

Un prototype de rampe de phénotypage haut débit au champ piloté par GPS-RTK

Philippe Burger¹, Fabrice Daumard¹, Pierre Perrin¹, Didier Campergue², Jean-François Liévin², Jean-François Hanocq³, Frédéric Baret³, Benoit de Solan⁴, Alexis Comar³

Résumé. Dans le cadre du développement des techniques de phénotypage à haut débit, l'UMRAGIR (AGroécologie, Innovation et TERritoires) et l'UE d'Auzeville en collaboration avec l'UMT CAPTE (CAPteurs et TELédétection) ont développé un dispositif d'acquisition de données sur des microparcelles de céréales à pailles. Le dispositif de mesure est composé d'appareils photographiques numériques du commerce et d'un ensemble de quatre spectromètres hyperspectraux dans la gamme VIS-NIR. Un logiciel a été développé dans le cadre du projet ANR Phénoblé pour piloter ces instruments. Il utilise un repérage de haute précision par GPS (global positioning system) différentiel RTK - real time kinematic). Le système utilise un plan géoréférencé de l'essai issu du SIG (système d'Information géographique) de l'UE et nomme automatiquement tous les fichiers en utilisant le nom de la parcelle (coordonnées XY), la date de mesure et un numéro d'ordre. Le déclenchement du cycle est automatique et basé sur la position des capteurs. Le système permet d'améliorer la répétabilité du positionnement des images des différents passages et géoréférence chaque spectre acquis, ce qui améliore l'analyse des données.

Mots-clés : rampe de phénotypage haut débit : GPS-RTK, SIG, prototype, imagerie, réflectance

Introduction

Le phénotype est l'ensemble des caractères observables d'un organisme vivant. Il est le résultat de l'interaction entre les gènes et le milieu dans lequel cet organisme se développe. Le phénotypage est l'activité qui consiste à caractériser un phénotype. C'est le pendant du génotypage qui consiste à caractériser le support génétique au travers de l'ADN. Les progrès technologiques dans le domaine du génotypage ont été spectaculaires entraînant une augmentation du débit de mesure et une forte diminution des coûts, ce qui a permis la création de vastes bases de données aussi bien en génétique humaine qu'en génétique animale et végétale. Dans le domaine végétal, l'exploitation de ces bases de données est limitée par la quantité et la qualité des observations phénotypiques que l'on peut associer aux données génotypiques.

La création de bases de données phénotypiques de qualité est devenue un enjeu majeur en biologie végétale (Montes et al., 2007). La tâche est complexe car une plante donnée n'a qu'un seul génotype alors qu'elle a une infinité de phénotypes. Il ne s'agit bien entendu pas de caractériser cette plante dans sa totalité mais bien de se concentrer sur des caractères d'importance économique liés à la production agricole (rendement, qualité, tolérance au stress, ...). Pour faciliter l'interprétation des mesures, il est important de pouvoir réaliser des mesures non destructives afin d'acquérir des données sur des caractères différents sur la même parcelle et de pouvoir répéter les observations pour décrire l'évolution de ces caractères au cours du cycle. La notion de débit de mesure est également primordiale pour deux raisons i) statistiques, il est nécessaire d'observer un grand nombre de plantes pour pouvoir faire le lien avec les données génétiques, ii) biologiques, il est souvent nécessaire de pouvoir observer ces plantes dans un laps de temps assez bref car la plante se développe et change continuellement et les conditions d'observations peuvent également évoluer, rendant l'interprétation plus incertaine. On parle alors de phénotypage haut débit. Les techniques issues de l'imagerie et de la télédétection sont très vite apparues comme de bonnes candidates et leur utilisation dans ce contexte a donné naissance à une nouvelle discipline appelée 'phénomique' (Furbank et Tester, 2011).

Le phénotypage haut débit a d'abord été envisagé sur des plantes isolées élevées en pot, le plus souvent sous serre. Le contrôle des conditions de croissance est en effet un élément important lors de l'analyse des données. Des dispositifs spécialisés permettant de suivre la croissance des feuilles ont ainsi été développés. Il s'agit en général de photographier les plantes à intervalle régulier sous plusieurs angles et dans des conditions d'illumination bien contrôlées afin de pouvoir automatiser le traitement d'images. Certains caractères ne sont cependant pas

1 INRA, UMR1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; Philippe.Burger@toulouse.inra.fr

2 INRA, UE802 GCA, F-31326 Castanet-Tolosan, France

3 INRA, UMT CAPTE, F-84914 Avignon, France

4 UMT CAPTE Arvalis Institut du végétal, France

observables de façon réaliste sur une plante isolée en pot et élevée en serre (exemple l'absorption d'azote), ils doivent être observés sur une plante en peuplement (en situation de compétition entre plantes) et dans des conditions de croissance normales. Il est donc nécessaire de développer des outils permettant le phénotypage haut débit au champ.

Un premier projet, visant à développer un instrument de mesure au champ, a été soumis à l'appel d'offre interne à l'INRA 'projet innovant' du Département Environnement et Agronomie en 2008 par l'UMR AGIR (AGroécologie, Innovation et TERritoires) (en partenariat avec l'UMR EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-hydrosystèmes). Le projet intitulé '*Proxi-détection pour le phénotypage haut débit au champ*' a été financé pour deux années (2008 et 2009). Ce financement a permis l'acquisition des capteurs et les premiers tests du système. Les développements ultérieurs ont eu lieu dans le cadre du projet ANR 'Phénoblé' (2010-2014) et ont concerné le développement du logiciel de pilotage ainsi que des méthodes d'analyse des données. Ces développements ont en partie été réalisés dans le cadre de l'UMT CAPTE (CAPteurs et TELédétection) d'Avignon, centrée sur le phénotypage et l'aide à la décision ou à l'expérimentation.

Description du matériel

Les capteurs

Le dispositif (Comar et al., 2012) est constitué de deux APN (appareil photo numérique) (Canon EOS 400D puis 1000D) et de quatre spectrophotomètres dans le domaine visible et proche infrarouge (domaine 400-900 nm, résolution spectrale environ 3 nm, MMS1 de Zeiss). Ces capteurs sont montés sur une arche dimensionnée pour enjamber une microparcelle de blé de 1,44 m de large (10 rangs à 16 cm). Les APN servent à estimer la fraction de vert du couvert selon deux angles : nadir et 57° par rapport à la verticale. Les images sont acquises perpendiculairement au rang et deux flashes industriels au xénon (FR50, Lumix, Lyon, France) permettent d'assurer une bonne homogénéité de l'éclairage de la scène et une constance des conditions lumineuses entre dates. Les spectrophotomètres sont placés de la façon suivante : trois visent le couvert (un au nadir, les deux autres de chaque côté de la parcelle avec un angle zénithal de 57°), le 4^e équipé d'un diffuseur vise le ciel à la verticale pour acquérir de façon synchrone le rayonnement incident.

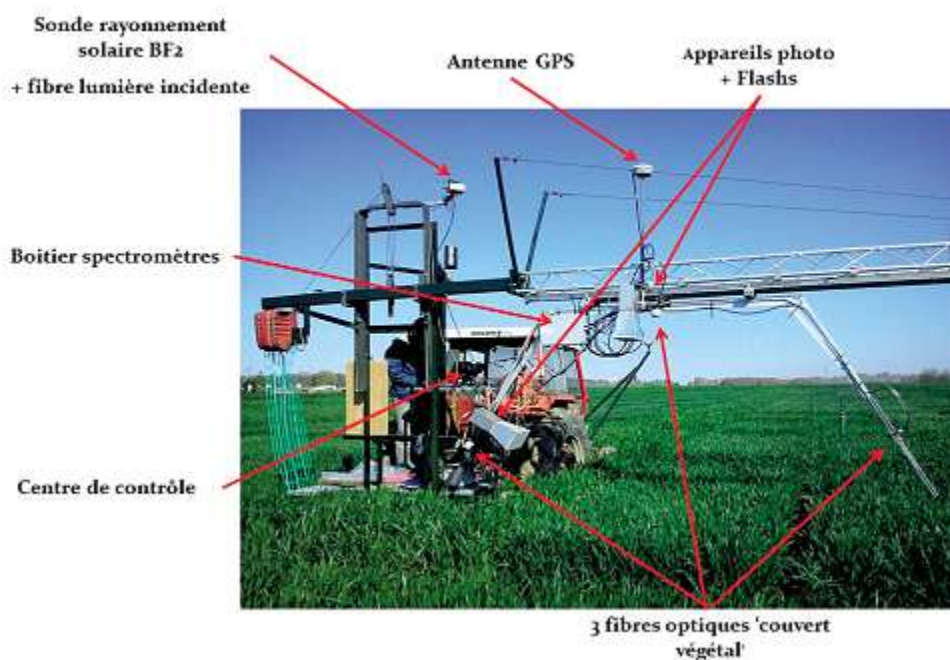


Figure 1. Positionnement des capteurs sur la rampe.

Le dispositif est monté sur une rampe fixée sur un châssis de pulvérisateur modifié en interne et tiré par un tracteur dont le déplacement permet de faire passer l'arche au-dessus des microparcelles dans le sens de la longueur.

Par la suite, un GPS (global positioning system, CFX 750, Trimble) a été intégré au système, il fonctionne en mode RTK (real time kinematic), réseau Sat Info avec récupération des corrections en temps réel par GSM (global system for mobile communications) ce qui permet un positionnement centimétrique en temps réel. L'antenne est fixée sur l'arche à la verticale du centre de la micro parcelle (au-dessus de l'APN nadir). En tenant compte des mouvements d'oscillations de l'ensemble tracteur-rampe-arche, le positionnement reste au moins décimétrique.



Figure 2. Vue du système en cours d'acquisition sur des microparcelles de blé (Photo P. Burger).

Les images permettent de mesurer la fraction de vert du couvert (feuilles, tiges et épis) alors que les mesures spectrales, converties en réflectance, sont sensibles à la fois à la structure du couvert et au contenu en chlorophylle.

Le logiciel de pilotage des acquisitions

Les spectromètres et les APN sont reliés à un ordinateur portable sur lequel un programme dédié permet de piloter l'acquisition des mesures.

Un logiciel Version 1 basé sur un cycle temporel

Le premier programme de pilotage des instruments a été écrit en Labview. Il permettait de déclencher manuellement, directement depuis le clavier de l'ordinateur, un cycle de mesures par parcelle. Celui-ci consiste à prendre un nombre paramétrable d'images de la parcelle (trois positions pour une parcelle de 5 m de long) et à acquérir des spectres entre les images (en respectant une latence pour éviter l'influence des flashes sur les mesures). Le déclenchement du cycle était décidé par l'opérateur et seuls les spectres étaient enregistrés sur l'ordinateur, les photos étant stockées sur les cartes mémoire des appareils. Le cycle avait une durée fixe (mais paramétrable), de sorte qu'il fallait assurer une vitesse de déplacement régulière et déclencher le cycle au bon moment afin de positionner les prises de données sur les zones cibles.

Ce premier logiciel a permis de tester le concept du système de mesure mais s'est vite avéré limité. Le déclenchement manuel requérait une grande attention de la part de l'opérateur et le moindre problème était source



de difficultés. En effet, seul le cycle d'acquisition était repéré dans les données, on se retrouvait donc souvent avec plus de cycles que de parcelles. Il fallait de plus assurer manuellement la concordance entre les fichiers images (stockés uniquement sur la carte mémoire des appareils) et les spectres et faire le nettoyage des acquisitions manquées.

Un pilotage Version 2 basé sur la position GPS

Le projet ANR Phénoblé a permis, via le recrutement d'un Ingénieur de Recherche (F. Daumard, CDD 2 ans), le développement d'un logiciel bien plus performant (AcQPhen) dont le fonctionnement est basé sur la position GPS de l'arche.

Le logiciel d'acquisition, AcQPhen, utilise donc la position de l'arche pour déclencher les mesures. Il n'y a pas de parcours préalablement établi mais un plan géoréférencé des parcelles à mesurer et un paramétrage du cycle de mesure basé sur la taille de la parcelle. Il s'agit notamment de définir i) deux zones de sécurité (entrante et sortante, paramétrables) dans lesquelles on ne veut pas faire de mesures (pour éviter les effets de bordure et les petites imprécisions de positionnement) et ii) le nombre d'images que l'on souhaite acquérir. Le logiciel se charge ensuite de déterminer le sens d'avancement du tracteur et de répartir les prises de vue sur la zone d'intérêt. Les spectres sont acquis avant et après chaque image (en respectant une latence pour éviter l'influence des flashes sur les mesures). L'ensemble des images et des spectres est enregistré sur l'ordinateur dans un répertoire qui porte le nom de la parcelle. Chaque image est renommée avec le nom de la parcelle, son type de prise de vue (nadir ou angle) et l'heure de prise de vue. De même, chaque spectre est référencé avec la date et l'heure, la parcelle et le numéro du spectromètre. L'ensemble des transferts de données vers l'ordinateur est réalisé de manière asynchrone (on n'attend pas qu'un instrument ait terminé de transférer ses données pour réagir aux déplacements du tracteur et lancer l'acquisition suivante). Par exemple, le transfert des photos est plus lent que le temps entre deux déclenchements et se prolonge ainsi pendant les déplacements entre deux microparcelles et pendant les virages en bout de ligne.

Les parcelles sont identifiées par un nom et les coordonnées GPS (WGS84 degrés décimaux) des quatre coins. Ces informations sont stockées dans un fichier texte.

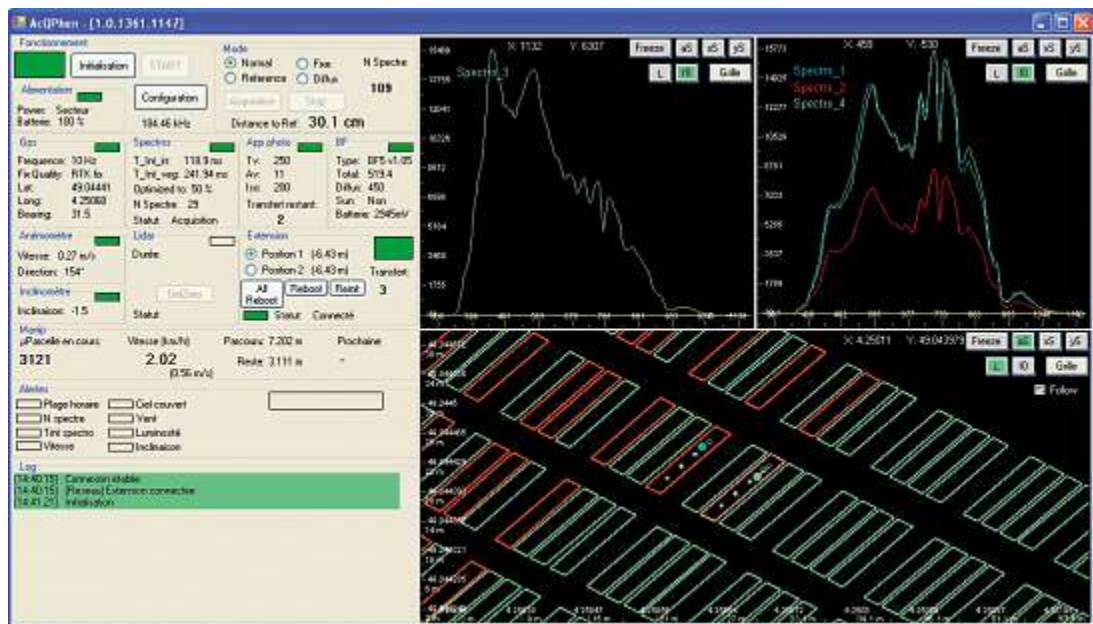


Figure 3. Fenêtre principale du logiciel : sur la partie gauche la liste des instruments et leur état, en haut à droite les spectres et en bas le plan des parcelles à mesurer (en vert les parcelles déjà mesurées).

Un outil qui s'insère dans la démarche SIG de l'UE

L'UE d'Auzeville utilise ArcGis for Desktop, logiciel commercial édité par ESRI (<http://www.esrifrance.fr/bureautique.aspx>), pour gérer ses données spatialisées (Legalle, 2009). En particulier, chaque essai est géoréférencé avec une précision centimétrique soit directement au semis lorsque le semoir à déclenchement par GPS est utilisé (cultures d'été) soit par relevé de quelques coordonnées à l'aide du GPS d'arpentage. Les couches SIG (système d'information géographique) sont définies dans le système de coordonnées Lambert 93. Les coordonnées des coins de chaque microparcelle, nécessaires au fonctionnement d'AcQPhen, sont donc récupérées dans le SIG après projection du repère Lambert 93 vers le repère WGS84. Le système de pilotage de la rampe s'insère donc naturellement dans la démarche engagée par l'UE vis-à-vis des outils de géolocalisation de ses activités. Il utilise aussi l'abonnement au réseau Sat-Info de l'UE utilisé pour les autres opérations nécessitant un géoréférencement précis en temps réel.

Conclusion

Le pilotage par GPS apporte un plus grand confort et une plus grande fiabilité dans les mesures en déchargeant l'opérateur du déclenchement et en lui permettant ainsi de se concentrer sur la surveillance des instruments. Il apporte aussi, grâce au positionnement absolu des mesures, une amélioration majeure dans l'exploitation des données en permettant une bonne concordance spatiale entre les séries de mesures successives d'une même microparcelle sur un cycle de culture. Le principe a donné satisfaction et sera repris pour le développement de la phénomobile qui équipera les plateformes de phénotypage au champ du projet Phénomène (projet Investissement d'Avenir, piloté par F. Tardieu et J. Le Gouis, visant à créer un réseau de plateformes de phénotypage des plantes). La phénomobile utilisera le positionnement GPS non seulement pour déclencher les mesures mais aussi pour piloter les déplacements de façon autonome.

Références bibliographiques

Montes JM, Melchinger AE, Reif JC (2007) Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies. *Trends Plant Sci* **12** : 433-436.

Furbank RT, Tester M (2011) Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck *Trends Plant Sci* **16** : 636-644.

Comar A, Burger P, de Solan B, Baret F, Daumard F, Hanocq J-F (2012) A semi-automatic system for high throughput phenotyping wheat cultivars in field conditions : description and first results. *Funct Plant Biol* **39** : 914-924.

Legalle M (2009) Mise en place d'un SIG au Domaine expérimental d'Auzeville, Centre INRA de Toulouse. Université de Toulouse le Mirail, Master 2 professionnel géomatique « science de l'information géoréférencée pour la maîtrise de l'environnement et l'aménagement des territoires (SIGMA) », stage soutenu le 16 septembre 2009. INRA, Domaine expérimental Grandes cultures Auzeville, 54 p. + annexes.

