



Caractériser le pouvoir couvrant des céréales

Anne-Michelle Faux¹, Julie Legrand², Martine Leclercq¹, Mathieu Bonnavé³, Olivier Mahieu³ et Fabienne Rabier¹

La lutte contre les adventices est fréquemment citée comme contrainte majeure à la conversion à l'agriculture biologique (AB). Outre le désherbage mécanique, la culture en tant que telle fait partie des moyens de lutte par sa capacité à concurrencer le développement des adventices. Dans cette étude, nous nous intéressons à caractériser la capacité des céréales à couvrir le sol, ou pouvoir couvrant, dans le but d'étayer les recommandations variétales aux agriculteurs·rices.

Le pouvoir couvrant en culture de céréales

En culture de céréales, il est reconnu que le triticale est plus compétitif que le blé tendre, tandis qu'il existe des différences variétales quant à leur capacité à étouffer les adventices (Fontaine *et al.*, 2009 ; Arvalis, 2013). Dans ce cadre, la mesure du pouvoir couvrant vise à **apprécier la compétitivité de la culture vis-à-vis des adventices**. Le pouvoir couvrant dépend *a priori* de la **surface foliaire** et du port des plantes, lesquels influencent la distribution de la lumière dans le couvert — la plante ou son ombre couvre le sol et prive ainsi de lumière les autres plantes — et évoluent au cours du développement des plantes. Il est caractérisé par la couverture foliaire et est potentiellement associé à d'autres paramètres morphologiques de la culture, à savoir, **le port des plantes, le nombre de talles ou la largeur des feuilles**. En termes de port, les variétés érectophiles, qui présentent des feuilles dressées le long de la tige, se différencient des variétés planophiles, dont les feuilles sont très étalées.

Traditionnellement, le pouvoir couvrant des céréales n'était pas considéré comme un caractère prioritaire dans les programmes de sélection, étant donné la possibilité de contrôler chimiquement les adventices. Plus récemment, le développement de l'AB et la réduction du recours aux herbicides, ou l'apparition de résistances à ceux-ci en agriculture conventionnelle, ont conduit à un regain d'intérêt pour sa caractérisation (Fontaine *et al.*, 2009 ; Andrew *et al.*, 2015). Il peut en effet constituer un levier agronomique intéressant à prendre en considération dans la lutte contre les adventices, en combinaison avec d'autres méthodes (Arvalis 2013).

Recourir à l'imagerie pour caractériser la couverture foliaire

Depuis 2020, le pouvoir couvrant fait l'objet d'une caractérisation approfondie au sein des essais variétaux de céréales en AB, menés conjointement par le CARAH, le CPL-Végémar et le CRA-W. Le recours à l'imagerie permettant d'objectiver la mesure de la couverture foliaire (Patrignani et Ochsner, 2015), la cotation visuelle de la couverture foliaire est couplée à la prise de photos des parcelles d'essai, lesquelles sont ensuite soumises à un logiciel d'analyse d'images.

Dans ce cadre, l'**objectif principal** de notre étude est d'**améliorer la méthode de caractérisation du pouvoir couvrant des céréales**. Il se décline en deux objectifs spécifiques :

- (i) Évaluer l'intérêt de l'**analyse d'images** comme méthode de caractérisation de la couverture foliaire des céréales, et
- (ii) Caractériser les **relations entre couverture foliaire et autres paramètres** morphologiques ou agronomiques potentiellement associés.

Matériels et méthodes

La couverture foliaire (CF) a été caractérisée au sein des essais par cotation visuelle et par imagerie (Figure 1). La **cotation visuelle** de la CF consistait à fournir une note allant de 1 à 9, selon que la culture couvre très peu à complètement la surface du sol. En outre, une (en 2020) ou deux (en 2021, 2022 et 2023) **photos par parcelle** ont été prises au moyen d'un smartphone et soumises à un logiciel d'analyse d'images, l'application Canopeo (Patrignani et Ochsner, 2015) ou le package R FieldImageR (Matias *et al.*, 2020), afin de déterminer le pourcentage de pixels correspondant à la canopée.

En 2023, afin d'optimiser l'acquisition des images, la plateforme d'essais du CRA-W a été survolée par un **drone équipé de capteurs** (drone DJI Phantom 4 Multispectral RTK), qui mesurent la réflectance du couvert sous différentes longueurs d'onde (bleu, vert, rouge, « red edge » et proche infrarouge). La hauteur de vol était de 30 mètres, résultant en une résolution de 1,47 cm par pixel. Les valeurs de réflectance sont ensuite utilisées pour calculer des indices de végétation, parmi lesquels le NDVI (« Normalized Difference Vegetation Index »), le plus couramment utilisé. La valeur du NDVI varie de -1 à 1 et est d'autant plus élevée que le couvert est de couleur verte. Chaque parcelle d'essai est alors caractérisée par une valeur de NDVI moyen.

La caractérisation de la couverture foliaire a été effectuée entre une et cinq fois dans chacun des sites, entre les stades plein tallage et deux nœuds (Tableau 1).

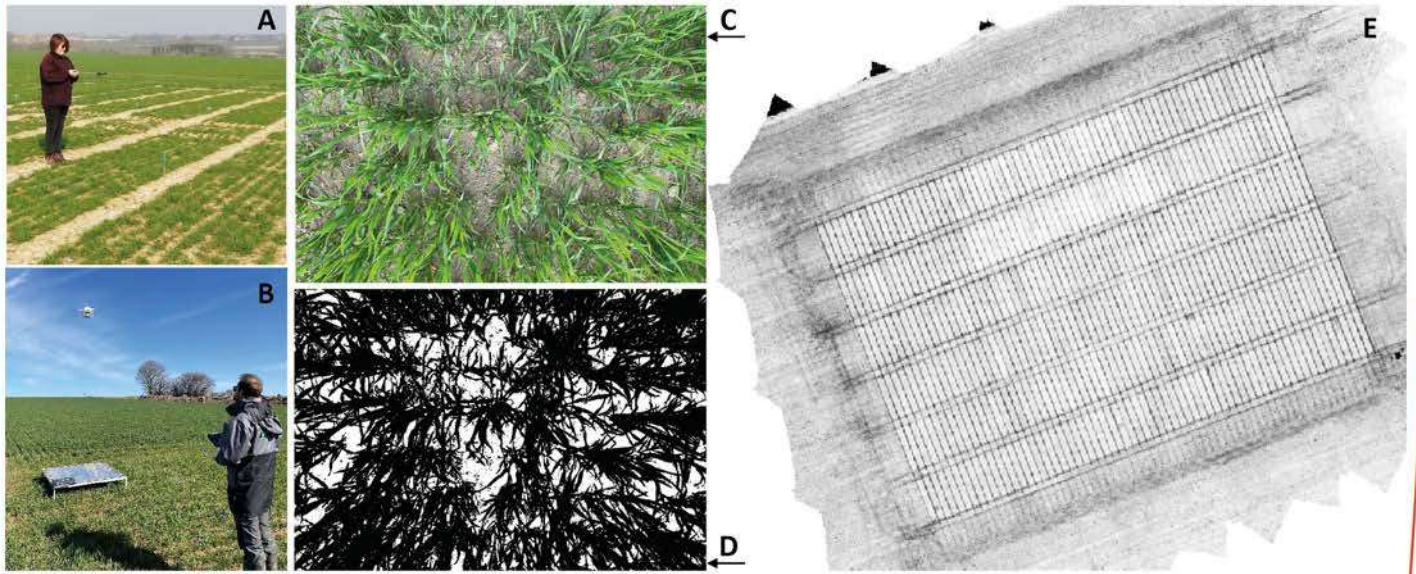


Figure 1 : Détermination de la couverture foliaire par imagerie. A — Prise de photo au niveau de la parcelle avec un smartphone manipulé au moyen d'un « selfie stick ». B — Pilotage du drone survolant l'essai d'Assesse. C — Photo d'une parcelle d'essai prise au moyen d'un smartphone (variété de froment Energo à Assesse en 2022). D — Masque de la photo C, créé lors de l'analyse avec le logiciel FieldImageR, résultant en une couverture de 66,94 %. E — Image orthomosaïque représentant le NDVI obtenu pour la plateforme d'essais à Assesse le 21/4/2023.

Dans un premier temps, les méthodes de caractérisation de la CF par cotation visuelle (CF_visuelle) et par imagerie, à partir de photos prises avec un smartphone au niveau de la parcelle (CF_imgParcelle), ont été comparées sur un total de 24 variétés présentes dans les essais en 2020, 2021 et 2022 (13 variétés de froment, 7 d'épeautre et 4 de triticales). Dans un second temps, les méthodes de caractérisation par imagerie, au niveau de la parcelle (CF_imgParcelle) et par vol de drone (CF_imgDrone), ont été comparées sur l'ensemble des variétés cultivées en 2023 à Assesse (28 variétés de froment, 12 d'épeautre et 12 de triticales).

Outre la CF, différents paramètres morphologiques ont été caractérisés durant ces quatre années au sein des essais menés à Rhisnes, Ohey et Assesse : le nombre de talles, la largeur des feuilles, cotée de 1 (feuilles très étroites) à 9 (feuilles très larges), et le port au tallage, coté de 1 (port dressé) à 9 (port étalé). À ces paramètres s'ajoutaient la densité de plantes à la sortie d'hiver et la précocité à l'épiaison.

Tableau 1 : Dates auxquelles la couverture foliaire a été caractérisée au sein des essais variétaux de céréales biologiques, de 2020 à 2023

	Site CARAH ^a	Site CPL-Végémar ^a	Site CRA-W ^a
2020	Ath	Horion-Hozémont	Rhisnes
Cotation visuelle	16/3 (EP), 13/5 (EP, FR)	23/3 (EP, TR), 15/5	19/3 (TR), 6/4 (EP, FR)
Photos avec smartphone	16/3 (FR, TR), 29/4 (TR)	9/4, 15/5	19/3 (TR), 6/4, 16/4, 27/4
2021	Chièvres	Horion-Hozémont	Ohey
Cotation visuelle		20/4	14/4, 22/4, 28/4, 6/5, 12/5
Photos avec smartphone	1/3, 5/5	24/3, 29/4, 4/6 (TR)	2/4, 14/4, 28/4, 6/5, 12/5
2022	Chièvres	Grand-Axhe	Assesse
Cotation visuelle			18/3, 4/4, 19/4, 2/5
Photos avec smartphone	16/4	24/3, 29/4	18/3, 4/4, 19/4, 2/5
2023	Ath	Ligney	Assesse
Photos avec smartphone	29/3, 19/4	28/3, 21/4	21/2, 16/3, 28/3, 21/4 (EP, FR), 5/5 (TR)
Photos par vol de drone			15/3, 4/4, 21/4

^a Les 3 espèces, froment (FR), triticales (TR) et épeautre (EP), ont été observées aux dates pour lesquelles aucune espèce n'est spécifiée entre parenthèses. Les photos avec smartphone étaient prises au niveau de chaque parcelle d'essai. En 2023, seules les données collectées à Assesse ont été traitées pour la rédaction du présent article.

Intérêt de l'analyse d'images pour caractériser la couverture foliaire (CF) des céréales

Comparaison des résultats obtenus avec les méthodes CF_visuelle et CF_imgParcelle

La corrélation entre cotations visuelles de la CF et mesures par imagerie au niveau de la parcelle a pu être testée pour chacune

des trois espèces à dix dates distinctes, distribuées sur les années 2020, 2021 et 2022, représentant un total de 30 situations. Les cotations visuelles et mesures CF_imgParcelle sont apparues positivement corrélées entre elles dans 50 % des situations

uniquement. La corrélation moyenne s'élevait à $0,44 \pm 0,23$. Afin d'apprécier l'intérêt de l'une et l'autre méthodes, la variabilité de la CF parmi les essais a été investiguée, selon qu'elle était caractérisée par CF_visuelle ou par CF_imgParcelle.

LES AVANCÉES DU BIO

Le recours à l'imagerie met en évidence l'évolution de la CF avec le temps, conséquence de la croissance et du développement des plantes. Les cotations visuelles n'ont mis en évidence cet effet que dans un seul essai (froment à Ohey), les cotations effectuées dans les autres essais apparaissant indépendantes de la date d'observation. La CF variait entre essais, et sa mesure par imagerie indiquait une interaction entre l'essai (année, site) et la date d'observation. Ces observations s'expliquent par le développement différé des plantes dans les différents essais. Par ailleurs, les deux méthodes de caractérisation de la CF, CF_visuelle et CF_imgParcelle, mettaient en évidence une interaction entre les facteurs variété et essai. L'analyse des résultats variétaux montre que cette interaction s'explique en grande partie par le comportement variable, d'un essai à l'autre, de variétés présentant une CF intermédiaire. Enfin, l'effet de la date d'observation sur la CF ne variait pas selon la variété, suggérant que la CF des variétés évoluait de façon similaire durant la période d'observation, soit entre les stades plein tallage et deux nœuds. En l'absence d'interaction significative entre variété et date d'observation, des tests de corrélations ont été réalisés afin d'évaluer la consistance des observations de CF effectuées à des dates distinctes au sein d'un même essai (tests intra-essais) ou d'essais distincts (tests inter-essais), par cotation visuelle ou par imagerie au niveau de la parcelle (Tableau 2).

Les corrélations entre observations de CF

effectuées à des dates distinctes au sein d'un même essai (tests intra-essais) étaient élevées, que la CF ait été cotée visuellement ou mesurée par imagerie, et ce, aussi bien en froment qu'en épeautre (~0,8 en froment et ~0,7 en épeautre). Les corrélations entre observations réalisées dans des essais distincts (tests inter-essais) étaient plus faibles et variaient fortement selon les paires de dates d'observation considérées. Néanmoins, la mesure de CF par imagerie offrait des corrélations moyennes inter-essais plus élevées que les cotations visuelles (0,26 vs 0,04 en froment, et 0,47 vs 0,3 en épeautre) et relativement moins variables, indiquant une consistance plus élevée des observations effectuées par imagerie.

Comparaison des résultats obtenus avec les méthodes CF_imgParcelle et CF_imgDrone

La corrélation entre mesures par imagerie au niveau de la parcelle et par drone a

été testée sur le site d'Assesse à trois dates distinctes en 2023 pour chacune des trois espèces (Tableau 1), représentant un total de 9 situations. Les mesures CF_imgParcelle et CF_imgDrone étaient positivement corrélées entre elles dans toutes les situations ($p < 0,001$) sauf une. Celle-ci correspondait à la dernière date d'observation en épeautre, pour laquelle la relation était non significative en raison de la présence d'une variété très précoce (Rossella) ayant un NDVI relativement faible. La corrélation moyenne entre mesures CF_imgParcelle et CF_imgDrone s'élevait à $0,74 \pm 0,20$ en considérant les 9 situations, et à $0,79 \pm 0,11$ sans la dernière date en épeautre, montrant une bonne cohérence entre mesures de la CF par imagerie obtenues au niveau de la parcelle et par vol de drone.

Tableau 2 : Résultats moyens (moyenne \pm écart-type) des tests de corrélation entre observations de la CF effectuées à des dates distinctes, selon que la CF ait été cotée visuellement (CF_visuelle) ou mesurée par imagerie au niveau de la parcelle (CF_imgParcelle)

Espèce ¹	Type de test ²	Nombre de tests ³	CF_visuelle	CF_imgParcelle
Froment	intra-essais	12	$0,81 \pm 0,07$	$0,83 \pm 0,1$
	inter-essais	33	$0,04 \pm 0,22$	$0,26 \pm 0,25$
Épeautre	intra-essais	12	$0,7 \pm 0,15$	$0,71 \pm 0,27$
	inter-essais	33	$0,3 \pm 0,33$	$0,47 \pm 0,2$

¹ Les tests de corrélation n'ont pas été réalisés pour le triticale en raison du très faible nombre de variétés pour cette espèce (4).
² Test intra-essai : test de corrélation entre observations réalisées à deux dates distinctes au sein d'un même essai. Test inter-essais : test de corrélation entre observations réalisées à deux dates distinctes dans des essais distincts (année et/ou site différent(s)).
³ Nombre de tests de corrélation réalisés. Chaque test incluait 13 observations pour le froment et 7 pour l'épeautre, chaque observation correspondant à une variété donnée.

Relation entre couverture foliaire (CF) et autres paramètres morphologiques ou agronomiques

Les corrélations entre CF et autres paramètres morphologiques ou agronomiques ont été testées en considérant la CF telle que mesurée par imagerie au niveau de la parcelle (CF_imgParcelle), et ce, dans les essais de froment et d'épeautre uniquement, étant donné le faible nombre de variétés de triticale.

Une corrélation positive entre densité de plantes à la sortie d'hiver et CF a été observée dans moins du tiers des essais ($p < 0,01$), démontrant la forte capacité des céréales à compenser une faible densité de

plantes à la sortie d'hiver. Aucune corrélation n'a été observée entre CF et largeur des feuilles. La corrélation entre CF et nombre de talles a pu être testée dans quatre essais, à savoir, en froment et en épeautre à Ohey en 2021 et à Assesse en 2022. Elle était significative à Ohey uniquement, la CF apparaissant positivement corrélée au tallage ($p < 0,05$). Des comptages additionnels des talles sont nécessaires afin de vérifier cette relation.

La corrélation entre CF et port au tallage a pu être testée en froment et en épeautre à

Rhisnes (2020), à Ohey (2021) et à Assesse (2022 et 2023). Une relation positive entre CF et port au tallage a été observée dans 3 essais sur les 4 en froment, la CF apparaissant plus élevée lorsque le port est davantage étalé ($p < 0,05$). Aussi, en froment, le port au tallage était positivement corrélé à la précocité ($p < 0,05$), les variétés précoces ayant un port au tallage davantage dressé. Enfin, une corrélation négative entre CF et précocité a été observée dans plusieurs essais en épeautre uniquement, la CF y apparaissant d'autant plus élevée que la variété est précoce ($p < 0,05$).

Discussion

Cet article dresse les premiers résultats méthodologiques des approches mises en place, afin de caractériser le pouvoir couvrant, décrit par la couverture foliaire (CF), au sein des essais variétaux de céréales biologiques.

La CF est un caractère **très sensible à l'environnement**. Si des différences systématiques entre essais ne remettent pas en question le classement des variétés, l'observation de comportements variétaux différents entre essais est plus problématique. À l'image des résultats de Fontaine *et al.* (2009), ceci était particulièrement le cas pour les variétés présentant une CF intermédiaire, lesquelles ne sont pas évidentes à classer. Cette observation invite à distinguer les essais lors de la présentation des résultats variétaux.

Le **recours à l'imagerie** semble prometteur pour caractériser la CF. En effet, face à la variabilité de la CF, l'analyse de photos de la CF prises au niveau de chaque parcelle d'essai offrait des résultats plus consistants entre essais que la cotation

visuelle. L'imagerie permet par ailleurs de caractériser l'évolution de la CF avec le temps et peut donc, le cas échéant, mettre en évidence des évolutions divergentes de la CF selon les essais et les variétés. Enfin, l'analyse des images acquises par **vol de drone** sur l'essai d'Assesse, au cours du printemps 2023, fournit des perspectives intéressantes pour la caractérisation de la CF au sein des essais variétaux. Comme attendu, une corrélation élevée a été observée entre la CF mesurée par analyse des photos au niveau de la parcelle et le NDVI, calculé à partir des images de réflectance obtenues via les capteurs embarqués sur le drone.

Aucune relation n'est apparue entre CF et largeur des feuilles, invitant à abandonner la cotation de la largeur des feuilles pour caractériser le pouvoir couvrant. La CF est apparue positivement associée au nombre de talles (essais de froment et épeautre à Ohey en 2021), à un port au tallage étalé en froment (à Rhisnes en 2020 et à Assesse en 2022 et 2023), et à des variétés davantage précoces à l'épiaison en épeautre.

Il s'agit de tendances : ces relations étaient significatives à un faible niveau ($\alpha = 0,05$) et n'ont pas été observées dans tous les essais ; elles sont à **considérer avec précaution**. Elles reflètent la **complexité** du pouvoir couvrant des céréales, lequel semble être davantage le résultat d'une combinaison de caractéristiques morphologiques que de l'influence de l'une ou l'autre caractéristique majeure.

Finalement, si la technologie semble offrir des perspectives intéressantes pour affiner la caractérisation du pouvoir couvrant des céréales, des essais menés en conditions de forte infestation ont montré que le choix d'une variété couvrante reste une **méthode alternative de lutte** contre les adventices, qui doit être combinée à d'autres méthodes agronomiques (Arvalis, 2013). Notons enfin que ces essais menés en conditions de forte infestation ont mis en évidence l'importance de la **hauteur de la plante** comme facteur explicatif du pouvoir concurrentiel face aux adventices, avec la CF et le port au tallage (Fontaine *et al.*, 2009).

Remerciements

Les auteurs remercient les agriculteurs chez qui les essais ont été mis en place et les équipes techniques pour la mise en place des essais et la collecte des données, parmi lesquelles, en particulier, Thibaud Fievet pour la réalisation des vols de drone et l'assemblage des images orthomosaïques et Émilie Mulot, pour l'analyse des images orthomosaïques.

Références

- Andrew I. K. S., Storkey J., Sparkes D. L. (2015). « A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management ». *Weed Research* 55:239–248.
- Arvalis (2013). « Les Essentiels d'ARVALIS – Désherbage / Leviers agronomiques : peut-on valoriser le pouvoir couvrant des cultures ? », <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/desherbage-des-cereales-paille-leviers-agronomiques-peut-valoriser-le-pouvoir>. Page consultée le 23/1/2023.
- Fontaine L., Bernicot M.-H., Rolland B., Poiré L. (2009). « Des variétés rustiques concurrentes des adventices pour l'agriculture durable, en particulier l'agriculture biologique ». *Innovations Agronomiques INRA* 4:115–124.
- Matias F. I., Caraza-Harter M. V., Endelman J. B. (2020). « FIELDimageR: An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials ». *The Plant Phenome J.* DOI: 10.1002/ppj.20005.
- Patrignani A., Ochsner T. E. (2015). « Canopeo: a powerful new tool for measuring fractional green canopy cover ». *Agronomy Journal* 107:2312–2320.