

La phéno-mobile est un robot autonome enjambant les parcelles fonctionnant comme un scanner de la végétation.

CAPTEURS ET SÉLECTION VARIÉTALE

VERS UN NOUVEAU POTENTIEL de développement

Identifier des variétés mieux adaptées à leur environnement de croissance est un objectif mondial. Les nouvelles technologies donnent accès à davantage d'informations pour une analyse plus fine des critères de sélection.

L'amélioration du rendement potentiel des espèces cultivées (+ 0,1q/ha/an en moyenne depuis 1950 en blé tendre) est le résultat d'une approche essentiellement empirique, basée sur la comparaison et la sélection des variétés les plus performantes en rendement grain et sur des observations visuelles. Aujourd'hui, l'évolution du contexte climatique et réglementaire oblige à adopter une approche plus fonctionnelle de la sélection. Il s'agit non seulement d'obtenir des variétés productives, mais aussi de comprendre pourquoi elles le sont et de mettre en évidence les caractéristiques pouvant conférer un avantage dans certaines situations agronomiques (fort pouvoir couvrant pour une meilleure compétition avec les adventices, tolérance à la sécheresse ou à une carence en azote, ...). Par type de milieu ou

de conduite culturale, il est possible de définir un ensemble de caractères utiles, ou « idéotype » [1], à un mode de production et d'utilisation donné.

Des évolutions qui se complètent

D'autre part, le séquençage du génome des espèces cultivées a connu des progrès considérables ces dernières années, mettant à disposition des chercheurs et sélectionneurs plusieurs millions de marqueurs génétiques. Comprendre la fonction de ces différences génétiques nécessite un grand nombre de mesures descriptives du « phénotype », qui est la résultante observable de l'expression des gènes, dans un environnement de croissance donné. Le phénotypage, consiste à effectuer l'observation des caractères étudiés pour identifier l'ensemble des différences entre les variétés. Il peut être effectué en serre, afin d'identifier des caractères de manière

précise, dans un environnement de croissance bien contrôlé, ou en plein champ, pour étudier le comportement des variétés en contexte de production. Les capteurs apportent précision, répétabilité, automatisation et rapidité de mise en œuvre. Ils s'imposent donc comme des outils incontournables pour cette future approche de la sélection variétale. Cependant, leurs mesures disponibles diffèrent des variables classiquement acquises par observation visuelle ou mesure destructive.

Il est difficile de concilier rapidité et précision des mesures en un seul et même outil. Deux systèmes sont notamment développés en partenariat entre ARVALIS et l'INRA, dans le cadre du projet « Phénomobile » : un robot terrestre, la phéno-mobile, et un robot aérien, le phénodrone.

La phéno-mobile est un robot de phénotypage haut-débit (*encadré*), destiné à acquérir des mesures dans des essais en plein champ avec un haut niveau d'automatisation. Il se compose de deux parties principales fonctionnellement indépendantes : le vecteur, assurant le déplacement du robot dans le champ, et l'ensemble des capteurs, qui effectuent les mesures de caractérisation de la culture.

De la structure des plantes à la biochimie

Les mesures par laser scanner de la phéno-mobile apportent des informations particulièrement détaillées sur la structure de la végétation, son port et sa surface foliaire notamment (*figure 1*). Un rayon laser est envoyé à haute fréquence (200 000 mesures/s), informant de la distance entre le capteur et les éléments de la végétation (épis, feuilles, tiges). Il est possible d'en déduire la hauteur moyenne de la culture, mais aussi la quantité de rayonnement intercepté ou encore la surface de plante par strate de végétation. Ces indications sont précieuses pour

Phénomobile : un robot programmable

Le vecteur de la phéno-mobile est autonome et programmable : il suit un itinéraire défini par l'opérateur. C'est un système enjambeur, pour passer au-dessus des parcelles d'essais, dont la largeur est réglable. Il possède quatre roues motrices et directrices contrôlées par un ordinateur. Le positionnement est obtenu grâce à un GPS RTK, dont les données sont filtrées dynamiquement afin d'éliminer les données aberrantes. L'erreur de positionnement en absolu est inférieure à 5 cm. Cette précision est nécessaire afin de ne pas endommager les parcelles d'essais.

Le système de mesure est installé sur un bras mobile en hauteur, supportant deux plateformes : l'une pour une visée verticale, l'autre orientable latéralement. Il se compose d'un ordinateur auquel sont reliés plusieurs capteurs complémentaires : lasers scanner pour la caractérisation de la structure en trois dimensions, caméras couleur pour l'identification des organes végétaux, spectroradiomètres pour estimer le contenu biochimique du couvert végétal. Des flashes apportent une source lumineuse afin de s'affranchir des variations de l'éclairage solaire. Le déclenchement des mesures par ces différents capteurs est programmable via une interface.

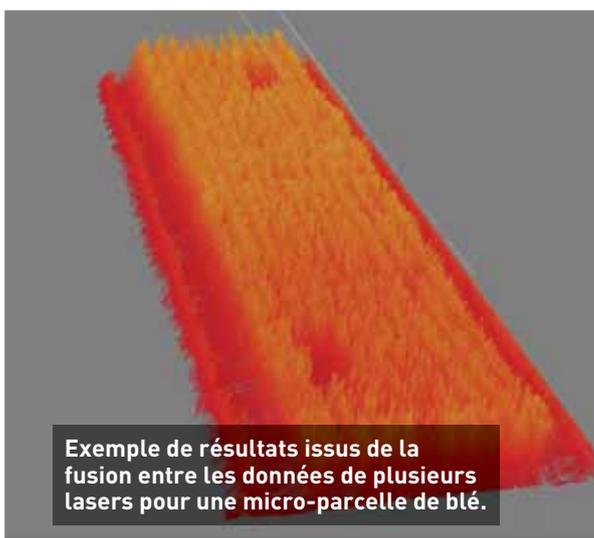
quantifier l'efficacité des cultures à capter le rayonnement solaire, source d'énergie indispensable pour fixer le carbone de l'air.

Le spectroradiomètre, installé sur la phéno-mobile, est très complémentaire. Il mesure la quantité d'énergie réfléchie par la végétation en fonction de la longueur d'onde. Cette mesure révèle le contenu en pigments de la culture. Les pigments sont des molécules complexes ayant un rôle précis dans la gestion de l'énergie lumineuse à l'intérieur de la feuille. Les principaux sont des caroténoïdes, les xanthophylles, et la chlorophylle. Les premiers, par leur rôle de dissipateur d'énergie, protègent la feuille lorsque la

« Les capteurs apportent précision, répétabilité, automatisation et rapidité de mise en œuvre. »

plante est en stress. La chlorophylle, particulièrement visible, est essentielle pour transformer l'énergie solaire en énergie utilisable pour les réactions chimiques dans les cellules des feuilles.

Chacun de ces pigments a une courbe d'absorption spécifique : il absorbe l'énergie dans certaines longueurs d'ondes et la réfléchit dans d'autres. La mesure du spectre de réflectance rend ainsi possible l'évaluation de la teneur en certains de ces pigments (*figure 2*). La teneur en chlorophylle est un bon in-



Exemple de résultats issus de la fusion entre les données de plusieurs lasers pour une micro-parcelle de blé.

dicateur de l'état azoté de la plante. Plus la teneur en azote de la plante est élevée, plus elle synthétise de Rubisco (molécule responsable de la photosynthèse qui contient une part importante de l'azote des feuilles) et plus elle augmente sa teneur en chlorophylle pour capter l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

Une acquisition plus rapide des données

Si chaque mesure (image, scan 3D et spectre de réflectance) est informative en elle-même, l'analyse combinée des différentes sources de données



permet une description plus précise de l'état des cultures. Le laser scanner renseigne sur la quantité d'énergie interceptée par la culture et le spectroradiomètre informe sur l'utilisation de cette énergie. De plus, les mesures par capteur sont non destructives, il est possible de les répéter. L'analyse dans le temps de l'évolution de ces variables offre une vision inédite de la réaction de la plante aux conditions environnementales.

Pour obtenir des mesures fréquentes, le drone est un vecteur efficace : une acquisition sur une plateforme d'essai d'un hectare peut être cartographiée en ½ heure environ. Le drone utilisé pour le phénotypage est constitué des éléments suivants : une structure volante de type « multicoptère » pour une meilleure stabilité en vol et une charge utile plus importante, un ensemble de capteurs, des caméras mesurant l'énergie renvoyée dans plusieurs domaines de longueurs d'ondes et un système de stockage des données.

Il existe une vraie complémentarité entre drone et phénotypage. Le drone seul apporte une fréquence temporelle élevée mais un niveau de

LASER SCANNER : une résolution de quelques mm³

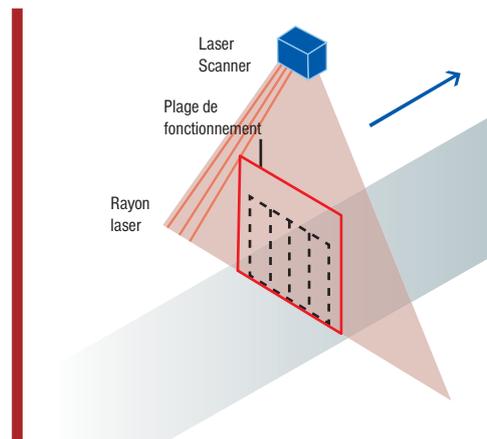


Figure 1 : Mode de fonctionnement du laser scanner pour l'obtention d'une image 3D de la végétation.

détail insuffisant pour caractériser finement les variétés. Il offre une vue globale des parcelles agricoles ou des essais de variétés, permettant par exemple l'évaluation de l'efficacité azotée (images prises avant et après des apports d'azote), de la précocité (images prises autour de la flo-

raison), de la sensibilité au froid (disparition de la végétation suite au gel) ou encore du risque de verse (images 3D). Ces aspects sont notamment étudiés dans le cadre du projet « Rapsodyn » en vue d'optimiser le rendement en huile de colza en condition de moindre fertilisation azotée. La phéno-mobile fournit des données d'une très haute résolution spatiale mais sa mise en œuvre plus longue (une dizaine d'heures pour 1000 microparcelles) limite le nombre de mesures dans la saison. Ces techniques développées dans un objectif d'aide à la sélection variétale, préfigurent de nouvelles méthodologies qui bénéficieront à l'évaluation des variétés inscrites, en vue d'affiner le choix variétal en fonction du contexte technique et agro-climatique.

(1) : Combinaison optimale de caractères morphologiques et physiologiques conférant à un matériel végétal une adéquation satisfaisante à un environnement.

Benoît de Solan - b.desolan@arvalisinstitutduvegetal.fr
David Gouache - d.gouache@arvalisinstitutduvegetal.fr
Katia Beauchêne - k.beauchene@arvalisinstitutduvegetal.fr

ARVALIS - Institut du végétal

Alexis Comar - acomar@hiphen-plant.com

HI-PHEN

Farzaneh KAZEMI - kazemi@cetiom.fr

CETIOM

SPECTRE LUMINEUX : quantifier la teneur en chlorophylle de la végétation

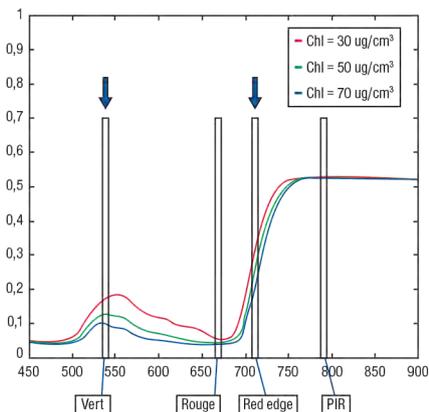


Figure 2 : Analyse des spectres de réflectance.

Une augmentation de la teneur en chlorophylle modifie notamment la réflectance dans le vert et le red edge.

Chl = chlorophylle.