A, le taux de couverture du sol par le peuplement culture (TC_c) est de 0,14 et pour les adventices (TC_w) est de 0,02. Pour la date 2, TC_c est de 0,26 et TC_w est de 0,08. A travers le tableau II, on remarque une très grande variabilité des résultats du peuplement d'adventices pour chacune des dates montrant la difficulté à caractériser ce peuplement à grande variabilité spatiale.

Tableau II : Tableau de valeurs concernant le taux de couverture du sol par la culture et les adventices pour chaque image.

Table II: Table of values for ground cover ratio of a wheat stand and a weed stand for each image.

Prélèvement	Quadrat	Culture			Adventices		
		TC_c			TC_w		
date 1 12 mars 2019	Q1	0,14	moyenne :	0,14	0,02	moyenne :	0,07
	Q2	0,15	écart-type :	0,01	0,03	écart-type :	0,06
	Q3	0,12			0,16		
date 2 25 mars 2019	Q1	0,26	moyenne :	0,25	0,08	moyenne :	0,14
	Q2	0,27	écart-type :	0,02	0,19	écart-type :	0,05
	Q3	0,22			0,16		

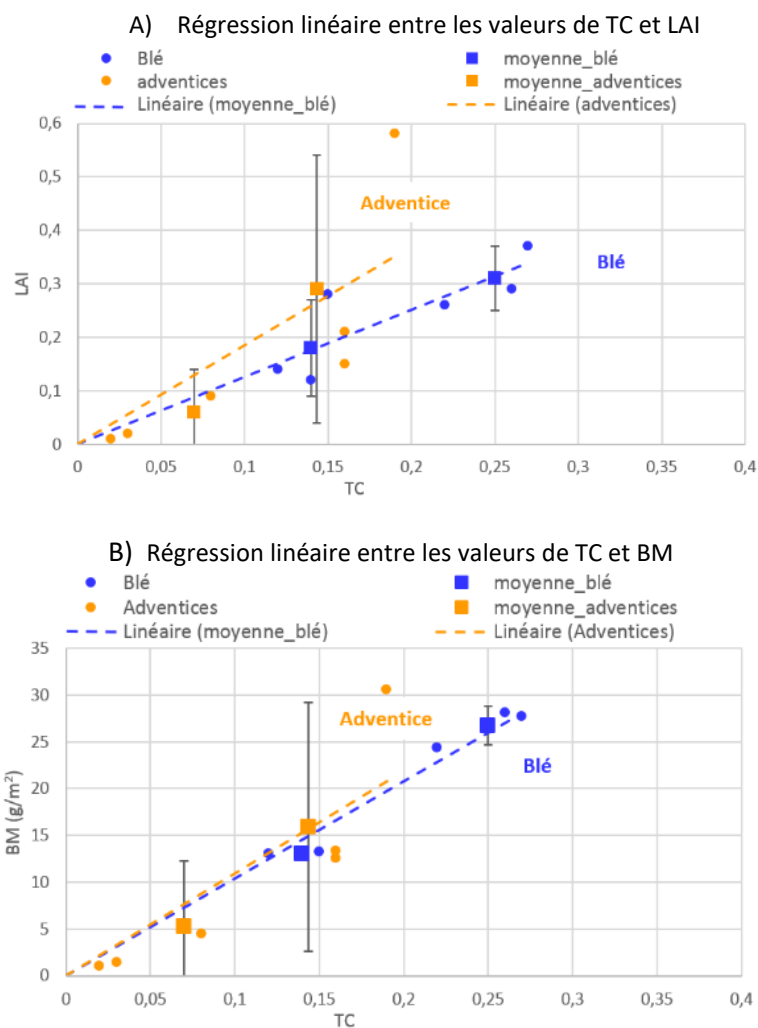
Etude des corrélations de l'indice foliaire (LAI), la biomasse (BM) avec le taux de couverture du sol (TC) pour la culture de blé et les adventices.

L'objectif de cette partie est d'étudier s'il est possible d'utiliser le taux de couverture du sol par la végétation afin d'estimer les variables d'état biologiques, LAI et BM de culture et adventices tout en minimisant le temps et les moyens nécessaires d'acquisition et traitement des données et en évitant la destruction du peuplement. Sachant que les données ont été collectées à un stade jeune de développement, nous avons testé un modèle linéaire simple : LAI (ou BM) = $a \cdot TC$. La Figure 5A présente l'indice foliaire (LAI) en fonction du taux de couverture de la culture de blé et du peuplement d'adventices. Les équations de régressions linéaires sont obtenues sur l'ensemble des répétitions.

Concernant l'Indice foliaire (LAI), $LAI = 1,26 \times TC_c$ avec $r^2=0,85$ pour la culture de blé, et $LAI = 1,85 \times TC_w$ avec $r^2= 0,66$ pour le peuplement d'adventices. Les résultats sont satisfaisants pour le blé mais restent plus mitigés pour les adventices avec de forts écarts-types. A la lecture de la figure 5A, il semble que les données issues de l'image sous-estiment les valeurs, comparées aux données issues (LAI) de la méthode destructive, dite de référence. Il faut préciser que les mesures destructives sont assez délicates, notamment concernant le prélèvement des plantes proches des bords du quadrat dont la délimitation des feuilles est parfois difficile à définir ; ce point demanderait à être approfondi. Concernant la biomasse (BM), les résultats sont présentés figure 5B : $BM = 104 \times TC_c$ avec $r^2= 0,98$ pour le blé et $BM = 109 \times TC_w$ avec $r^2= 0,78$ pour le peuplement adventice. Comparée à la précédente, cette relation entre TC et BM semble beaucoup plus fiable pour les deux peuplements renforçant l'idée de corréler la biomasse (BM) au taux de couverture du sol par la végétation (TC).

Figure 5 : Régression linéaire (ligne en pointillé) entre A) les valeurs de TC et LAI et B) les valeurs de TC et BM pour chaque peuplement (wheat, weed). Les points ronds sont les mesures de chaque date, de couleur bleue pour blé et orange pour adventices. Les points carrés représentent les valeurs moyennes et barres d'erreur pour chaque date.

Figure 5: Linear regression (dashed line) between A) TC and LAI values and B) TC and BM values for each stand (wheat, weed). The round dots are the measurements of each date, blue for wheat and orange for weeds. The square dots represent means and standard deviations for each date.



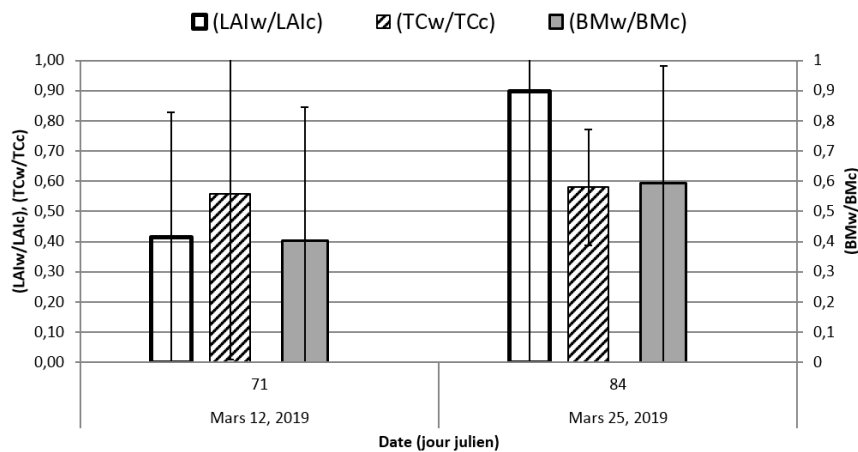
Caractérisation de la compétition culture-adventices

Dans le cadre de la gestion du désherbage sur une parcelle agricole, la compétition culture-adventices peut être explorée à travers un nouvel indicateur, proposé par Colbach et Cordeau (2018), comme le rapport de la biomasse adventices sur biomasse culture (BM_w / BM_c). Cet indicateur semble plus pertinent que la densité d'adventices (nbre de pieds/m²) pour exprimer la nuisibilité de celles-ci en parcelles cultivées car la densité ne semble pas traduire suffisamment l'influence de l'effet du stade de croissance des adventices sur le peuplement de culture.

Grâce aux précédents résultats des corrélations entre TC (taux de couverture du sol par la végétation) et BM ainsi qu'entre TC et LAI, pour la culture d'une part et pour les adventices d'autre part, il devient donc possible d'estimer cet indicateur de compétition entre culture et adventices, de trois manières différentes : rapport (BM_w / BM_c), rapport (LAI_w / LAI_c) et le rapport (TC_w / TC_c). Les valeurs moyennes des résultats obtenus pour chaque date sont présentées en figure 6 avec leurs écart-types. Même si les valeurs du rapport (LAI_w / LAI_c) sont très éloignées de celles des rapports (BM_w / BM_c) et (TC_w / TC_c), on constate qu'il n'en est pas de même pour les rapports (BM_w / BM_c) et (TC_w / TC_c), qui semblent assez similaires, avec cependant des écart-types assez importants. Ces résultats méritent d'être complétés pour mieux caractériser la compétition culture-adventices entre les données issues de l'image et les données mesurées sur le terrain. Des images de toute la parcelle ont été réalisées et sont en cours de traitement.

Figure 6 : Evolution du nouvel indicateur de compétition dans le peuplement de blé estimé à partir de l'indice foliaire (LAI), du taux de couverture du sol par la végétation (TC) et de la biomasse (BM) pour chaque date de mesure.

Figure 6: Evolution of the new competition indicator in wheat crop estimated from the Leaf Area Index (LAI), vegetation cover ratio (TC) and biomass (BM) for each measurement date.



DISCUSSION

a) Validation de l'approche image

L'utilisation d'une méthode de classification supervisée -avec en amont la préparation d'une base de données d'images- donne de bons résultats visuels. Ceux-ci doivent être quantifiés pour mieux évaluer les performances de cet algorithme dans la classification culture/adventices. L'utilisation des techniques de machine learning semble être un réel avantage pour la classification de végétation comparée aux techniques classiques reposant sur la détection du rang de culture telles que la transformée de Hough ou filtre de Gabor reposant sur une transformée de Fourier (Jones *et al*, 2009). En effet, non seulement les adventices sur le rang sont bien détectées mais aussi les extrémités de feuilles de culture dans l'inter-rang sont bien identifiées en culture et non en adventices.

Même si la comparaison entre les résultats de l'image (taux de couverture du sol par la végétation (TC)) et les données expérimentales (BM et LAI) semble très satisfaisante en terme de corrélation (figure 5), il n'en demeure pas moins que la validation des résultats issus de l'image à plus grande échelle spatiale reste à faire. Avec la création et l'utilisation d'une base d'apprentissage permettant d'explorer des centaines de caractéristiques de plantes, les performances de la méthode pourront être améliorées et il deviendrait envisageable d'aller vers une classification beaucoup plus fine au sein des adventices pour espérer les classer en différentes catégories utiles à l'agriculteur pour sa stratégie de désherbage : dicot (annuelles/vivaces) /monocot.

Lors de cette étude, la micro-parcelle de blé étudiée présentait uniquement des adventices dicotylédones annuelles, résultats liés à l'historique de la parcelle. Aussi, nous n'avons pu tester l'efficacité de cette nouvelle méthode de traitement d'image pour d'autres adventices (par ex., monocotylédones ou flore d'adventices dicots plus variée) aux traits morphologiques très proches de ceux de la culture implantée. D'autres expérimentations seront nécessaires pour éprouver la robustesse de cette classification entre une culture et des adventices monocotylédones et à terme d'aller vers l'identification de plantes.

b) Corrélation entre (TC et LAI) et (TC et BM)

Concernant la culture de blé, l'étude de la corrélation entre les résultats images (TC) et les mesures de BM et LAI a confirmé la qualité des résultats obtenus avec des corrélations linéaires. La corrélation

entre BM, la biomasse aérienne, et TC apparaît meilleure que pour le LAI. Cette tendance est également observée avec le peuplement d'adventices malgré une très grande variabilité des données. Ces premiers résultats sur la corrélation encouragent à poursuivre ces essais afin de voir la robustesse de ces corrélations à l'échelle d'une parcelle agricole, sur plusieurs années et sur différents sites d'étude.

c) Vers un indicateur non destructif de compétition culture-adventice reposant sur la biomasse ?

La gestion durable des adventices repose le plus souvent sur la connaissance des populations d'adventices et de leur densité. Nous avons testé le ratio (BM_w/BM_c), nouvel indicateur de nuisibilité des adventices, à travers la biomasse aérienne et étudié les corrélations avec les données images (TC_w/TC_c). Les résultats sont encourageants mais pas assez nombreux pour conclure sur le potentiel de l'imagerie visible à caractériser la biomasse aérienne d'un peuplement. Grâce à l'imagerie nous aurions alors un indicateur non destructif pour caractériser cette compétition à différents stades de croissance, ce qui permettrait de faire un pilotage précis du désherbage par le suivi minutieux de l'évolution de la flore adventice au sein d'une parcelle cultivée.

Par la suite, il pourrait être envisagé de prédire à très court terme l'évolution de la biomasse des adventices photographiées pour l'estimation d'un risque potentiel de nuisibilité. Aller vers une modélisation de la croissance journalière d'un peuplement (culture, adventices) n'est pas à exclure. Des modèles plus perfectionnés (modèle STICS ou FLORSYS) seraient à explorer avec le risque d'alourdir considérablement la démarche recherchée d'opérationnalité pour l'agriculteur.

CONCLUSION

Ce travail méthodologique a porté sur la réalisation d'une détection automatique précoce des peuplements de culture et d'adventices, par imagerie visible pour développer des cartes de biomasse aérienne de peuplement de végétation à l'échelle d'une parcelle afin d'élaborer un indicateur non destructif de la compétition culture-adventices. L'objectif à terme serait d'estimer le potentiel de nuisibilité des adventices. Les premiers résultats ont permis de mettre en correspondance les résultats issus de l'image (TC) à ceux obtenus par mesures destructives (BM et LAI) ouvrant de nouvelles possibilités sur le potentiel de l'imagerie pour caractériser différents peuplements de végétation au sein d'une image mixte en estimant des variables agronomiques primordiales. Même si ces nouvelles technologies restent encore sous-utilisées au champ, la mise en place de telles techniques pour la prédiction court-terme des adventices en culture de blé est un réel challenge surtout dans l'objectif d'un zéro-phyto.

REMERCIEMENTS

Un très grand merci aux technicien(ne)s de l'UMR Agroécologie, Eric Pimet et Annick Matějček, pour leurs implications dans ce projet, l'un sur la gestion des micro-parcelles d'AgroSup Dijon et l'autre concernant les mesures au laboratoire de surfaces foliaires et de biomasses.

BIBLIOGRAPHIE

- Bah M.D., Hafiane A., Canals R., 2018 - Deep Learning with unsupervised data labeling for weeds detection on UAV images. *Remote Sens.*, 10(11), 1690. <https://doi.org/10.3390/rs10111690>
- Bastiaans, L., Kropff, M.J., 2017- Weed Competition. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (Second Edition). Academic Press, Oxford, pp. 473–478. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00027-7>
- Bay H., Tuytelaars T. and Van Gool L., 2006 - SURF: Speeded Up Robust Features. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, p. 404-417.
- Beniaich A., Marx Leandro Naves Silva, Fabio Arnaldo Pomar Avalos, Michele Duarte de Menezes, Bernardo Moreira Cândido, 2019 - Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital

photographic camera. *Proceedings of the PSEMINA: CIENCIAS AGRARIAS*, 40(1):49-66 · February 2019
<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p49>

Berge T.W., Goldberg S., Kaspersen K., Netland J. -2012. Towards machine vision based site-specific weed management in cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 81, p.79–86

Caussanel, P. J., 1989 - Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle: Situation de concurrence bispecifique. *Agronomie* 9, 219–240.
<https://doi.org/10.1051/agro:19890301>

Colbach N. and Cordeau S., 2018 - Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* 94 p. 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.008>

Cordeau, S., Dessaint, F., Denieul, C., Bonin, L., Vuillemin, F., Delattre, M., Rodriguez, A., Guillemain, J.-P., Chauvel, B., 2016 - La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures : quelles réponses nous apportent les essais désherbage ? *Presented at the AFPP - 23e Conférence du COLUMA, Dijon.*

Darmency H, Gasquez J., 1990- Résistances aux herbicides chez les mauvaises herbes. *Agronomie, EDP Sciences*, 10 (6), pp.457-472.

Fried G. and Reboud X., 2007 - Évolution de la composition des communautés adventices des cultures de colza sous l'influence des systèmes de culture. *OCL VOL. 14 N° 2*, p.130-138.
<http://dx.doi.org/10.1684/ocl.2007.0098>

Jones G., Gée Ch., Truchetet F., 2009 - Modelling agronomic images for weed detection. Application to the comparison of crop/weed discrimination algorithm performances. *Precision Agriculture Journal* Vol 10 (1) p.1-15.

Lecomte C., Heumez E., Pluchard P., 2000 - Identification de différences génotypiques dans la réponse aux contraintes environnementales : cas de la concurrence due aux mauvaises herbes dans une culture de blé tendre d'hiver. In : *Maillard P., Bonhomme R. (Eds.), Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. INRA, Paris, p. 539-558.

Meyer G.E., Neto J.C., 2008 - Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and electronics in agriculture*, 63, 282-293

Munier-Jolain N.M., Chauvel B., Gasquez J., 2005 - Stratégies de Protection Intégrée contre les adventices des cultures : le retour de l'agronomie. In : *Regnault-Roger C. (Ed.), Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement*, Lavoisier, Paris, p. 411-430.

Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., et López-Granados, F., 2013 - Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. *PLoS ONE* N°8, e77151.

Pflanz M., Nordmeyer H. and Schirrmann M., 2018 - Weed Mapping with UAS Imagery and a Bag of Visual Words Based Image Classifier. *Remote Sens.*, 10(10), 1530; <https://doi.org/10.3390/rs10101530>

Liu Shouyang, Baret F., Andrieu B., Burger P. and Hemmerlé M., 2017 - Estimation of Wheat Plant Density at Early Stages Using High Resolution Imagery. *Front Plant Sci.*, 8: 739.

Svensgaard J., Roitsch T. and Christensen S., 2014 - Development of a Mobile Multispectral Imaging Platform for Precise Field Phenotyping. *Agronomy*, 4, 322-336.
<http://dx.doi.org/10.3390/agronomy4030322>

Vigneau N., Chéron C., Verger A., Baret F., 2014 - Imagerie aérienne par drone : exploitation des données pour l'agriculture de précision. In : *Colloque scientifique francophone: Drones et moyens légers aéroportés d'observation*, 2014, Montpellier, France

Wei Guo, Uday K. Rage, Seishi Ninomiya, 2013 - Illumination invariant segmentation of vegetation for time series wheat images based on decision tree model. *Computers and Electronics in Agriculture* 96, p.58–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.010>

Wu X., Xu W., Song Y. and Cai M., 2011 - A Detection Method of Weed in Wheat Field on Machine Vision. *Procedia Engineering*, Volume 15, Page:1998-2003
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.373>