



HAL
open science

Apport des réseaux de capteurs connectés au suivi des cultures.

Benoît de Solan, Frédéric Baret, Gil de Sousa, J. Orensanz, Pierre Boyer

► **To cite this version:**

Benoît de Solan, Frédéric Baret, Gil de Sousa, J. Orensanz, Pierre Boyer. Apport des réseaux de capteurs connectés au suivi des cultures.. Innovations Agronomiques, 2018, 63, pp.457-473. <10.15454/1.5191204539861958E12>. <hal-01848565>

HAL Id: hal-01848565

<https://hal.science/hal-01848565v1>

Submitted on 24 Jul 2018

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 CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Apport des réseaux de capteurs connectés au suivi des cultures

de Solan B.¹, Baret F.², de Sousa G.³, Orensanz J.⁴, Boyer P.⁵

¹ Arvalis – Institut du végétal, 3 rue Joseph et Marie Hackin, F-75116 Paris

² INRA UMR 1114 EMMAH, 228 Route de l'Aérodrome, F-84914 Avignon

³ Irstea – 9 Avenue Balise Pascal, F-63170 Aubières

⁴ CAP2020 – 2 allée du chemin Neuf, F-91720 Gironville

⁵ Acolyance – 16 Bd du Val de Vesle, F-51100 Reims

Correspondance : b.desolan@arvalis.fr

Résumé

Acquérir de manière très régulière des observations au cœur des parcelles et les valoriser en éléments d'aide à la décision pour l'ensemble des parcelles d'un territoire est un élément essentiel pour faciliter le travail des acteurs du monde agricole. A ce titre, les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) sont une des technologies les plus prometteuses car ils sont complémentaires des solutions existantes (satellites, capteurs embarqués, stations météorologiques), qui présentent des résolutions spatiales ou temporelles trop faibles.

Afin de répondre aux limites actuelles des outils d'aide à la décision agricoles, l'objectif général du projet est de concevoir, mettre en œuvre et évaluer un système d'information complet, allant de l'installation d'un RCSF opérationnel, jusqu'au conseil à l'agriculteur ou au technicien. Mis en œuvre en Champagne-Ardenne, le projet Casdar CROCUS a permis d'évaluer l'intérêt technique et économique de cette technologie, mais aussi de dresser un panorama des perspectives pour l'amélioration des conseils aux agriculteurs. A ce titre, CROCUS est une implémentation pionnière de l'Internet des objets (IoT) dans les parcelles agricoles.

Mots-clés : blé, réseau de capteurs sans fil, Internet des objets, outils d'aide à la décision

Abstract: Tools to reduce and to improve a sustainable chemical control against the diseases of wheat and rapeseed

Acquiring observations very regularly at the fields and valuing them as decision-support elements for all the plots of a territory is an essential element to facilitate the work of the actors of the agricultural sector. As such, the Wireless Sensor Networks (WSN) are one of the most promising technologies because they provide complementarity with existing solutions (satellites, embedded sensors, meteorological stations), which have too low spatial or temporal resolutions.

In order to address the current limitations of agricultural decision support tools, the overall goal of the project was to design, implement and evaluate a comprehensive information system, ranging from the installation of an operational WSN, up to the advice to the farmer or technician. Implemented in Champagne-Ardenne, the Casdar CROCUS project made it possible to assess the technical and economic interest of this technology, as well as to provide an overview of prospects for improving farmer advice. As such, CROCUS is a pioneering implementation of the Internet of Things (IoT) in agricultural fields.

Keywords: wheat, wireless sensors network, Internet of Things, decision support tools

Introduction

Acquérir de manière très régulière des observations au cœur des parcelles et les valoriser en éléments d'aide à la décision pour l'ensemble des parcelles d'un territoire est un élément essentiel pour faciliter le travail des acteurs du monde agricole. A ce titre, les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) sont une des technologies les plus prometteuses car ils sont complémentaires des solutions existantes (satellites, capteurs embarqués, stations météorologiques), qui présentent des résolutions spatiales ou temporelles trop faibles. On définit un capteur sans fil (CSF) comme un système électronique intelligent équipé d'un module de communication sans fil et de différentes sondes (capteurs de grandeur physique). Regroupés en réseau (RCSF), les CSF transmettent leurs mesures en continu à une station de collecte (Vellidis *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2006). Les données ainsi collectées alimentent en temps réel un système d'information servant de support à l'élaboration et la diffusion des conseils issus des outils d'aide à la décision (OAD).

Les systèmes de mesure par capteurs disponibles sur le marché s'intéressent en général à un nombre très limité de variables, et à un seul compartiment : le sol, la plante ou la météo. Disposer de ces éléments partiels peut être suffisant pour répondre à une question simple (dois-je arroser, dois-je apporter de l'azote), ... mais ne permet pas de réaliser un bilan agronomique complet de la culture. Ce bilan complet est indispensable pour prendre des décisions intégrant des contraintes multiples. Par exemple, il peut être nécessaire de modérer les apports d'azote si la culture connaît un développement trop limité, qui ne lui permettra pas d'atteindre le potentiel prévu en début de saison. Cela est particulièrement vrai dans les régions du sud de la France. Cependant, ce type de raisonnement s'est révélé également pertinent dans les parties plus septentrionales au cours de la campagne 2016-2017. La variabilité des conditions de croissance, due à la forte variabilité climatique mais aussi à une diversification des pratiques culturales nécessite un ajustement sur la base de mesures et non sur des règles établies en conditions moyennes.

Jusqu'à récemment, ces systèmes de mesure étaient peu développés dans le domaine agricole. Maintenant, les conditions de leur développement sont réunies : une offre de sondes plus large, des systèmes de communication sans fil plus performants, des composants électroniques moins chers, des algorithmes d'analyse plus puissants (Bogena *et al.*, 2010 ; Garcia-Sanchez *et al.*, 2011).

Dans ce contexte et afin de répondre aux limites actuelles des OAD agricoles, l'objectif général du projet est de concevoir, mettre en œuvre et évaluer un système d'information complet, allant de l'installation d'un RCSF opérationnel, jusqu'à son utilisation par l'agriculteur ou le technicien. Mis en œuvre en Champagne-Ardenne, le projet CROCUS a pour objectif d'évaluer l'intérêt technique de cette technologie pour l'amélioration des conseils aux agriculteurs. Après avoir présenté le système physique développé, nous décrivons le système de gestion des données. Enfin, les différentes voies de valorisation des données seront détaillées.

1. Description du système de mesure développé et des méthodes de traitement associées

Le système de mesure développé doit intégrer un ensemble de sondes de mesure permettant d'établir un diagnostic complet de la culture. On s'intéresse à la mesure de variables d'état des trois compartiments : la végétation, le sol et la météo. Les choix techniques répondent à plusieurs contraintes : bonne sensibilité des mesures aux variables d'intérêt, robustesse aux conditions extérieures, autonomie énergétique, coût raisonnable. L'objectif est de disposer d'un ensemble de capteurs pour un coût de l'ordre de 1000 euros. Ces systèmes doivent par ailleurs répondre aux problématiques d'intérêt du projet : suivi de l'état hydrique du sol, suivi de l'état azoté de la culture, suivi des conditions de développement des maladies.

1.1 Mesure des variables d'état du sol

Plusieurs types de capteurs permettant des mesures d'humidité du sol sont disponibles sur le marché. La variable délivrée varie selon le modèle : constante diélectrique, humidité relative, potentiel hydrique.

Les tensiomètres classiques (sondes Watermark®) fournissent des mesures de potentiel hydrique directement utilisables pour diagnostiquer une entrée en stress. Ces capteurs, bien adaptés à la conduite de l'irrigation, présentent une gamme de potentiels hydriques mesurables trop faible (gamme de mesure pF [2 ; 3]) pour pouvoir être utilisés dans un contexte de suivi du stress hydrique du sol. Par ailleurs, des essais ont montré qu'ils n'étaient pas adaptés à des sols de craie, tels que présents en Champagne.

Une alternative est d'utiliser des sondes capacitives mesurant la permittivité du sol ou d'un matériau de référence au contact du sol. Elles permettent d'estimer un contenu en eau du sol et d'estimer ainsi la consommation d'eau par les plantes. Les sondes capacitives classiques mesurent directement la permittivité du sol. Leur implantation est cependant délicate et leur mesure est très sensible au bon contact entre le sol et le capteur.



Figure 1 : Sondes Decagon MPS2

Les capteurs choisis pour mesurer l'état hydrique du sol sont les sondes Decagon MPS-2 (<http://www.decagon.com/>), sondes capacitives délivrant des valeurs de potentiel hydrique (kPa) (Figure 1). Elles sont constituées d'une céramique poreuse qui absorbe l'eau par mise en équilibre avec le sol environnant. La constante diélectrique est mesurée au niveau de cette céramique, dont les propriétés sont connues. La conversion de la constante diélectrique en potentiel hydrique par étalonnage est intégrée directement dans le capteur par le fabricant.

Ces sondes ont été choisies du fait de leur coût raisonnable et de leur facilité de déploiement, notamment dans les sols de craie qui présentaient un obstacle majeur à l'installation de tensiomètres classiques. Par ailleurs, le fait que les mesures fournies soient des mesures de potentiel hydrique a été perçu comme un intérêt pour détecter facilement l'entrée en stress de la culture. Un autre intérêt est de fournir une mesure de température du sol en même temps que la valeur de potentiel hydrique. Enfin, elles présentent une faible consommation énergétique et fournissent les données au format numérique par un protocole standard SDI12, ce qui rend simple leur intégration dans le système d'acquisition.

Une demande formulée par Acolyance et ARVALIS consiste à estimer un contenu en eau du sol, exprimé en mm. Cette variable est en effet comparable aux simulations d'un bilan hydrique et permet d'estimer l'évapotranspiration réelle.

Il a fallu pour cela déterminer les fonctions de rétention (relation entre le potentiel hydrique et l'humidité relative du sol) des deux horizons pour les sols crayeux champenois, représentatifs des parcelles dans lesquelles les sondes seront installées, car celles-ci n'étaient pas disponibles dans la littérature dans la gamme de potentiel hydrique rencontrée. Ces courbes ont été réalisées par le département EMMAH Sol de l'INRA d'Avignon à partir d'une carotte de sol prélevée sur le site de Thibie (Figure 2). Le modèle de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) a ensuite été utilisé pour ajuster une courbe à partir de ces points et déterminer la fonction de pédotransfert de chaque horizon.

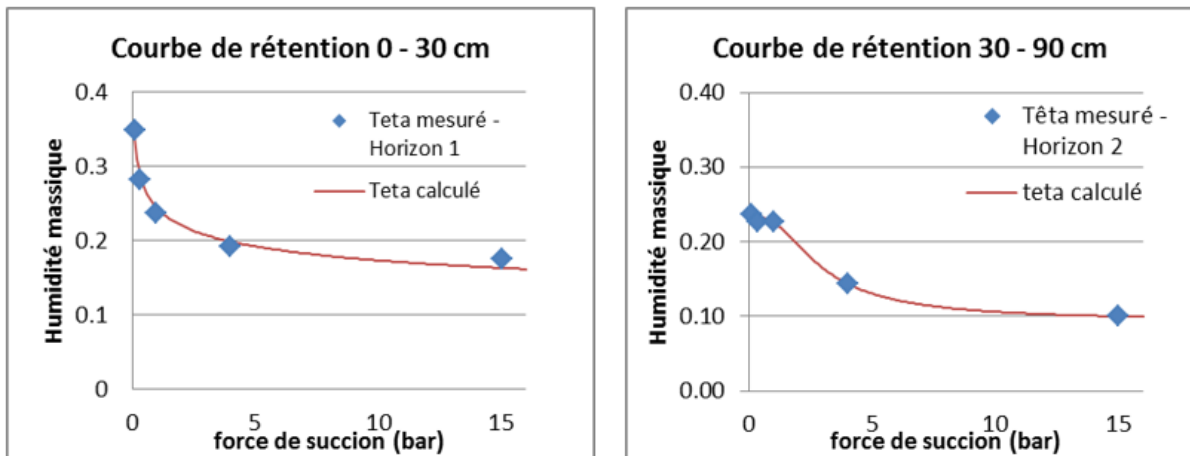


Figure 2 : Courbes de rétention pour le sol de Thibie (gauche: horizon 0 – 30 cm, droite: horizon 30 – 90 cm)

1.2 Mesures des variables d'état de la végétation

1.2.1 Indice foliaire



Figure 3 : Capteurs PASTIS 45° (gauche) et capteur de réflectance (droite)

L'indice foliaire est estimé à partir de capteurs situés au niveau du sol. Ces capteurs, développés lors d'un projet précédent (Lecerf *et al.*, 2010), ont été spécialement adaptés pour les besoins de CROCUS.

Ces capteurs mesurent la transmittance de la végétation avec un angle de 45°, angle qui limite fortement l'effet de l'inclinaison des feuilles sur la relation entre transmittance et indice foliaire. Le rayonnement est mesuré dans le bleu afin de maximiser le contraste entre la végétation et le ciel et limiter les effets de diffusion de la lumière à l'intérieur du couvert. Dans cette longueur d'onde la végétation peut être assimilée à des objets noirs autorisant à considérer la transmittance comme une fraction de trous.

Plusieurs modèles permettent de décrire la fraction de trous (P_0) en fonction de l'angle d'inclinaison foliaire (θ_f), de l'indice foliaire (PAI : Plant area Index car on considère ici toute la surface de la culture) et de l'angle de visée (θ_v). Le modèle le plus simple et le plus utilisé est le modèle de Poisson qui repose sur l'hypothèse que les feuilles sont aléatoirement et uniformément distribuées dans le couvert. Ce modèle a été utilisé pour le blé avec succès (Baret *et al.*, 2010) et se formule ainsi :

$$P_0(\theta_v, \theta_f) = \exp(-K(\theta_v, \theta_f) \cdot \text{PAI}), \text{ avec } K(\theta_v, \theta_f) \text{ le coefficient d'extinction.}$$

Le modèle de culture 3D ADEL (Fournier *et al.*, 2005) a été utilisé pour simuler une large gamme de situations, pour lesquelles les PAI et les fractions de trous ont été calculées. Cet ensemble de données a été utilisé pour estimer le coefficient d'extinction à 0.715 pour une visée de 45°.

Dans le cas de l'utilisation de capteurs de rayonnement, on estime en fait le Plant Area Index (PAI) car il n'y a pas de distinction entre les feuilles et les autres organes verts de la plante, notamment les tiges. C'est donc cet indice qui sera utilisé par la suite. Un exemple de dynamique est présenté en Figure 4.

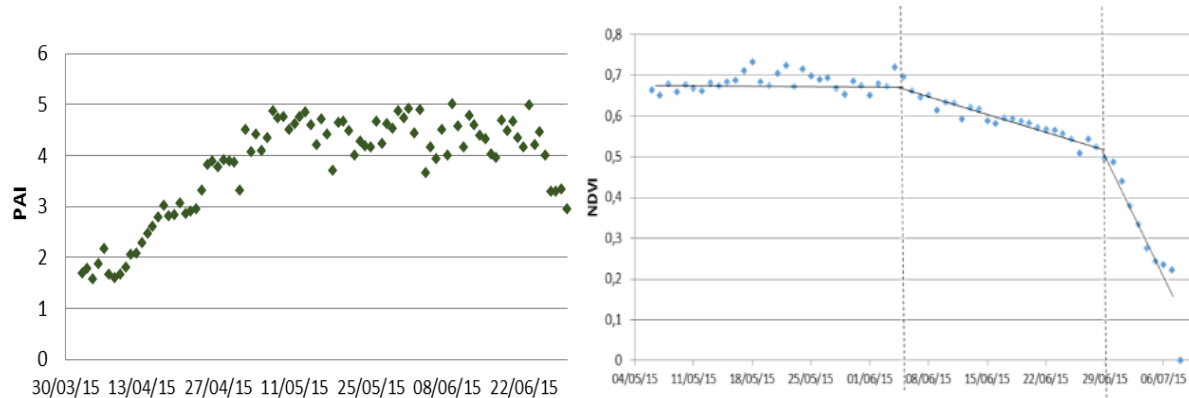


Figure 4 : Variations saisonnières du PAI (gauche) du NDVI (droite), au cours de la saison 2015 à Mont Arabais.

1.2.2 Teneur en chlorophylle

L'analyse du spectre de réflectance est classiquement utilisée pour accéder aux caractéristiques biochimiques de la culture. En effet, ce spectre est révélateur de l'interaction de la lumière avec la végétation.

Les indices de végétation sont des combinaisons de bandes spectrales conçues pour offrir une sensibilité importante à une certaine caractéristique de la végétation (fraction de vert, teneur en chlorophylle, ...). Nous avons retenu un indice sensible à la fraction de couverture verte et un indice sensible à la teneur en chlorophylle (Tableau 1 : Synthèse des indices de végétation calculés).

Tableau 1 : Synthèse des indices de végétation calculés

Indice de végétation	Source	Formule	Variable cible
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index	(Rouse <i>et al.</i> , 1974)	$\text{NDVI} = \frac{\rho_{800} - \rho_{670}}{\rho_{800} + \rho_{670}}$	Fraction de couverture verte fIPAR, Kc
MTCI : MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	(Dash et Curran, 2004)	$\text{MTCI} = \frac{\rho_{753} - \rho_{708}}{\rho_{708} - \rho_{681}}$	Contenu en chlorophylle de la culture

Afin de mesurer le rayonnement réfléchi par la végétation dans les longueurs d'onde d'intérêt pour le suivi du contenu biochimique de la végétation, des capteurs équipés de LED (diodes électroluminescentes) fonctionnant en mode inverse et sensibles à différentes longueurs d'onde ont été développés. Un capteur comprend 5 LED, sensibles chacune à une des longueurs d'onde suivantes : 550 nm, 630 nm, 680 nm, 735 nm et 810 nm, qui produisent un signal électrique proportionnel à l'intensité du rayonnement perçu (Ryu *et al.*, 2010).

Un exemple de dynamique est présenté en Figure 4.

Pour calculer ces indices, une étape préalable consiste à étalonner les capteurs en effectuant des mesures au-dessus d'une surface de référence grise caractérisée auparavant par des mesures au spectromètre. Pour calculer des valeurs journalières pour chacun des indices de végétation, un filtrage des données de réflectance a été réalisé. Seules les valeurs acquises de 13h à 15h ont été conservées afin d'écartier les mesures ayant pu être perturbées par des rayons rasants atteignant directement les capteurs. Une moyenne a ensuite été effectuée sur les valeurs retenues pour le calcul d'une valeur journalière.

1.3 Synthèse du système installé dans la parcelle

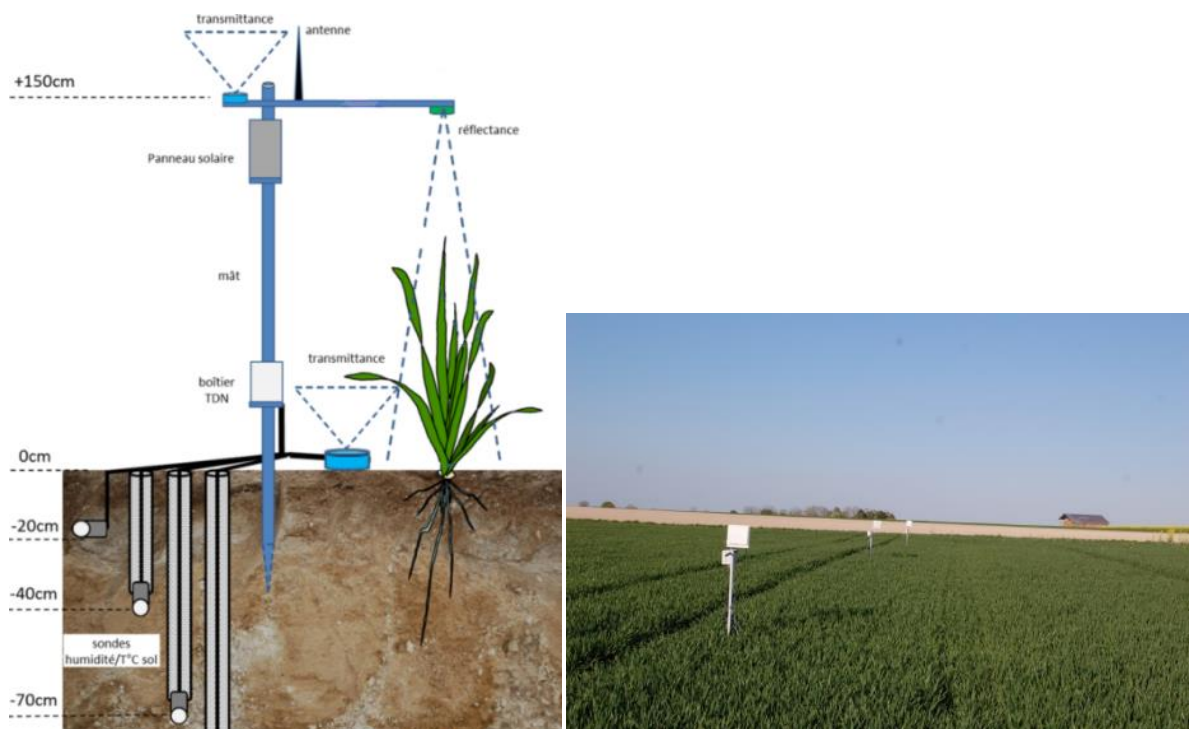


Figure 5 : Schéma d'un nœud de mesure dans la parcelle avec ses sondes de mesure (à gauche) et implémentation sur le terrain (photo à droite)

Une synthèse de l'ensemble des variables mesurées est présentée dans le

Tableau 2 et illustrée par la Figure 5 : Schéma d'un nœud de mesure dans la parcelle avec ses sondes de mesure (à gauche) et implémentation sur le terrain. En complément des nœuds installés dans les parcelles pour le suivi de la végétation et du sol, des systèmes spécifiques (appelés passerelles par la suite) sont équipés d'un ensemble complet de capteurs météorologiques classiques. Chaque capteur réalise des mesures 4 fois par heure.

Tableau 2 : Synthèse des variables calculées à un pas de temps journalier

Grandeur d'intérêt	Compartiment mesuré	Grandeur mesurée et unité
Potentiel hydrique	Sol	kPa
Température du sol	Sol	°C
PAI	Végétation	m ² de végétation /m ² au sol
NDVI, MTCI	Végétation	Indices de végétation, sans unité
Pluviométrie	Météo	nb de basculements -> mm
Rayonnement global	Météo	Wh/m ²
Vitesse moyenne du vent	Météo	nb d'impulsions -> m/s
Température de l'air	Météo	°C
Hygrométrie	Météo	%

2. Mise en réseau et gestion des données

Les systèmes de capteurs connectés se composent de trois parties principales (Figure 6) :

- Les sondes de mesure, sur le terrain, qui observent et enregistrent des données (monde physique)
- Le module de transmission des données
- La plateforme informatique recevant les mesures d'un ensemble de capteurs distribués et les mettant à disposition d'outils de traitement, de stockage et d'affichage (système d'informations)

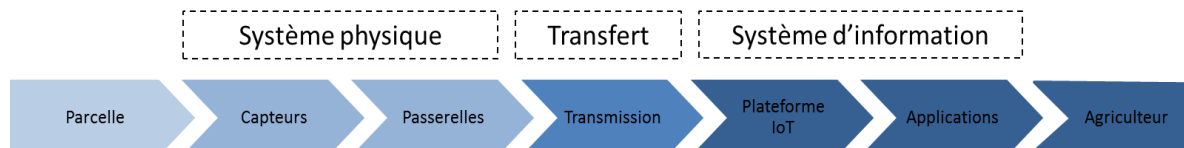


Figure 6 : Schéma de circulation de l'information de la parcelle à l'agriculteur via les 3 modules composant un système de capteurs connectés

Ainsi, on réalise une virtualisation de la parcelle cultivée, la rendant largement accessible et valorisable au travers d'outils d'analyse, de modèles, de services. Cette partie vise à décrire le cheminement de la donnée, depuis la parcelle où les capteurs sont installés jusqu'au système d'information, où les mesures sont mises à disposition des utilisateurs.

2.1 La structuration du réseau de capteurs

Afin de fonctionner et transmettre leurs données, les sondes de mesure précédemment décrites doivent être mises en réseau. Pour cela, une première tâche consiste à les raccorder physiquement à un capteur sans fil (CSF) qui assure les fonctions d'alimentation en énergie, de communication avec chaque sonde, de stockage, de mise en forme et de transmission vers l'extérieur. En outre ce CSF est doté d'un microprocesseur qui permet de programmer ces différentes actions. Le nœud réalise une centralisation des mesures en un point donné.

La particularité de notre structure est de mesurer à la fois la culture, à l'intérieur des parcelles, et la météo, mesurée en conditions standards selon les recommandations WMO (Guide to agricultural meteorological practices, 2010) pour être cohérente avec les mesures réalisées par les stations météorologiques disponibles.

Pour cette raison, nous avons défini deux types de capteurs sans fil :

- Les nœuds, équipés des sondes de mesure des caractéristiques du sol et de la végétation, avec un mode de transmission à courte portée par Zigbee PRO.
- Les passerelles, équipées des sondes de mesures des variables météorologiques, positionnées en bordures de parcelles, avec un mode de transmission longue portée par GPRS/3G.

Les nœuds positionnés dans les parcelles sont implantés avec une densité élevée pour prendre en compte la variabilité spatiale importante, et les passerelles sont positionnées en dehors des parcelles, avec une densité plus faible, adaptée à la moindre variabilité spatiale des conditions météorologiques.

L'électronique se compose de deux parties :

- Une carte électronique pour les communications de bas niveau avec les sondes de mesure, qui a été développée spécifiquement pour ce projet,
- Une carte électronique pour la gestion des opérations de haut niveau, programmation, alimentation en énergie, communication, stockage. Des cartes Libelium Waspote PRO v1.2 ont été choisies pour leur facilité de programmation.

La communication entre ces deux cartes est assurée par sur une liaison SPI (Serial Peripheral Interface) et un protocole défini pour le projet. A chaque cycle d'acquisition, les anciennes données collectées par les cartes d'extension sont remplacées par des nouvelles.

Un programme pour le stockage des données dans les cartes microSD d'une capacité de 2Go pouvant équiper les Libelium Waspmotes PRO a été développé. Il permet la création des fichiers quotidiens ou biquotidiens (pour les passerelles lors de la seconde période de la seconde campagne).

2.2 Le transfert des données

Pour les communications entre nœuds et passerelle, la technologie de transmission sans fil WPAN (Wireless Personal Area Network) utilisée a été choisie par rapport aux contraintes de l'application (quantité de données à transmettre, portée, etc.) et les technologies disponibles au début du projet (pas de module XBee 900 notamment). Après avoir étudié les modules de communication XBee ZigBee PRO et XBee 868, notre choix s'est porté sur le premier qui affichait une consommation énergétique et un coût moindres mais, cependant, pour une portée plus faible (7 contre 12 km). Un programme, propre à la technologie choisie, a été développé pour réaliser la communication entre les nœuds « capteurs » et leurs passerelles.

Pour la transmission externe, nous avons débuté par le développement d'un programme pour une transmission par GSM/GPRS. Des tests de communication 3G ont également été réalisés mais se sont avérés moins fiables. Au cours du projet, le fonctionnement du programme associé à celui-ci a été modifié avec l'augmentation du nombre d'essais et le passage à une transmission biquotidienne.

Afin d'optimiser l'autonomie énergétique des CSF, différents modes de fonctionnement ont été définis et programmés : « idéal », « acceptable », « dégradé » et « survie », avec pour chacun d'entre eux, les fréquences d'acquisition souhaitées.

A partir des données collectées, le nœud constitue une trame « brute » qui est ensuite transmise à la passerelle. Que ce soit au niveau du nœud lui-même ou de la passerelle, cette trame « brute » est convertie au format JSON pour être stockée. En effet, l'espace disponible sur les cartes microSD le permet et la lecture des données dans le cadre d'une opération de maintenance en est facilitée.

2.3 La plateforme CROCUS de gestion et traitement des données

La plateforme CROCUS est déployée sur un serveur dont les performances ont été ajustées au cours du projet. Les échanges, de type machine to machine (M2M) sont basés autour de deux types de fichiers au format JSON, qui est couramment utilisé pour ce genre d'application :

- Un fichier de configuration du RCSF (pour chaque dispositif, c'est-à-dire chaque parcelle) décrivant le dispositif, notamment les sondes connectées à chacun des capteurs sans fil.
- Un fichier de données, envoyé à intervalle régulier, contenant les données relevées par les capteurs.

La plateforme CROCUS est capable d'interpréter un fichier de configuration (autodécouverte du dispositif) et de créer les entrées nécessaires à l'accueil des données au sein de la base de données CROCUS (Figure 7).

Les données issues des RCSF sont récupérées et mises en ligne deux fois par jour (minuit et midi).

Un ensemble de fonctionnalités ont été implémentées au cours des 3 années du projet : autodécouverte des RCSF, sauvegarde des données des sondes, sauvegarde du niveau de batterie au cours du temps, afin de pouvoir diagnostiquer la déperdition d'énergie importantes.

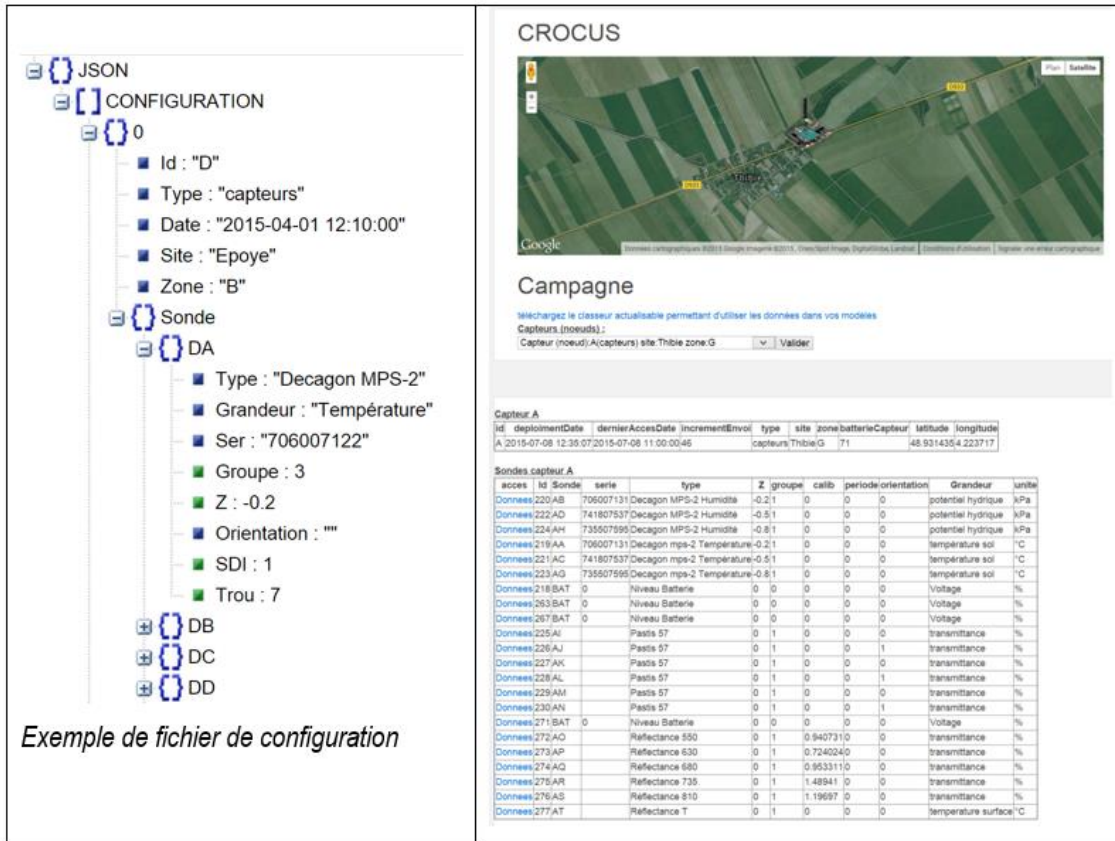


Figure 7 : Interface de contrôle capteurs. Ici : contenu de la base de données une fois le dispositif « autodécouvert ».

2.3.1 La gestion des données au sein de la plateforme IoT

La Figure 8 reprend l'idée et les particularités du projet CROCUS, en ce qui concerne la gestion et le partage des données.

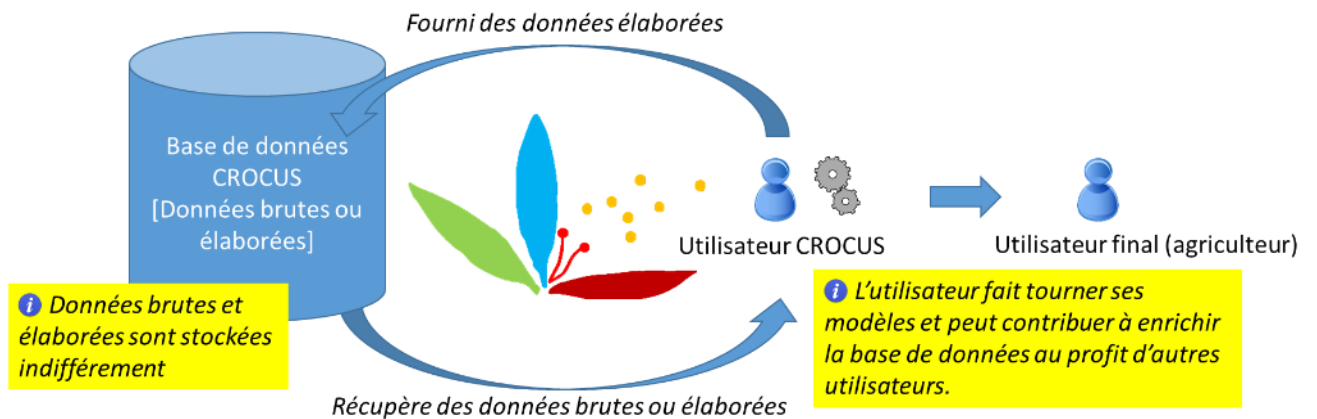


Figure 8 : Schéma général des transferts d'informations pour CROCUS

Voici quelques-uns des points remarquables de la plateforme CROCUS à cet égard :

- Les données brutes et élaborées sont stockées indifféremment. On connaît toutefois ce qui a produit la donnée : sonde (données brutes) ou modèle (données élaborées). L'intérêt de cette approche est qu'elle permet de requêter de la même façon des données brutes ou élaborées

pouvant être utiles pour le fonctionnement d'un modèle, facilitant ainsi la construction de modèles agronomiques avec un outil comme Excel ou R.

- L'utilisateur est invité à insérer les résultats des modèles qu'il fait fonctionner au sein de la base de données CROCUS, ces résultats pouvant servir de données d'entrée à d'autres modèles et pour d'autres utilisateurs.
- A aucun moment, l'utilisateur n'a à fournir des informations sur son modèle, qui peut rester hébergé de son côté, tout en étant « connecté » aux données des RCSF ou à d'autres modèles.
- Il est possible d'implémenter des modèles directement dans la plateforme pour les cas où la confidentialité des calculs n'est pas un enjeu (exemple : modèle de recalage de données de sondes, ou autres).
- Il est conseillé à un utilisateur souhaitant implémenter un modèle de décomposer son fonctionnement afin de disposer, dans la base de données CROCUS, de l'ensemble des données intermédiaires (exemple du LAI calculé à partir des sondes de transmittance et utilisé *in fine* dans le modèle de calcul des stades phénologiques de la plante).

Ces propriétés ont été implémentées et testées au cours de la campagne 2014, puis utilisées de manière effective au cours de la campagne 2015.

2.3.2 Mise à disposition des données

Les développements effectués ont été faits en conservant à l'esprit que les données brutes issues des RCSF devront être valorisées au travers de modèles agronomiques, dont les données élaborées seront à leur tour utilisées dans des modèles ou utilisées directement pour l'aide à la décision.

Il est donc important d'assurer une bonne utilisabilité (simplicité d'accès) et une bonne interopérabilité des données (possibilité d'interroger des données depuis de nombreux langages, avec des réponses à un format bien défini).

Il a été décidé de mettre en œuvre l'accès aux données via :

- Une interface Web permettant l'accès aux données de chaque sonde de tous les RCSF déployés. Il pourra aisément y être ajoutée une surcouche d'authentification et de gestion de multiples réseaux de RCSF partagés ou privés.
- Des web services, accessibles via l'interface ci-dessus permettant d'accéder aux données et aux métadonnées issues des RCSF, l'ensemble des web services définis constituant l'API CROCUS (interface de programmation).
- Un classeur Excel actualisable pré-chargé avec l'ensemble des web services permettant l'affichage des données d'un modèle choisi par l'utilisateur (Figure 9).

L'accès sous forme de WebServices permet de facilement charger des données issues des RCSF au sein d'un environnement de développement (exemple Rstudio, utilisé par Arvalis Institut du Végétal) afin d'implémenter des modèles agronomiques pouvant facilement passer en opérationnel (R permet en effet le chargement de données JSON et peut être déployé au sein d'un OAD Web).

L'accès sous forme de classeur actualisable s'adresse préférentiellement à un utilisateur ne maîtrisant pas de langage de programmation mais souhaitant charger et exploiter les données brutes, ou élaborées au sein de ses propres modèles développés dans Excel.

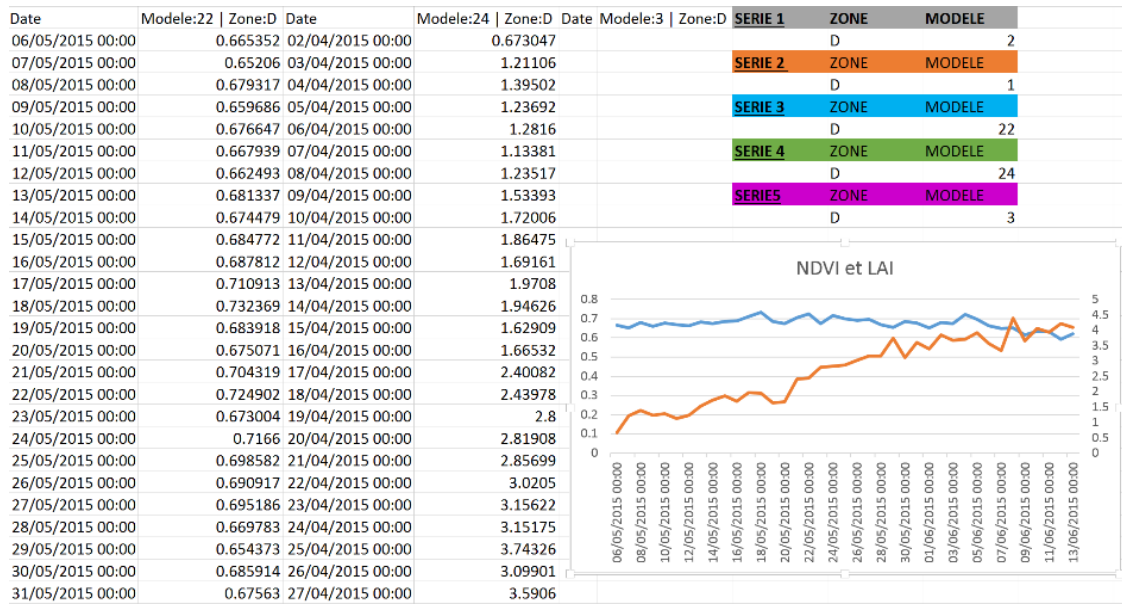


Figure 9 : Capture d'écran montrant le classeur actualisable : l'utilisateur choisi sa zone, ses modèles, et exploite les données élaborées qui sont mises à jour automatiquement

3. Installation sur le terrain et intégration dans les outils

3.1 Site de test et installation

Le réseau de capteurs a été testé sur 3 parcelles situées dans le département de la Marne (Champagne-Ardenne). Deux parcelles de blé situées à Epoye ont été mises à disposition par un agriculteur de la coopérative Acolyance. La troisième parcelle ayant accueilli un réseau de capteurs est une parcelle d'orge de la station d'expérimentation ARVALIS de Châlons-en-Champagne située à Thibie (Figure 10). En tout, ce sont 6 zones qui ont été identifiées et choisies pour accueillir chacune un ensemble de capteurs. Au sein de la modalité blé, les parcelles diffèrent par leur précédent (colza ou betterave), et les zones au sein d'une même parcelle ont été définies de sorte à présenter une gamme de réserve utile.

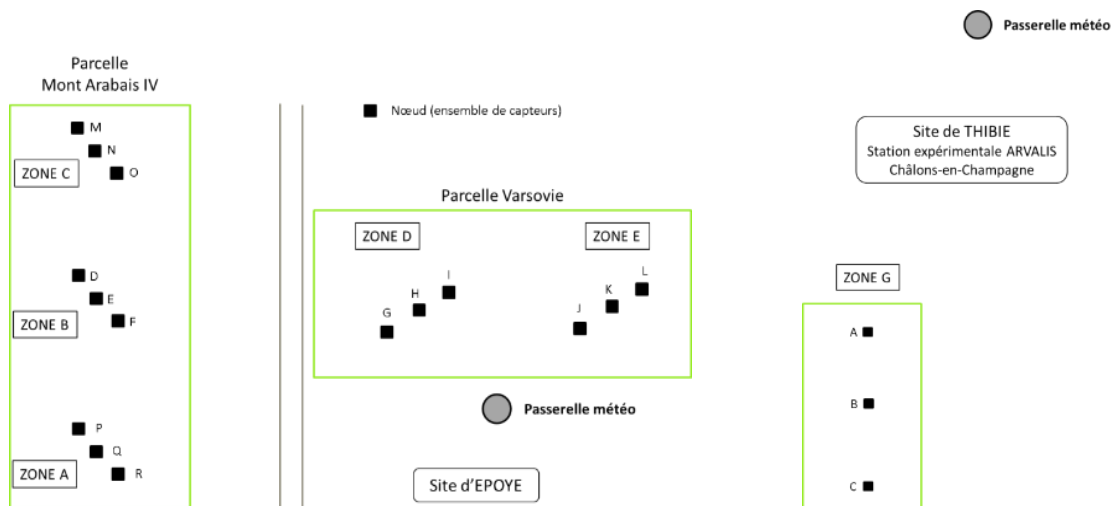


Figure 10: Schéma de la zone d'expérimentation, site d'Epoye (2 parcelles de blé d'hiver) et de Thibie (1 parcelle d'orge de printemps).

Au sein d'une zone, trois répétitions ont été effectuées par l'implantation de trois ensembles complets de capteurs.

Les parcelles d'essai sont situées en Champagne crayeuse sur des Rendzines sur craie à poches de cryoturbation. Ces sols sont constitués de deux horizons : un horizon de surface de 25cm d'épaisseur de texture limono-argilo-sableuse à argilo-limono-sableuse très riche en calcaire et présentant un nombre important d'éléments grossiers, graviers et cailloux de craie. Le deuxième horizon, entre 25 et 80 cm environ est un horizon cryoturbé constitué d'un ensemble de poches et de cheminées. Les poches ont une texture limono-argilo-sableuse et présentent un nombre important de graviers. Très compactes, elles présentent souvent un obstacle à l'enracinement. Les cheminées sont, elles, constituées de cailloux de craie disjoints qui ne limitent généralement pas l'exploration par les racines. Au-delà de 80 cm, on obtient des cailloux et des blocs de craie jointifs.

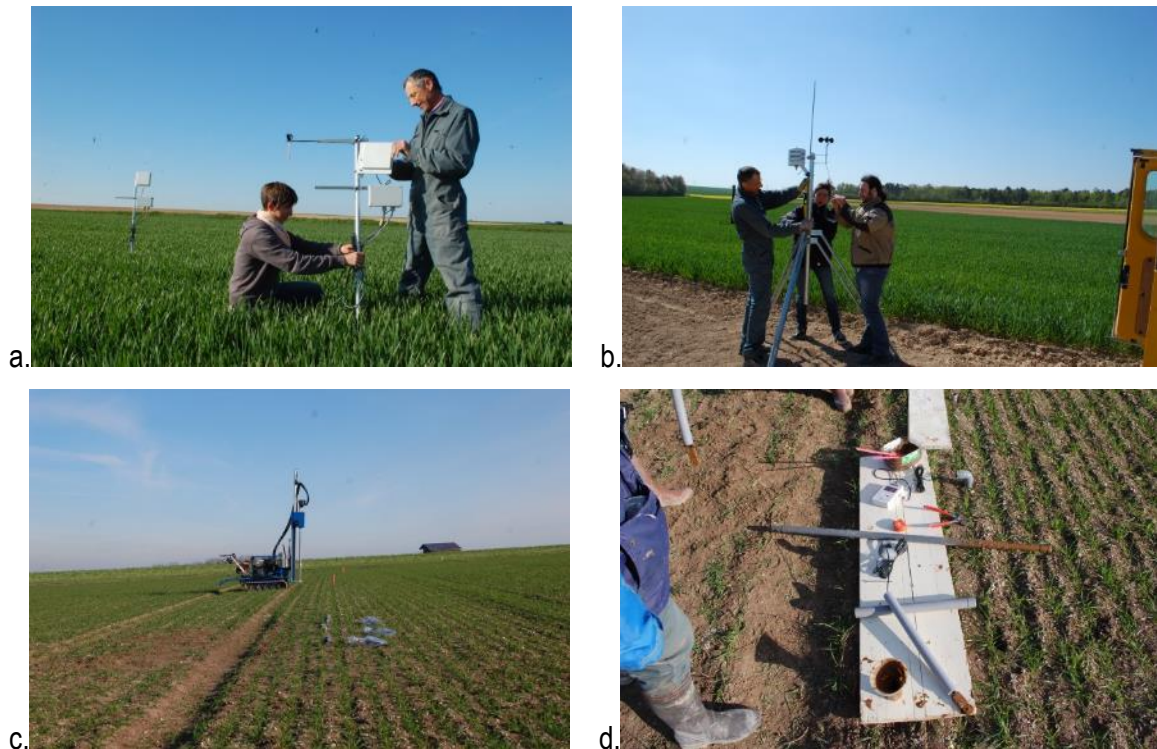


Figure 11 : Installation des nœuds (a), passerelle (b) et des capteurs sol (c,d)

L'installation des capteurs sur ces différents sites (**Figure 11**) est un élément important car la pose correcte des sondes de mesure conditionne la qualité des mesures acquises. Par ailleurs, optimiser le temps de pose est un facteur important pour faciliter l'adoption de la solution. Celle-ci a été réalisée en deux phases, au cours de la saison 2015. La pose des capteurs sol, qui nécessite d'effectuer des trous, a été effectuée en début d'hiver pour ne pas perturber la culture. Les capteurs de végétation et météo ont été installés ultérieurement. En effet, l'autonomie énergétique ne permettait pas un fonctionnement sur l'ensemble de la saison, notamment durant la période hivernale lorsque l'ensoleillement est limité.

3.2 Sorties disponibles

On distingue classiquement trois types d'informations correspondant à des niveaux croissants d'analyse des données : description, prévision et prescription.

Il a été décidé que les sorties à produire devraient prendre la forme de 3 interfaces de suivi axées chacune sur une thématique : Eau, Azote, Maladies.

Il s'agit pour chaque thématique de représenter l'ensemble des variables biophysiques et agronomiques permettant de caractériser l'état de la culture pour ce qui est de l'eau et de l'azote, et de suivre le risque de développement de certaines maladies problématiques sur blé.

Le contenu de chacune des interfaces est présenté ci-dessous (Tableau 3).

Tableau 3 : Synthèse des informations contenues dans chacune des interfaces du classeur Excel actualisable

Interface « EAU »	Interface « AZOTE »	Interface « MALADIES »
<ul style="list-style-type: none"> - Pluies - ETM - Réserve en eau - Indice de stress 	<ul style="list-style-type: none"> - Température du sol en surface (-20 cm) - Humidité de sol en surface (-20 cm) - Indices de stress 	<ul style="list-style-type: none"> - Température de l'air - Humidité de l'air - Température du sol en surface (-20 cm) - Humidité de sol en surface (-20 cm) - Pluies

Pour le suivi de l'état hydrique, la Figure 12 présente l'évolution de l'état hydrique dans les différentes zones de la parcelle. Le passage de potentiels à des humidités pondérales par horizon puis à un contenu en eau global apporte une vision intégrée de la consommation en eau au cours de la saison.

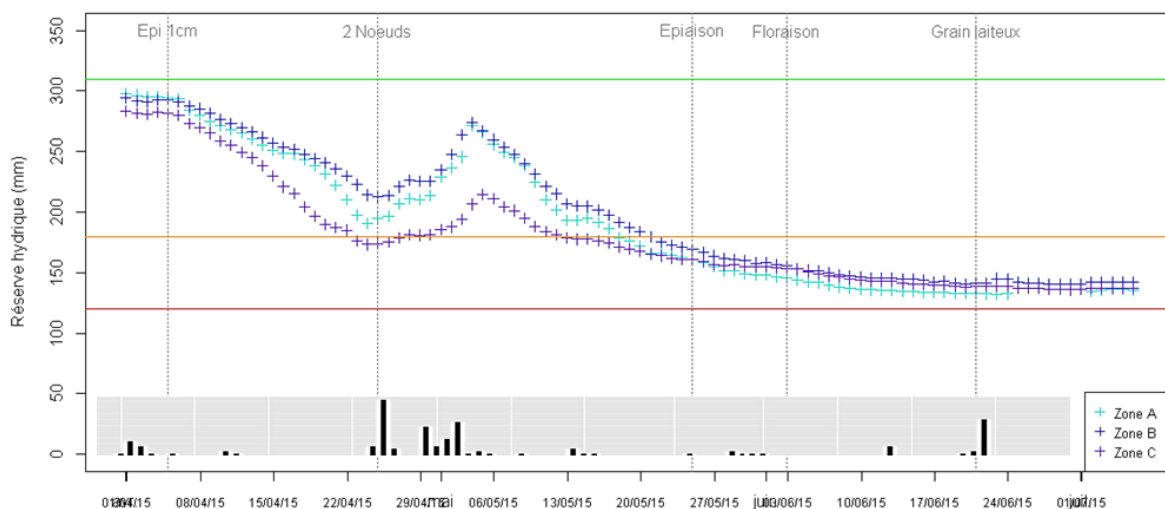


Figure 12 : Evolution du contenu en eau du sol au niveau des différentes zones sur la parcelle de Mont Arabais et précipitations. Les limites représentées correspondent à la capacité au champ (en vert), au point de flétrissement permanent (en rouge). Le contenu en eau délimité par ces deux droites correspond à la réserve utile maximale (RUM). La courbe orange représente la limite de la réserve facilement utilisable, qui correspond à la consommation de 60 % de la RUM.

Cette approche présente l'avantage de donner directement un état de la réserve en eau. Elle permet par ailleurs de situer précisément la date d'entrée en stress de la culture grâce à la délimitation de la réserve facilement utilisable. Son inconvénient majeur est qu'elle nécessite une bonne connaissance du sol dans lequel sont implantés les capteurs, et impose en particulier de disposer des courbes de rétention des sols en question.

3.3 Intégration dans des outils de pilotage

Pour aller au-delà de la consultation des mesures journalières et aller jusqu'au conseil ou à la prévision, les données doivent être combinées à des règles de décisions et éventuellement à des modèles dynamiques. On peut ainsi distinguer 3 niveaux de valorisation de ces données pour l'aide à la décision : suivi temps réel et déclenchement en fonction de seuils ; suivi en temps réel et correction de modèles dynamiques simples ; suivi en temps réel et correction d'un modèle dynamique complexe.

Dans le cas de la gestion de l'azote, voici comment se concrétisent ces trois niveaux d'intégration, par rapport aux outils disponibles au sein d'ARVALIS :

3.3.1 Suivi temps réel et déclenchement en fonction d'un seuil ou d'une zone de référence

Avec cette stratégie, on plante un capteur dans une zone de référence et les autres capteurs dans le reste de la parcelle. Afin de déclencher le premier apport, on positionne en début de saison le capteur de référence dans une zone à double densité de semis. Il s'agit d'une méthode classiquement utilisée par les agriculteurs : la plus forte densité de plantes entraîne une consommation plus importante de l'azote du sol qu'avec une densité normale de semis, entraînant un jaunissement accéléré des feuilles. Cet indicateur visuel met en évidence de manière anticipée le besoin en azote du reste de la parcelle. Le suivi à l'aide du capteur de réflectance permet d'estimer la teneur en chlorophylle de la culture et de déterminer la date pour laquelle on détecte une diminution de la teneur en chlorophylle sur la bande double densité par rapport au reste de la parcelle. Cette date correspond au moment du premier apport, pour éviter tout stress azoté.

Pour le déclenchement et la quantification du troisième apport, on positionne un capteur sur une zone surfertilisée. En utilisant le principe de la méthode N-Tester Extra (YARA, ARVALIS), on utilise de manière comparative l'évolution de la teneur en chlorophylle mesurée sur la bande fertilisée et sur les zones de la parcelle pour déterminer la date et la dose d'apport. Par rapport au système N-Tester, l'intérêt des capteurs connectés réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire de se déplacer régulièrement pour réaliser ces mesures sur le terrain.

3.3.2 Suivi en temps réel et correction de modèles dynamiques simples

Le service Farmstar a pour objectif de piloter les apports d'azote au cours de la saison en combinant images satellite et modèles agronomiques (Blondlot *et al.*, 2005). La disponibilité des observations par satellite dépend cependant des conditions météorologiques, notamment de la nébulosité. Disposer de mesures en continu sur un ensemble de zones de référence donne l'opportunité de dynamiser, voire de corriger les variables d'entrée du modèle de calcul de la dose optimale que sont l'indice foliaire et la teneur en chlorophylle. Dans ce cas, on envisage une correction de l'évolution des données satellite par des méthodes de type filtrage (Verger *et al.*, 2013)

3.3.3 Suivi en temps réel et correction d'un modèle dynamique complexe

L'utilisation de modèles agronomiques complets permet d'optimiser conjointement un ensemble de pratiques culturales. Cependant, ces modèles ne prennent en compte qu'une partie des processus biologiques à l'œuvre dans les parcelles. C'est pourquoi la complémentarité entre modèles mécanistes et données de télédétection a été particulièrement étudiée (Guerif *et al.*, 2006 ; Houles *et al.*, 2004). Pour cela, on a recours à l'assimilation des observations dans le modèle, pour ajuster certains de ses paramètres ou conditions initiales afin de faire coïncider les simulations aux mesures. Cependant, les données disponibles étaient jusqu'à présent généralement limitées au suivi de la végétation par satellite. Grâce aux capteurs au sol, de nouveaux types d'observations sont disponibles (données à haute fréquence temporelle, potentiel hydrique du sol notamment), nécessitant de revisiter ces travaux.

Conclusion et perspectives

Le projet CROCUS a permis de déterminer un ensemble de sondes de mesure bien adaptées à un suivi continu et distribué des conditions de croissance et de l'état des cultures. Une intégration de ces sondes dans un réseau de capteurs rend les mesures disponibles avec une fréquence quotidienne. La structuration de la plateforme de gestion et de traitement des données permet une analyse automatisée et une mise à disposition en temps réel de ces données dans des interfaces modulaires. Mis en œuvre en Champagne, dans des parcelles agricoles, ce système a permis une évaluation des forces et des faiblesses de cet ensemble complexe.

La principale originalité de cet ensemble est la caractérisation complète de la culture, qui offre la possibilité de porter un diagnostic pertinent sur son état et son fonctionnement. La démonstration de la

faisabilité technique de l'ensemble de cette chaîne, allant de la mesure dans la parcelle jusqu'à sa mise à disposition pour l'utilisateur final est également un apport remarquable du projet.

L'intégration de ces données dans des outils de pilotage pour une correction en temps réel n'a pas été possible, du fait des problèmes techniques (autonomie énergétique, communication, robustesse de la connectique) inhérents à l'utilisation de prototypes. Cependant, les réflexions entre partenaires de la recherche, du développement et les acteurs de terrain offrent une bonne vision des différentes options possibles pour la réaliser.

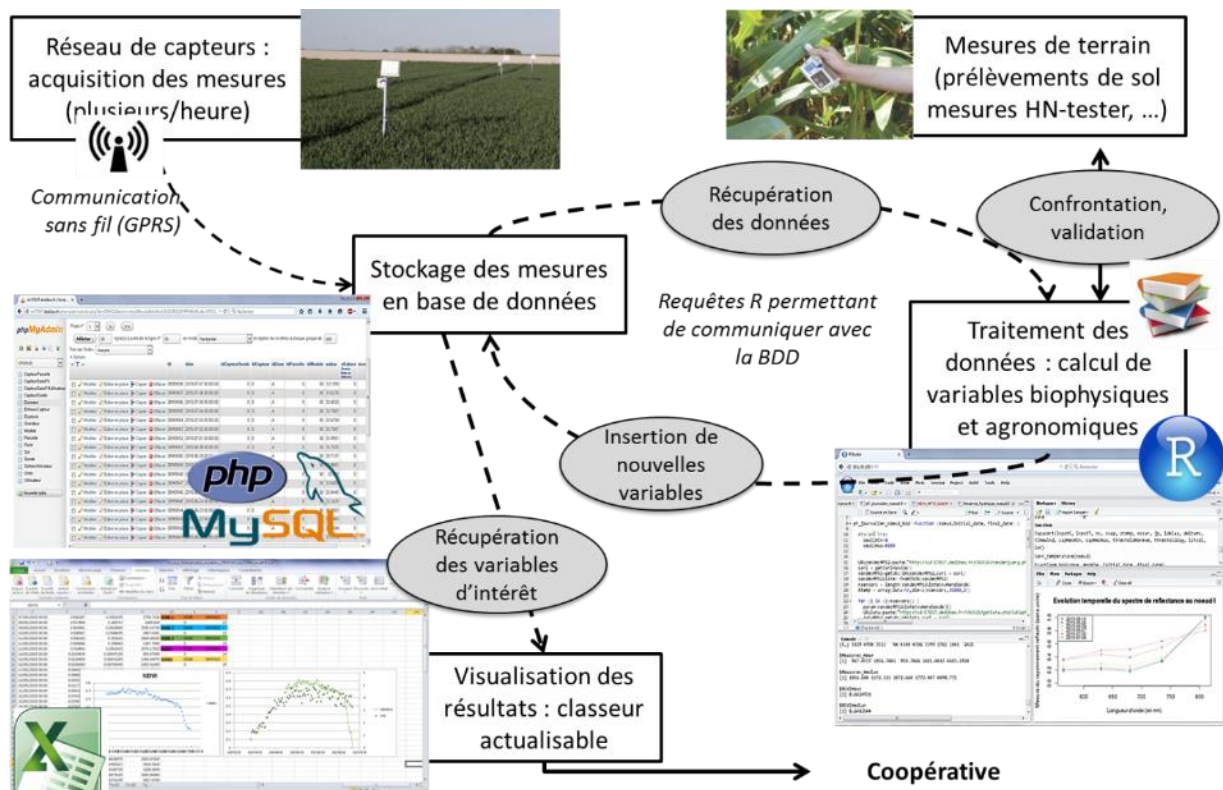


Figure 13 : Schéma complet de fonctionnement de CROCUS

Le projet CROCUS est une des premières implémentations grandeur réelle de l'Internet des Objets (IoT) appliqué à l'agriculture. L'IoT consiste à capter des données issues d'objets ou machines connectés, de les traiter et d'agir selon le résultat de ces analyses (Figure 13). Dans le secteur agricole, le développement et la structuration de cet écosystème sont encore modestes. Cela tient principalement à des freins de deux types : techniques et économiques.

Les freins techniques concernent aujourd'hui la disponibilité de capteurs adaptés aux contraintes agricoles et de moyens de communications en zones rurales. Cependant, une fois ces challenges résolus, les étapes suivantes deviendront sans aucun doute limitantes. Il faut donc agir sur chacun d'eux, et particulièrement sur ceux qui sont spécifiques au secteur agricole :

- Développement de capteurs : mesure de caractéristiques des cultures (caméras time lapse, analyse des phéromones dans l'air, des nitrates dans le sol, ...)
- Développement d'algorithmes de traitement de ces données : analyse d'image, de spectres, de séries temporelles, fusion entre données spatiales et temporelles
- Développement d'outils de prévision et de prescription basés sur ces nouveaux types d'informations, par machine learning notamment

Ces verrous représentent bien sûr des opportunités de recherches ou d'activités commerciales pour autant que les investissements nécessaires ne découragent pas les investisseurs. Aucun d'eux ne constitue une barrière insurmontable techniquement.

Il est important de considérer les obstacles économiques pour comprendre pourquoi l'IoT est encore peu développé en agriculture. Bien qu'important économiquement, le secteur agricole se caractérise par de faibles marges et une longue durée d'amortissement des investissements. D'un autre côté, la valeur apportée par ces nouvelles informations est encore mal connue. Elle est répartie entre tous les acteurs du secteur – producteurs mais aussi collecteurs, négoce, transformateurs, consommateurs – ce qui la rend particulièrement difficile à quantifier. Cela nécessite de mettre en œuvre ces technologies dans le cadre d'études de long terme, multi-disciplinaires et multi-partenariales. Tant que la valeur et la rentabilité de ces solutions ne sont pas démontrées, les start-up, leurs financeurs ou les industries seront réticents à investir massivement. Or, ces investissements sont nécessaires pour une production à grande échelle synonyme de baisse des prix des systèmes physiques et une large répartition des coûts d'hébergement ou d'analyse des données. Parmi les facteurs favorables à son adoption, il faut noter qu'une large part des composants de cette boucle est réutilisable entre applications : les capteurs, les systèmes de communication, l'infrastructure informatique, certains algorithmes de traitement de données peuvent être identiques quand on étudie la cercosporiose de la betterave et la septoriose du blé. En revanche, l'acquisition des données sur le terrain et les modèles développés resteront spécifiques.

Pour répondre aux deux questions essentielles qui sont « qui paie le surcoût » et « comment changer d'échelle », il convient donc d'analyser finement la boucle de valeur de l'IoT pour comprendre « qui gagne quoi ». Cela doit se faire par cas d'usage, c'est-à-dire par culture voire par opération culturale. Il est très probable que l'équation économique soit aujourd'hui difficile à résoudre étant donné le faible coût des intrants. Mais si les termes de cette équation évoluent (interdiction de molécules, incitations plus importantes au verdissement des pratiques, ...), ou si le prix des productions agricoles augmente du fait de démarches qualité (chartes de productions intégrant une précision accrue des pratiques) ou de tension sur les marchés mondiaux, l'IoT agricole deviendra incontournable pour continuer à produire en qualité et quantité suffisantes.

Le projet CROCUS a eu deux suites directes principales. Tout d'abord, la collaboration avec les sociétés BOSCH et HIPHEN au développement du système Field Sensor®, version industrialisée du prototype développé dans CROCUS, intégrant en plus une caméra RGB. Ensuite, le vaste projet européen IOF2020 (<https://www.iof2020.eu>), dans lequel ARVALIS est responsable de l'implémentation d'un cas d'usage sur l'utilisation de capteurs Field Sensor® pour le pilotage de la fertilisation et de l'irrigation du blé.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble de l'équipe technique ARVALIS de Chalons en Champagne pour le suivi des expérimentations au champ, ainsi que les équipes techniques de l'Irstea et de l'INRA pour leur active participation.

Le projet CROCUS a été financé par le Casdar.

Références bibliographiques

Baret F., de Solan B., Lopez-Lozano R., Ma K., Weiss M., 2010. GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5 degrees zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), 1393-1401. doi:10.1016/j.agrformet.2010.04.011

- Blondlot A., Gate P., Poilve H., 2005. Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery. *Precision Agriculture* 05, 345-352.
- Bogena H.R., Herbst M., Huisman J. A., Rosenbaum U., Weuthen A., Vereecken H., 2010. Potential of Wireless Sensor Networks for Measuring Soil Water Content Variability. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 1002-1013. doi:10.2136/vzj2009.0173
- Dash J., Curran P.J., 2004. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5403-5413. doi:10.1080/0143116042000274015
- Fournier C., Durand J.L., Ljutovac S., Schaefe R., Gastal F., Andrieu B., 2005. A functional-structural model of elongation of the grass leaf and its relationships with the phyllochron. *New Phytologist*, 166(3), 881-894. doi:10.1111/j.1469-8137.2005.01371.x
- Garcia-Sanchez A.-J., Garcia-Sanchez F., Garcia-Haro J., 2011. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2), 288-303. doi:10.1016/j.compag.2010.12.005
- Guerif M., Houles V., Makowski D., Lauvernet C., 2006. Data assimilation and parameter estimation for precision agriculture using the crop model (STICS). In D. W. a. D. M. a. J. W. Jones (Ed.), *Working with dynamic crop models: evaluating, analyzing, parameterizing and using them* (pp. 395:401): Elsevier.
- World Meteorological Organization, 2010. Guide to agricultural meteorological practices. http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/documents/WMO_No134_en.pdf
- Houles V., Mary B., Guerif M., Makowski D., Justes E., 2004. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie*, 24(6-7), 339-349. doi:10.1051/agro:2004036
- Lecerf R., Baret F., Hanocq J., Marloie O., Rautiainen M., Mottus M., Stenberg P., 2010. PASTIS 57: Autonomous light sensors for PAI continuous monitoring. Principles, calibration and application to vegetation phenology. Paper presented at the AGU Fall Meeting.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Paper presented at the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Washington, D.C.
- Ryu Y., Baldocchi D.D., Verfaillie J., Ma S., Falk M., Ruiz-Mercado I., Sonnentag O., 2010. Testing the performance of a novel spectral reflectance sensor, built with light emitting diodes (LEDs), to monitor ecosystem metabolism, structure and function. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(12), 1597-1606. doi:10.1016/j.agrformet.2010.08.009
- Vangenuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Vellidis G., Garrick V., Pocknee S., Perry C., Kvien C., Tucker M., 2007. How wireless will change agriculture. Paper presented at the Precision agriculture '07. Papers presented at the 6th European Conference on Precision Agriculture, Skiathos, Greece, 3-6 June, 2007.
- Verger A., Baret F., Weiss M., Kandasamy S., Vermote E., 2013. The CACAO Method for Smoothing, Gap Filling, and Characterizing Seasonal Anomalies in Satellite Time Series. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(4), 1963-1972. doi:10.1109/tgrs.2012.2228653
- Wang N., Zhang N.Q., Wang M.H., 2006. Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1), 1-14. doi:10.1016/j.compag.2005.09.003

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

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 », la date de sa publication, et son URL.