



HAL
open science

LITERAL, un système de phénotypage haut débit portable, léger et précis pour le suivi des cultures

Benoît de Solan, Gaëtan Daubige, Samuel Thomas, Mario Serouart

► To cite this version:

Benoît de Solan, Gaëtan Daubige, Samuel Thomas, Mario Serouart. LITERAL, un système de phénotypage haut débit portable, léger et précis pour le suivi des cultures. Innovations Agronomiques, 2024, 94, pp.303-312. 10.17180/ciag-2024-vol94-art20 . hal-04623296

HAL Id: hal-04623296

<https://hal.inrae.fr/hal-04623296>

Submitted on 25 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



LITERAL, un système de phénotypage haut débit portable, léger et précis pour le suivi des cultures

Benoît DE SOLAN¹, Gaëtan DAUBIGE¹, Samuel THOMAS¹, Mario SEROUART¹

¹ ARVALIS – LPA CAPTE, Laboratoire Partenarial Associé CAPteurs et TELédétection – 228, route de l'Aérodrome – 84914 Avignon, France

Correspondance : b.desolan@arvalis.fr

Résumé :

LITERAL est un outil de phénotypage haut débit portable léger. Il répond au besoin de disposer de moyens de mesure économiques, simples d'utilisation mais précis pour le suivi d'essais en petites parcelles ou d'un réseau de parcelles agricoles. En pratique, il intègre un ensemble de capteurs dont trois caméras à haute résolution, connectés à un boîtier d'acquisition qui déclenche la collecte et la sauvegarde des données. Ce dernier communique avec une tablette PC qui permet la définition de scénarios de mesures via une interface graphique intuitive. Le scénario de mesure décrit la configuration de chaque capteur, le plan d'essai et le nombre de mesures dans chaque parcelle. Cela permet une utilisation facile sur le terrain et assure le bon référencement de chaque image.

Une fois déchargées, les données sont analysées par une chaîne de traitement modulaire, mettant en œuvre des algorithmes de traitement génériques : segmentation sémantique, détection d'objets par *deep learning*, analyse colorimétrique, stéréovision. Ces algorithmes sont paramétrables par culture afin d'obtenir une précision maximale. La qualité des images acquises et les multiples configurations possibles permettent d'utiliser LITERAL pour de nombreuses applications : suivi de la croissance des grandes cultures, des arbres fruitiers, caractérisation de mélanges d'espèces, quantification des symptômes de maladies foliaires, mesure de la densité de plantes ou d'épis, etc.

Ergonomique et évolutif, LITERAL est développé dans le cadre d'un projet CASDAR animé par ARVALIS et associant l'INRAE¹, le GEVES², Terres Inovia³, l'ITB⁴, le CTIFL⁵ et HIPHEN. Il est actuellement utilisé par des équipes techniques en France, au Portugal, aux États-Unis et en Australie. Une diffusion plus large est prévue à partir de 2024.

Mots-clés : Phénotypage haut débit ; Capteurs ; *Deep learning* ; Traitement d'image ; Analyse 3D ; variables biophysiques ; Evaluation variétale

Abstract: LITERAL, a high-throughput precise and portable device for the crop survey

LITERAL is a lightweight, portable high-throughput phenotyping tool. It meets the need for low-cost, easy-to-use yet accurate measuring equipment for monitoring small plot trials or a network of agricultural plots. In practical terms, it integrates a set of sensors, including three high-resolution cameras, connected to an acquisition box that triggers acquisitions, stores data, and communicates with a tablet PC that enables

¹ Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

² Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences

³ Institut technique de la filière des huiles et protéines végétales et de la filière chanvre

⁴ Institut Technique de la Betterave

⁵ Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

measurement scenarios to be defined via a user-friendly graphic interface. The measurement scenario describes the configuration of each sensor, the test plan, and the number of measurements in each plot. This makes it easy to use in the field and ensures that each image is correctly referenced.

Once downloaded, the data are analyzed by a modular processing chain, implementing generic processing algorithms: semantic segmentation, object detection by deep learning, colorimetric analysis, stereovision. These algorithms can be parameterized by culture to achieve high precision. The quality of the images acquired, and the many possible configurations mean that LITERAL can be used for a wide range of uses: monitoring the growth of field crops and trees, characterizing mixed crops, quantifying the symptoms of leaf diseases, measuring the density of plants or fruits, etc.

Ergonomic and scalable, LITERAL has been developed as part of a CASDAR project led by ARVALIS and involving INRAE¹, GEVES², Terres Inovia³, ITB⁴, CTIFL⁵ and HIPHEN. It is currently used by technical teams in France, Portugal, USA and Australia. Wider distribution is planned from 2024.

Keywords: High-throughput phenotyping; Sensors; Deep learning; Image processing; 3D analysis; Biophysical variables; Variety testing

1. LITERAL, un système d'acquisition original

Si le phénotypage haut débit a connu des développements importants depuis 15 ans (Furbank et Tester, 2011), il existe peu de systèmes portables et légers de phénotypage par capteur. Or il s'agit d'un élément essentiel pour accélérer l'acquisition de références expérimentales au champ. LITERAL est un système de phénotypage numérique original. Il se positionne entre les capteurs scientifiques, coûteux et complexes et les capteurs d'agriculture de précision, simples, économiques mais moins précis (Figure 1). Un comparatif des différentes solutions de phénotypage a été établi par Reynolds *et al.* (2019). Les systèmes portables apportent une précision plus élevée que les drones grâce à leur haute résolution spatiale, mais sont moins adaptés au suivi de très grands essais du fait de la durée d'acquisition. Par rapport aux robots de phénotypage comme la PHENOMOBILE (Baret *et al.*, 2019), ils sont plus simples de mise en œuvre, bien plus économiques mais moins précis car ils ne possèdent pas de contrôle de l'illumination. Ces vecteurs automatiques et mobiles sont intéressants dans des études sur la physiologie des plantes soumises à des conditions environnementales particulières.

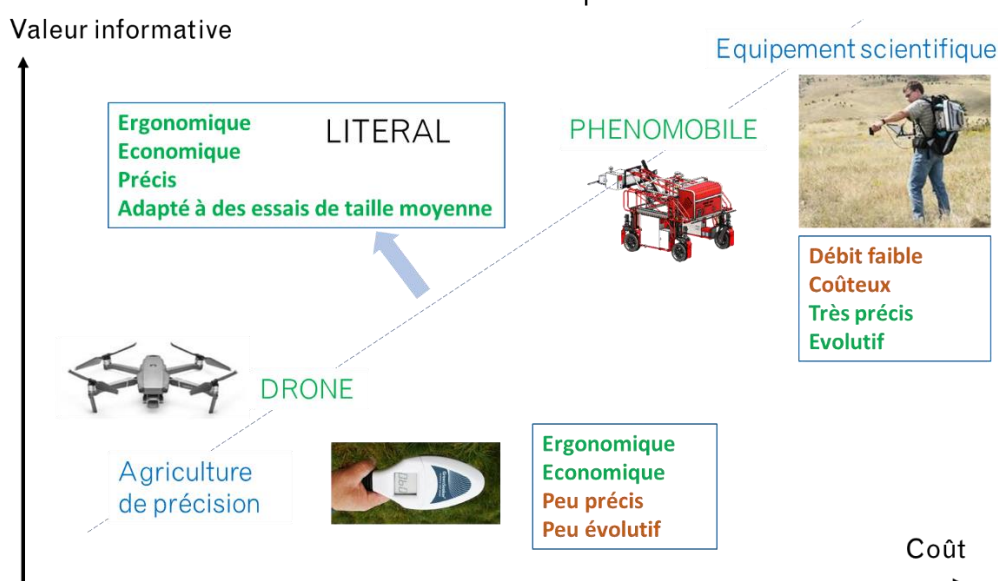


Figure 1 : Positionnement de LITERAL par rapport à l'offre de matériel de phénotypage au champ existant, en fonction du coût et de la valeur informative des données acquises



Un soin particulier a été apporté au choix des capteurs de façon à bénéficier d'une précision maximale pour un coût raisonnable, ainsi qu'à l'ergonomie de système afin de le rendre utilisable par un grand nombre d'opérateurs, moyennant une formation minimale. LITERAL offre un bon compromis entre coût, productivité et précision. Il s'avère particulièrement adapté au suivi de réseaux d'essais agronomiques (évaluation variétale, comparaison de conduites de cultures, mesures en parcelles d'agriculteurs, ...) présentant un nombre conséquent, quelques centaines de microparcelles, ce qui constitue en réalité l'essentiel des situations pour les instituts techniques et autres organismes de R&D du secteur agricole.

LITERAL intègre plusieurs composants (Figure 2) :

- Des capteurs imageurs (caméras) permettant de caractériser la structure de la végétation (taux de couverture totale, indice foliaire vert, fraction de rayonnement intercepté, port foliaire), de dénombrer des organes (comptage plantes, fleurs, épis, tiges...), d'estimer le contenu en chlorophylle (utilisation de l'information multispectrale) ou enfin de caractériser les symptômes de maladies ou ravageurs.
- Une carte électronique intégrant ces capteurs imageurs, ainsi qu'un ensemble de composants assurant le bon 'enregistrement et le référencement de ces données : GPS, accéléromètre, horloge. Un logiciel embarqué assure également le contrôle de ces mesures.
- Une interface ergonomique de contrôle des acquisitions par l'opérateur, via une tablette PC.
- Un support mécanique offrant une grande facilité d'utilisation sur le terrain et assurant un bon confort pour l'opérateur.
- Des algorithmes transformant les images en variables agronomiques d'intérêt. Notre stratégie sur ce point est de centraliser ces traitements sur une plateforme informatique dédiée afin de pouvoir faire évoluer rapidement les méthodes mises à disposition.



Figure 2 : Eléments du système d'acquisition de données de phénotypage LITERAL.

Le système optique est le cœur du système LITERAL. Il est équipé de deux caméras couleur à haute résolution pour son boîtier principal et d'une caméra latérale. Le modèle intégré est la SONY RX0, équipée d'un capteur de 4 800 x 3 200 pixels actifs et d'un objectif 7,7 mm. Cette caméra miniature permet une bonne intégration dans le système électronique. A une distance de mesure de 1,6 m, il offre une GSD (ground sampling distance ou distance réelle au sol entre deux pixels) de 0,5 mm, pour un champ de vue de 1,5 m. Les deux caméras du boîtier principal forment une paire stéréoscopique calibrée géométriquement qui présente une précision théorique pour l'estimation de la distance de 4 cm à 1,6 m. Une caméra RX0 latérale est également reliée au boîtier principal par une prise USB. Elle permet une



prise d'image selon un angle de vue complémentaire. La configuration classique d'utilisation étant de positionner le boîtier principal en visée verticale orientée vers le bas ainsi que la caméra latérale en visée à 45°.

L'autre élément clé de LITERAL est son interface de contrôle. Elle reprend en partie les fonctionnalités du logiciel PhenolHM (Baret *et al.*, 2019), en l'adaptant aux spécificités de LITERAL. Le logiciel permet de définir un essai, composé d'un ensemble de microparcelles référencées par leur identifiant. On définit ensuite un scénario de mesure, qui sera appliqué à chaque microparcelle. Ce scénario est composé d'un ensemble d'actions qui sont déclenchées par l'opérateur lors de la prise active d'acquisitions. On peut par exemple prévoir 6 acquisitions par parcelle, chaque acquisition impliquant une mise au point suivie d'un calcul du temps d'exposition optimal, d'une prise d'image et d'un enregistrement de celle-ci. Ainsi guidé dans la prise de mesures, l'opérateur peut optimiser sa vitesse de travail et limiter les risques d'erreur. On estime à moins d'une minute le temps de mesure pour une microparcelle avec 6 prises d'images.

Enfin, l'ergonomie générale du système a été réfléchi pour une utilisation pratique et confortable au champ. Le principe est de fixer le boîtier principal au bout d'une perche télescopique, elle-même fixée à une ceinture portée par l'opérateur. Un jeu d'articulations permet d'acquérir des images en visée verticale dirigée vers le sol à différentes hauteurs et distances de l'opérateur. À la suite de nos tests, nous considérons que 3 m au-dessus du sol est une limite maximale d'utilisation.

D'autres configurations de mesure sont possibles, pour des cultures hautes comme les vergers ou le maïs. Dans ces cas, nous avons pu tester la mesure en visée basse, avec les capteurs orientés vers le ciel, ainsi que la prise d'image par le côté. Dans ce dernier cas, la perche télescopique est posée sur le sol et déplacée par l'opérateur à chaque mesure.

2. Gestion et traitement des données

Les mesures acquises par capteurs sont structurées selon un format spécifiquement défini pour le stockage et le référencement des données de phénotypage : le format PhenoHDF5 (ARVALIS, 2014). L'intérêt de ce format est d'intégrer les images et les données de référencement associées : nom de l'essai, numéro de microparcelle, date et heure de mesure, position GPS, inclinaison (Figure 3). Le format PhenoHDF5 permet de gérer les données acquises par LITERAL mais aussi par d'autres systèmes de phénotypage comme la PHENOMOBILE. Chaque image occupe un volume de 15 Mo environ. Pour une parcelle avec un échantillonnage de 6 images, mesurée par les 3 caméras, cela représente une volumétrie de 270 Mo. Une fois la session de mesure terminée, les données sont copiées depuis le boîtier principal vers un disque dur externe par connexion USB3, pour un traitement ultérieur.

Ces fichiers standardisés bruts, appelés L0, sont la donnée d'entrée de chaînes de traitement variées. Ces dernières partagent un ensemble de modules logiciels génériques, assurant des tâches de prétraitement et générant des résultats intermédiaires, appelées données L1. Ces modules mettent en œuvre des méthodes de trois types principaux : détection d'objets, segmentation sémantique par *deep learning* et stéréovision, par photogrammétrie (Figure 4).

À l'issue de cette phase de prétraitement, on dispose d'un ensemble de couches d'information sous forme d'images superposables pixel à pixel. Chaque pixel possède différents attributs : couleur (Rouge, Vert, Bleu), distance au capteur (D), information sémantique (sol, végétation, type d'organe, espèce, ...). Le croisement de ces couches offre des possibilités nombreuses pour générer des variables de plus haut niveau, appelée variables agronomiques ou biophysiques (L2). Par exemple, en combinant la distance moyenne au capteur des pixels de sol et la distance minimale au capteur des pixels de la classe végétation, on peut déterminer la hauteur maximale de la culture. L'ensemble de ces résultats sont



stockés dans un fichier ASCII (csv) standardisé permet une lecture et une analyse par les utilisateurs finaux.

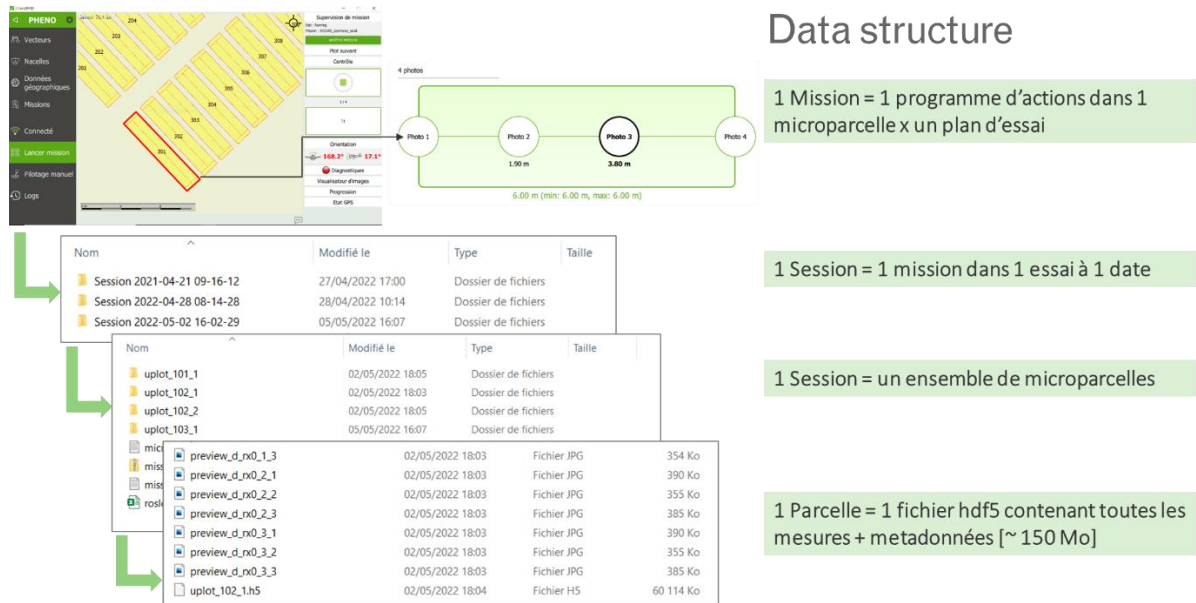


Figure 3 : Structure simplifiée des données acquises à l'aide du système LITERAL

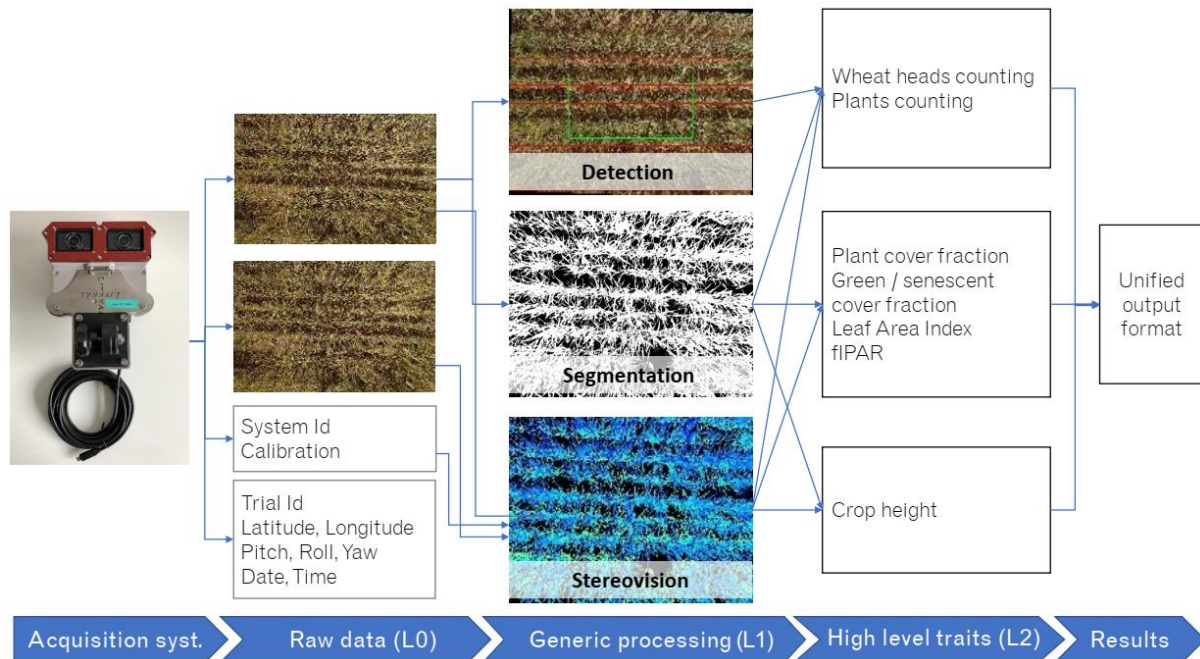


Figure 4 : Gestion et traitement des données acquises par LITERAL.

3. Résultats

Pour illustrer les résultats obtenus par le système LITERAL, voici deux exemples d'application sur des cultures et des variables agronomiques différentes.

Estimation de la densité de plantes de lin

La mesure de densité de plantes de lin par unité de surface est classiquement réalisée au champ par comptage visuel de placettes de 1 m de long sur 2 rangs. Il s'agit d'une mesure longue, pénible et peu précise car la densité de plantes est élevée et hétérogène à l'échelle d'une microparcelle. Il existe donc un intérêt fort à automatiser cette mesure. Le temps de mesure par LITERAL est de 1 min par microparcelle. On estime le temps économisé à 6 min par microparcelle.

A partir de 2019, un ensemble d'images ont été acquises avec le système LITERAL sur le site d'essai de Villers St Christophe (02). Les images ont été prises à 1,2 m de hauteur au-dessus du sol, pour une GSD de 0,35 mm au niveau de la culture.

Une chaîne complète d'analyse de ces données a été définie, en enchaînant un ensemble de modules de traitement. Les étapes sont précisées la Figure 5. Celle-ci mobilise les modules de stéréovision, de détection et de segmentation par *deep learning*. Il s'agit donc d'un cas représentatif des possibilités offertes par l'outil.

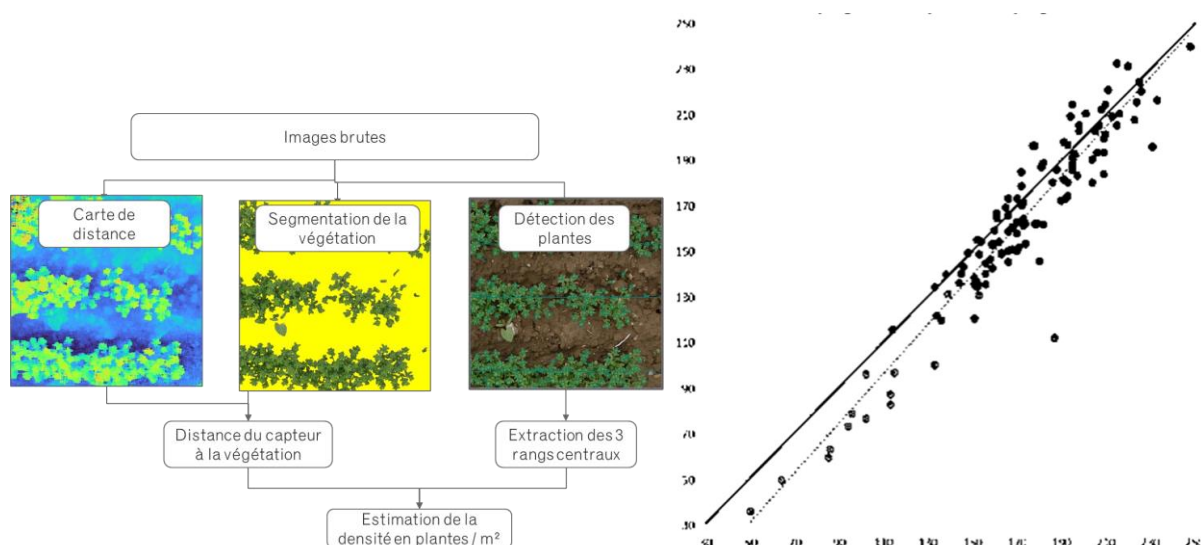


Figure 5 : A gauche : description des étapes de traitement des images pour l'estimation de la densité de plantes de lin par unité de surface ; à droite : corrélation entre densité de plantes mesurées visuellement en abscisses et par LITERAL en ordonnées, en plantes / 0.1 m². Trait plein : droite 1 :1 ; Pointillés : droite de régression

La comparaison avec les mesures de référence acquises sur des placettes de 3 rangs sur 80 cm (Figure 5) montre une bonne précision d'estimation, avec une RMSE relative de 9 %. Les écarts constatés sont nettement plus élevés lorsque l'on compare les estimations faites à l'échelle de la microparcelle. Dans ce cas, les zones précises mesurées et l'effort d'échantillonnage sont différents. Le coefficient de corrélation passe de 0,9 à 0,5. Cette dégradation peut être interprétée comme un effet de l'hétérogénéité du peuplement à l'échelle de la parcelle et un échantillonnage faible dans le cas du comptage visuel du fait du temps de mesure nécessaire. Cette limite n'existe pas pour LITERAL du fait de la rapidité de prise d'images, et du meilleur échantillonnage à l'échelle de la parcelle

Estimation de la fraction de couverture du sol par le blé

La fraction de couverture du sol par la culture est une variable agronomique importante. Elle conditionne en effet la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la culture (fIPAR), mais aussi la capacité de culture à concurrencer le développement des adventices en ombrant l'inter-rang, appelé pouvoir couvrant.

Les images RVB obtenues par LITERAL sont bien adaptées à l'estimation de cette variable agronomique car elles sont très similaires à la vision humaine. Leur traitement consiste en une segmentation



sémantique de chaque image, c'est-à-dire que l'on affecte une classe à chaque pixel de l'image. Le deep learning offre des solutions très performantes pour ce type d'application, moyennant un apprentissage sur un jeu de données annotées. Le jeu de données VegAann (Madec *et al.*, 2023) a été constitué dans cet objectif. Il combine des images issues de différents pays et systèmes d'acquisition, y compris LITERAL. Sur cette base, le modèle SegVeg de segmentation de la culture sur pied vis-à-vis de l'arrière-plan (sol nu, pierres, résidus de culture) a été développé (Serouart *et al.*, 2022). Il s'agit d'un modèle de réseau de neurones convolutifs de type U-net (Ronneberger *et al.*, 2015) prédisant la probabilité d'appartenance de chaque pixel à l'une des deux classes définies : végétation ou arrière-plan. La précision obtenue lors de l'évaluation du modèle par Serouart *et al.* (2022) sur des images LITERAL est de 84 %. Il s'agit du pourcentage de pixels correctement classés par rapport au nombre de pixels total.

Ce modèle a été utilisé pour traiter les images LITERAL acquises dans 3 essais ARVALIS (Châteaufort, 78 ; Aubigny-aux-Kaisnes, 02 ; Saint-Hilaire-en-Woëvre, 55), évaluant le pouvoir couvrant de variétés de blé tendre. La méthode de référence consiste en une notation visuelle réalisée à l'échelle de la microparcelle. Dans le cas de LITERAL, 4 images verticales sont acquises dans une microparcelle. La fraction de couverture du sol par la végétation est calculée par le modèle de segmentation pour chaque image, puis moyennée.

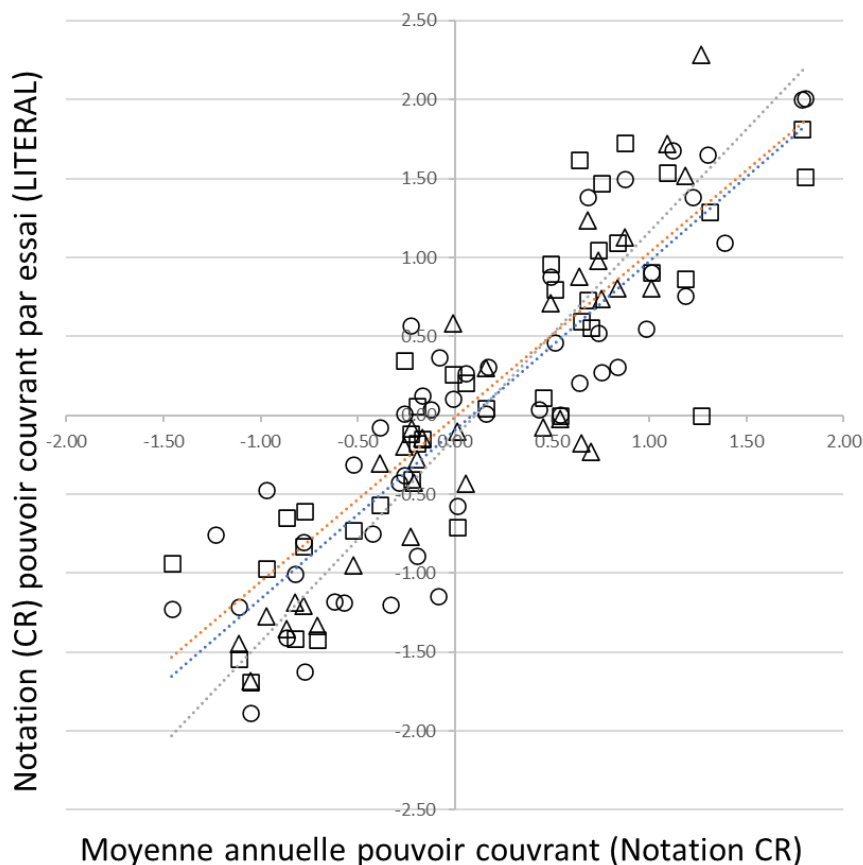


Figure 6 comparaison des pouvoirs couvrants de 24 variétés, par LITERAL et par notation visuelle, au stade Z30 pour 3 essais carrés :Châteaufort, ronds : 78, Aubigny, 02, et triangles : St Hilaire, 55).

On compare (Figure 6) la moyenne issue d'un réseau de 40 essais en France par la méthode visuelle en abscisse avec la mesure de chaque essai par LITERAL en ordonnée. Dans la figure de gauche, on s'intéresse uniquement au stade Z30, qui correspond au début de la montaison des blés. Les valeurs de fraction de couverture sont centrées et réduites afin de faciliter la comparaison entre sites. Dans ce type d'essai, on s'intéresse principalement au classement des variétés. A droite, on analyse l'évolution de la



fraction de vert à 3 stades clés (Z30 : épi 1 cm, Z32 : 2 nœuds, Z55 : épiaison) pour 4 géotypes contrastés. De haut en bas : un géotype peu couvrant au stade précoce, puis couvrant en fin de cycle ; un géotype très couvrant ; un géotype peu couvrant ; un géotype couvrant en début de cycle puis moins couvrant que les autres variétés.

On constate pour ces deux comparaisons une bonne concordance entre les valeurs LITERAL acquises sur un essai avec le comportement moyen des variétés à l'échelle nationale. Ce résultat est très intéressant dans l'optique d'un remplacement de mesures visuelles par des mesures par capteur pour le suivi de réseaux d'essais d'évaluation variétale.

Autres cas d'applications

LITERAL a été utilisé sur différentes cultures et pour d'un ensemble de variables. Cette liste est principalement limitée par le développement et la validation de méthodes de traitement robustes.

- Phénotypage des stress biotiques : dans le cadre du projet Carnot Plant2Pro PHENOBIOTIC en 2021, la quantification des symptômes de stress biotiques par imagerie au champ a été évaluée. Pour cela, des mesures LITERAL ont été acquises dans des essais présentant des attaques de septoriose du blé. On constate que la quantification des symptômes par LITERAL est mieux corrélée à la perte de rendement que les notations visuelles (Bernigaud Samatan, 2021).
- Phénotypage des couverts complexes : le projet #DIGITAG « Phénotypage des cultures associées par capteurs de proxidtection » en 2021 a permis de phénotyper un ensemble de cultures en mélange (Studer, 2021).
- Phénotypage des haies en agroforesterie : le projet CLIMAF PACA (FEADER) vise à caractériser l'impact des haies sur les cultures, en contexte d'agroforesterie. Dans ce cadre, LITERAL est utilisé pour caractériser la structure (hauteur, porosité) des haies et des plantations d'arbres.

4. Discussion, conclusion et perspectives

LITERAL est un système de phénotypage particulièrement bien adapté au suivi d'essais de taille moyenne et en parcelles d'agriculteurs. Son ergonomie permet une acquisition rapide au champ. Son ensemble de capteurs offre de grandes possibilités d'analyses. Un ensemble de modules de traitement ont été développés, dans le cadre du projet CASDAR LITERAL, mais aussi d'autres projets.

A ce stade, le système LITERAL peut être qualifié de prototype. Il offre une bonne robustesse à l'usage mais souffre d'un certain nombre de fragilités liées aux choix techniques. En particulier, le fait d'intégrer des caméras grand public a permis un développement rapide et relativement économique mais s'avère contraignant dans le contrôle des données acquises et dans son mode de fonctionnement. C'est aussi une limite pour la pérennité des développements car ce type de composant grand public évolue régulièrement, nécessitant une adaptation continue du système.

La solution pour disposer de systèmes produits en plus grande série est de passer par une phase d'industrialisation. A l'issue du projet CASDAR, un ensemble de points d'évolution ont été listés en vue d'un tel développement. La phase d'industrialisation a été lancée par ARVALIS en septembre 2022, et la première série produite à large commercialisation est attendue pour mi 2024. Ses spécifications techniques se basent sur l'expérience acquise au cours du projet CASDAR. Le redéveloppement technique est en revanche très profond car il nécessite l'intégration de composants industriels.

La perspective, une fois ce système largement diffusé, est de pouvoir constituer de larges jeux de données homogènes en termes de capteurs et de formats. Il s'agit d'une première étape pour définir des chaînes de traitement mutualisées par un ensemble d'acteurs. Ce point est bien identifié comme essentiel : il s'agit d'un gain de temps considérable, mais aussi une voie de standardisation des pratiques



entre acteurs de la R&D agricole. LITERAL est actuellement mis en œuvre dans les projets européens INVITE (*INnovations in plant Varlety Testing in Europe*) et PHENET (*Tools and methods for extended plant PHENotyping and EnviroTyping services of European Research Infrastructures*). Il est également testé en Australie ainsi qu'aux Etats-Unis. Il contribue de manière significative à la constitution de larges jeux de données partagés au niveau international. Ceux-ci servent de support au développement des méthodes de traitement les plus performantes, comme cela a été fait par le *Global Wheat Dataset Consortium* (<https://www.global-wheat.com/>) par l'organisation de data challenges (David *et al.*, 2020 et 2021).

Ainsi, LITERAL s'impose comme une brique technologique importante dans l'adoption du phénotypage haut-débit pour le suivi d'essais agronomiques, le développement de méthodes de traitement standardisées et la constitution de bases de données facilement partageables.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Toutes les données qui étayaient les résultats évoqués dans cet article ne sont pas accessibles du fait de l'implication de partenaires tiers pour certaines expérimentations.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

B. de Solan : 0000-0002-6162-2562

M. Serouart : 0000-0001-7860-7257

Contributions des auteurs

BS : Rédaction, analyse des données, gestion de projet

GD : Tests, acquisition et traitement de données, gestion de projet

ST : Développement des méthodes de traitement

MS : Développement des méthodes de traitement

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les partenaires du projet : INRAE, GEVES, HIPHEN, ITB, Terres Inovia, CTIFL. Merci également aux équipes ayant assuré les tests matériels, les mesures au champ et les comparaisons avec les mesures agronomiques de référence. Nous remercions en particulier : P. Simonet, M. Camous, P. Gierczak, L. Florin et P. Du Cheyron.

Déclaration de soutien financier

Le projet CASDAR LITERAL a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. Il a de plus bénéficié des développements réalisés dans le cadre du projet PHENOME-EMPHASIS, financé par l'ANR. L'évaluation de la précision des estimations des variables



agronomiques présentées dans cet article s'est appuyée sur différents projets thématiques, dont les essais ont servi de support expérimental, et ayant bénéficié de financements divers : Carnot Plant2Pro, Institut de Convergence #DIGITAG, FEADER.

Références bibliographiques :

ARVALIS, 2014. PhenoHDF5, a data structure for plant phenotyping measurements based on the HDF5 format. Phenohdf5_contact@arvalis.fr

Baret F., de Solan B., Thomas S., Burger P., Liu S., et al., 2019. Phenomobile: a fully automatic robot for high-throughput field phenotyping of a large range of crops with active measurements. IAMPS - Image Analysis Methods in the Plant Sciences, Jul 2019, Lyon, France. fihal-03646863f

Bernigaud Samatan L., 2021. Phénotypage des maladies par capteurs de proxidtection. Mémoire de fin d'études AgroParisTech. 39 pp.

David E., Madec S., Sadeghi-Tehran P., Aasen H., Zheng B., Liu S., de Solan B., ... & Guo W., 2020. Global Wheat Head Detection (GWHD) dataset: a large and diverse dataset of high-resolution RGB-labelled images to develop and benchmark wheat head detection methods. Plant Phenomics, Article Number 3521852. DOI10.34133/2020/3521852

David E., Serouart M., Smith D., Madec S., Velumani K., Liu S., de Solan B., ... & Guo W., 2021. Global wheat head detection 2021: An improved dataset for benchmarking wheat head detection methods. Plant Phenomics Article Number 9846158. DOI10.34133/2021/9846158

Furbank R.T., Tester M., 2011. Phenomics—technologies to relieve the phenotyping bottleneck. Trends in plant science, 16(12), 635-644.

Madec S., Irfan K., Velumani K., Baret F., David E., Daubige G., de Solan B., ... & Weiss M., 2023. VegAnn, Vegetation Annotation of multi-crop RGB images acquired under diverse conditions for segmentation. Scientific Data, 10(1), 302.

Serouart M., Madec S., David E., Velumani K., Lozano R. L., Weiss M., Baret F., 2022. SegVeg: Segmenting RGB images into green and senescent vegetation by combining deep and shallow methods. Plant Phenomics.

Reynolds D., Baret F., Welcker C., Bostrom A., Ball J., Cellini F., ... & Tardieu F., 2019. What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios. Plant Science, 282, 14-22.

Ronneberger O., Fischer P., Brox T., 2015. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III 18 (pp. 234-241). Springer International Publishing.

Studer G., 2021. Phénotypage des cultures associées par capteurs de proxidtection. Mémoire de fin d'études AgroParisTech. 48 pp.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue Innovations Agronomiques et son DOI, la date de publication.