

L'agriculture de précision

Philippe Zwaenepoel et Jean-Michel Le Bars

Hormis certaines situations particulières où, déjà, des exploitants cherchaient à ajuster « à l'œil » un passage d'outil ou un apport d'engrais selon les conditions locales rencontrées, l'agriculture s'est appuyée depuis toujours sur le principe de l'homogénéité des parcelles entrant dans le cycle de production, principe qui a pour corollaire l'application d'interventions culturales (travail du sol, semis, fertilisation, protection des cultures) elles-mêmes uniformes sur chaque parcelle. Cette approche qui méconnaissait la variabilité du milieu naturel était cependant justifiée pour deux raisons essentielles, d'une part la taille réduite des parcelles, d'ailleurs parfois découpées sur des critères d'homogénéité, et, d'autre part, l'absence de moyens techniques économiquement accessibles pour qualifier la variabilité du milieu naturel à l'échelle intraparcellaire.

Aujourd'hui, la donne a changé : l'agrandissement continu de la taille des exploitations conduit à la réorganisation et au regroupement de parcelles en unités de plusieurs dizaines d'hectares, voire davantage ; le système de localisation GPS (*Global Positioning System*), l'électronique embarquée, l'informatique à la ferme permettent d'accéder, notamment par les cartographies de rendement, à une connaissance précise de cette variabilité et de réaliser des interventions modulées.

Dans ces conditions, pourquoi en rester à l'approche conventionnelle dont on connaît les limites en termes de sous-utilisation des intrants, de moindres performances économiques et de risques pour l'environnement ?

Cette réflexion a été à l'origine du développement de l'agriculture de précision (encadré 1), concept

que l'on peut traduire par la formule : « la bonne intervention au bon endroit et au bon moment », et dont les premières applications à grande échelle ont vu le jour aux USA dans les années 1980 pour la fertilisation P et K (*nota* : on parlait à l'époque de site *specific farming*, de *spatially variable field operations*, avant que l'expression *Precision agriculture*, plus générale, ne soit adoptée).

La variabilité des milieux

L'hétérogénéité des sols, traduite par des variations de texture, de profondeurs de sol, de pH, de teneur en matières organiques... constitue une source importante de variabilité pour la production agricole ; l'hétérogénéité des sols a une origine « naturelle » (géologie, évolutions pédogénétiques, lithologie...) à laquelle se superpose souvent une hétérogénéité liée à l'activité humaine : retournement des prairies, épandage d'engrais organiques, opérations de remembrement, etc. (Arrouays *et al.*, 1997).

La topographie est un autre facteur de variabilité à considérer, qui a des incidences multiples : entraînement des éléments fins et de l'azote minéral vers les bas de pentes, modifications des conditions de fonctionnement des agro-équipements, différences d'ensoleillement entre versants en relief marqué de coteaux...

Les facteurs de variabilité des milieux ne se limitent pas à l'hétérogénéité des sols et à la topographie ; la culture elle-même est rarement homogène en raison, par exemple, de problèmes locaux de levée, de tâches d'adventices, d'attaques de ravageurs ou de maladies dans certaines zones...

Philippe Zwaenepoel et Jean-Michel Le Bars
Cemagref
Domaine des Palaquins
Montoldre
03150 Varennes-sur-Allier

Encadré 1

L'agriculture de précision dans le monde

La modulation des apports d'engrais à partir d'analyses de sol a commencé aux USA dans les années 1983-1984. Au début des années 1990, a débuté la commercialisation des capteurs de rendement qui seraient aujourd'hui au nombre de 9 000, dont la moitié connectée à un DGPS (Robert, 1997). Selon des enquêtes récentes, cet engouement pour l'agriculture de précision, favorisé par une couverture DGPS dense, devrait toucher un nombre croissant d'exploitations au cours des prochaines années, exploitations grandes en général et produisant des cultures à haut niveau d'intrants (maïs, betteraves sucrières...) ; ce mouvement est accompagné et favorisé par une offre croissante de services au niveau de coopératives, d'entrepreneurs, ou de sociétés de conseil agronomique, comme l'échantillonnage et l'analyse de sols, la réalisation de cartes de rendement, leur interprétation et la création de cartes de préconisations, l'application modulée des intrants.

En Europe, la Grande-Bretagne et l'Allemagne sont certainement les pays plus avancés en matière d'agriculture de précision, si l'on prend comme critères le nombre de moissonneuses-batteuses en service équipées d'un capteur de rendement et le nombre d'études engagées sur cette problématique. Cette situation s'explique notamment par la disponibilité des signaux de correction différentielle GPS, l'introduction plus précoce de capteurs de rendement, la taille des exploitations et l'importance de la fertilisation « rendue racine » (Boisgontier, 1997).

En France, l'année 1997 avec la présentation au SIMA de cinq systèmes de cartographies de rendement par les grands

constructeurs de moissonneuses-batteuses peut être considérée comme une année charnière dans la diffusion de cette technologie, les premières études ayant été lancées par l'ITCF (Institut Technique des Céréales et des Fourrages) et le Cemagref en 1993-1994 (encadré 3).

On manque complètement de références, aujourd'hui, pour évaluer l'intérêt de l'agriculture de précision dans le contexte français ou plutôt dans les grandes régions agricoles françaises, car les réponses pourront être différentes d'une région à l'autre, selon la variabilité des sols, la taille des exploitations, le type de production... Aux USA, des travaux font état de gains économiques pouvant atteindre l'équivalent de 500 F/ha pour la modulation de la fumure N, P et K, mais ces exemples sont difficilement transposables dans notre pays. Dans d'autres situations, l'intérêt de l'agriculture de précision apparaît plus tangible sur le plan environnemental, en réduisant le lessivage des nitrates, que sur le plan économique ; si les enjeux environnementaux le justifient, il faudrait alors très certainement prendre des mesures d'incitation financière pour amener les agriculteurs à aller dans cette direction.

D'une manière générale, de nombreux programmes de recherche et d'expérimentation sont engagés aux Etats-Unis et en Europe, touchant l'agronomie, le génie des agro-équipements, l'économie et l'environnement, pour produire des références sur l'agriculture de précision et développer les méthodes et les outils opérationnels nécessaires à sa mise en œuvre sur le terrain.

Photo 1. – Exemple de variabilité en région céréalière mise en évidence par photographie aérienne ; cette parcelle, dite ITCF-Imbault, est utilisée à des fins expérimentales dans le cadre du programme européen IN-SPACE (encadré 3). ▼



La variabilité est inhérente au milieu naturel, cependant avec des degrés très divers selon les paramètres considérés (photo 1). Quantifier cette variabilité est essentiel pour décider d'une stratégie de conduite de cultures : maintien de l'approche conventionnelle ou passage à l'agriculture de précision, selon le niveau de variabilité mesuré.

Mesurer la variabilité

La cartographie de rendement représente un outil particulièrement efficace de mesure de la variabilité intraparcellaire. C'est dans le domaine des céréales que les technologies sont les plus avancées, plusieurs constructeurs de moissonneuses-batteuses proposant aujourd'hui, en option, des systèmes permettant la réalisation de cartes de rendement (photo 2).

Ces systèmes comprennent tous les éléments de base suivants : un capteur de débit, un récepteur DGPS (*Differential Global Positioning System*), un logiciel d'édition et de visualisation de cartes, de type SIG (Système d'Information Géographique).

Le capteur de débit mesure en continu la quantité de grain arrivant dans la trémie. Plusieurs principes de mesure ont été développés :

- le capteur massique à impact, placé en sortie d'élevateur, et constitué d'une pièce instrumentée (plaque ou doigts) sur laquelle vient frapper le flux de grain ;
- le capteur volumétrique à barrière lumineuse, qui mesure le niveau de remplissage des palettes de l'élevateur ;
- le capteur massique à effet capacitif, dans lequel on mesure la permittivité du grain jouant le rôle de diélectrique ;
- le capteur massique à source radioactive où l'on mesure l'absorption d'un rayonnement gamma par le flux de grain ; ce capteur, utilisé dans plusieurs pays européens dont la Grande Bretagne et le Danemark, n'est pas autorisé à la vente en France.

Ces capteurs nécessitent une calibration soignée et la réalisation d'une pesée de contrôle pour chaque type de grain récolté, pour les capteurs de type volumétrique, la mesure du poids spécifique est également indispensable. A la mesure en continu du débit, est associée une mesure de l'humidité du grain, à partir d'un capteur à effet capacitif, corrigé éventuellement en température.

Le récepteur DGPS permet de localiser en continu la moissonneuse-batteuse avec une précision, selon le type de matériel choisi, qui est de l'ordre de 1 à 5 m (cf. Infra).

A partir des données brutes (en général une mesure par seconde), le logiciel de cartographie génère une carte présentant les différentes zones d'équ rendement (figure 1), aux contours lissés par des méthodes géostatistiques (moyenne arithmétique, kriging, poids inverse de la distance). Il convient de préciser que les données brutes (débit, position) doivent être corrigées du temps de transit relatif au passage du grain dans les organes de battage. Ce temps représente la durée de trajet du grain entre l'instant de récolte et l'instant de passage devant le capteur de débit.



CLAAS

▲ Photo 2. – Moissonneuse-batteuse équipée pour la réalisation de cartes de rendement ; ici, le terminal peut être transféré sur le tracteur pour contrôler la réalisation des applications modulées.

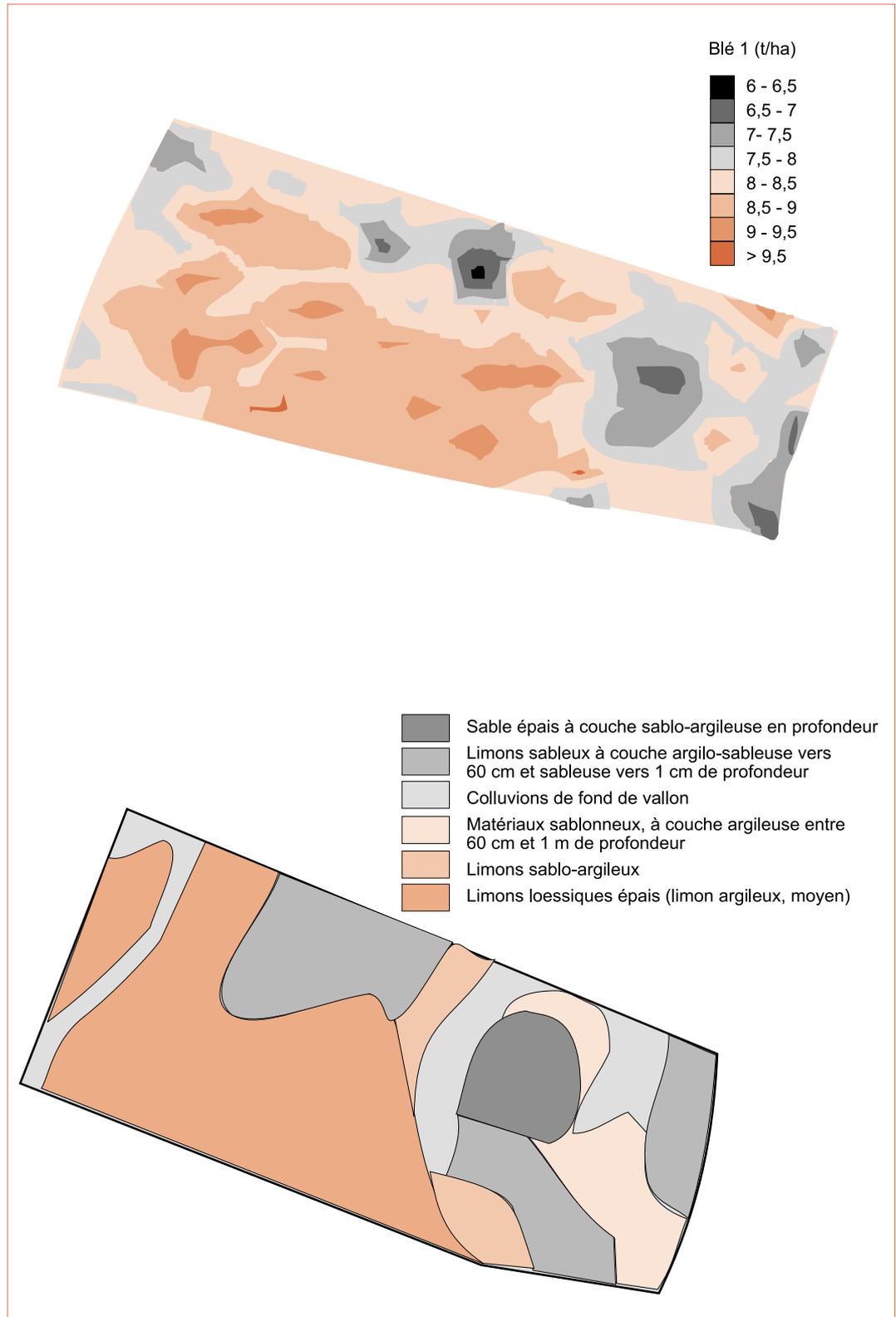
La précision des cartes de rendement dépend de la taille du maillage choisie et de la précision combinée de chacun des éléments cités, avec comme sources supplémentaires d'erreurs, l'incertitude liée à la largeur effective de coupe et aux pertes de grain non mesurées (avant la récolte et au niveau de la barre de coupe). Une précision de 7,5 %, par exemple, a été obtenue avec un maillage de 20 m x 20 m, limite minimale raisonnable (Missotten *et al.*, 1996).

L'agriculteur dispose d'autres méthodes pour caractériser la variabilité du milieu, au premier rang desquelles figure classiquement l'analyse de sol portant sur des échantillons prélevés en différents points de la parcelle, en général à partir d'une grille prédéterminée d'échantillonnage.

L'emploi des analyses de sol reste, toutefois, freiné par le coût élevé du prélèvement des échantillons et des analyses elles-mêmes, surtout quand elles comportent des mesures de caractéristiques pérennes (granulométrie, profondeur de sol...). Cette situation devrait cependant pouvoir évoluer positivement au cours des prochaines années, avec :

- la mise au point d'outils utilisés par des prestataires de services et permettant de mécaniser les prélèvements d'échantillons et de les référencer géographiquement (véhicule tout terrain léger type « Quad » associé à un système de localisation DGPS) ;

Figure 1. –
Caractérisation de la
variabilité
intraparcellaire ; carte
de rendement en blé
et carte pédologique
d'une même parcelle
(document Cemagref,
INRA-Laon et Chambre
d'agriculture de
l'Aisne). ▶



– la mise en œuvre de méthodes d'échantillonnage orientées (notamment par les cartes de rendement) et permettant de limiter le nombre d'échantillons prélevés (Pocknee *et al.*, 1996) ;

– une réduction du coût des analyses induite par le développement du marché, lié au développement de l'agriculture de précision.

Les observations faites par l'agriculteur sur ses parcelles à l'occasion de « tours de plaine » ou lors d'interventions culturales sont essentielles pour apporter des éléments d'interprétation de la variabilité constatée, au niveau, par exemple, de cartes de rendement. Pour faciliter cette tâche, des moyens de saisie portables ou embarqués couplés avec un système DGPS sont maintenant disponibles. Ils permettent, par exemple, de réaliser la cartographie des mauvaises herbes, à partir d'observations visuelles.

La télédétection aérienne ou satellitaire constitue un outil puissant d'investigation qui, à terme, devrait rendre de grands services pour l'agriculture de précision. La mesure du taux de réflectance du milieu dans le visible et le proche infrarouge, couplée si nécessaire avec des mesures ponctuelles au sol (étalonnage, vérification) peut permettre, en effet, d'acquérir beaucoup d'informations sur les caractéristiques du sol et du couvert végétal, comme la teneur en matières organiques et l'humidité du sol en surface, la quantité de biomasse, la présence éventuelle de stress au niveau de la culture... A l'heure actuelle, les limitations à l'utilisation de la télédétection par l'agriculteur ou par un prestataire de service, sont encore nombreuses ; citons pour les satellites actuels la faible répétitivité des prises de vues (26 jours pour SPOT), avec de surcroît des risques afférents de couverture nuageuse, la faible résolution des images (20 m x 20 m pour SPOT en multi-spectral), et leur coût encore élevé. La télédétection aérienne offre, en fait, davantage de souplesse et se met en place progressivement aux USA, dans les grandes plaines du Middle West.

Bien d'autres capteurs sont à développer pour parfaire la caractérisation du sol et de la culture, donnée essentielle pour l'agriculture de précision (Stafford, 1996) ; les recherches engagées dans ce domaine sont nombreuses et concernent, par exemple, le repérage des mauvaises herbes (réflectométrie infrarouge, traitement d'images), la mesure de la structure et de la profondeur du sol (conductivité

électromagnétique, radar...), la détermination du pH et de la teneur du sol en éléments minéraux (électrode rapide...).

Le système de localisation GPS

Comme nous l'avons vu précédemment, la réalisation des cartes (rendement, caractéristiques du sol, tâches d'adventices...) fait appel au système de localisation DGPS. L'usage de ce système dans l'agriculture de précision ne s'arrête pas à la cartographie des parcelles : il sera mis également en œuvre pour l'exécution automatique de cartes d'interventions préprogrammées, comme les cartes de fertilisation, en fournissant à chaque instant la position du matériel dans la parcelle.

La précision du système de localisation par GPS direct (encadré 2) est normalement de 15 m, mais en réalité, du fait de la dégradation volontaire, appelée *Selective Availability* (SA), introduite dans les signaux des satellites par le Département américain de la Défense, pour les usages civils la précision réelle se situe entre 50 et 60 m. Cette limitation a conduit au développement du GPS différentiel (DGPS), basé sur l'utilisation de stations de références de position connue, fournissant aux récepteurs les corrections à réaliser (figure 2) ; le DGPS permet ainsi d'obtenir une précision de positionnement en temps réel, qui, selon les configurations, se situe dans une fourchette de 1 à 5 m (Le Bars *et al.*, 1996).

Encadré 2

Le GPS

Le système de localisation GPS (*Global Positioning System*) est un système géré par le Département américain de la Défense et constitué par un réseau de 24 satellites qui permet aux utilisateurs de récepteurs GPS de se localiser en tout point dégagé du globe. Schématiquement, le principe de calcul des coordonnées repose sur la connaissance de la position des satellites et la détermination de la distance récepteur-satellites à partir de la mesure du temps de vol des signaux entre les satellites émetteurs et le récepteur. Le récepteur calcule ses coordonnées par trilatération (recherche du point d'intersection de sphères centrées sur les satellites). Seulement trois satellites « visibles » du récepteur permettent de calculer la longitude et la latitude ; l'altitude est obtenue avec un satellite supplémentaire. L'utilisation du DGPS ne nécessite donc pas l'installation de plusieurs balises dans un périmètre proche du mobile et là réside son avantage essentiel par rapport aux autres systèmes de localisation connus (laser, HF...) ; s'affranchissant de toute infrastructure « propriétaire » terrestre, il tend à s'imposer aujourd'hui comme le système universel de localisation.

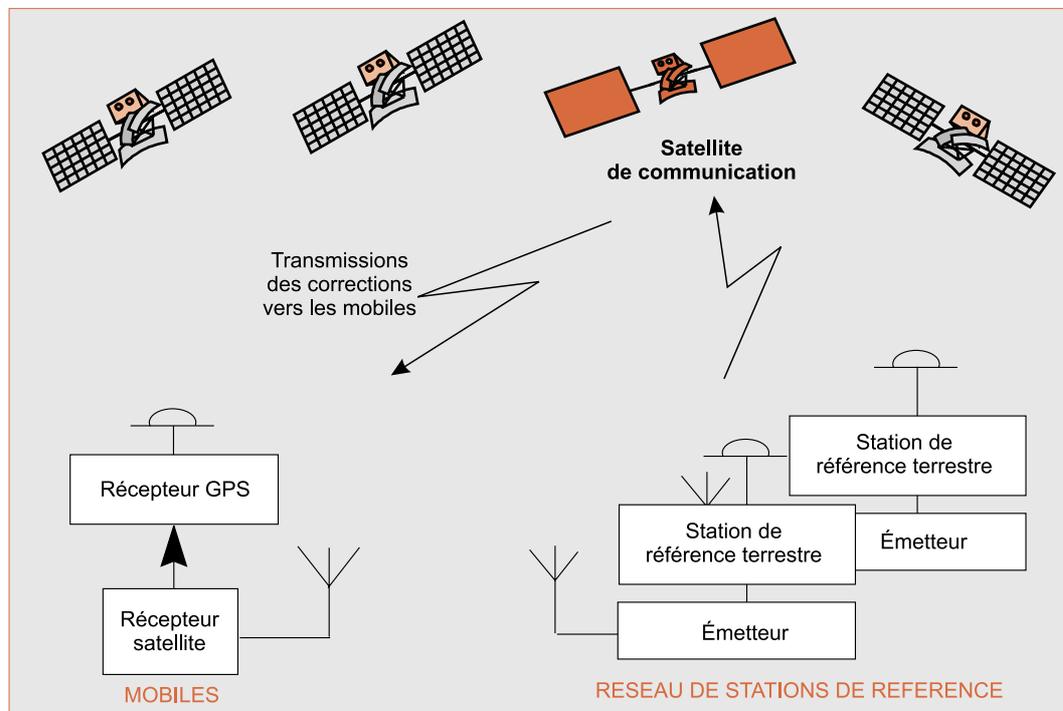


Figure 2. – Schéma de principe du GPS différentiel temps réel ; ici, les signaux de correction provenant des stations de référence sont retransmis par un satellite de télécommunication géostationnaire (document Cemagref).

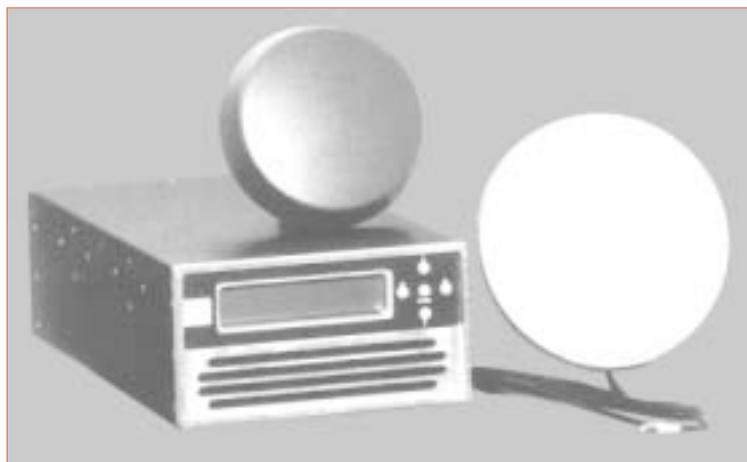
Cette technologie a conduit à la mise en place de différents services de corrections différentielles :

- de nombreux pays, dont la France, ont installé sur les côtes des stations de référence pour la navigation. Ce service gratuit est accessible aux mobiles terrestres proches de l'émetteur ;
- des compagnies privées gérant des stations de référence terrestres proposent des récepteurs spécifiques pour la réception de signaux de correction émis par un satellite de télécommunication ;

– dans certains pays européens (Suède, Allemagne...), les signaux de correction sont disponibles sur la bande FM par le système RDS (*Radio Data System*) moyennant le paiement d'une redevance annuelle.

Avec le développement de l'utilisation du GPS dans de nombreux secteurs d'activités (transports, agriculture, topographie...), la concurrence des fabricants de récepteurs (photo 3) s'est accrue au bénéfice des utilisateurs, avec une baisse sensible des prix depuis ces dernières années.

Photo 3. – Récepteur GPS différentiel avec deux antennes indépendantes, l'une pour les signaux des satellites GPS, l'autre pour les signaux de correction. ▼



document OMNISTAR

La gestion des informations

L'agriculture de précision repose sur l'utilisation accrue d'informations et de connaissances, considérées comme de véritables intrants dans le processus de production. Collectées à l'échelle intraparcellaire sur des surfaces élémentaires plus ou moins grandes (environ 500 points de mesure à l'hectare, en cartographie de rendement), archivées sur plusieurs années dans un SIG, ces informations doivent pouvoir facilement être stockées, utilisées et échangées, malgré la multiplicité des acteurs et des équipements susceptibles d'intervenir dans la chaîne de mesure/décision/action. Comment, par exemple, transférer une carte de

rendement produite par le système embarqué d'un constructeur vers l'ordinateur de gestion, et après élaboration d'une carte de fertilisation, la faire exécuter par l'épandeur d'un autre constructeur monté sur un tracteur d'une troisième marque. Ce cas de figure est tout à fait envisageable, sachant, en outre, que l'agriculteur peut confier certaines de ces tâches à des prestataires de services (entrepreneur, coopérative...).

Si l'on en juge par l'activité des groupes travaillant sur ce problème dans le cadre de l'ISO (*International Organization for Standardization*), on ne devrait pas s'orienter vers un standard défini par un constructeur auquel se rallieraient les autres constructeurs, comme ce fut le cas dans la micro-informatique avec le PC d'IBM.

L'activité de normalisation engagée au niveau de l'ISO repose sur le sous-comité technique « Électronique en agriculture » qui a mis en chantier trois normes : la norme 11783 définit le bus de communication pour les échanges d'informations entre les équipements mobiles (le tracteur et les outils) ; les normes 11787 (publiée en 1995) et 11788 définissant, quant à elles, les échanges de données entre équipements fixes. Les difficultés rencontrées dans l'élaboration de ces normes ne se situent pas tant au niveau des procédures de transmission d'informations, mais plutôt au niveau de la définition des données échangées (Grenier, 1997).

Toutes ces normes n'étant pas encore publiées, plusieurs sociétés adoptent, pour les informations spatialisées, des formats de fichiers DXF ou ASCII qui sont reconnus par la plupart des logiciels de SIG.

La prise de décision

Dans un premier temps, la carte de rendement permet d'obtenir, à peu de frais pour l'agriculteur, si elle est réalisée par un entrepreneur de moissonnage-battage, des informations précieuses sur le niveau d'hétérogénéité de ses parcelles et sur l'identification de problèmes affectant la productivité de certaines zones (compaction, excès d'eau, ravageurs...). L'analyse de ces informations peut conduire à la mise en œuvre de mesures correctrices pour l'année suivante, ou, si nécessaire, comme le font les fermiers anglais, à la mise en jachère des zones les moins productives (Clark *et al.*, 1996).

La carte de rendement donne, bien entendu, le tonnage de grain récolté par parcelle, information

qui n'est pas toujours triviale compte tenu de la logistique des chantiers de moissonnage-battage ou du transfert de grain vers la ferme, qui ne dispose pas nécessairement de moyens de pesée.

De l'inter-comparaison des rendements entre parcelles, la carte de rendement permet aussi d'aller vers la mise en place d'expérimentations en bandes au sein d'une même parcelle pour comparer sur le plan technico-économique, les effets de différentes conduites culturales, variétés, densités de semis, niveaux de fertilisation...

En ce qui concerne la modulation des intrants, objectif poursuivi par l'agriculture de précision, tous les auteurs s'accordent pour déconseiller l'établissement de cartes de préconisations pour l'année n+1 à partir de cartes de rendement établies l'année n, en raison de la variabilité inter-annuelle de ces dernières.

Plusieurs années d'observations sont, en effet, nécessaires pour identifier les principaux facteurs explicatifs de la variabilité constatée. Dans certaines situations, on mettra facilement en évidence la présence de zones de rendement stables d'une année sur l'autre, en relations avec les caractéristiques pérennes du sol (granulométrie, profondeur) et la topographie. Dans d'autres situations, les corrélations seront beaucoup plus lâches avec les caractéristiques pérennes de la parcelle et les facteurs explicatifs devront être cherchés ailleurs (Lark *et al.*, 1996). De nombreuses études sont menées actuellement dans ce domaine pour mettre au point des méthodologies d'analyse et dégager des règles, qui pourront être, à terme, intégrées dans un système expert d'aide à la décision. Bien entendu, toutes les informations collectées sur la culture pendant son développement, seront autant d'atouts pour étayer l'interprétation et la décision.

Une expertise agronomique adaptée à l'agriculture de précision est donc aujourd'hui à construire pour l'interprétation des cartes de rendement et surtout pour l'élaboration de règles multi-critères de gestion intraparcellaire, susceptibles de prendre en compte les objectifs spécifiques de chaque exploitant, l'idéal étant de pouvoir combiner les critères économiques, environnementaux et de qualité de la production dans la décision finale. L'élaboration de cette expertise agronomique va demander un effort important au cours des prochaines années, notamment pour la production de références ré-

gionales et locales sur lesquelles pourra s'appuyer le Conseil agronomique (nota : la disponibilité dans certaines régions de cartes de sols détaillées, à petite échelle, sera un atout important pour le conseil agronomique).

Les matériels d'application modulée

L'agriculture de précision repose sur le concept de modulation des interventions, en particulier les apports d'intrants, selon un zonage en relation avec la variabilité intraparcellaire rencontrée. Pour traduire ce concept en réalité opérationnelle, il est nécessaire de disposer de matériels réglables pendant le travail et ce, de façon automatisée, car hormis pour des configurations extrêmement simples, il ne paraît pas concevable de confier cette tâche supplémentaire à l'opérateur. Les matériels devront être de réglage précis et commandable électriquement, caractéristiques qui d'ailleurs vont aller en se généralisant sur la plupart des matériels, pour répondre au souci des agriculteurs de disposer de réglages faciles et rapides.

Pour l'automatisation du réglage des matériels, on peut distinguer deux grands principes de fonctionnement, selon que les interventions sont préprogrammées (ex. : carte de fertilisation) ou ajustées, en temps réel, à partir de capteurs placés sur le matériel (ex : détection et traitement d'adventices). Dans le second cas, il n'est pas nécessaire de disposer d'un système de localisation. A noter que l'on peut aussi imaginer des formules mixtes où l'exécution, par exemple, d'une carte de fertilisation peut être aussi corrigée, en temps réel, pour tenir compte du développement de la culture ou d'incidents survenus depuis l'établissement de la carte (mauvaise levée, dégâts dus au gibier...).

Quels sont les matériels visés ? En théorie tous, dans la mesure où chacune des opérations culturales (travail du sol, semis, fertilisation...) a des conséquences directes sur le processus de production, et où l'on recherche une optimisation globale, exploitant au mieux les investissements généraux réalisés (DGPS, informatique...). Cela étant, si des travaux commencent à être menés sur la modulation du semis en fonction des caractéristiques et des potentialités locales, les opérations auxquelles on s'est intéressé en priorité dans un souci de rentabilité et

de protection de l'environnement, concernent la fertilisation et la protection des cultures.

■ La fertilisation

C'est dans le domaine de la fertilisation qu'ont vu le jour aux États-Unis les premières réalisations technologiques de modulation intraparcellaire des intrants, pour l'apport de fumures de fond.

La technologie s'est développée autour de gros matériels automoteurs d'épandage pneumatique utilisés par les entrepreneurs et les coopératives. Les matériels les plus sophistiqués comportent aujourd'hui jusqu'à six trémies pour ajuster en continu la dose et la formulation épandues, à partir du mélange d'engrais de compositions différentes (photo 4). Par ailleurs, ils peuvent être équipés de rampes doubles de pulvérisation (une pour les débits élevés, l'autre pour les faibles débits) pour l'épandage d'engrais liquides et/ou de produits phytosanitaires, avec la possibilité de mélanger en continu deux engrais, de traiter en injection directe avec deux produits différents.

En Europe, la technologie est, sans conteste, moins avancée qu'aux États-Unis et a en fait pris une autre direction, répondant mieux *a priori* aux besoins de l'agriculture européenne (Zwaenepoel, 1997). Constructeurs et chercheurs se sont en effet davantage intéressés aux épandeurs attelés derrière le tracteur, les plus diffusés, et aux moyens de bien contrôler les quantités réellement apportées, en pensant essentiellement à la fertilisation azotée en raison de son implication dans la pollution des eaux par les nitrates.

Un constructeur propose ainsi un épandeur centrifuge adapté à la modulation des apports et doté d'un dispositif de pesée de la trémie, pour corriger éventuellement la calibration du réglage de débit. Un autre constructeur a présenté au SIMA 97 un épandeur centrifuge dont le modulateur de débit peut être couplé à différents terminaux électroniques utilisés pour la cartographie de rendement sur moissonneuse-batteuse. Deux moteurs électriques à pilotage digital commandent indépendamment l'action des trappes de distribution, côté gauche et côté droit, pour exécuter la carte de fertilisation mémorisée ; le conducteur conserve la possibilité, en outre, d'ajuster en temps réel par incréments de $\pm 10\%$ la dose prévue pour tenir compte de l'état de la culture au moment de l'épandage.

■ Protection des cultures

Dans ce domaine, les technologies de « précision » ne concernent aujourd'hui que la lutte contre les mauvaises herbes, les autres ennemis des plantes (maladies, insectes) nécessitant en général des traitements généralisés, en raison de leur aptitude à se propager rapidement au sein d'une culture.

L'élimination sélective des mauvaises herbes suppose d'abord un repérage, puis simultanément ou en différé, une action destructrice. Le premier principe de travail demande la mise en œuvre de techniques rapides de repérage des mauvaises herbes qui, à l'heure actuelle, se cantonnent à la détection de la présence ou de l'absence de mauvaises herbes dans des configurations simples.

Un matériel exploitant ce principe est actuellement commercialisé : son fonctionnement repose sur la commande automatique et séparée de chacune des buses de la rampe de pulvérisation à partir de signaux fournis par des radiomètres (un par buse) qui mesurent la lumière réfléchie par le sol et son couvert végétal (figure 3). Sachant que le taux de réflexion des végétaux est plus élevé que celui du sol nu, il est facile de contrôler la présence d'adventices sur sol nu ou recouvert de chaumes. Par contre, cette technique en l'état ne peut pas fonctionner sur des cultures en croissance.

Les configurations plus complexes de peuplement végétal, en cultures céréalières, par exemple, nécessitent un repérage préalable des zones infestées et l'établissement de cartes de traitement *ad hoc*. Le repérage, visuel, s'effectue depuis la cabine lors d'interventions sur la culture, ou à pied, lors d'une démarche spécifique de diagnostic ; les observations recueillies doivent être référencées géographiquement (utilisation possible du DGPS) ; des suivis historiques des zones infestées ont d'ailleurs montré une relative stabilité des tâches d'adventices (localisation, composition) d'une année sur l'autre, dimension à prendre en compte dans le raisonnement de la carte de traitement (Gerhards, 1996).

Pour la réalisation proprement dite du traitement, les seuls matériels véritablement adaptés et disponibles sur le marché sont les automoteurs précédemment cités avec leur équipement « pulvérisation ».



Deleplanque

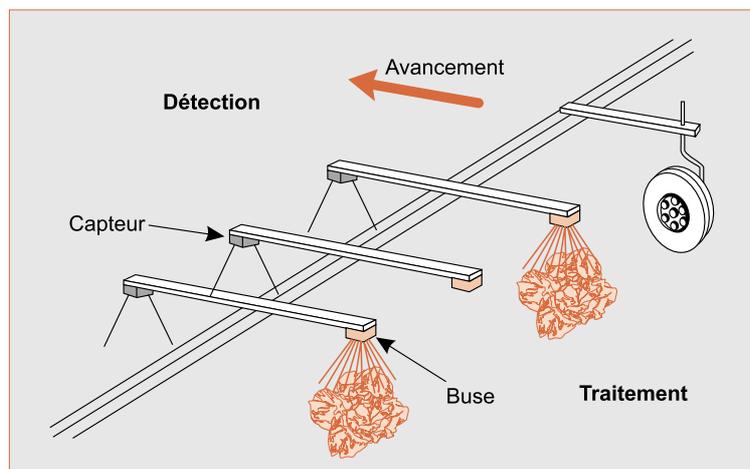
▲ Photo 4. – Automoteur d'épandage pneumatique utilisé aux USA pour la modulation intraparcellaire des apports d'engrais.

Conclusion

La modernisation de l'agriculture s'est traduite par un emploi accru d'énergie et d'intrants (engrais, phytosanitaires, eau...) qu'il faut aujourd'hui mieux gérer pour en optimiser l'usage et limiter les risques pour l'homme et l'environnement.

Cette problématique a donné naissance à l'agriculture de précision, nouvelle approche de l'agriculture, fondée sur l'intégration des technologies de l'information et de la communication et dans laquelle le milieu (relief, sol, couvert végétal...) est caractérisé dans toute sa variabilité spatiale et non ramené de façon classique à un ensemble homogène. Le processus de production peut ainsi être piloté localement et optimisé pour chacune des interventions culturales : travail du sol, semis, fertilisation...

Figure 3. – Schéma de principe du traitement sélectif des adventices sur sol nu ; chaque buse est commandée individuellement à partir du signal fourni par un capteur radiométrique (document Cemagref). ▼



Encadré 3

L'action du Cemagref

L'agriculture de précision fait partie du programme Cemagref/AGRIPROPRE « Maîtrise de l'impact des agro-équipements sur l'environnement ». Dans ce programme, quatre thèmes de recherches sont axés sur l'agriculture de précision.

Localisation et cartographie des rendements

La division « Technologie du Machinisme Agricole » de Clermont-Ferrand a mené en 1993-1994, en collaboration avec l'ITCF, une étude de la variabilité intraparcellaire du rendement en production céréalière. Cette étude s'est plus spécifiquement attaché à l'évaluation de systèmes de localisation (GPS, AXYLE...) et à la réalisation de cartes de rendement à partir d'une moissonneuse-batteuse spécialement équipée.

En prolongement de cette étude, la division a participé à l'encadrement d'une thèse sur la modulation des conduites culturales à partir des différences constatées sur une même parcelle.

La fertilisation modulée

Depuis novembre 1994, le Cemagref de Clermont-Ferrand est impliqué dans IN-SPACE,

programme financé par la Communauté européenne qui réunit des équipes de l'Institut de Silsoe (Grande-Bretagne), des Universités de Wageningen (Pays Bas) et de Louvain (Belgique), et de l'ITCF (Institut Technique des Céréales et des Fourrages).

L'objectif est de développer des méthodes et des outils permettant d'appliquer les concepts de l'agriculture de précision à la fertilisation azotée. Le Cemagref de Clermont-Ferrand est plus spécialement chargé de proposer une architecture électronique de communication entre les différents équipements (capteurs, actionneurs, GPS, ordinateurs de bord) et d'adapter un épandeur pneumatique à l'exécution de cartes de fertilisation préprogrammées (photo 5).

Parallèlement, des travaux sont menés en collaboration avec le Laboratoire des sciences et matériaux pour l'électronique et l'automatique (LASMEA) de l'Université de Clermont-Ferrand II pour améliorer la fiabilité et la précision du système de localisation DGPS, en présence de masques (arbres, bâtiments...).

Cemagref



Photo 5. – Distributeur pneumatique adapté par le Cemagref pour la réalisation de cartes de fertilisation préprogrammées ; chaque demi-rampe de 6 m est commandable de façon indépendante.

Encadré 3 (suite)

La qualité du lit de semences

Depuis 1995, dans le cadre du programme « Agriculture Demain », financé par le ministère de la Recherche, le Cemagref mène en partenariat avec l'ITCF (Boigneville), l'INRA (Laon) et l'ENITA (Bordeaux), une recherche visant à améliorer la qualité de réalisation des lits de semences en modulant l'action des outils en fonction de l'émiettement du sol obtenu.

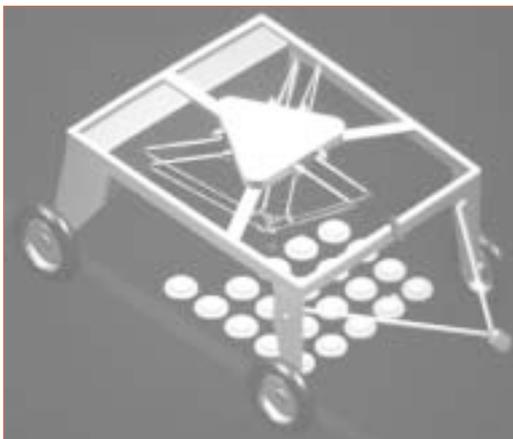
Par ce moyen il s'agit d'obtenir, dès le premier passage, le « bon » lit de semences, adapté au sol et à la culture. On économise ainsi des passages de tracteur dans les champs, ce qui est bon à la fois du point de vue économique, énergétique et environnemental. Une bonne qualité du lit de semence permet aussi d'économiser des intrants – semences, herbicides – en assurant une levée de la culture plus rapide et plus homogène.

Dans cette étude, les aspects agronomiques sont pris en charge par l'INRA et l'ITCF, tandis que le Cemagref et l'ENITA travaillent sur la perception de la qualité de l'émiettement de la couche superficielle du sol travaillé (capteurs) et la modulation de l'action des outils (automatismes).

La protection des cultures

Le Cemagref de Montpellier travaille sur les techniques de protection des cultures au sein du programme PATCHWORK.

Pour les cultures « en lignes » à forte valeur ajoutée, telles le maraîchage ou l'horticulture, l'objectif consiste à concevoir un outil tracté capable de détruire les mauvaises herbes d'une culture, avec l'usage minimum de produit chimi-



Cemagref

▲ Figure 4. – Schéma de principe de la maquette développée par le Cemagref pour l'étude de procédés d'élimination sélective des adventices en cultures maraîchères ; le contrôle des mouvements du bras est associé à un dispositif de repérage automatisé des adventices par traitement d'images (non représenté).

ques. Repérées par traitement d'images, les adventices sont éliminées par procédé électrique, mécanique... à l'aide d'un bras automatisé spécialement conçu pour contrebalancer, en temps réel, les perturbations dynamiques induites par le sol (figure 4). Ces travaux, financés par la Commission européenne, associent le Cemagref à l'Université de Valence, l'IVIA (Espagne), le *Danish Institute of Plants and Soils Sciences* (Danemark) et le *Silsoe Research Institute* (Grande-Bretagne).

En disposant de plus d'informations et de connaissances, considérées comme de véritables intrants dans le processus de production, l'exploitant peut réduire la part d'approximation et d'incertitude liée à ses choix.

L'agriculture de précision, lancée aux USA dans les années 80, s'implante aujourd'hui dans les principaux pays agricoles européens, *via* la cartographie de rendement en production céréalière.

Le mouvement amorcé semble inéluctable à long terme en raison de la conjonction de plusieurs tendances : l'agriculture européenne doit améliorer

sa compétitivité et la qualité de ses produits tout en respectant mieux l'environnement ; le consommateur, de son côté, veut plus de transparence et de sécurité pour la production des aliments, ce qui implique notamment la notion de traçabilité. L'agriculture de précision permet d'envisager des réponses adaptées pour ces différents objectifs.

Toutefois, les freins à son développement sont bien réels : l'expertise agronomique correspondant à la gestion intraparcellaire est encore à construire, et va nécessiter un effort important de recherches et de production de références pluriannuelles tant agronomiques qu'économiques, pour évaluer l'in-

térêt de cette approche dans différents contextes. On manque également de capteurs : capteurs de rendement dans toutes les filières, capteurs des caractéristiques du sol et de la culture pour nourrir l'expertise agronomique. Des résistances culturelles comme celles qui freinent la pénétration de la micro-informatique en agriculture sont peut-être aussi à craindre (Jacquin, 1997).

L'agriculture de précision ne se développera donc que progressivement, d'autant plus vite que les freins précédents auront été levés, avec, en perspective, une véritable intégration des filières de production agricole et alimentaire, touchant à la fois la qualité des produits et la gestion de l'ensemble des moyens de production. □

Résumé

La modernisation de l'agriculture s'est traduite par un emploi accru d'énergie et d'intrants (engrais, phytosanitaires, eau) qu'il faut aujourd'hui mieux gérer pour en optimiser l'usage et limiter les risques pour l'homme et l'environnement. Cette problématique a donné naissance à l'agriculture de précision, nouvelle approche de l'agriculture, fondée sur l'intégration des technologies de l'information et de la communication et dans laquelle le milieu (relief, sol, couvert végétal ...) est caractérisé dans toute sa variabilité spatiale et non ramené de façon classique à un ensemble homogène. Le processus de production peut ainsi être piloté localement et optimisé pour chacune des interventions culturales : travail du sol, semis, fertilisation ... L'agriculture de précision, lancée aux USA dans les années 80, s'implante aujourd'hui dans les principaux pays agricoles européens, via la cartographie de rendement en production céréalière. L'article fait le point des méthodes et outils associés à l'agriculture de précision : la mesure de la variabilité du milieu, le système de localisation DGPS, la gestion des informations, la prise de décision et enfin les matériels d'application modulée. Si le mouvement amorcé semble inéluctable, il reste de nombreux freins à lever, impliquant notamment la recherche agronomique et technologique, pour favoriser la diffusion de ce concept au sein du monde agricole. L'article présente, à ce propos, les travaux menés par le Cemagref dans le domaine de l'agriculture de précision.

Abstract

The modernization of agriculture has led to an increasing use of energy and amendments (fertilizer, crop protection products, water) that today need to be better managed in order to optimize their use and to restrict the risks for men and the environment. This problem has given birth to the accuracy farming, which is a new approach of agriculture, based on the integration of information and communication technologies and in which the medium (topography, soil, ground cover) is characterized by its whole spatial variability and not treated as an homogeneous medium. The production process may be locally monitored and optimized for each farming intervention: work on the soil, seeding, fertilization... Accuracy farming, born in the USA in the 80's, now appears in the main farming European countries, via the mapping of cereal production yield. This article summarizes the methods and tools related to accuracy farming: measurement of the medium variability, DGPS localization system, information management, decision making and, finally, modular application tools. Even though this trend seems irreversible, several hurdles still need to be handled, especially those related to agronomic and technological research, in order to ease the spreading of this concept throughout the agricultural world. In that respect, this article presents the work done by the Cemagref in the field of accuracy farming.

Bibliographie

ARROUAYS, D., BÉGON J.-C., NICOUILLAUD, B., LE BAS, C., 1997. La variabilité des milieux, Une réalité : de la région à la plante, *Perspectives agricoles*, n° 222, mars 1997, p. 8-9.

BOISGONTIER, D., 1997. L'agriculture de précision en Europe, Une maîtrise plus ou moins grande selon les pays, *Perspectives agricoles*, n° 225, juin 1997, p. 19-24.

CLARK, J., Froment, M.-A., Stafford, J., LARK, M., 1996. *An investigation into the relationship between yield maps, soil variation and crop development in the UK*. Precision agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference, June 23-26, Minneapolis, Minnesota, 433-442, ASA, CSSA, SSSA.

GERHARDS, R., 1996. *Spatial stability of weed patches in agricultural fields*. Precision agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference, June 23-26, Minneapolis, Minnesota, 495-504, ASA, CSSA, SSSA.

GRENIER, G., 1997. Informations intra-parcellaires : une masse de données à gérer, *Perspectives agricoles*, n° 222, mars 1997, p. 32-36.

LARK, R.M., STAFFORD, J.V., 1996. *Consistency and change in spatial variability of crop yield over successive seasons : methods of data analysis*. Precision agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference, June 23-26, Minneapolis, Minnesota, 141-149, ASA, CSSA, SSSA.

LE BARS, J.-M., BOFFETY, D., 1997. GPS, Un moyen de se localiser dans la parcelle, *Perspectives agricoles*, n° 222, mars 1997, p. 26-31.

MISSOTTEN, B., STRUBBE, G., DE BAERDEMACKER, J., 1996. *Accuracies of grain and straw yield maps*. Ag ENG paper 96 G-009, International Conference, Madrid, 23-26 september.

POCKNEE, S., BOYDELL, B.C., GREEN, H.M., WATERS, D.J., KVIEN, C.K., Directed soil sampling. Precision agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference, June 23-26, Minneapolis, Minnesota, 159-179, ASA, CSSA, SSSA.

ROBERT, P.C., 1997. Precision farming aux États-Unis, *Perspectives agricoles*, n° 222, mars 1997, p. 44-47.

STAFFORD, J.V., 1996. *Essential technology for precision agriculture*. Precision agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference, June 23-26, Minneapolis, Minnesota, 595-604, ASA, CSSA, SSSA.

ZWAENEPOEL, P., 1997. Les matériels d'application modulée : le moyen d'ajuster les intrants, *Perspectives agricoles*, n° 222, mars 1997, p. 36-41.

