

La cartographie des parcelles agricoles et les services associés à Farmstar

Par Philippe GATE, Baptiste SOENEN, Mathilde CLOSSET et Norbert BENAMOU
ARVALIS
et Hervé POILVÉ et Michel FEUGA
Airbus Defence and Space

Service innovant unique au monde, Farmstar valorise les images satellites et des modèles agronomiques pour aider les agriculteurs dans leurs décisions d'apport d'azote en cours de campagne. Son succès, avec plus 16 000 agriculteurs abonnés exploitant plus de 700 000 hectares, s'explique par sa grande précision sur un élément minéral qui, d'une part, est, en France, avant l'eau, le principal facteur limitant la production agricole tant en quantité qu'en qualité, et qui, d'autre part, peut être responsable d'une baisse de la qualité des eaux (augmentation de la teneur en nitrates des nappes phréatiques). Les bénéfices générés concernent la rentabilité économique (gains de rendement, réduction des doses d'intrants, récolte de grains de meilleure qualité) et les enjeux environnementaux et sociétaux (en évitant tout type d'excès d'azote, en traçant et en justifiant les interventions des agriculteurs). Par ailleurs, grâce aux cartes de zonage livrées aux agriculteurs, chacun d'eux peut faire varier les doses nécessaires en fonction des besoins des plantes en différents points d'une même parcelle.

Cette réussite enviée par beaucoup résulte de l'agrégation de compétences complémentaires entre les agronomes d'ARVALIS et les experts en télédétection d'Airbus.

Introduction

La production agricole est probablement l'activité économique la plus dépendante des conditions climatiques. Le changement climatique, dont on peut évaluer les effets à la fois en termes de rendement et de variabilité interannuelle des productions à peu près depuis 1995, accroît cette dépendance au climat (Brisson *et al.*, 2010).

À l'échelle de la France, l'azote est, avant l'eau, le principal facteur de limitation de la production de céréales tant sur le plan quantitatif (rendement par hectare) que qualitatif (teneur en protéines des grains) (Gate, 1995). Les sols ne contenant pas suffisamment d'azote pour satisfaire les besoins des cultures, l'agriculteur doit toujours apporter des compléments sous forme d'apport d'engrais, hormis dans le cas des légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique. Par ailleurs, les quantités d'azote contenues dans les sols sont variables, à la fois selon le type de sol, les espèces choisies pour la rotation des cultures sur l'exploitation et l'année météorologique, car l'activité des bactéries du sol responsables de la minéralisation de l'azote dépend également des conditions climatiques.

Outre le coût des engrais, tous ces éléments font que la dose à épandre varie de plus en plus d'une année sur l'autre pour une même parcelle, y compris au niveau intra-parcellaire, car les sols sont souvent de nature hétérogène au sein d'une même parcelle. Par ailleurs, l'accroissement de la surface des parcelles utilisées en grandes cultures (moyennes supérieures à 10 hectares (ha)) rend impossible un diagnostic azoté exhaustif de l'ensemble du champ avec les outils classiques.

En réponse à cette demande exprimée par les producteurs, ARVALIS et Airbus ont mis au point une méthode permettant un ajustement des doses d'engrais au plus juste des besoins de la culture, évitant ainsi tout excès dans l'environnement, une méthode basée sur la télédétection satellitaire : le service Farmstar qui couvre aujourd'hui environ 700 000 hectares est en fait l'outil de pilotage de la fertilisation azotée qui est le plus utilisé en France ; il est même unique à l'échelle mondiale. La démarche permet de préconiser, pour chaque partie pixelisée de la parcelle (100 m²), la dose optimale, c'est-à-dire la quantité minimale d'engrais permettant d'accéder au

rendement maximum tout en garantissant la qualité des grains (teneur en protéines). Le recours à la télédétection satellitaire permet à la fois une démultiplication des surfaces pilotées et une prise en charge de l'hétérogénéité intra-parcellaire grâce à une spatialisation fine du conseil.

L'élaboration du concept Farmstar et sa mise en œuvre effective sont directement liées à deux projets de recherche financés par la Commission européenne : le projet PAAGE (Pilot Project for Agriculture and AGri-Environment, 1997-1999) et le projet SAAGE (Space Applications for AGriculture and agri-Environment, de 1998 à fin 1999).

Les principes

Estimation de variables biophysiques de la canopée

Le concept Farmstar consiste à combiner la technologie spatiale aux connaissances agronomiques. La première étape développée par les experts d'Airbus est d'estimer pour chaque pixel deux paramètres biophysiques et biochimiques de la canopée à partir de modèles de réflectance, l'indice foliaire vert (IFV) et la teneur en chlorophylle (Chl, exprimée en $\mu\text{g cm}^{-2}$). À partir de l'IFV (qui correspond au total de la surface verte des feuilles sur 1 m^2 de sol, exprimé en $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$), il est possible d'estimer la biomasse des parties aériennes. Et à partir de Chl, on peut évaluer l'indice de satisfaction des besoins en azote du peuplement (Blondot, Gate et Poilvé, 2005).

Le modèle de réflectance utilisé est le modèle SAIL + PROSPECT. PROSPECT est un modèle générique de transmittance et de réflectance des couverts végétaux (Jacquemout et Baret, 1990 ; Fourty et Baret, 1997) ; SAIL, quant à lui, intègre les propriétés optiques des feuilles ainsi que des paramètres de description de la canopée (Verhoef, 1984). Le modèle utilisé pour les corrections atmosphériques est MODTRAN.

Une première étape importante a consisté à valider la précision des valeurs de l'IFV et de Chl estimées par télédétection (capteur hyperspectral CASI) par rapport à des mesures géolocalisées réalisées sur le terrain (mesures directes de la biomasse, dosage d'azote par spectrométrie de masse et mesures indirectes avec des capteurs de proxidtection, le LI-Cor pour IFV et le Chlorophyll-meter SPAD 502 pour Chl). Ces validations ont porté sur quatre campagnes successives, dont trois réalisées dans trois pays différents (France, Royaume-Uni et Espagne).

La précision moyenne des deux indicateurs est suffisante : 15 % pour IFV et $2 \mu\text{g cm}^{-2}$ pour Chl (Blondot *et al.*, 2005).

En cours de campagne, les estimations de ces variables sont réalisées à une étape clé de la culture pour la gestion du dernier apport d'azote, celle de la mi-montaison des tiges (valeur moyenne en milieu de printemps).

Évaluer IFV et Chl sur une surface très grande a conduit à utiliser des satellites, dont la fréquence de revisite d'une même zone et la fauchée sont adaptées (famille Spot avec aujourd'hui Spot6 et Spot7, mais aussi Formosat, Deimos-1 et DMC-2, et plus récemment Sentinel2).

Estimation d'indicateurs agronomiques pour ajuster au plus près la fertilisation azotée

En France, la fertilisation azotée est réglementée. La méthode officielle est celle du bilan prévisionnel, elle est basée sur un bilan de masse entre les entrées et les sorties d'azote (Machet *et al.*, 1990). Cette méthode est parfois entachée d'erreurs en raison de l'incertitude affectant certains paramètres (azote fourni par le sol, besoins azotés de la plante qui sont variables selon les années). Estimer ou prédire la quantité absorbée par la culture est une voie réelle de progrès pour améliorer cette méthode : c'est la culture qui constitue le poste principal du fait qu'elle absorbe la quasi-totalité de l'azote disponible. Pour savoir si la plante est carencée ou en excès, l'agronome utilise l'indice de nutrition azotée basé sur la courbe critique de l'azote (Justes *et al.*, 1994). Dans la phase qui nous intéresse, la relation correspond à l'équation suivante :

$$Nc\% = 5.35W^{-0.442}$$

Où W correspond à la biomasse sèche des parties aériennes (t ha^{-1}) ; Nc à la concentration critique en azote exprimée en pourcentage de la biomasse sèche. Le ratio N présent/N critique correspond à l'INN (indice de nutrition azotée) : quand cet indice est égal à 1, la plante est alimentée à ses justes besoins (optimum) ; inférieur à 1, la plante est carencée, et supérieur à 1, la plante est en excès d'azote. Par ailleurs, par la connaissance de la biomasse, il est possible d'exprimer cet indice en quantité d'azote par hectare dans les parties aériennes (QN). Sur la base de ces valeurs estimées (QN estimé, en tenant compte de l'IFV, de Chl et de QN critique, de Nc pour la biomasse estimée à travers l'IFV), il devient alors possible de préconiser l'apport de doses supplémentaires d'azote dans le but de suivre la courbe critique. Afin d'être sûr d'y parvenir, l'agriculteur utilise la méthode du bilan prévisionnel, mais au moment d'apporter l'azote au stade épis à 1 cm (souvent l'apport le plus important), il minimise dans le cadre de Farmstar la dose apportée par rapport à la dose optimale préconisée par la méthode. Cette condition minimaliste conduit la culture à entrer progressivement en carence, ce qui permet d'ajuster le dernier apport pour satisfaire ses besoins totaux. Les besoins totaux de la culture étant déterminés au stade de la floraison (apogée de la croissance des parties végétatives), un modèle écophysique projeté dans la dernière version de Farmstar la valeur de QN estimée de la mi-montaison jusqu'à la floraison. Ce modèle simule notamment la croissance, l'absorption d'azote et le niveau journalier du stock azoté du sol (Soenen *et al.*, 2017). La projection jusqu'à la floraison se fait par une projection fréquentielle en utilisant le modèle de fonctionnement sur une série historique de données climatiques afin d'en dégager les valeurs les plus probables (les médianes).

	Méthode du bilan	Farmstar Méthode QN
Écart à la dose optimale	+ 25 kgN.ha ⁻¹	+ 0.7 kgN.ha ⁻¹ **
r²	0.34	0.41

Tableau 1 : Écart moyen par rapport à la dose optimale en fonction des deux méthodes de gestion de l'azote (méthode du bilan prévisionnel et Farmstar).

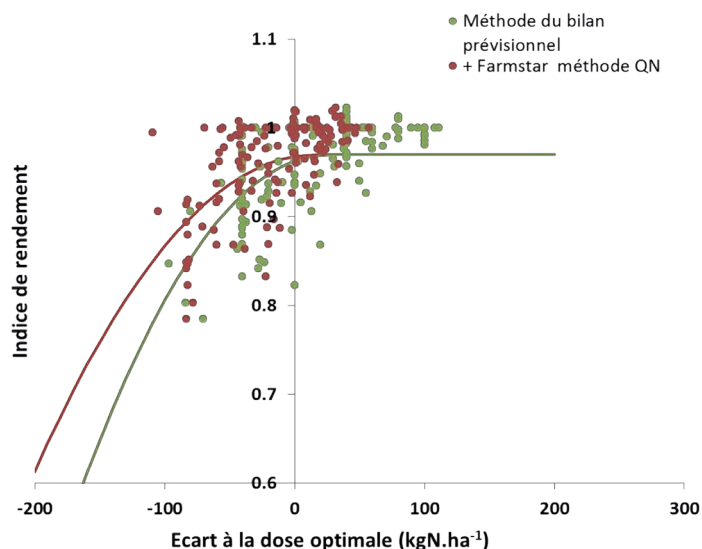


Figure 1 : Relation entre l'indice de rendement et l'écart par rapport à la dose optimale pour apprécier le rendement (kgN.ha^{-1}) en fonction des deux méthodes de gestion de l'azote (méthode du bilan prévisionnel et méthode Farmstar).

La Figure 1 ci-dessus et le Tableau 1 de la page précédente illustrent la performance globale de la méthode en comparant le pilotage assuré par Farmstar (méthode QN) à la méthode du bilan prévisionnel.

La dose optimale correspond à la dose d'azote qui aurait dû être apportée à l'échelle de la parcelle : elle est donc calculée *a posteriori* par ajustement des courbes des réponses en termes de rendement à des doses croissantes d'azote. Ainsi, la méthode Farmstar conduit en moyenne à conseiller des doses très proches de l'optimum ($0,7 \text{ kgN.ha}^{-1}$), alors que la méthode conventionnelle conseille des doses se traduisant par un excès ($+ 25 \text{ kgN.ha}^{-1}$).

Applications

Lancé en 2002, le service Farmstar n'a cessé depuis lors de progresser pour couvrir aujourd'hui plus de 700 000 hectares, dont 438 000 de blé, ce qui en fait le premier outil de pilotage agricole en France (voir la Figure 2 ci-dessous). Cette surface correspond à celle exploitée par 16 000 agriculteurs abonnés, avec de plus un taux de fidélisation proche de 90 %.

Cette réussite est due aux bénéfices procurés par la mise en œuvre de cette technologie qui n'a pas d'équivalent (BAUDART *et al.*, 1990 ; DUVAL-FLEURY *et al.*, 2010) :

- rentabilité économique : des gains de rendement pouvant aller jusqu'à 3 quintaux par hectare, et des économies quand les besoins réels en azote sont revus à la baisse grâce à la prévision à la mi-montaison (réduction des doses, voire absence d'apport) ;
- gain environnemental : lié à un moindre apport de l'ordre de 10 kg d'azote par hectare. On évite tout type d'excès dans l'environnement en usant de la possibilité d'appliquer des doses différenciées en fonction de l'hétérogénéité intra-parcellaire ;
- qualité : le modèle d'ajustement de la dose prend en compte la migration de l'azote vers les grains pour assurer une teneur en protéines satisfaisant les marchés, notamment ceux de la meunerie et de l'export ;
- traçabilité : la décision de l'apport et l'argumentation de celle-ci sont tracées ce qui donne la possibilité à l'agriculteur de s'assurer que la dose épandue ne soit pas supérieure à celle préconisée par la réglementation.

En début de campagne, chaque parcelle exploitée par un agriculteur est géolocalisée dans une fauchée satellite (voir la Figure 3 de la page suivante). De même, pour chacune des parcelles, toutes les variables nécessaires pour

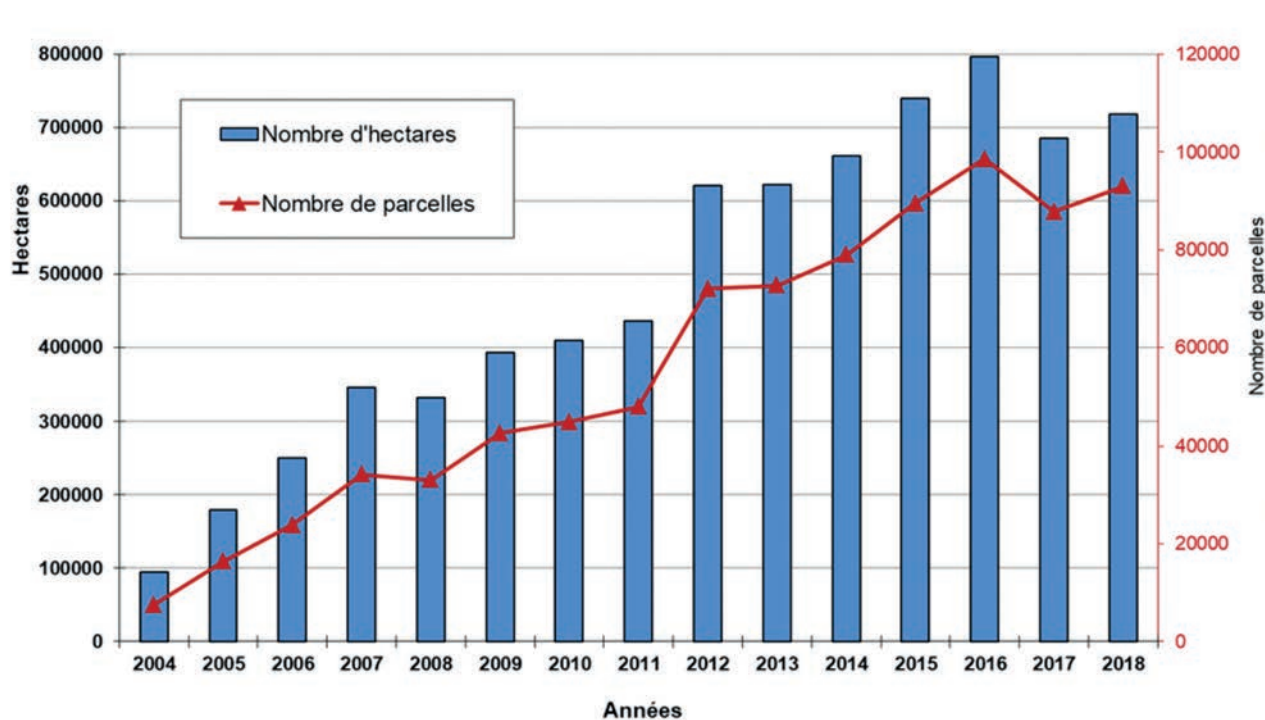


Figure 2 : Évolution du nombre d'hectares et de parcelles Farmstar.

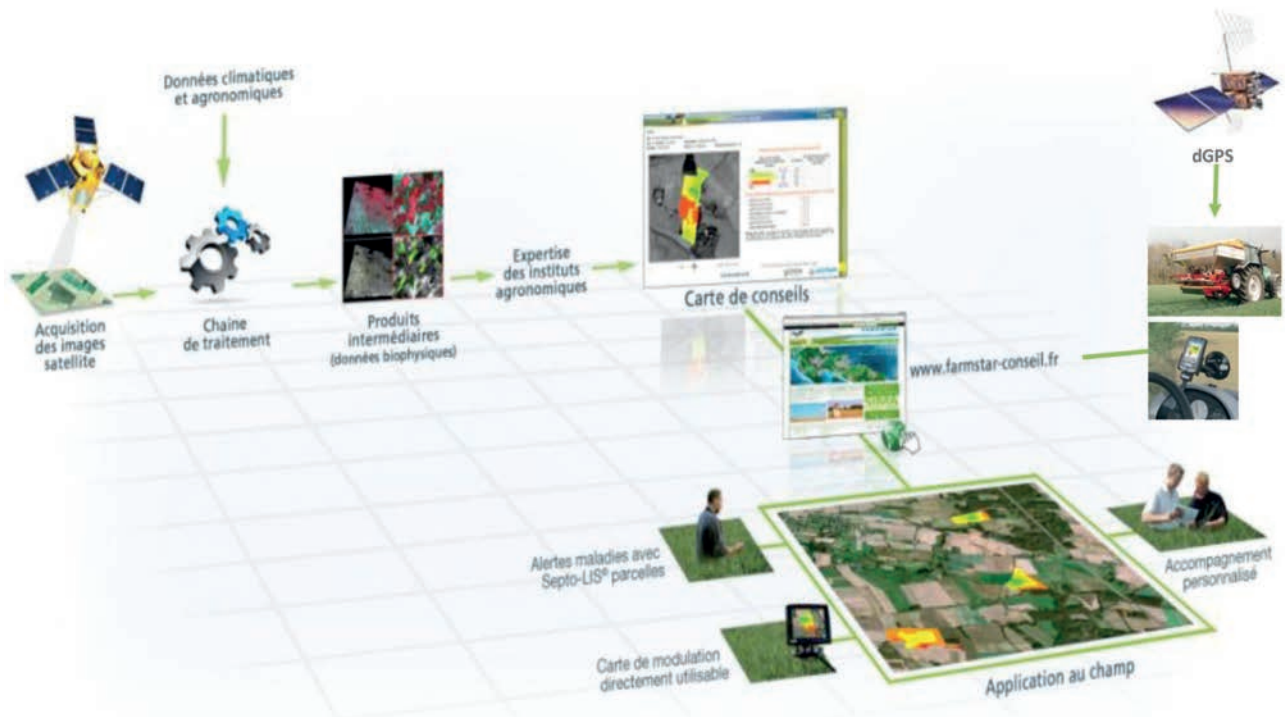


Figure 3 : De la vue satellitaire à la préconisation intra-parcellaire.

incrémenter les modèles agronomiques sont recueillies par le technicien qui dispense le service : coordonnées de la parcelle (afin de spatialiser les données météorologiques journalières), caractéristiques du sol (profondeur, texture...), et pratiques de l'agriculteur (date de semis, variété cultivée...).

Pour chaque parcelle, ARVALIS détermine les moments clés de diagnostic en procédant à des prévisions des différents stades de développement. À partir de ces prévisions, Airbus programme les dates de prises de vue les mieux adaptées à chaque zone géographique en prenant en compte la distribution des stades de développement. Pour chacune des parcelles, sont alors estimées les variables biophysiques clés (Airbus), qui sont converties en statuts azotés, puis en décisions (ARVALIS) par des chaînes de traitement automatisées (voir la Figure 3 ci-dessus).

La Figure 4 de la page suivante donne un exemple de carte de préconisation fournie à l'agriculteur. En fonction de l'hétérogénéité de la parcelle, différentes doses sont conseillées en indiquant la surface approximative de leur épandage. Leur géoréférencement et l'utilisation d'interfaces informatiques permettent aujourd'hui de procéder à des modulations d'application intra-parcellaire pour les machines agricoles (tracteurs et pulvérisateurs).

Au final, sept jours en moyenne séparent le passage du satellite de la délivrance du conseil. À l'échelle d'une campagne, 1 million de données météorologiques sont traitées, et environ 80 millions d'exécutions du modèle agronomique sont effectuées.

Conclusion et perspectives

Farmstar reste un modèle unique. Son caractère innovant résulte avant tout des complémentarités existant entre

les compétences technologiques d'Airbus et les compétences agronomiques d'ARVALIS.

D'autres conseils spatialisés sont venus progressivement compléter le service Farmstar : état de croissance de la culture, risque de verse physiologique... En réponse à une demande des clients distributeurs, le service a dépassé l'offre de conseil basée uniquement sur l'imagerie satellite pour devenir un vecteur de diffusion plus large, en proposant des modules qui ne font pas appel à la télé-détection, comme la prévision des stades phénologiques et des épidémiologies. Cette dimension de « plateforme intégrée de diffusion de conseils » est permise grâce au cadre très structurant de la base de données parcellaires qui intègre un grand nombre de variables que l'on peut valoriser pour d'autres applications. La plateforme s'est progressivement imposée, notamment pour répondre à la multiplicité des formats des outils proposés par les opérateurs (notamment les coopératives).

La satisfaction des clients est une priorité pour Farmstar, c'est pourquoi l'évolution et l'amélioration des conseils sont continues. Dans les années à venir, le service devra évoluer pour intégrer de nouveaux moyens de télédétection (drones, constellation de satellites Sentinel 2), de nouveaux capteurs (en particulier, des capteurs dédiés à l'estimation des composants du sol), pour renforcer son interactivité avec les agriculteurs par la remontée de leurs pratiques, pour pouvoir réaliser des calculs en temps réel et pour valoriser et faciliter la modulation intra-parcellaire. Ces nouveaux leviers technologiques peuvent ouvrir la porte à de nouveaux conseils, comme la prévision de collecte (rendement et qualité) pour les organismes stockeurs, ou à de nouvelles cultures. La diffusion du modèle à l'étranger est aussi une voie prometteuse. Le champ des possibles est vaste, mais Farmstar, pour suivre

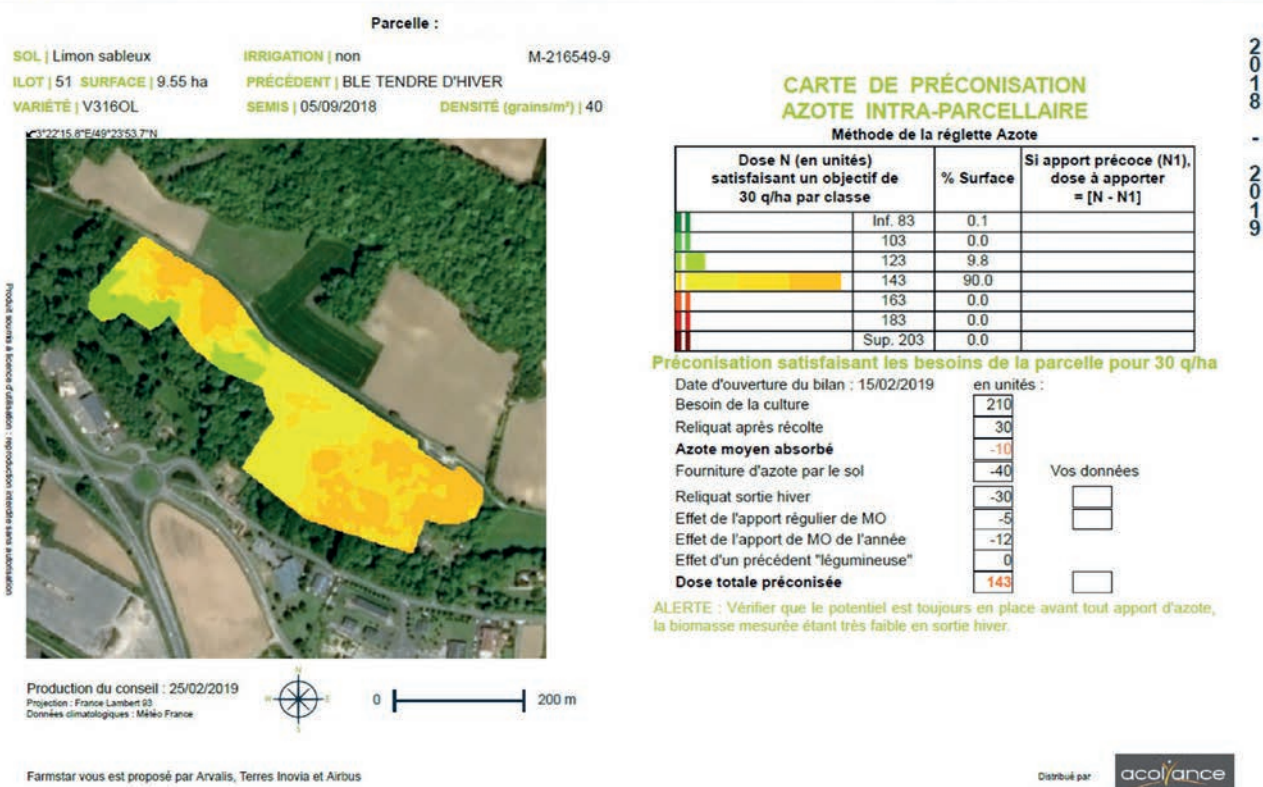


Figure 4 : Carte de préconisation d'apport d'azote au niveau intra-parcellaire.

la pente de l'innovation, devra tenir compte des avancées à la fois techniques et technologiques du monde agricole, des nouvelles réglementations et des attentes des producteurs, tout en conservant une rentabilité économique suffisante pour garantir sa pérennité, cela passera par la construction de nouveaux services.

Bibliographie

BRISSON N., GATE P., GOUACHE D., CHARMET G., OURY F. X. & HUARD F. (2010), "Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France", *Field Crops Research* 119 (2010), pp. 201-212.

GATE P. (1995), *Écophysologie du blé : de la plante à la culture*, Lavoisier Éditeur, 424 pages.

BLONDOT A., GATE P. & POILVÉ H. (2005), "Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery", *Precision Agriculture* 05, edited by J. V. STAFFORD, pp. 345-352 (5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, June 9th-12th).

FOURTY T. & BARET F. (1997), "Vegetation water and dry matter contents estimated from top of the atmosphere reflectance data: a simulation study", *Remote Sensing of Environment* 61, pp. 34-45.

JACQUEMOU S., BACOUR C., POILVÉ H. & FRANGI J.-P. (1999), "Comparison of Four radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance – Direct and Inverse Mode", *Remote Sensing of Environment* 74, pp. 471-481.

JACQUEMOU S. & BARET F. (1990), "PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra", *Remote Sensing of Environment* 34, pp. 75-91.

MACHET J.-M., DUBRULLE P. & LOUIS P. (1990), "Azobil: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method", *Proceedings 1st European Society for Agronomy Congress*, Paris, Session 2, p. 21.

VERHOEF W. (1984), "Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model", *Remote Sensing of Environment* 16, pp. 125-141.

SOENEN B., CLOSSET M., BONNARD A. & LEBRIS X. (2017), « Le pilotage de l'azote sur blé dans le service Farmstar », Colloque Phloème, *actes du congrès*, 24 et 25 janvier 2018, Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris.

DUVAL-FLEURY A. D. & LAURENT F. (2009), « Farmstar : bilan du service à l'horizon 2010 », *Perspectives agricoles*, 361, novembre 2009.

BAUDART C., BLONDOT A. & DOUCHE H. (2008), « Farmstar : la précision des satellites pour piloter les cultures », *Perspectives agricoles*, 349, octobre 2008.

JUSTES E., MARY B., MEYNARD J.-M., MACHET J.-M. & THELIER-HUCHE L. (1994), "Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops", *Annals of Botany* 74, pp. 397-407.