

**AFPP – ONZIÈME CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
TOURS – 7 AU 9 DÉCEMBRE 2015**

**OAD ET AGRICULTURE NUMERIQUE :
MOYENS DE MIEUX PROTEGER LES PLANTES AVEC MOINS D'INTRANTS**

C. REGNAULT ROGER¹, M. DELOS², J. ROUZET³

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour & Académie d'agriculture de France, 18 rue de Bellechasse, 75007 Paris, Catherine.regnault-roger@univ-pau.fr

² SRAI-DRAAF-"Midi-Pyrénées" – Bât. E – Bd Armand Duportal - 31074 TOULOUSE, marc.delos@agriculture.gouv.fr

³ MODELINE, 3 rue de Montaud 34820 TEYRAN,

RÉSUMÉ

Le cadre général de l'agriculture du 21^è siècle requiert une mobilisation de toutes les connaissances et savoir-faire, de toutes les technologies disponibles pour nourrir la population mondiale tout en préservant l'environnement. Parmi les innovations récentes, une formidable révolution technologique est intervenue à la fin du 20^è siècle. Grâce au numérique, l'agriculture bénéficie de nouveaux outils qui ouvrent de nouveaux champs d'investigation et d'opération tels que la prévision, la surveillance et la gestion des tâches agricoles et des itinéraires techniques pour un optimum agro-écologique autant qu'économique.

A titre d'exemples seront retenus : (1) la signalisation par GPS et la prise d'images associées formant un système embarqué dans des engins agricoles ou dans des drones, afin de gérer les applications localisées de produits phytopharmaceutiques et une meilleure gestion des sols en limitant le passage d'engins ; (2) la mise au point de logiciels dédiés que ce soit dans la prévision de maladies et de l'occurrence de ravageurs permettant de disposer de conseils optimisés, ou la modélisation des seuils de tolérance économiques en fonction des dégâts et du prix de la récolte, ce qui conduit à une gestion ajustée de l'exploitation agricole.

Cette évolution nécessite une intégration et une interaction d'outils différents et complémentaires dans des systèmes de conseils stratégiques ou tactiques complexes, et surtout une réglementation adaptée qui doit encourager ces innovations et ne soit pas un obstacle à leur mise en œuvre.

Mots-clés : agriculture numérique, modélisation, OAD, drones, GPS, analyse, prévision, gestion

ABSTRACT

DECISION SUPPORT TOOLS AND DIGITAL AGRICULTURE: A WAY TO IMPROVE PLANT PROTECTION WITH LESS INPUTS

The general framework of agriculture of the 21th century requires the mobilization of the whole knowledge and expertise of all the technologies available in order to feed Humans and animals as well as to preserve the environment. Among the recent innovations, a tremendous technological revolution took place in the late 20th century. Digital technology opens new fields of investigation and operation that agriculture takes advantage. New tools forecast, monitor and manage agronomic practices to lead to sustainable agriculture taking into account agro-ecological and economic goals as well.

As examples: GPS signals and the associated images forming an embedded system in agricultural vehicles or drones, to manage localized applications of plant protection products and limit the passing gear for a better land management; also, the development of software dedicated in (i) predicting disease and the occurrence of pests to have optimized recommendations, (ii) modeling economic tolerances according to the damage and the price of the crop to induce an adjusted management of farming.

These changes require the integration and interaction of different and complementary tools in complex tactical or strategic advisory systems. An appropriate regulation to encourage these innovations through their implementation will be a key as well.

Keywords: Digital agriculture, modeling, ADO, drones, GPS, analysis, forecasting, management.

INTRODUCTION

Un des enjeux de l'agriculture durable en ce début de 21^è siècle est la réduction des intrants, fertilisants, pesticides et énergie, tout en améliorant les rendements afin de nourrir une population planétaire à la démographie soutenue. C'est donc fondamentalement à un gain de productivité s'accompagnant d'une empreinte environnementale positive qu'est confrontée aujourd'hui l'agriculture française et mondiale, un véritable défi puisqu'il s'agit de conjuguer autant une approche écologique qu'économique et sociologique, les trois facettes du développement durable.

Ce cadre général requière une mobilisation de toutes les connaissances et savoir-faire, de toutes les technologies disponibles. Aucune ne doit être exclue du champ des réflexions en raison de l'ampleur des progrès à accomplir.

Dans cette approche globale, plusieurs outils technologiques sont disponibles :

- l'amélioration variétale et les biotechnologies végétales qui conjuguent des techniques anciennes ou récentes (mutagenèse, transgénèse, cisgénèse, CRISPR-Cas9) afin d'obtenir des variétés plus résistantes aux maladies ou s'adaptant à des conditions pédo-climatiques parfois difficiles, tout en obtenant des rendements de plus en plus performants ;
- la création de nouvelles molécules phytopharmaceutiques qui conjuguent efficacité et moindre dose ;
- le développement de nouvelles solutions de biocontrôle ;
- la mise en place de réseaux de fermes à haute valeur environnementale, comme les réseaux DEPHY ou AGERISTTM dans lesquelles les efforts portent non seulement sur une meilleure gestion des effluents et une utilisation optimisée des intrants mais aussi sur la concertation et la mise en commun des expériences engagées et leurs résultats ;
- l'existence d'un matériel agricole et d'appareillages de plus en plus performants.

L'ensemble de ces approches bénéficie en outre de la formidable révolution technologique qui est intervenue à la fin du 20^{ème} siècle : l'avènement du numérique. Le développement de ces outils numériques a de profondes répercussions dans toutes les domaines, non seulement domestiques mais aussi professionnels. Grâce au numérique, l'agriculture bénéficie de nouveaux outils qui ouvrent de nouveaux champs d'investigation et d'opération. Parmi lesquels la prévision, la surveillance et la gestion des tâches agricoles et des itinéraires techniques pour un optimum agro-écologique autant qu'économique.

Dans ce contexte nouveau, seule l'optimisation stricte de l'emploi de l'énergie, des fertilisants et des pesticides permettra de progresser vers les objectifs de l'agriculture durable. Les outils qui devraient permettre cette formidable évolution sont en majorité déjà connus dans leur structure, voire pour certains déjà mis au point et utilisés. L'essentiel reste cependant à faire pour améliorer des outils de prévision et d'aide à la décision (OAD) existant et d'en créer de nouveaux. Ainsi le développement des drones offre des opportunités fantastiques en agriculture et devrait connaître un essor remarquable. C'est ce développement qui permettra de gérer une agro-écologie de progrès augmentant les rendements tout en réduisant les intrants (énergie, fertilisants, pesticides). Il s'agit donc d'un triptyque *Prévoir, Surveiller et Gérer* conjuguant production agricole, équilibre des écosystèmes et performance économique.

1. PREVOIR

La prévention relève non seulement d'actions de prophylaxie mais aussi d'une estimation des risques à l'aide d'une démarche de modélisation assistée par ordinateur. Les exemples suivants illustrent le sujet.

▪ Gestion de la complexité des relations interspécifiques

La modélisation permet de décrire la dynamique de champignons pathogènes, des ravageurs ou des adventices sous l'effet du climat ou de pratiques agronomiques prédéfinies. Les modèles obtenus doivent conduire à déterminer la plage de temps au cours de laquelle un bioagresseur atteindra le niveau de nuisibilité nécessitant une gestion. Ils interviennent pour définir les éléments tactiques de la décision.

C'est le cas du modèle *Presept* qui décrit l'évolution de la septoriose du blé provoquée par *Zymoseptoria tritici* (Rouzet et al., 2005). Ce modèle prévisionnel décrit par anticipation le niveau de dégât de la maladie sur le végétal et intègre des variables climatiques et agronomiques comme la variété et la date de semis. Un autre modèle TOP décrit l'évolution d'une autre maladie du blé, le piétin-verse du blé provoqué par *Oculimacula yallundae* et *Oculimacula acutiformis*. Il comprend des paramètres supplémentaires (type de sol, rotations et façons culturales) intervenant dans l'expression de la maladie (Délès, 1995 ; Rouzet et al., 2005).

Les modèles peuvent devenir encore plus complexes si on décide de gérer plusieurs niveaux trophiques à la fois :

- par exemple les travaux de Folcher et al. (2009), qui modélisent les relations existantes entre la plante maïs (*Zea mays*), les lépidoptères ravageurs pyrale (*Ostrinia nubilalis*) et sésamie (*Sesamia nonagrioides*), la mycoflore fusarienne (*Fusarium graminearum*, *F. verticillioïdes* (ex. *moniliforme*), *F. proliferatum*) et les mycotoxines associées (trichothécènes dont le deoxy-nivalenol DON, fumonisines, zéaralénone).
- un autre exemple, cité dans la session sur la sécurité sanitaire, montre l'importance de la dissémination des ascospores au-delà de l'échelle locale dans la contamination du blé par l'ergot du seigle. Cette dispersion résulte de graminées adventices non maîtrisées dans la parcelle mais aussi de l'activité d'insectes butineurs qui déportent les spores du champignon qu'ils ont récolté dans un miellat attractif (Vitry et al, 2015).

C'est donc un ensemble de relations interspécifiques complexes que les OAD doivent intégrer pour que nous puissions disposer d'une prévision et d'une gestion efficace.

▪ Gestion des performances économiques

La prise d'une décision tactique dépend non seulement d'une estimation de la qualité sanitaire de la production mais également de considérations économiques. Quel est le seuil tolérable des pertes de rendement en termes économiques ? Dans ce cas, il faut recourir à des modèles complémentaires qui intègrent les prix : le prix unitaire du produit agricole à préserver, les prix des intrants (fongicides, insecticides ou herbicides). Les seuils d'intervention qui déterminent la décision du traitement et sa date vont alors évoluer d'une année à l'autre en raison de la volatilité des prix sur le marché, avec une tolérance au dégât et au dommage qui sera fonction de la valeur commerciale attendue de la production, et non du seul prix de l'intervention phytosanitaire.

Il est donc indispensable que préalablement à cette étape, une modélisation des conséquences des choix agronomiques sur le développement d'un ensemble des bioagresseurs ait été réalisée. Cette projection peut conduire à modifier certains de ces choix. Ainsi, certains modèles intègrent des variables comme la rotation, le travail du sol, les choix variétaux, les dates de semis, la fertilisation, l'irrigation, dont l'incidence sur différents risques parasitaires varie en fonction des milieux. Modifier certains de ces choix suppose d'intégrer les externalités négatives de ces choix (érosion, tassement des sols, risques sanitaires pour l'aliment, rentabilité de la culture replacée dans la rotation...).

Une autre dimension est à prendre en considération. Les modèles sont plus ou moins ajustés selon le type de culture. Ainsi s'il existe une certaine visibilité pour la valeur de la production des céréales et les oléagineux en fonction du pas de temps des rotations, ce n'est pas le cas pour les cultures spéciales. Il faudra intégrer l'efficacité économique des changements envisagés dans les paramètres agronomiques en commençant par la succession d'espèces qui composera la rotation, son incidence sur les bio-agresseurs associés et les interactions entre bioagresseurs. Des modèles de ce type sont actuellement proposés mais ils ne visent qu'un ensemble limité de bioagresseurs. Il reste à les évaluer sur une échelle plus large.

Ces modèles économiques ne sont pas nouveaux, ils existent depuis l'origine des modèles avec par exemple le modèle *Epitre* ou sa déclinaison française *Epicure* (Progetti et Benizri, 1990) qui intègrent le prix du grain pour la prise de décision avec des seuils ajustables en fonction des prix, pour partie fixés à l'avance ou sur les marchés à terme.

2. SURVEILLER

Après cette phase stratégique qui a déterminé la rotation d'espèces idéales dans un contexte agronomique donné en tenant compte du contexte économique, et qui a intégré les modèles biologiques de simulation du développement des bioagresseurs, il reste à confirmer que les prévisions des modèles correspondent à l'observation.

- *Détecter l'hétérogénéité dans la parcelle*

Dans des cas comme la septoriose ou le piétin verse du blé, si l'apparition des symptômes est conforme aux prévisions, la gestion directe des bioagresseurs peut s'affranchir de l'observation, en raison de temps d'incubation assez longs de ces pathologies. Les interventions contre ces maladies sont alors idéalement placées en suivant les recommandations des modèles. Il faudra cependant identifier qu'il n'existe pas d'hétérogénéité de la maladie au sein d'une parcelle qui justifierait des micro-ajustements localisés de l'utilisation des fongicides. De manière analogue, aujourd'hui, l'optimisation de l'utilisation des intrants passera par une segmentation de la parcelle en zones homogènes sur lesquelles seront appliqués les bons intrants au moment opportun.

La parcelle agricole n'est plus considérée comme une entité homogène mais comme une agrégation de zones aux besoins différenciés qui sont définis grâce à de nouveaux outils de surveillance désormais disponibles.

- *Des appareils de détection fine et de gestion ajustée*

Différents outils permettent aujourd'hui de caractériser ces hétérogénéités :

- la *photo satellite*, parfaitement opérationnelle pour la gestion de la fertilisation et la géolocalisation des maladies. Cette identification photographique fait encore appel actuellement à l'expertise de l'agriculteur ou du technicien mais les progrès accomplis en terme de reconnaissance d'images, tant pour les maladies que pour les adventices, laisse entrevoir dans moins de dix ans, une assistance à la reconnaissance qui limitera les risques d'erreur humaine.

Créé en 2002, *Farmstar* devenu *Farmstar Expert* en 2014 (<https://www.farmstar-conseil.fr/>), est focalisé sur les cultures de blé, colza et orge. Cette technologie développée par *Arvalis*, *Terres-Inovia* (ex *Cetiom*) et *Airbus Defence and Space*, intègre des outils de surveillance adaptés et pilotés par des outils informatiques en rapide évolution. Elle couvre actuellement 740000 ha. C'est un succès pour la gestion des apports d'azote et elle intervient maintenant dans la gestion des maladies.

- la *caméra embarquée* sur des tracteurs couplée à un système de géo-localisation et à un système de distribution du produit de traitement phytopharmaceutique, permet de ne pas appliquer sur toute la parcelle le même intrant ou de moduler sa dose, en forçant jusqu'à la valeur maximale autorisée là où c'est justifié pour ensuite alléger là où ça l'est moins. Le système à haute technicité, appelé ILS® (*Intelligent Localized Spray*) primé au CIMA 2011, en est l'exemple ([Regnault-Roger, 2014](#)).

- les *drones* sont sans doute les appareils qui paraissent à terme les plus porteurs de progrès. Souple et pouvant être géré individuellement, le drone permet à la fois de disposer d'une vue d'ensemble d'une parcelle mais aussi d'aller recueillir des images au plus près de la végétation, quasiment sans intervention humaine. Le pilotage des drones doit à terme devenir automatique en France comme c'est le cas aux Etats Unis d'Amérique.

Toutes ces technologies ne s'opposent pas mais sont complémentaires. L'agriculture à l'heure numérique devrait évoluer vers un pilotage de la surveillance globale ainsi que de la vérification de l'origine des hétérogénéités identifiées à 100 mètres par un vol plus rasant. Ces images viendront en appui de la prise de photos en altitude des plantes. Elles permettront de vérifier si les zones décolorées vues du ciel sont dues à un excès ou un manque d'eau, une mosaïque virale, une carence en manganèse ou une attaque de rouille jaune, ce que confirmera si nécessaire un déplacement de l'agriculteur sur la parcelle.

3. GERER

Une fois la prévision faite, la culture implantée, la surveillance réalisée et les maladies ou les ravageurs repérés ainsi qu'une éventuelle hétérogénéité dans leur distribution dans les parcelles, il reste le temps de la gestion directe lorsque la gestion en amont, celle permise par les méthodes culturales, s'est avérée insuffisante.

Pour optimiser l'efficacité de l'intervention, les modèles biologiques avec des modules simulant l'efficacité des fongicides vont rapidement devenir la règle. Des outils précurseurs avaient été proposés avec le modèle allemand *Proplant* ou français *Epicure* ([Progetti et Benizri, 1990](#)). Très en avance sur leur époque, ils n'avaient pas eu le succès escompté. Ces auteurs avaient d'ailleurs analysé la nature des différents freins et proposé des débuts de solutions pour que ces approches soient mieux acceptées par les techniciens du conseil phytosanitaire.

Ces concepts ont été repris avec des modèles biologiques plus solides ([Rouzet et al., 2005](#)). C'est dans ce sens qu'un premier travail avait été réalisé par les ingénieurs de la DGAL avec la mise au point d'une trentaine d'outils de prévision du risque sanitaire. Bien sûr ces « modèles » peuvent être encore affinés, mais surtout il faut les intégrer dans des systèmes de prise de décision plus larges de type *Epicure*. Sur un autre plan, les réseaux de stations météorologiques vont fortement s'étoffer et ceci dans un futur très proche. En effet, des stations de qualité professionnelle vont être mises sur le marché à des coûts très abordables. S'agissant de météorologie, les modèles ici aussi, en améliorant la prévision à 10, 15 jours, voire au-delà, rendront la décision plus sûre et capable d'anticiper le climat du futur proche.

4. ENCOURAGER L'INNOVATION

Nous assistons donc à une évolution rapide des outils, des matériels et aussi de la demande. La nouvelle génération d'agriculteurs maîtrise très bien toutes les nouvelles technologies de l'information. Les agriculteurs les plus novateurs sont à la recherche de nouvelles approches.

L'amélioration variétale et les nouvelles biotechnologies offrent un large champ pour obtenir des plantes génétiquement plus résistantes aux stress biotiques et abiotiques, avec des performances en termes de rendement et de qualités technologiques accrues. Ces nouvelles variétés, dans la course de l'évolution, ne pourront cependant pas être exemptes de fragilité.

Alors que de méthodes nouvelles pour la protection des cultures et de santé des plantes ont, à l'instar du biocontrôle, les performances aujourd'hui limitées, c'est bien grâce à l'agriculture de précision que l'agriculture durable, dans sa dimension agro-écologique, sera un succès. Cette agriculture se nourrit de différents OAD, couvrant tous les champs de la détection et l'identification des risques, de la prévision et de la modélisation.

Une réglementation adaptée constitue un facteur essentiel pour son développement. Ainsi aujourd'hui les drones étant assimilés à des aéronefs, il est exclu en France réglementairement de les utiliser pour l'épandage de produits phytopharmaceutiques de synthèse. Seuls actuellement peuvent être appliqués des macroorganismes autorisés, comme les trichogrammes par exemple, qui échappent à la réglementation qui s'imposent aux produits phytopharmaceutiques. Une réflexion avancée existe pour les moyens de biocontrôle les moins préoccupants qui pourraient voir, à terme, leur statut évoluer sur ce point, en raison de l'appui des pouvoirs publics et après que toutes les garanties aient été obtenues. Sans examiner plus avant la pertinence de ces choix, il n'en reste pas moins que les drones et les systèmes d'acquisition d'images embarqués sont des outils de gestion et d'économie des intrants en agriculture qui méritent également toute l'attention des décideurs publics.

CONCLUSION

Le monde est entré depuis la conférence de Rio en 1992 dans une ère où la prise de conscience, à la fois de la finitude des ressources naturelles et de la nécessité de réduire l'impact de l'activité humaine sur les milieux naturels, est partagée par l'ensemble des décideurs au plan mondial et d'une partie des populations des pays développés. La seule ressource non limitante est le soleil qui préside à la production de toutes les énergies renouvelables dont l'utilisation de la photosynthèse par les plantes, pour produire des hydrates de carbones, des huiles, des protéines, des fibres, des écomatériaux etc.

Avec l'agriculture, nous sommes au cœur de la production d'énergie renouvelable mais pour que cette dernière soit maximale avec le minimum d'impacts sur les milieux, une optimisation de la façon de produire, tout en recherchant la qualité maximale, est indispensable.

Cet objectif est désormais à notre portée grâce à une informatique performante et désormais portable et embarquée. Elle se traduit par divers Outils d'Aide à la Décision (OAD) qui permettent d'exploiter les données de la météo passée, celle de la météo prévue pour le futur proche, de mesurer les conséquences du climat sur un ensemble de stress biotiques et abiotiques. Les OAD actuels permettent de combiner des outils conduisant à des décisions stratégiques ou concernant la rotation et la mise en place des outils agronomiques mais aussi des décisions tactiques pour la réalisation des interventions phytosanitaires. La donnée biologique alimente désormais des modèles économiques qui tiennent compte de la valeur unitaire du produit pour plus de précision et une justification maximale de la décision d'intervention.

Les drones, outils nouveaux venus dans la panoplie des moyens, permettent enfin de mieux raisonner l'intervention. Ils vont permettre, en complément des prises de vue depuis l'espace, de ne plus considérer la parcelle comme une entité homogène devant recevoir à l'identique la même

quantité d'intrant, mais bien comme un agrégat de zones hétérogènes où il sera possible de réaliser des modulations dans des fourchettes raisonnables.

Ce sont ces outils qui permettront le déploiement de l'agro-écologie pour une production augmentée et des intrants maîtrisés si possible en baisse. On pourrait s'attendre à ce qu'en France les futurs Certificats d'Économie de Produits Phytopharmaceutiques dynamisent l'ensemble des OAD dans un futur très proche. L'agriculture numérique est déjà une réalité et s'impose comme un élément clé, incontournable, de l'agriculture de demain.

BIBLIOGRAPHIE :

- Delos M., 1995 - TOP - Modèle de prévision de l'évolution du piétin-verse *Phytoma* - *La Défense des Végétaux* n°474, 26-28
- Folcher L. , M. Jarry , A. Weissenberger , F. Gérault, N. Eychenne , M. Délos & C. Regnault-Roger 2009 Biocontrol of *Ostrinia nubilalis* (hübner) and *Sesamia nonagrioides* (Lefebvre) by Bt maize (*Zea mays* L.) in southwestern France: characterization of biological indicators by model-based approach for managing mycotoxin risk. IOBC/wprs Bull 45: 487-490
- Progetti F, Benizri E., 1990 - L'informatique dans l'aide à la décision à la parcelle: EPICURE— système d'optimisation des traitements fongicides du blé. EPPO Bulletin, 20: 367–372
- Regnault-Roger C., 2014 Produits de protection des plantes : innovation et sécurité pour l'agriculture durable, Editions Lavoisier, 318p
- Rouzet J., Delos M., Le Henaff G., 2005 - Modélisation et mise en œuvre de modèles dans le cadre du conseil phytosanitaire - . In Regnault-Roger C., Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement. Lavoisier Tec & Doc, Paris : 309-341
- Vitry C., Dauthieux F., Ducerf R., Orlando B., Leclerc A., Maumene C. , Valade R., 2015 - Développement d'une méthode de quantification moléculaire spécifique de *Claviceps purpurea* agent de l'ergot des céréales : application à l'étude de sa dispersion et à l'évaluation de sa toxicité 2012 - AFPP, Annales 11ème conférence internationale sur les maladies des plantes, Tours, France, 7 et 9 Décembre 2015, à paraître.