



itk

PREDICT AND DECIDE



Mission Intelligence Artificielle

28/11/2017

www.itk.fr

Sommaire

1	Les enjeux globaux de l'agriculture	4
1.1	Contexte général	4
1.2	Les enjeux spécifiques à la France	5
2	L'Intelligence Artificielle (IA) en agriculture	5
2.1	Périmètre de notre intervention	5
2.2	Les questions à résoudre	7
2.3	Les techniques de collecte de données en agriculture	8
2.3.1	Les logiciels de gestion parcellaire	8
2.3.2	Les stations météo et autres capteurs de mesure environnementale	8
2.3.3	Les capteurs embarqués sur le matériel agricole	8
2.3.4	La télédétection et la proxymétrie	9
2.3.5	Les capteurs autonomes connectés	9
2.4	L'analyse de données et l'IA en agriculture	10
2.4.1	Les problématiques du raisonnement des itinéraires culturaux	10
2.4.2	Les systèmes experts	11
2.4.3	Les modèles mécanistes de cultures	11
2.4.4	Les modèles statistiques	13
2.4.5	L'avenir probable : la fusion des approches mécanistes et statistiques	14
2.4.6	« Big Data » ou « Medium Data »?	14
3	Evolutions récentes de l'agriculture de précision : baisse tendancielle des coûts et émergence de l' « agri-intelligence »	16
3.1	Un marché de l'AgTech en pleine croissance et en mutation	16
3.2	L'émergence d'une nouvelle activité : l'agri-intelligence	18
3.3	Enjeux économiques et sociétaux	20
4	Conclusion : les conditions du succès de l'IA agricole en France	23

Résumé :

L'importance des enjeux de l'agriculture (sécurité alimentaire mondiale face à la croissance démographique et au changement climatique, prise en compte de ses impacts environnementaux) suscite un effort intense d'innovation sur le thème de l'agriculture ou de l'élevage de précision.

Ces innovations sont portées depuis une vingtaine d'années par l'intégration successive de nouvelles technologies apportant des informations nouvelles sur l'état des cultures et des troupeaux : capteurs embarqués sur le matériel agricole, télédétection, et maintenant développement de capteurs autonomes communicants, disséminés dans les cultures ou les troupeaux. Cet afflux de données nouvelles tend à déplacer la valeur ajoutée, initialement portée par le matériel, vers l'analyse des données, l'aide à la décision et le développement de modèles prédictifs. L'Intelligence Artificielle devient donc un enjeu essentiel de cette agriculture connectée.

Cette agriculture numérique suscite beaucoup d'espoirs pour répondre aux tensions entre productivité et préservation de l'environnement. Mais elle génère aussi des inquiétudes, quant aux risques de mainmise sur les données des agriculteurs français par les grands équipementiers mondialisés de l'agriculture, les groupes d'agrochimie-semences, ou les leaders mondiaux du Big Data comme Google ou IBM.

De ce point de vue, la France a des atouts forts : une recherche publique dynamique, et un tissu de start-ups et PME reconnu à l'international, mais aussi une faiblesse : l'absence de leaders mondiaux capables de stimuler la croissance et la structuration de ce secteur. Mais elle peut porter un modèle alternatif que l'on peut appeler l'agri-intelligence, par analogie avec la Business Intelligence, c'est-à-dire l'intégration et l'interprétation de l'ensemble des informations stratégiques que les nouvelles technologies apportent à l'agriculteur. Par opposition au pur « Big Data », souvent présenté comme la voie royale de l'innovation agricole, elle capitalise essentiellement sur la modélisation, dite mécaniste, associée à d'autres techniques d'Intelligence Artificielle (Algorithmes génétiques, Réseaux de Neurones Artificiels Systèmes-experts.) et sur le « Medium Data », des données du type de celles produites par les organismes de développement agricole. Contrairement au modèle centralisé et opaque initié par les grands équipementiers, l'agri-intelligence fonctionne sur un modèle d'innovation ouverte, avec des alliances entre prestataires de services agricoles mettant en commun leurs données pour tirer de la valeur ajoutée de leurs synergies, sous le contrôle de l'agriculteur. Basée sur du logiciel et des capteurs connectés, et non des équipements lourds, elle peut développer des services peu coûteux accessibles à tout type d'exploitation.

La réussite de cette innovation ouverte suppose deux pré-requis :

- Une réglementation assurant la libre circulation des données des agriculteurs, sous leur contrôle
- Une politique ambitieuse d'open-data, impliquant elle-même une clarification du statut et du rôle des Instituts Techniques Agricoles dans l'innovation agricole.

1 Les enjeux globaux de l'agriculture

1.1 Contexte général

Les progrès spectaculaires de l'agriculture au XIX^{ème} et XX^{ème} siècle ont été un des principaux moteurs de l'économie globale et de l'amélioration du niveau de vie global : l'augmentation de la production alimentaire a permis la disparition de la famine dans les pays développés, et réduit les risques de malnutrition dans les pays en voie de développement et moins avancés. De façon plus indirecte, l'augmentation de la productivité agricole (rapportée à la main d'œuvre) a permis de libérer des ressources humaines pour le développement de l'industrie et des services. Elle a également permis une baisse importante du coût relatif de l'alimentation dans les pays développés.

Tous les experts s'accordent pour dire que cet effort doit être poursuivi au XXI^{ème} :

- Même si la croissance démographique ralentit, elle devrait rester soutenue au moins jusqu'à la fin de ce siècle.
- Les besoins alimentaires sont également tirés vers le haut par l'augmentation globale du niveau de vie, qui entraîne une demande alimentaire accrue par habitant.
- Le changement climatique en cours aura très certainement des effets négatifs sur la productivité agricole au niveau global, en particulier dans les régions du monde où elle est déjà la plus fragile

mais en tenant compte d'éléments nouveaux :

- la croissance démographique se reporte maintenant essentiellement sur les pays les moins développés, où les recettes mises en œuvre pour l'agriculture des pays développés ont mal fonctionné jusqu'à présent
- les techniques actuelles de l'agriculture intensive (recours à des intrants chimiques comme les engrais de synthèse et les pesticides) entraînent des pollutions diffuses dans tous les milieux, y compris non agricoles. De plus, elles dégradent le bilan énergétique de l'agriculture
- les menaces générales sur la biodiversité limitent très fortement les possibilités d'extension des surfaces agricoles
- la course à la productivité s'est traduite par une concentration croissante des exploitations agricoles elles-mêmes, mais aussi de leurs fournisseurs (équipementiers et fabricants d'intrants). La concentration des exploitations a des impacts sociaux très forts et non désirés dans les pays concernés (désertification des campagnes, concentration urbaine excessive, voire paupérisation dans les pays où la croissance des secteurs secondaire et tertiaire ne permet pas d'absorber la main d'œuvre libérée par l'agriculture). Enfin, la concentration extrême de ces fournisseurs peut poser des problèmes d'indépendance nationale pour les pays producteurs qui, comme la France, n'ont pas ou plus de leader mondial dans ce secteur.

L'importance reconnue de ces enjeux a un effet très positif : l'agriculture est clairement identifiée comme un secteur économique stratégique, dont l'importance devrait encore s'affirmer pendant le siècle à venir. Elle attire donc des capitaux importants, en particulier pour stimuler l'innovation dans ce domaine. Depuis quelques années, ce mouvement attire

aussi de grands leaders mondiaux de l'innovation technologique non spécialisés dans l'agriculture, comme Google, IBM ou les grands opérateurs de télécommunication. Cet afflux de capitaux est une opportunité majeure, mais aussi un risque, s'il alimente la concentration des techniques les plus innovantes chez un petit nombre d'acteurs mondialisés.

1.2 Les enjeux spécifiques à la France

En tant que grande puissance agricole, la France est particulièrement concernée par ces enjeux, avec deux spécificités particulières :

- Elle est engagée au niveau national et européen dans une politique d'agro-écologie particulièrement ambitieuse, avec en particulier des objectifs forts de réduction d'emploi des intrants chimiques (engrais et pesticides), et localement des restrictions d'eau pour l'irrigation. Si elles sont appliquées sans discernement, ces restrictions peuvent entraîner des pertes de rendement, et donc de revenus, largement supérieures aux économies réalisées sur ces intrants. Il est donc nécessaire de développer des outils d'aide à la décision particulièrement sophistiqués, pour éviter de dégrader le revenu des agriculteurs.
- Comme nous l'avons déjà évoqué au paragraphe précédent, la France garde une position forte en tant que pays producteur agricole, mais elle n'a par contre aucun leader mondial dans le domaine de l'agro-équipement, ni dans celui de l'Intelligence Artificielle ou du Big Data. Il est donc nécessaire de trouver une voie d'innovation compétitive, qui permette l'émergence d'un leader mondial français, ou à tout le moins, qui reste accessible aux acteurs de taille moyenne qui composent actuellement l'essentiel du secteur en France.

2 L'Intelligence Artificielle (IA) en agriculture

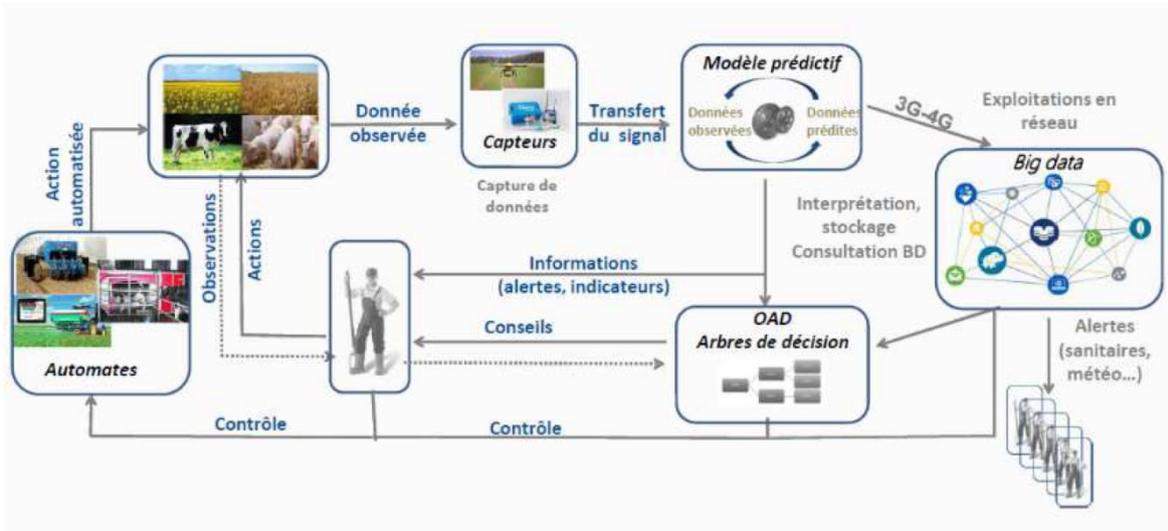
2.1 Périmètre de notre intervention

Deux rapports de l'OPECST ont déjà évoqué les questions relatives aux applications de l'IA à l'agriculture :

- LA PLACE DU TRAITEMENT MASSIF DES DONNÉES (BIG DATA) DANS L'AGRICULTURE : SITUATION ET PERSPECTIVES (2015)
- POUR UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE MAÎTRISÉE, UTILE ET DÉMYSTIFIÉE (2017)

Ces deux rapports ont déjà bien défini le cadre général des utilisations de l'IA et du Big Data en agriculture, ainsi que leurs domaines d'application potentiels. Nous nous baserons donc sur ce cadre pour définir les limites de notre intervention :

Les processus de traitement des données dans l'agriculture



Source : INRA

Fig. 1 : Processus de traitement des données dans l'agriculture (extrait du rapport OPECST « Pour une intelligence artificielle maîtrisée, utile et démystifiée »). Les technologies que nous évoquerons dans cette intervention concernent essentiellement la partie droite de ce graphe (de la capture de données à l'OAD).

Exemples d'utilisations des données dans l'agriculture



Source : INRA

Fig. 2 : Exemples d'utilisation des données dans l'agriculture (extrait du rapport OPECST « Pour une intelligence artificielle maîtrisée, utile et démystifiée »). Les technologies que nous évoquerons dans cette intervention concernent essentiellement la partie gauche de ce graphe (Suivi des rendements et de la qualité, localisation des traitements au champ), car c'est la partie qui présente le plus de spécificités scientifiques propres à l'agriculture (contrairement la régulation d'ambiance, proche des problématiques d'autres domaines industriels). C'est également le domaine où les verrous sur les données nous paraissent les plus préoccupants.

Tous les rapports sur l'Intelligence Artificielle insiste sur un pré-requis essentiel pour son développement : la disponibilité de données en quantité et qualité suffisante. C'est sur ce sujet que nous nous concentrerons, ce qui nous amènera à faire un tour d'horizon rapide des technologies générant des données d'intérêt pour l'IA agricole. **Cela nous amènera à étudier les acteurs maîtrisant ces technologies en France et dans le monde, et à identifier deux modèles possibles pour le développement de l'IA en agriculture, l'un très centralisateur et porté par les grands équipementiers et agrofournisseurs mondiaux, l'autre plus décentralisé et coopératif, et plus ouvert à des applications pour tous modèles d'exploitation agricole.**

2.2 Les questions à résoudre

L'agriculture agit par essence sur des systèmes vivants (plantes ou animaux) dont la physiologie repose sur des interactions complexes avec leur environnement physique (climat, partie inerte du sol) et biologique (parasite et pathogènes, espèces concurrentes). L'agronomie et la zootechnie se sont donc appuyées sur des recherches approfondies sur la physiologie et l'écologie des espèces végétales cultivées et du bétail. Ces recherches ont pris des directions assez différentes pour les filières animales et végétales :

- Comme les végétaux ont très peu de capacité de réaction face aux variations de leur environnement, leur développement est très fortement influencé par ces variations, et en particulier celles du climat. De plus, les plantes fournissent peu de signaux permettant d'estimer à un instant donné leur état physiologique. Par contre, la mesure de leur performance économique (rendement et qualité) est relativement facile à collecter et automatiser. Jusqu'aux années 1980, l'enjeu principal de l'agronomie était d'identifier les pratiques agricoles les plus adaptées à un contexte pédoclimatique moyen donné, afin de permettre une vulgarisation de ces pratiques. Cela ne requerrait que des méthodes assez simples d'analyse des données. Pour aller plus loin dans l'amélioration des pratiques agricoles, en particulier pour une meilleure gestion des intrants, il est ensuite devenu nécessaire de développer des modèles prédictifs pour mieux anticiper les variations de productivité induites par les variations climatiques intra et interannuelles, et adapter les pratiques de l'agriculteur en réponse à ces variations de productivité.
- Les animaux d'élevage sont pour la plupart des animaux à sang chaud, capables de réguler fortement leur physiologie en réaction aux variations de l'environnement, leur niveau de productivité est donc plus facilement prévisible que celui des végétaux. Les enjeux de l'IA ont donc d'abord porté surtout sur des questions d'automatisation :
 - o De la détection des problèmes de santé, par le suivi d'indicateurs simples (par exemple température corporelle) et l'analyse automatique du comportement.
 - o De l'automatisation de la mesure des performances (production de lait, poids de carcasses,...)

En conséquence, les techniques utilisées pour les productions animales dérivent souvent d'approches communes avec la médecine et l'analyse des performances sportives (pour le suivi quotidien de l'état des animaux), ou de techniques industrielles plus génériques (pour la mesure des performances laitières ou à l'abattage). Nous détaillerons surtout dans la suite les techniques utilisées en productions végétales, qui sont plus spécifiques au monde agricole.

2.3 Les techniques de collecte de données en agriculture

2.3.1 Les logiciels de gestion parcellaire

Ces logiciels sont en quelque sorte des ERP simplifiés et adaptés aux besoins des exploitations agricoles. Apparus dès la fin des années 80, ils permettent aux agriculteurs d'enregistrer les descriptifs de leur parcelle et des cultures qu'elles portent, ainsi que de toutes les interventions qu'ils réalisent. Croisés avec les données comptables, (qui peuvent être saisies dans un module complémentaire du logiciel), ils permettent théoriquement des analyses technico-économiques pour évaluer la rentabilité de leurs différentes productions. En pratique, le remplissage intégral des données nécessaires à ces calculs est rare. La plupart des utilisateurs se contentent d'y saisir les données requises pour les déclarations PAC (Politique Agricole Commune), c'est-à-dire les données sur l'implantation des parcelles (espèces et variétés semées, rendement potentiel attendu). Les informations sur les interventions réalisées en cours de culture sont la plupart du temps trop lacunaires pour être utilisées à des fins de conseil agronomique. De plus, ces logiciels ne se prêtent qu'à la saisie d'informations à l'échelle de la parcelle.

2.3.2 Les stations météo et autres capteurs de mesure environnementale

Très sensibilisés à l'importance de la météorologie pour leur métier, les agriculteurs s'équipent fréquemment de stations météo qui leur permettent de connaître précisément les conditions propres au micro-climat de leurs parcelles. En plus des capteurs classiques (thermomètre, pluviomètre, hygromètre, anémomètre), les stations météo destinées à l'agriculture peuvent intégrer des capteurs plus spécifiques à l'aide à la décision agricole (humectomètres), et des sondes destinées à mesurer l'état du sol (température, hygrométrie) en plus de celui l'atmosphère.

2.3.3 Les capteurs embarqués sur le matériel agricole

La réflexion sur l'agriculture raisonnée, qui prend en compte les variations interannuelles des besoins des cultures, a conduit à remettre en cause l'échelle classique de raisonnement, qui se faisait à l'échelle de la parcelle. En effet, les rendements moyens des parcelles masquent souvent des variations significatives en fonction des hétérogénéités du sol, en particulier dans les grandes exploitations d'Amérique du Nord et du Sud, ou d'Australie. C'est ce qui a conduit à l'émergence de l'agriculture de précision (une agriculture raisonnée à l'échelle intra-parcellaire) dans les années 90. Les grands équipementiers agricoles ont alors commencé à proposer des équipements spécifiques pour cette agriculture (moissonneuses-batteuses géolocalisées, équipées de capteurs de rendement fonctionnant en temps réel, et pulvérisateurs ou épandeurs capables de moduler en continu les doses de produit appliqué).

Ces équipements, disponibles dès la fin des années 90, ne se sont développés qu'assez progressivement pendant les années 2000, malgré la baisse rapide de leur coût. En effet, si les capteurs de rendement fournissent des cartes très précises, leur interprétation reste difficile, en l'absence de techniques permettant de cartographier avec la même précision les causes potentielles de variations de rendement (variations de la composition physique ou chimique du sol). **Il y a donc un fort déséquilibre entre la quantité d'information descriptive des cultures, et la densité d'information sur les facteurs explicatifs de leur potentiel de rendement (informations sur le sol et le climat).** En conséquence, il est

difficile de déduire rapidement des cartes de rendement des cartes d'application des engrais ou pesticides, qui pourraient ensuite être mises en œuvre par les pulvérisateurs ou épandeurs de précision. **Ce déséquilibre entre information descriptive et information explicative est encore à ce jour une limite majeure de l'IA pour l'agriculture.**

2.3.4 La télédétection et la proxédétection

L'agriculture est un des domaines qui a le plus bénéficié des avancées de l'imagerie satellitaires. En effet, la chlorophylle des cultures a une signature spectrale très caractéristique. Il est donc relativement facile d'estimer à partir d'images satellite la biomasse photosynthétiquement active d'une culture, ce qui permet dans une certaine mesure d'estimer son potentiel de rendement. Comme les capteurs de rendement, les images satellite permettent d'obtenir une cartographie du potentiel de rendement des parcelles, avec une précision moindre, mais avec l'avantage important d'une prise en compte de l'effet du climat de l'année en cours. Par contre, elle reste elle aussi très pauvre en matière d'interprétation des causes de ces variations de rendement (ou de biomasse en l'occurrence). **L'arrivée de la télédétection a donc renforcé la quantité d'information descriptive, mais sans fournir d'éléments explicatifs nouveaux.**

Avec la baisse régulière du coût de leurs images, les satellites restent à l'heure actuelle la source la moins coûteuse pour des images de télédétection utilisables à grande échelle en agriculture. Ils présentent toutefois l'inconvénient d'être tributaires des conditions météorologiques (les longueurs d'onde actuellement exploitées en télédétection sont arrêtées par les nuages). De nombreux supports alternatifs peuvent être utilisés : avion, ULM, drone. Plus compliqués à gérer à grande échelle, ces vecteurs ont par contre l'avantage d'opérer sous les nuages, et donc de permettre une couverture plus régulière que celle des satellites. Des capteurs embarqués sur les tracteurs ont été lancés (par exemple le N-Sensor de Yara, pour une fertilisation azotée de précision), mais leur développement reste limité en raison de leur coût élevé, par rapport à leur usage à l'échelle d'une seule exploitation.

2.3.5 Les capteurs autonomes connectés

C'est la vague la plus récente d'innovation atteignant l'agriculture : la banalisation des technologies de l'Internet des Objets (IoT), et la baisse de leurs coûts, va permettre un afflux de données nouvelles sur le suivi des parcelles agricoles. Pour les capteurs environnementaux classiques (ceux qui sont actuellement gérés par les stations météo), c'est déjà un progrès considérable, car la baisse des coûts des capteurs permettra une multiplication considérable de leur dissémination sur le terrain. **Cette dissémination permettra enfin de réduire le déficit d'information explicative sur l'état des cultures, avec un maillage plus fin des données météorologiques et de sol, voire des capteurs mesurant directement l'état physiologique de la plante** (capteurs de flux de sève, dendromètres mesurant les variations fines de volume des rameaux ou des fruits, afin de suivre la croissance et l'état hydrique de la culture).

2.4 L'analyse de données et l'IA en agriculture

2.4.1 Les problématiques du raisonnement des itinéraires culturaux

Les besoins d'une culture en eau et en fertilisants, que l'agriculteur doit satisfaire pour assurer sa productivité, varient de façon complexe en fonction du sol où pousse la culture, et du climat auquel elle est exposée. **Ces besoins sont liés par des interactions complexes, dues à leur interdépendance et à la notion de facteur limitant.** Par exemple, si une culture souffre d'un déficit hydrique, sa photosynthèse va être bloquée, ce qui va réduire ses besoins en azote et autres éléments nécessaires pour sa croissance. Le facteur limitant va alors être l'eau. Si l'agriculteur lève ce facteur limitant en irriguant, la photosynthèse peut être relancée, ce qui va faire remonter les besoins en azote de la culture. Si on n'a pas réajusté la fertilisation en conséquence, c'est l'azote qui risque de devenir à son tour le facteur limitant... et du coup de perturber la valorisation de l'apport d'eau. Ces interdépendances ont donné naissance aux notions d'itinéraire cultural, d'effet précédent, d'effet suivant, et de système de culture, c'est-à-dire de séquences d'intervention sur la culture et d'organisation de la sol cultivée dans l'espace et le temps, dont les cohérences doivent être assurées pour préserver les potentiels de production.

Une autre difficulté du raisonnement des interventions en agriculture est qu'il implique toujours une dimension prédictive forte :

- le raisonnement de l'irrigation doit prendre en compte les prévisions météorologiques, pour éviter une irrigation non urgente qui serait rendue inutile par des pluies à venir dans les prochains jours
- sauf dans les cas particuliers de fertirrigation (engrais appliqués en mélange avec l'eau d'irrigation), les fertilisants ne sont appliqués qu'en un petit nombre d'applications par an (typiquement 3 pour le blé), qui devront couvrir ses besoins tout au long de son cycle. Il ne suffit donc pas de connaître les besoins de la culture à l'instant t, il faut être capable de prévoir quels vont être ses besoins jusqu'à la fin de son cycle. Cela alors que ces besoins sont dépendants du niveau de rendement qu'elle va obtenir, rendement qui peut varier considérablement en fonction du climat de l'année. Il est donc nécessaire d'ajuster par des modèles prévisionnels le rendement potentiel que l'on peut attendre en cours de campagne, en fonction des événements climatiques de l'année
- enfin, pour la protection phytosanitaire, les plupart des pesticides ont un mode d'action essentiellement préventif. Il est donc nécessaire de prévoir à l'avance la survenue des ravageurs ou des pathogènes, pour appliquer les traitements avant l'apparition de symptômes.

Ces particularités des itinéraires culturaux (complexité des interactions et nécessité d'un raisonnement prévisionnel) ont incité très tôt les agronomes à s'intéresser au potentiel de l'IA pour faciliter le travail des conseillers agricoles et des agriculteurs. Elles ont également fortement structuré les choix techniques retenus, et en particulier l'importance des modèles mécanistes de cultures (process-based models).

2.4.2 Les systèmes experts

L'application de systèmes experts à l'agriculture a été explorée dès les années 90, afin de formaliser les règles de raisonnement des conseillers agricoles. Cette approche a connu un certain succès pour l'automatisation de l'exécution des interventions mécaniques consécutives à la prise de décisions agronomiques simples : c'est le cas par exemple pour le pilotage automatique des serres, où beaucoup d'interventions (irrigation avec ou sans fertilisation associée) sont décidées en temps réel, en fonction de données instantanées fournies par des capteurs.

Par contre, les systèmes experts ont connu peu de développement pour l'aide à la préconisation agronomique au champ. Cela tient à leur approche, basée sur la formalisation des savoirs des meilleurs experts d'un domaine. Par nature, elle ne permet pas de progresser sensiblement sur les sujets dont la complexité dépasse la capacité de raisonnement du cerveau humain, même pour un expert. Or c'est le cas pour la gestion des interactions entre les différentes interventions potentielles d'un agriculteur sur l'itinéraire cultural, de même que pour les calculs hautement récurrents que suppose la prise de décision prévisionnelle. Pour ces sujets, les chercheurs se sont plutôt orientés vers une technique qui a pris une importance toute particulière en particulier en agronomie : la modélisation mécaniste (ou process-based models). Ce n'est qu'en interaction avec un modèle mécaniste de simulation que les systèmes experts à base de règles peuvent présenter un intérêt réel en terme d'aide à la décision.

2.4.3 Les modèles mécanistes de cultures

Les modèles mécanistes de culture (process-based crop models) sont des algorithmes qui simulent de façon dynamique (en général à un pas de temps journalier) le développement d'une culture, de son semis à sa récolte, en fonction de son environnement.

Les variables d'entrées de ces modèles sont des données climatiques (au minimum température, pluviométrie, rayonnement solaire global, vitesse du vent), des données sur le sol (profondeur accessible aux racines, granulométrie,...), et sur la culture (espèce et variété semée, date de semis, densité de peuplement...). A partir de ces données, le modèle calcule pour chaque jour la phénologie de la culture (son stade de développement). Il en déduit sa surface foliaire, et donc l'énergie solaire que la plante est capable de capter pour la photosynthèse. Cela permet alors de déterminer la quantité de biomasse potentielle que cette photosynthèse permet de produire chaque jour, si la plante est parfaitement alimentée en eau et autres nutriments, et la quantité d'eau et autres nutriments nécessaires pour que cette photosynthèse se produise effectivement. Si le modèle plante est couplé à un modèle sol avec bilan hydrique et azoté, il sera possible de savoir si les quantités requises pour une photosynthèse optimale sont bien disponibles pour la plante, et, dans le cas contraire, quelle quantité devrait être apportée par l'agriculteur. Il est également possible de développer des modèles mécanistes pour les principaux ravageurs et maladies des cultures, pour prédire les dates de contamination, puis d'apparition des symptômes.

Ce type de modèle repose sur des travaux scientifiques d'écophysiologie des plantes, qui ont étudié de façon réductionniste l'effet des variables climatiques et des déficits en nutriment sur la croissance des plantes en condition contrôlée. Il n'est donc possible d'en réaliser que sur les espèces cultivées les plus importantes, qui ont fait l'objet de gros efforts de recherche. Il s'agit de plus de modèles complexes, dont le coût de développement initial est très important (typiquement une ou quelques dizaines d'années*hommes). Par contre, ils

présentent des avantages décisifs pour une utilisation à grande échelle dans le cadre de l'agriculture de précision :

- Comme ils s'appuient sur une connaissance approfondie de la physiologie de la culture, ils sont généralement très robustes et facilement transposables d'un pays à l'autre, voire d'un continent à l'autre, sans transformation majeure
- Pour les mêmes raisons, ils permettent de simuler de façon assez réaliste le comportement potentiel de la culture dans une situation à laquelle elle n'a encore jamais été confrontée (par exemple dans le cadre d'itinéraires techniques innovants, ou dans des scénarios de changement climatique). Cela tient au fait que ces modèles s'appuient sur des travaux d'écophysiologie où l'effet des variables climatiques a été testé en conditions contrôlées, dans une gamme de variation plus large que celle des conditions culturelles habituelles.
- En plus des principales variables d'intérêt de la culture (rendement et indicateurs de qualité, besoins pour les principaux nutriments...), le modèle calcule une large gamme de variables intermédiaires descriptives de la culture et du sol de la parcelle, qui peuvent être comparées aux observations de l'agriculteur, ou à des mesures de capteurs ou d'imagerie. Par exemple, un modèle mécaniste calcule la quantité de biomasse aérienne au m² présente chaque jour sur une parcelle. Cette biomasse peut également être estimée à partir d'une image satellite. En croisant ces deux données, on peut alors avoir une vision plus globale de la parcelle, qui combine la spatialité apportée par l'image satellite, et la prédictivité apportée par le modèle.

Les modèles mécanistes ont été initialement conçus pour la recherche publique, pour des travaux de recherche fondamentale sur la physiologie des plantes. Ils ne sont pas applicables directement pour le conseil agronomique sur le terrain. En effet, les chercheurs recherchent une très grande précision pour les résultats de leur modèle, et peuvent mettre des ressources considérables sur l'acquisition de données d'entrée très précises. Pour avoir des résultats comparables sur le long terme, ils travaillent généralement sur des variétés de référence, bien connues des chercheurs, mais qui ne sont parfois plus commercialisées, ou marginales sur le marché. Pour être utilisables sur le terrain, des modèles doivent au contraire pouvoir donner des résultats satisfaisants avec des données d'entrée beaucoup plus pauvres, celles qu'un agriculteur est capable de fournir en routine. De plus, ils doivent pouvoir fonctionner sur toutes les variétés du marché (à titre d'exemple, il y a en moyenne 50 variétés de blé commercialisées de façon significative en France, et plus d'une centaine de variétés de maïs). Le développement de modèles mécanistes utilisables sur le terrain requiert donc des compétences bien spécifiques (c'est le cœur de métier d'iTK) et doit s'appuyer sur des données de terrain différentes de celles dont disposent les laboratoires de recherche publics. Ce sont plutôt les réseaux expérimentaux des organismes de développement (chambres d'agriculture, instituts techniques) qui peuvent jouer ce rôle.

La modélisation mécaniste n'est pas forcément perçue comme une technique d'IA dans son acceptation la plus courante. Elle peut toutefois lui être assimilée, dans la mesure où, par rapport au raisonnement humain, elle permet d'améliorer par un calcul automatisé la précision d'analyses prévisionnelles reposant sur l'expertise accumulée sur les cultures. De plus, elle fait appel à des techniques d'optimisation très classiques en IA, telles que les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones artificiels. En effet, les modèles mécanistes comprennent un grand nombre de paramètres, dont la valeur exacte doit être optimisée pendant leur calibration, pour minimiser l'écart entre les résultats du modèle et les jeux de données réelles qui servent à sa validation. Un modèle mécaniste de culture comprenant couramment une centaine de paramètres, cette optimisation ne peut être accomplie par un opérateur humain, le recours à des méthodes algorithmiques telles que les

algorithmes génétiques sont nécessaires. Ou alors, dans leur mise en œuvre, la construction de scénarii sur la base d'une organisation spatiale optimisée sera permise grâce à des approches d'apprentissage automatique non supervisées comme les cartes auto adaptatives de Kohonen. Enfin, comme indiqué plus haut, l'intégration de systèmes-experts avec un modèle de simulation permet de générer des jeux de solutions optimales répondant à la fois aux attentes des agriculteurs et pouvant être mis en œuvre car compréhensibles et explicites.

2.4.4 Les modèles statistiques

Les modèles statistiques utilisés en agriculture sont des modèles dans lesquels une variable d'intérêt (par exemple le rendement) est prédite à partir d'une relation statistique avec ses variables explicatives (par exemple date de semis, cumuls de température et de pluviométrie, réserve utile du sol, ...). Pour ce type de modèles, il n'y a pas besoin de connaissances agronomiques ou écophysiologiques sur la culture concernée, il suffit de jeu de données suffisamment importants. La précision et la robustesse du modèle dépendra à la fois de la quantité de données disponibles, mais aussi de leur variabilité : un modèle statistique établi sur un jeu de données abondant, mais dans une région restreinte, pourra donner d'excellents résultats dans cette région, mais donner de très mauvais résultats ailleurs. Il en est de même pour un modèle mis au point sur un petit nombre d'années de références, qui risquera d'être complètement inadapté à une année climatique atypique. Cette technique est donc très complémentaire de la modélisation mécaniste, car leurs avantages et inconvénients respectifs sont très symétriques :

- La modélisation statistique peut être appliquée à des cultures peu connues scientifiquement, ou à des variables peu étudiées.
- Elle ne nécessite pas de connaissances agronomiques approfondies, et elle est relativement simple à mettre en œuvre, une fois que l'on a pu rassembler les données nécessaires
- Par contre, elle n'est pas transposable sans précaution à des régions nouvelles, ou des itinéraires techniques nouveaux. Chaque extension d'un modèle statistique à un nouveau contexte demandera presque autant de travail que sa conception initiale, contrairement au cas de la modélisation mécaniste
- Pour les mêmes raisons, elle ne se prête pas à des simulations prospectives (prévision des performances de la culture dans des itinéraires techniques innovants, ou face au changement climatique)
- Pour l'agriculteur ou le conseiller agricole, un modèle statistique est une « boîte noire », qui ne lui fournit aucun résultat intermédiaire qu'il puisse confronter à ses observations ou son expérience
- Ce type de modèle ne se prête pas à l'intégration de données externes comme des mesures de capteurs ou des images satellite, pour corriger la trajectoire de la prévision de rendement par exemple.

Pour toutes ces raisons, la modélisation statistique a été beaucoup moins utilisée jusqu'à présent dans le conseil agricole que la modélisation mécaniste. Elle connaît toutefois un regain fort d'intérêt depuis quelques années, dans le cadre plus général des espoirs mis dans les technologies associées au « Big Data » (machine learning, deep learning). En effet, l'afflux des nouvelles données générées par les nouveaux matériels d'agriculture de précision et les capteurs autonomes connectés laisse penser que l'agriculture est en train d'atteindre une « masse critique » de données suffisantes pour que ces nouvelles techniques d'analyse et interprétation des données fassent sauter les verrous anciens de la

modélisation statistique. C'est en particulier cet espoir qui explique l'intérêt nouveau d'acteurs généralistes du Big Data (Google, IBM,...) pour ce secteur éloigné de leur domaines d'activité habituels.

2.4.5 L'avenir probable : la fusion des approches mécanistes et statistiques

L'opposition des méthodes mécanistes et statistiques n'est pas aussi absolue que peut le laisser croire leur description rapide. En fait, les modèles utilisés en pratique combinent toujours plus ou moins ces deux approches, selon le niveau de détail auquel on les regarde :

- La première étape d'un modèle mécaniste est en général le calcul du stade phénologique de la culture, qui est en fait réalisé par un calcul reliant la croissance de la plante à des cumuls de température et éventuellement d'autres variables climatiques : il s'agit donc d'un sous-modèle statistique et empirique, intégré dans une architecture mécaniste.
- A l'inverse, les modèles statistiques ne fonctionnent généralement pas avec des variables environnementales brutes, indépendantes de toute réflexion agronomique. Ils utilisent le plus souvent des indicateurs assez élaborés, qui intègrent implicitement des connaissances d'écophysiologie. Pour revenir à l'exemple des calculs phénologiques, les cumuls de température réalisés prennent en compte des seuils de température maximales et minimales, qui découlent d'études de recherche d'écophysiologie. Les indicateurs de température retenus dans ces modèles statistiques intègrent donc des connaissances mécanistes sur l'effet des températures sur la croissance.

L'avenir de la modélisation en agriculture reposera donc sans doute sur la capacité à moduler au mieux l'équilibre entre ces deux techniques, en fonction de la quantité et de la qualité des données disponibles sur le problème agronomique étudié.

2.4.6 « Big Data » ou « Medium Data » ?

L'engouement actuel pour « l'Agriculture numérique » repose largement sur l'idée que l'agronomie va connaître une rupture technologique liée aux objets connectés, dont l'afflux de données la ferait entrer dans l'ère des données massives. Ce sont ces espoirs qui justifient d'ailleurs l'irruption d'acteurs non agricoles du Big Data, convaincus que leur maîtrise de l'apprentissage automatique (Machine Learning, Deep learning) permettra des avancées nouvelles, en substituant l'analyse automatique de données massives à l'expertise humaine basée sur des données plus limitées, qui prédominait jusqu'à présent.

Il faut toutefois noter que des quantités massives de données sont déjà disponibles depuis une quinzaine d'années sur le suivi des performances des parcelles (cartes de rendement), ou des troupeaux (robots de traite), et n'ont pas permis à elles seules de progrès majeurs, à cause du déficit de données explicatives de ces performances, comme nous l'avons vu aux paragraphes précédents. Les capteurs connectés devraient à l'avenir combler ce déficit de données explicatives. Mais nous avons vu qu'ils ne peuvent être vraiment valorisés que dans des modèles mécanistes, qui font le lien entre toutes les étapes du métabolisme de la plante, et donc entre les observations intermédiaires de ces capteurs et le rendement final de la culture. Or, pour leur mise au point, ces modèles mécanistes ont des exigences en données très différentes des modèles statistiques :

- Pour être robustes, les modèles statistiques doivent être élaborés sur un grand nombre de données, dont la précision individuelle peut être médiocre. Pour mettre au point un modèle statistique pour une culture à l'échelle d'un pays, on peut considérer qu'il faut plusieurs milliers, voire plusieurs dizaines de milliers de parcelles de référence
- Les modèles mécanistes nécessitent de données de référence d'excellente qualité, sur des parcelles dont le choix a été déterminé à l'avance pour offrir un échantillon représentatif de situations agronomiques. Ces parcelles doivent être l'objet de mesures détaillées, qui vont largement au-delà des observations habituelles sur une parcelle de production, même chez un agriculteur très technique. Par contre, on peut se contenter d'un nombre beaucoup plus faible de sites (de l'ordre de quelques centaines)

Plutôt que de « Big Data », c'est-à-dire de données massives, dont la quantité peut suppléer à la qualité, la modélisation mécaniste a donc besoin plutôt de « Medium Data » : des données en quantité plus modestes, mais d'excellente qualité, et acquises de façon cohérente et coordonnée.

Comme nous avons vu que l'avenir sera sans doute à la combinaison de modèles mécanistes et statistiques, le facteur limitant risque donc d'être plus dans ces « Medium Data » que dans le Big Data : le succès viendra plus de la capacité à animer l'acquisition ordonnée de données de qualité, que dans l'accumulation incontrôlée de données redondantes et/ou incohérentes.

3 Evolutions récentes de l'agriculture de précision : baisse tendancielle des coûts et émergence de l' « agri-intelligence »

3.1 Un marché de l'AgTech en pleine croissance et en mutation

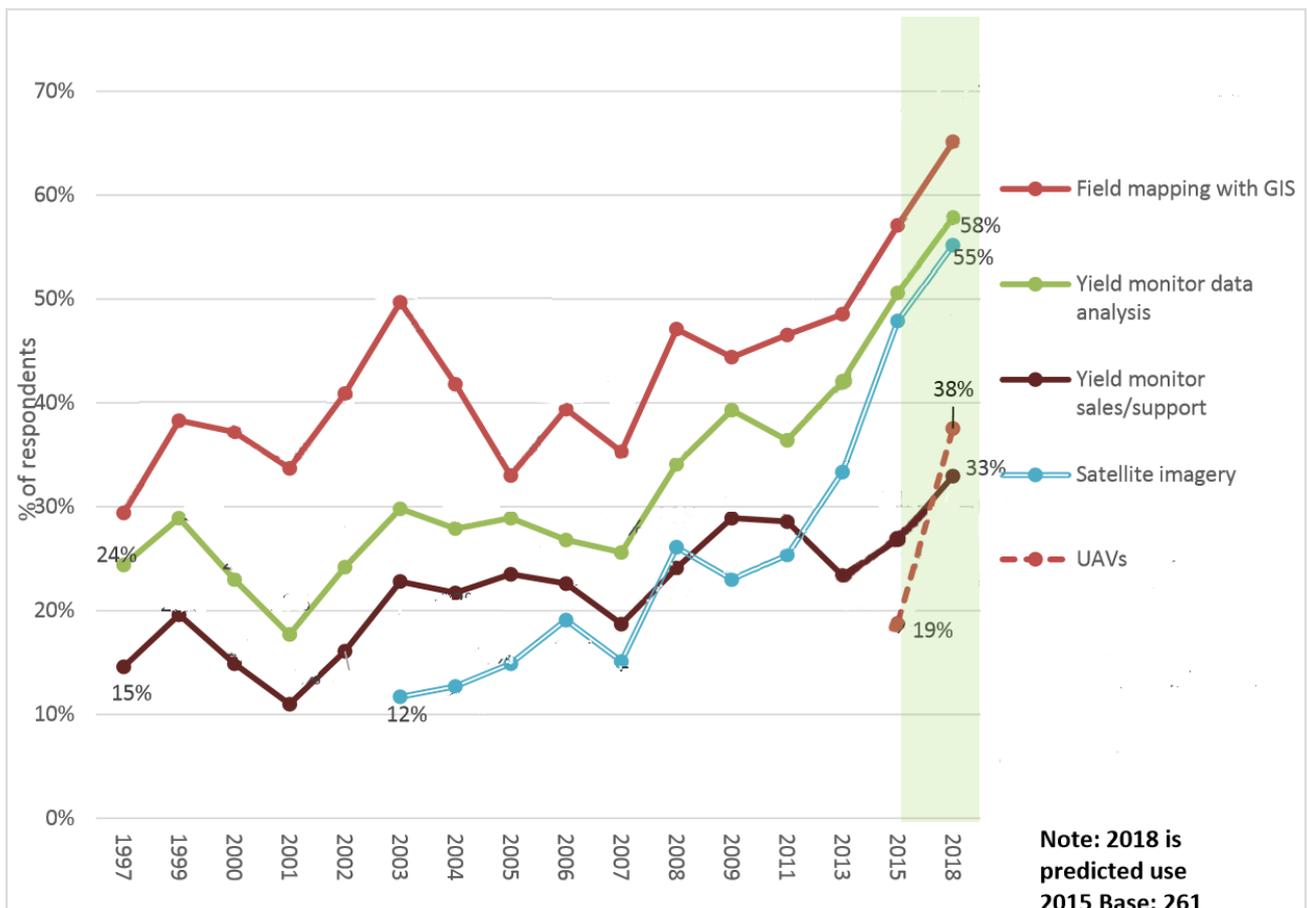


Fig. 3 : Evolution de l'offre en agriculture de précision aux USA depuis 1997 (D'après rapport Croplife 2015 de l'Université de Perdue). On voit que la demande de capteurs de rendement (courbe brun sombre) tend à stagner, alors que la demande en analyse des données de ces capteurs (courbe verte) s'envole, portée par la demande en imagerie de télédétection (satellites en bleu, drones en tirets bruns). En effet, c'est surtout la combinaison avec des données de télédétection ou une cartographie des sols (courbe du haut) qui donne de la valeur ajoutée aux cartes de rendement.

Face aux enjeux actuels de productivité agricole et du respect de l'environnement, le marché de l'agriculture de précision est en plein essor (fig. 3). Cette croissance a longtemps été alimentée par le développement de nouveaux équipements lourds d'acquisition de données (capteurs de rendement sur les moissonneuses-batteuses, robots de traite pour l'élevage, satellites pour la télédétection, ...). Plus récemment, sont apparus des capteurs connectés autonomes (pluviomètres et autres capteurs météo, sondes de sol connectées, ...).

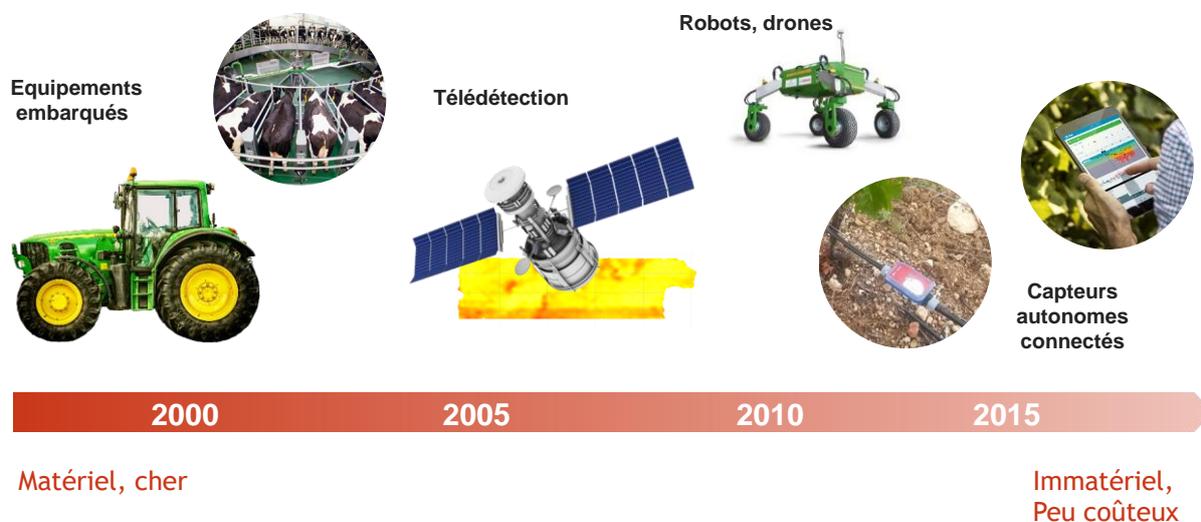


Fig. 4 : Chronologie d'apparition des techniques de l'agriculture de précision. On observe un double mouvement, de l'innovation matérielle vers l'immatériel (des capteurs embarqués au Big Data), et d'équipement coûteux (plusieurs dizaines de milliers d'euros) à des services beaucoup moins coûteux (quelques centaines d'euros/exploitation/an)

Les agriculteurs peuvent ainsi accumuler de plus en plus de données sur leurs parcelles ou leur cheptel. La valeur ajoutée se déplace donc maintenant vers les techniques leur permettant de valoriser au mieux ces données, pour en faire une synthèse indispensable afin de prendre les décisions les plus pertinentes pour leurs interventions au champ. Une des étapes les plus spectaculaires de cette évolution a été le rachat de Climate Corp. par Monsanto, pour près d'un milliard de dollars en 2013. On peut même se demander s'il n'y a pas maintenant une bulle spéculative sur ce secteur : plusieurs start-ups ont été rachetées récemment par de gros industriels (Granular par DuPont, Blue River par John Deere) pour plusieurs centaines de millions de dollars, des chiffres très au-delà du chiffre d'affaires des services qu'elles génèrent actuellement.

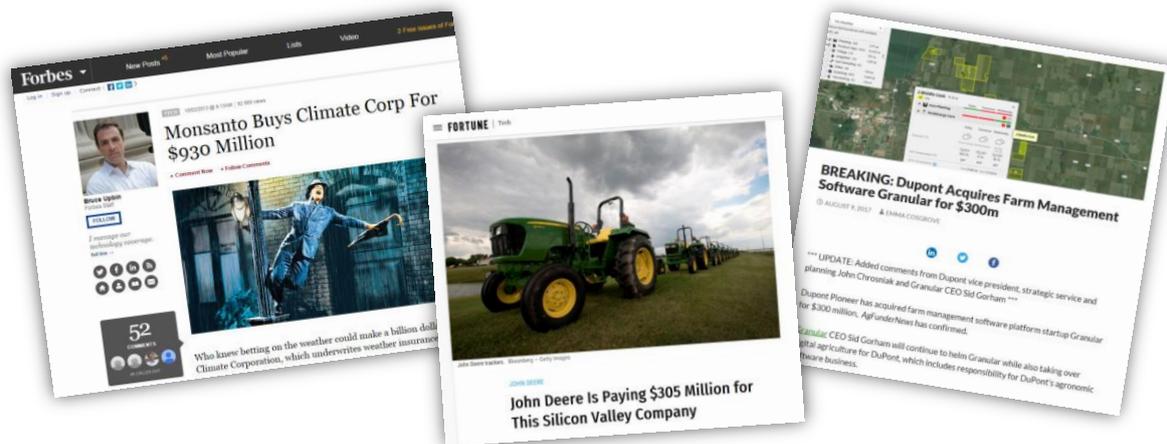


Fig. 5 : Trois exemples marquants d'acquisitions de start-ups de l'agriculture numérique. Le rachat de Blue River par John Deere répond à une logique industrielle classique (internalisation d'une technologie –clé destinée à être embarquée sur le matériel du constructeur). De leur côté, les géants de l'agrofourmiture ou du Big Data se concentrent plutôt sur l'acquisition de données chez les agriculteurs (Achat de Granular par Du Pont, investissement de Google Ventures dans Farm Business Network), ou sur l'agri-intelligence (Rachat de Climate Corp. par Monsanto)

3.2 L'émergence d'une nouvelle activité : l'agri-intelligence

Il est donc probable que ce secteur de l'Agtech va progressivement se structurer autour de deux pôles :

- **les équipements agricoles avec de l'intelligence embarquée**, qui restent dans une économie industrielle classique (tracteurs, robots de traite, robots mobiles au champ, drones). C'est dans cette mouvance que s'inscrit le rachat récent de Blue River (start-up travaillant sur l'intelligence artificielle) par John Deere. En effet, la technologie-phare développée par Blue River, l'identification automatique des mauvaises herbes, n'a de valeur que si elle est embarquée sur le matériel qui va exécuter le traitement herbicide.
- **l'agri-intelligence** (par analogie avec la business intelligence), c'est-à-dire les outils permettant d'agréger toutes les informations stratégiques utiles à l'exploitation pour leur donner, après interprétation, de la valeur ajoutée. Il s'agit d'un secteur essentiellement immatériel (Intelligence artificielle, Big Data, modélisation), mais il est clair que la production d'objets connectés a vocation à s'en rapprocher rapidement. En effet, le développement vertigineux de l'Internet des Objets va entraîner rapidement une banalisation de ces techniques, et leur valeur ajoutée va vite se concentrer sur l'intelligence dans le traitement des données qu'ils produisent.

C'est sur ce secteur de l'agri-intelligence qu'iTK se positionne, pour apporter une nouvelle vision à l'agriculteur lui permettant de voir son exploitation dans sa globalité pour contrôler les besoins des cultures et les anticiper. La modélisation des cultures est au cœur de cette agri-intelligence car c'est elle qui permet la synthèse de toutes les informations recueillies au champ.

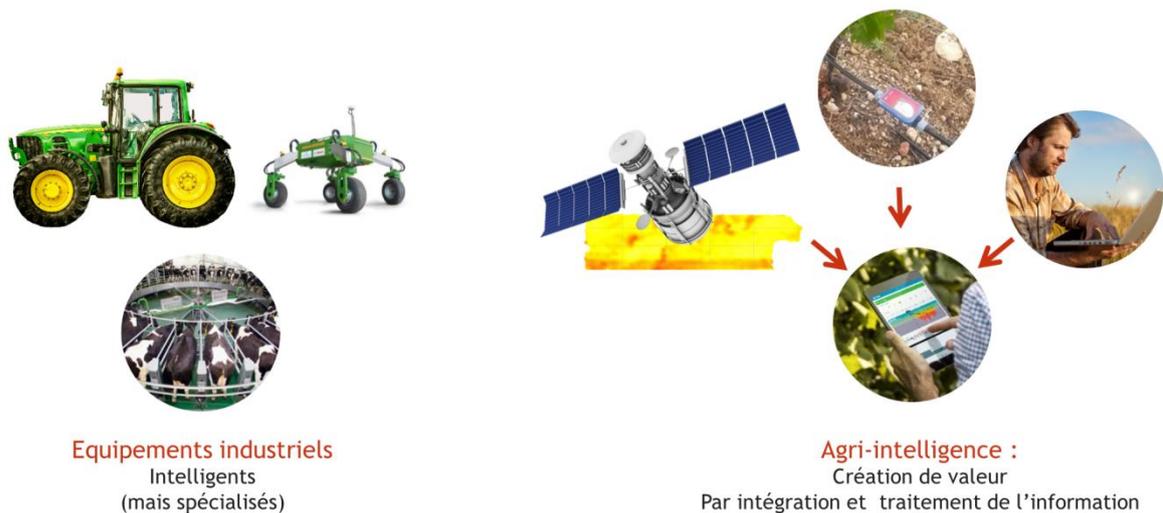


Fig. 6 : Il est probable que la structuration de la nébuleuse de l'agriculture va se concentrer autour de deux pôles :

- les équipements « lourds » intelligents, développés par les grands leaders du machinisme, qui embarqueront de plus en plus de capteurs et d'IA associée
- l' « agri-intelligence », c'est-à-dire l'équivalent agricole de la business intelligence : l'intégration de l'ensemble des données stratégiques et tactiques pour l'exploitation, et la production de valeur ajoutée par les synergies entre ces données

Pour donner des exemples de synergies créées par l'intégration de données :



En Grandes Cultures :

- la télédétection permet de détecter des anomalies dans la croissance d'une culture (biomasse plus faible dans les zones rouges de l'image, sur cet exemple). Mais elle ne permet pas d'estimer son effet potentiel sur le rendement, ni sa cause, et donc l'action que l'agriculteur doit entreprendre
- le croisement de cette information avec les données de capteurs connectés (sondes de mesure de l'humidité du sol, ou de teneurs en nitrates) permettra d'identifier la cause du

problème, mais pas de quantifier la quantité d'eau ou d'azote à apporter pour résoudre le problème

- seule l'assimilation de toutes ces données dans un modèle de culture mécaniste permettra :
 - d'évaluer la perte de rendement potentielle de la culture dans son état actuel
 - de calculer la quantité d'intrant (eau ou azote) agronomiquement nécessaire pour corriger le déficit
 - de prendre une décision optimale en tenant compte des critères économiques (le coût de l'intervention doit être inférieur au bénéfice obtenu) et environnementaux (vérification de la conformité à la réglementation et aux certifications agri-environnementales de l'agriculteur)

En élevage :

- les capteurs connectés porté par l'animal (accéléromètres, thermomètres, etc.) fournissent en continu des indicateurs simples sur la santé animale (température ruminale par exemple), et des analyses du comportement qui permettent d'identifier des évènements ponctuels (chaleurs, vêlage), ou estimer les durées d'alimentation ou de boisson. Mais ces informations ne sont pas reliées aux performances de l'animal, et restent pauvres en interprétation diagnostique sur la santé de l'animal
- Le croisement de ces données avec les carnets de suivi sanitaire et les analyses de taux de cellules dans le lait permettra de détecter les signaux précurseurs des pathologies les plus importantes, et probablement une détection plus précoce des maladies et une réduction de l'emploi des antibiotiques
- Les croisements de ces données avec le suivi des performances (contrôle laitier traditionnel ou enregistrement automatique sur les robots de traite) et les quantités d'aliments ingérés permettra de détecter les changements de comportement ou d'état de santé précurseurs d'une perte de performance (qu'il s'agisse de la production de l'animal, ou de l'efficacité de son alimentation, et d'y remédier plus rapidement.
- Enfin, le recoupement de toutes ces informations avec les fichiers généalogiques des troupeaux vont ouvrir de nouvelles voies à l'amélioration génétique, permettant par exemple de quantifier objectivement la résilience des animaux face aux variations de l'environnement et aux pathologies, et d'en faire un nouveau critère de sélection génétique.

3.3 Enjeux économiques et sociétaux

Malgré tous ses avantages potentiels, l'agriculture connectée suscite des inquiétudes, à cause du risque de mainmise des grands acteurs du Big Data agricole sur les données des agriculteurs. Ce risque existe sans doute, mais il paraît pourtant moins grand que pour les données des consommateurs captées par les fameux GAFAs (Google, Amazon, Facebook, Apple). En effet, la prise de décision en agriculture suppose la confrontation de données d'origines très variées, qu'aucun équipementier ne sera capable de fournir seul à l'agriculteur :

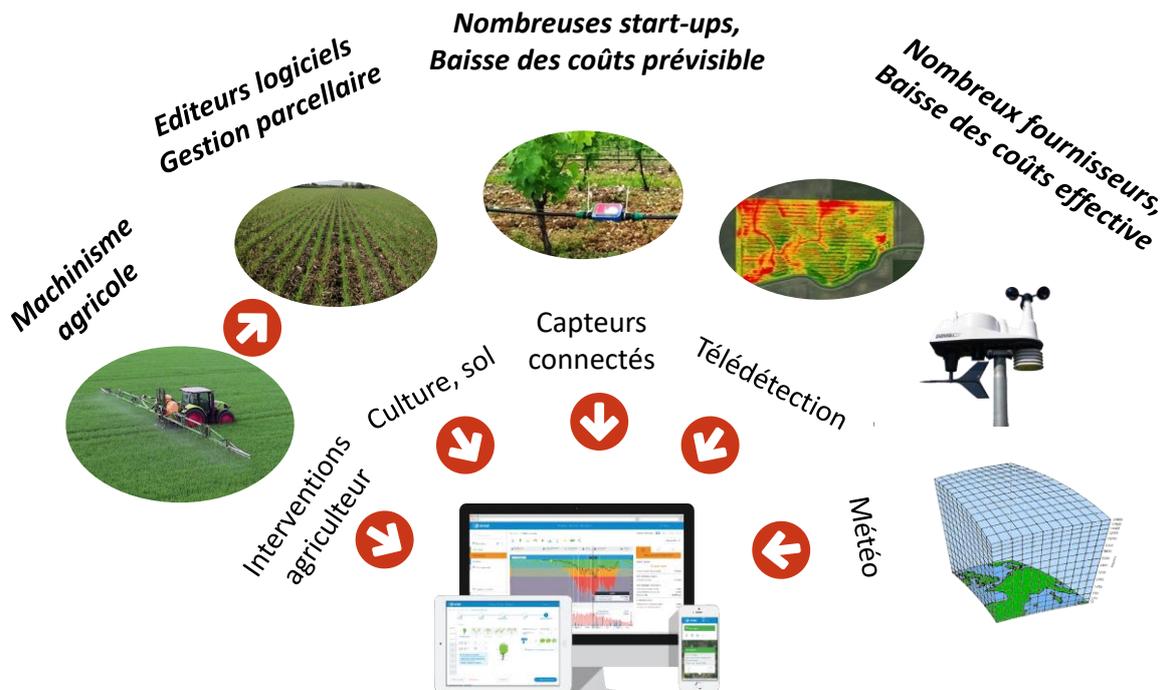


Fig. 7 : Données nécessaires à l'aide à la décision en agronomie, et type d'organisme détenteur de ces données. A l'exception du machinisme, très concentré au niveau mondial, aucun de ces acteurs n'a de position dominante au niveau international. Il est donc possible de construire des services à haute valeur ajoutée pour l'agriculteur, par des stratégies d'alliances entre entreprises de l'ensemble de la chaîne de valeur. La France a d'autant plus intérêt à favoriser ce type de stratégie, qu'elle n'a aucun acteur de premier plan au niveau mondial dans le domaine des équipements, alors qu'elle a un tissu très développé de PME et start-ups dans tous les autres domaines, avec une excellente visibilité au niveau mondial.

Les données requises pour l'aide à la décision agronomique sont d'origine très variées, et elles sont détenues par un grand nombre d'acteurs, dont la plupart ne présentent aucun risque de devenir hégémonique :

- Les fournisseurs de données météo modélisées ou réelles (station météo) ne sont pas très nombreux au niveau mondial, mais l'agriculture n'est pour eux qu'un marché parmi d'autres
- Les capteurs connectés pour l'agriculture sont pour l'instant développés par des start-ups. Ce secteur est sans doute amené à se concentrer, mais il est peu probable que de « pure players » hardware deviennent un jour prédominants, sur un marché où la banalisation de l'IoT (Internet of Things, ou Internet des Objets) dégradera sans doute très vite la valeur du matériel, au profit de l'intelligence mise en amont et en aval du capteur.
- Le secteur du logiciel de gestion parcellaire est déjà à un niveau de maturité avancé, mais sa concentration est restée limitée, et à un niveau national : aucun acteur de ce marché n'a réussi à ce jour à se développer largement à un niveau supranational. Les agrochimistes tentent de prendre pied sur ce marché, comme en témoigne le rachat récent de Granular par Du Pont, pour être en mesure de collecter plus de données sur leurs clients. Mais, compte tenu de leur rapport de force avec leurs distributeurs, qui ont les mêmes intentions, il est douteux que l'un d'eux arrive vraiment à s'imposer sur ce secteur. Il est peu probable qu'ils arrivent à ébranler la position des éditeurs spécialisés comme Isagri ou SMAG en France, qui ont l'avantage de leur connaissance parfaite du secteur et de l'absence de conflit d'intérêt avec les distributeurs agricoles.

- Les grands équipementiers comme John Deere pour les productions végétales, ou Delaval et Lely pour les productions animales, sont les seuls qui pourraient avoir une chance d'acquiescer une situation dominante dans ce domaine. Mais, faute de relation technique assez soutenue avec leurs clients, ils peinent à accéder aux données sur la culture et le sol que l'agriculteur n'a pas besoin d'entrer dans leurs outils. Après avoir longtemps verrouillé leurs données, les équipementiers ont pris conscience que cette fermeture a pénalisé le développement commercial de leurs matériels les plus innovants, et commencent à développer des API pour faciliter la communication avec les spécialistes des OAD agronomiques. De toute façon, des alliances avec ces constructeurs ne sont pas indispensables. Comme, pour des raisons pratiques, leurs données sont exportables dans les logiciels de gestion parcellaire des agriculteurs, des alliances directes avec les éditeurs de gestion parcellaire pourront offrir une voie alternative, à la condition expresse que la réglementation impose bien que les agriculteurs soient libres de transmettre les données qu'ils souhaitent transférer à tout prestataire de service de leur choix.

L'agri-intelligence est donc par essence un domaine d'innovation ouvert, qui ne peut fonctionner que dans un cadre collaboratif entre partenaires de confiance, qui y trouveront chacun leur bénéfice. Dans ce sens, l'intégration de ces services par des géants de l'agrofourniture, va inévitablement les handicaper, en raison des réticences que suscite leur situation oligopolistique. Par exemple, Winfield, le partenaire américain d'iTK, distribue bien les services d'un des concurrents d'iTK : Climate Corp, filiale de Monsanto. Cependant, il investit dans le même temps auprès d'iTK dans le développement de sa propre gamme de services, pour ne pas devenir dépendant de son principal fournisseur.

C'est ce type de collaboration ouverte qu'iTK a mis en œuvre dans le domaine des productions animales, en reprenant la société Medria, pionnière des capteurs connectés pour l'élevage avec un consortium d'acteurs réunis autour de sa relance :

- CCPA, spécialiste de la nutrition et de la santé animale
- Seenergi, un regroupement de 5 entreprises leaders du conseil en élevage laitier et sélection dans l'Ouest de la France

Les synergies entre ces partenaires vont permettre le développement de nouvelles offres à plus haute valeur ajoutée pour les éleveurs. En effet, il sera désormais possible de croiser les données de capteurs, avec les données de performance laitière, d'efficacité alimentaire, et suivi sanitaires fournis par les membres du consortium. Cela permettra de mieux prédire l'impact des changements de température ou de comportement détectés par les capteurs Medria. Comme dans l'exemple de la télédétection, on passera ainsi de simples alertes sur l'état actuel du cheptel, à de véritables modèles prévisionnels permettant d'anticiper les troubles de santé et de nutrition.

4 Conclusion : les conditions du succès de l'IA agricole en France

Les acteurs français de l'IA et du Big Data agricole ont déjà été inventoriés dans le rapport OPECST « La place du traitement massif des données (Big Data) dans l'agriculture : situation et perspectives ». Pour résumer rapidement :

- De nombreuses équipes de recherche des Instituts spécialisés dans la recherche agronomique (INRA, CIRAD et IRSTEA) travaillent, soit de façon générique sur l'IA (par exemple l'unité MIAT de l'INRA Toulouse), soit de façon plus appliquée sur la modélisation mécaniste. Ces équipes bénéficient d'une bonne visibilité internationale et peuvent être un appui important pour les entreprises innovantes du secteur
- Le secteur des logiciels de gestion parcellaire comprend trois acteurs majeurs, deux entreprises privées (Isagri et SMAG), et l'APCA (Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture) avec le logiciel MesP@rcelles. Si l'APCA n'est active qu'en France de par son statut d'organisme consulaire, Isagri et Smag sont implantées significativement dans d'autres pays européens, et comptent en tout cas parmi les principaux acteurs européens. Comme nous l'avons vu précédemment (§ 3.3), il est peu probable que des acteurs étrangers, même supportés par de grands industriels ou de grands acteurs du Big Data non agricole, réussisse à les supplanter dans un avenir proche.
- Enfin, la France est actuellement bien représentée dans le domaine émergent des capteurs autonomes connectés pour l'agriculture, avec de nombreuses start-ups dans tous les segments de ce marché, que ce soit sur la météorologie (Sencrop, Weenat), les capteurs de suivi de la végétation (Fruition Sciences, Hi-Phen), la détection automatique d'insectes (CAP 2020), ainsi que sur le secteur des drones à usage agricole (Airinov, Wanaka,...).
- Le seul maillon faible de la chaîne en France est celui du machinisme : sauf sur des marchés de niche (Pera-Pellenc pour la vigne, Irrifrance pour l'irrigation par enrouleur par exemple), la France n'a aucun groupe leader mondial dans ce domaine. Néanmoins des positions existent auprès des groupes industriels qui fabriquent des tracteurs en France :
 - Massey-Fergusson à Beauvais, (Groupe Agco, 3^{ème} mondial)
 - Kubota (Dunkerque) et
 - surtout Claas, 4^{ème} constructeur mondial qui a repris la marque Renault Agriculture et dont l'usine est basée au Mans et le bureau d'étude tracteur à Velizy, plus une usine de presse à Woippy (Metz).C'est aussi en France que CLAAS dispose de son plus grand parc de machines de récolte connectées au Monde (environ 1500 machines). Un parc de récolteuses de données probablement parmi les plus importants toutes marques confondues.

Nous avons vu de toute façon que des alliances avec ces acteurs du machinisme ne sont pas indispensables dans un premier temps, elles peuvent être contournées par des liaisons avec les logiciels de gestion parcellaire ou de gestion de troupeau. Par ailleurs, une stratégie IA en France devra aussi compter avec les professionnels utilisateurs, entrepreneurs de travaux agricoles (ETA) et Cuma, qui sont relativement bien structurés. L'enseignement agricole, très important, peut aussi être un point d'appui intéressant pour une diffusion rapide des nouvelles technologies de l'IA.

Enfin, parmi les acteurs susceptibles de participer au développement de l'agri-intelligence à l'amont des exploitations :

- Il n'y a plus en France de fournisseur majeur d'engrais ou de produits phytosanitaires. Par contre il reste trois semenciers de taille significative, Limagrain (4^{ème} mondial), et dans une moindre mesure Maisadour et Euralis.
- Les coopératives et négoce agricoles peuvent également être des moteurs pour ce secteur, avec un acteur majeur européen pour le négoce (Soufflet), et un tissu coopératif très actif, fédéré par l'Union InVivo, dont SMAG est d'ailleurs une filiale)

Il faut noter également le rôle potentiellement important d'un type de structure propre à la France, les Instituts Techniques Agricoles, qui jouent un rôle majeur dans la création des données de « Medium Data ». Ils participent également, de façon plus ou moins active en fonction des Instituts, au développement d'outils d'aide à la décision pouvant intégrer de l'IA, soit par leurs moyens propres, soit en collaboration avec l'INRA au sein du RMT (Réseau Mixte Technologique) Modelia.

Enfin, la France affiche des objectifs ambitieux en matière d'Open-Data, afin de soutenir cette innovation basée sur les données. Dans le domaine agricole, cette intention s'est traduite par la création du portail Ag-Gate, décidée par le Ministère de l'Agriculture, ainsi que la plate-forme API-Agro initiée par les Instituts Techniques.

Toutes les conditions sont donc réunies pour créer un terrain favorable à une innovation ouverte, par création d'alliances souples entre les différents maillons de la chaîne de l'agri-intelligence. Cette innovation ouverte, basée sur la modélisation et les objets connectés, est en phase avec deux demandes importantes des agriculteurs :

- elle permet le développement de services essentiellement immatériels, reposant sur des matériels peu coûteux, voire sur des services vendus par abonnement, sans investissement initial. Les débuts de l'agriculture et de l'élevage de précision reposaient sur des équipements coûteux, qui tendaient à renforcer le différentiel de compétitivité entre les grandes exploitations, seules capables de rentabiliser de tels matériels, et les exploitations familiales ou précaires. **Le développement d'objets connectés à bas coût (et dont les prix devraient baisser avec leur industrialisation à plus grande échelle), associés à des outils d'IA performants, devrait au contraire permettre le développement d'innovations accessibles à tous les modèles d'exploitation agricole**, et sans engagement de long terme.
- de tels services reposeront sur des échanges de données nécessairement connus pour l'agriculteur, puisque basés sur la coopération de plusieurs prestataires de services, chacun spécialiste de son métier, qui devront s'assurer de son consentement pour se transmettre mutuellement leurs données respectives. **Il y a là un modèle alternatif au modèle centralisateur des grands équipementiers, avec les risques d'opacité qu'il engendre**, comme c'est le cas pour les données des consommateurs collectées par les smartphones ou les grands sites de vente en ligne.

Toutefois, pour que ce type d'innovation puisse se prendre son essor, deux conditions paraissent indispensables :

- une bonne protection de la liberté d'exploitation de leurs données par les agriculteurs : les syndicats agricoles et chambres d'agriculture sont très mobilisés, à juste titre, sur le droit pour les agriculteurs à maîtriser la circulation de leurs données personnelles et professionnelles. Cela implique qu'ils puissent contrôler la diffusion de ces données,

mais aussi qu'ils aient la garantie de pouvoir disposer librement de celles qu'ils souhaitent transmettre à des prestataires de services. La FNSEA prépare une charte à ce sujet, inspirée de celle déjà rédigée par le Farm Bureau aux USA. Une charte de ce type ne sera efficace que si elle est complétée par des dispositions réglementaires imposant que tout fournisseur de matériel ou de services agricoles doit s'engager à permettre le transfert des données issues de son matériel ou service, sous une forme réellement exploitable par l'agriculteur, permettant ainsi la libre circulation des données prévues par le droit.

- Une clarification du rôle des Instituts Techniques Agricoles et de son articulation avec les acteurs privés. En effet, la variété des attributions de ces Instituts, et leur statut hybride (de droit privé, mais financés en grande partie par des financements rendus obligatoire par la force publique) génère des ambiguïtés préjudiciables au développement de l'écosystème de l'agri-intelligence. En effet, leur mission traditionnelle de production de références relève bien des missions de service public, dans une vision plus appliquée que celle des Instituts de Recherche. Par contre, la production d'outils d'aide à la décision les place en situation de compétition de fait avec les entreprises privées, avec un statut sans équivalent au niveau européen. Cette ambiguïté leur barre l'accès aux financements français et européens généralistes, où ils ne peuvent généralement postuler ni en tant que laboratoire de recherche ni en tant qu'entreprise, mais seulement comme sous-traitants des entreprises privées (cas des financements FUI). A l'inverse, ils ont un accès privilégié aux financements CASDAR du Ministère de l'Agriculture, mais ne peuvent y associer des entreprises privées qu'en tant que partenaire minoritaire. Dans les deux cas, ces difficultés administratives limitent des possibilités de collaboration qui pourraient être fécondes. Ces tensions contribuent sans doute à pénaliser la mise en Open-Data des données expérimentales de ces Instituts Techniques, et des entreprises privées, qui devraient pourtant être une source majeure des « Medium Data » essentielles pour le développement de l'agri-intelligence.

En complément du soutien que la puissance publique pourrait apporter à la structuration de l' « Agri-Intelligence » française, une clarification de la situation des Instituts Techniques Agricoles et de leur complémentarité avec les entreprises innovantes du secteur, serait donc un levier majeur, pour capitaliser sur la masse de connaissances et de compétences de l'écosystème agricole national, et faire émerger un « modèle français » de l'agriculture numérique.

iTK en bref

1. iTK, pionnier de la smart agriculture

iTK, Intelligence Technology Knowledge, a été créée en 2003 à Montpellier, pour développer des Outils d'Aide à la Décision (OAD) pour l'agriculture. Sa mission est de permettre aux agriculteurs d'optimiser le rendement et la qualité de leurs cultures, et de réduire les risques sur leur exploitation, tout en préservant l'environnement grâce à une meilleure gestion des intrants (irrigation, engrais, produits phytosanitaires).

iTK est depuis toujours très liée à la recherche. Son fondateur Eric Jallas était Directeur de Recherches du CIRAD, et la société reste très liée à l'écosystème du pôle de recherche agronomique de Montpellier, un des plus importants au monde pour les productions végétales.

L'équipe d'iTK reflète cet engagement dans la recherche de haut niveau, puisqu'elle comprend 40 % de docteurs et 55 % d'ingénieurs. Regroupant une centaine de personnes elle permet à l'entreprise d'être à la pointe sur les 3 domaines de compétences nécessaires à ses outils :

- **la modélisation agronomique**, qui permet de prévoir le rendement des cultures et leurs besoins en intrants en fonction du climat, du sol et des techniques culturales employées par les agriculteurs. Dans ce domaine, iTK se distingue par sa maîtrise des modèles dits « mécanistes » (Process-based models), issus de la recherche agronomique. Ces modèles simulent l'ensemble des mécanismes physiologiques de la culture, contrairement aux modèles statistiques issus du Big Data développés par la majorité des autres entreprises du secteur.
- **l'intelligence artificielle**, pour interpréter les résultats du modèle et l'ensemble des données stratégiques de l'exploitation, et en déduire les meilleures décisions
- **les compétences informatiques variées nécessaires au développement des plate-forme Web qui délivrent les services** : calcul intensif, portabilité (consultation sur PC, tablette ou smartphone, en mode connecté ou déconnecté, ergonomie), pour une expérience utilisateur optimale

Notre leitmotiv est l'agilité dans l'adaptation des avancées technologiques au service du monde agricole. C'est ainsi qu'après avoir eu longtemps une offre purement logicielle, l'entreprise s'est lancée dans la production d'objets connectés (débitmètre Winflow[®] en 2015), pour mieux maîtriser la qualité des données d'entrée de ses modèles.

2. Un modèle économique original

Pour assurer son développement, iTK s'appuie sur un modèle économique original qui repose sur deux axes complémentaires :

- **Des partenariats avec les leaders mondiaux des services pour l'agriculture, recherchant l'expertise agronomique d'iTK en R&D**

Sur la protection des cultures iTK travaille depuis 2006 avec Bayer Crop Science avec qui elle a développé les solutions Bay+Movida[®] pour le pilotage des programmes mildiou et oïdium en vigne, et Positif New[®] pour la septoriose du blé.

Aux Etats-Unis, le même type de collaboration a permis de développer Cropwin, pour le raisonnement de l'irrigation et de la fertilisation du maïs, du soja et du blé, en partenariat avec WinField Solutions, filiale de Land o'Lakes (2^{ème} groupe coopératif aux USA).

Dans ce type de projet, iTK co-investit avec ses partenaires, avec qui elle partage les domaines d'exploitation des services développés en commun. C'est ce qui lui permet maintenant d'adapter Cropwin au contexte européen, en partenariat avec des coopératives françaises, après son lancement aux USA par Winfield.

- Des projets collaboratifs entre les secteurs privés et publics, avec le soutien de financements publics français ou européens.

C'est sur la base de ces projets collaboratifs qu'est né le logiciel Vintel, pour le suivi de l'état hydrique du vignoble, pour l'irrigation de précision, ou pour la sélection parcellaire dans les vignobles ne pratiquant pas l'irrigation. Ce service a été développé dans le cadre d'un projet collaboratif FUI, de 2009 à 2013. Il est désormais commercialisé directement par iTK en France, auprès d'acteurs comme Arterris ou Magne S.A. Il a aussi permis à iTK de devenir aux USA le partenaire privilégié du géant des télécoms Verizon, pour le développement de son offre de services aux agriculteurs.

Ce modèle économique implique un investissement massif dans la R&D : iTK y investit chaque année environ un tiers de son chiffre d'affaires. Cet investissement porte ses fruits, puisqu'iTK bénéficie depuis 2013 de revenus récurrents apportés par les licences que lui versent ses partenaires, pour l'utilisation des services développés en commun.

Keys Events and Numbers

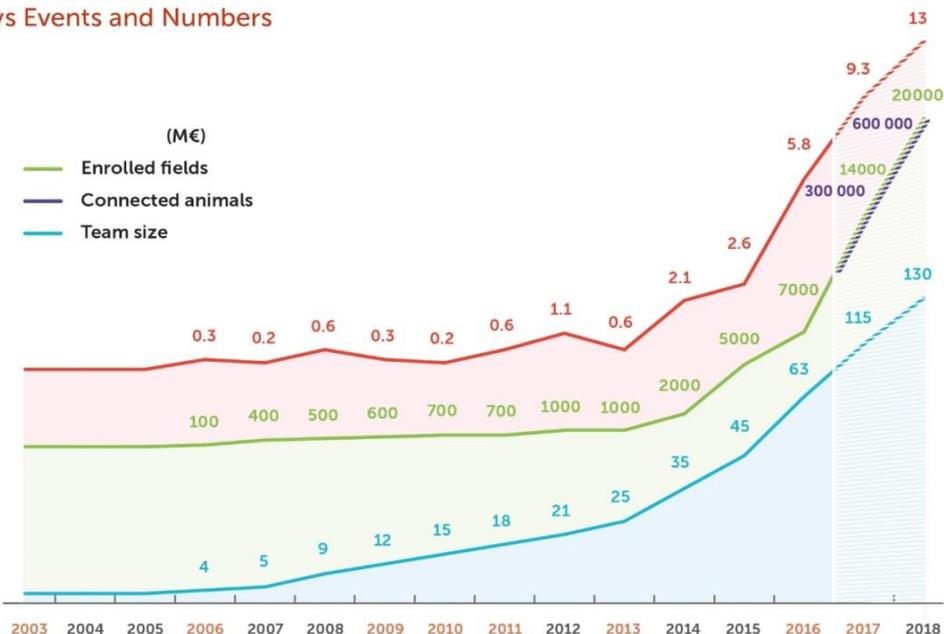


Figure n°1 : évolution du chiffre d'affaire, des salariés et de la surface couverte par les solutions iTK depuis 2003

Au total, un million d'hectares de cultures sont aujourd'hui couverts par un outil développé par iTK, en vignes et en grandes cultures.

Cette croissance solide et portée par des partenariats diversifiés, est la garante de l'indépendance d'iTK. Son capital reste détenu à 75 % par son fondateur Eric Jallas. Son actionnaire industriel le plus important (WinField LLC) n'en détient que 10 %, le reste étant détenu par le fonds Starquest Capital (9 %) et les 6 % restants par les actionnaires individuels qui avaient soutenu sa création.



DFI-presse

DFI est une société de production de contenus professionnels spécialistes des thématiques émergentes en agriculture (Politiques économiques régionales et locales, Agriculture de précision, Agriculture numérique.)

DFI édite notamment les Officiels métiers de l'agriculture. Ces éditions associent plusieurs partenaires économiques de métiers différents agissant sur un même secteur.

DFI participe au développement d'un système d'édition partagée conçu par son partenaire Columnae.