

Gestion de l'information parcellaire – cartographie du rendement à la récolte

Michel Berducat et Daniel Boffety

La cartographie de rendement est et restera sans aucun doute le point d'entrée de la démarche « agriculture de précision »¹. Ce moyen privilégié de caractérisation de la variabilité intraparcellaire, est en effet incontournable, dans le sens où il renseigne spatialement sur le résultat final de la conduite de la culture.

L'interprétation des cartes de rendement s'appuie notamment sur une analyse de la forme des différentes zones identifiées : la présence de zones homogènes de forme géométrique sur la carte de rendement peut conduire à rechercher une explication dans les changements des pratiques culturales (ex. : condition de travail du sol, changement de variété) ou traduire un dysfonctionnement de réglage de matériels (ex. : recoupement lors d'une application d'engrais). Ces zones aux contours géométriques nets (ex. : forme rectangulaire) ont donc souvent pour origine l'intervention humaine. Au contraire, les zones de formes quelconques peuvent être liées à la variabilité naturelle de la parcelle (nature des sols, réserve en eau...) (Boisgontier, 1999), encore faut-il être sûr que cette variabilité ne provient pas, pour une part, de la réalisation des cartes de rendement elles-mêmes (ex. : technique d'interpolation).

Des publications récentes en 1998 et 1999 (voir références introduites ci-après) sur la problématique « réalisation de cartes de rendement » font état de nombreuses sources d'erreurs potentielles. La première partie de cet article rapporte certaines d'entre elles. La seconde partie

aborde différentes perspectives en terme de besoins de nouveaux capteurs embarqués sur les machines de récolte pour améliorer la pertinence des informations de rendement ou remonter à la connaissance de nouvelles grandeurs, liées par exemple à la qualité de la récolte.

Caractérisation du rendement

■ *Principe des différents capteurs de débit*

Le schéma de la figure 1 (p. 54), proposé par l'université de Hohenheim-Allemagne (Kutzbach et Wachter, 1996), donne une représentation des différentes techniques développées pour caractériser le rendement sur des machines de récolte en général.

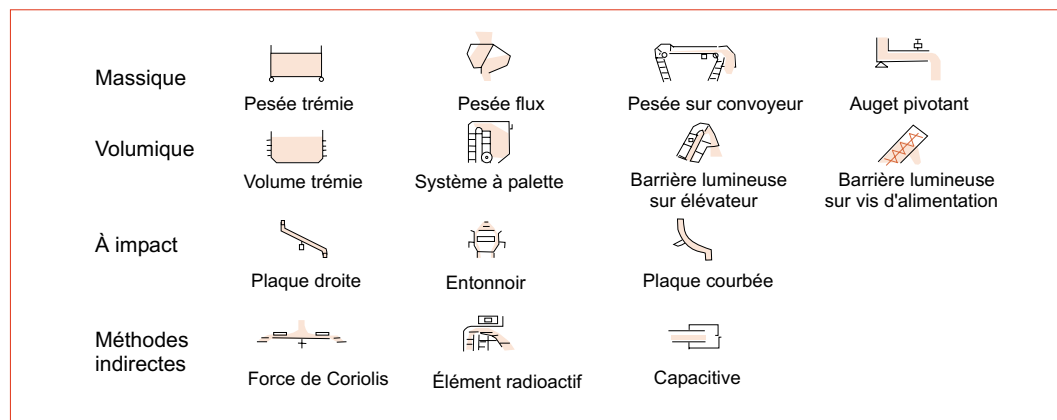
Une classification en quatre familles est proposée, dont trois plus homogènes, reposant respectivement sur les techniques de pesée, de mesure de volume, et d'impact sur des plaques de différentes géométries.

■ *Identification des principales sources d'erreur sur cartes de rendement en céréales*

Le développement des capteurs de débit de grain sur moissonneuse-batteuse date du début des années 90. Hormis Massey Ferguson qui propose en Europe (hors France) un capteur basé sur la mesure de l'affaiblissement de rayons gamma (source radioactive Americium) traversant le flux de grain à la sortie de l'élevateur,

1. Cet article résulte d'une communication présentée à Dijon les 29 et 30 mai 2000 au colloque « Agriculture de précision, avancées de la recherche technologique et industrielle », organisé par le Cemagref et l'Enesad. Les actes de ce colloque sont diffusés par Educagri Éditions.

Michel Berducat et Daniel Boffety
Cemagref –
Clermont-Ferrand,
24, avenue des
Landais
BP 50085, 63172
Aubière Cedex



► Figure 1 – Classification et principes des capteurs de débit (source Kutzbach et Wachter, 1996).

tous les autres constructeurs de moissonneuses-batteuses, ou équipementiers électroniques dans le machinisme agricole intervenant en sous-traitance des premiers, ou sur le marché de la seconde monte, proposent :

- soit un système massique, dit « capteur à impact », mesurant la « force » exercée par le flux de grain sur une plaque placée à la sortie de l'élévateur (ex. : Agtronix (Moissonix 3) – capteur Track Micro-USA ; Case IH (AFS) ; John Deere (Greenstar) ; LH-AGRO (LH 565 Yield Logger) – Capteur Ag Leader-USA) ;
- soit un système volumétrique mesurant le « volume » de grain à l'aide de cellules photoélectriques entre deux pales de l'élévateur à grains (ex. : Claas (Agrocom), New Holland et RDS (Ceres 2)...) .

Les constructeurs annoncent pour ces capteurs une précision de 1 à 3 %.

On peut essayer de recouper cette information en s'appuyant sur la littérature existante. Il faut déjà faire la distinction entre précision du capteur en débit cumulé ou instantané, entre précision des capteurs de débit et précision des cartes de rendement au final ; entre ces deux derniers points en particulier, il y a une multitude d'autres éléments qui entrent en ligne de compte comme nous allons essayer de l'illustrer ci-après.

Pour aller plus loin dans l'analyse des sources d'erreurs potentielles, nous distinguerons l'acquisition des données brutes effectuée au niveau de la moissonneuse-batteuse, leurs traite-

ments réalisés ensuite par les logiciels de cartographie sur l'ordinateur de l'exploitation qui permettent d'établir les cartes de rendement.

Acquisition de données brutes

Performances des capteurs de débit cumulé ou instantané

À l'université de Hohenheim, Reitz et Kutzbach (1996) ont déterminé le débit de grain avec un capteur volumétrique à barrières lumineuses associé à un capteur d'humidité. La précision sur la totalité de la parcelle récoltée est de l'ordre de 3 %. Cependant, un maximum d'erreur de 10 % a pu être observé en conditions particulières de récolte (en pente et flux de grain très faible). Des travaux conduits par l'université américaine de l'état de Caroline du Nord (Heiniger, 1998) sur un capteur massique AgLeader 2000 montrent une précision moyenne de 2 %, bien que des erreurs jusqu'à 8 % aient été observées.

Pour valider les performances des capteurs de débit, beaucoup de centres de recherche ou instituts techniques ont utilisé la méthode de pesée par lot (ex. : pesée de la remorque à chaque vidange de la trémie de la moissonneuse-batteuse) et comparé cette mesure avec la quantité de grain totalisée par le capteur de débit (Moore et Kremmer, 1998). La précision des capteurs testés reste dans une plage de ± 5 %. Les auteurs complètent en soulignant que, par extrapolation, il est supposé (ou laissé supposer à l'utilisateur) que la précision reste du même ordre de grandeur au niveau du débit instantané (fréquence de mesure de l'ordre de la se-

conde). Les essais menés à ce niveau sur un banc d'essais approprié (1 000 kg de grain – débit de 2 kg/s à 10 kg/s) avec un capteur Massey-Ferguson à rayonnement gamma font apparaître des erreurs de $\pm 6\%$ sur le débit instantané, alors que l'erreur était seulement de $\pm 0,5\%$ sur le poids total. En conclusion, la valeur obtenue à partir de la pesée en lots, si intéressante et importante soit-elle, ne fournit aucune indication sur les performances réelles en débit instantané.

Influence de l'humidité et du poids spécifique de la récolte

Moore et Kremmer signalent également que les capteurs de débit aussi bien volumétriques que massiques sont influencés par la variation d'humidité de la récolte (ex. : variation de 4 % de l'humidité du grain à la fois spatialement et temporellement au cours de la journée sur une parcelle), justifiant ainsi la nécessité de coupler un capteur d'humidité pour corriger le rendement, ce que proposent les constructeurs. Le poids spécifique (dans lequel d'ailleurs l'humidité intervient) évolue aussi considérablement temporellement et spatialement. La variation moyenne observée sur six parcelles de blé se situe autour de 10 %.

Blackmore et Moore (1999) dans un article récent consacré à l'analyse des sources d'erreur insistent alors sur la nécessité dans l'absolu, de devoir vérifier plusieurs fois par jour la valeur du poids spécifique, dont la connaissance est indispensable sur les systèmes volumétriques pour remonter à la masse du produit récolté.

Erreur de positionnement

En plus de l'information « débit », la réalisation de cartes de rendement demande la connaissance de la position de la machine dans la parcelle. Si le GPS constitue aujourd'hui le moyen universel pour se localiser, il est nécessaire de travailler en mode différentiel pour obtenir une précision métrique ; compromis entre une précision acceptable pour réaliser les cartes et coût. À noter que la précision obtenue (de l'ordre d'une dizaine de mètres) depuis la suppression du code SA décidée par les USA au 01/05/2000 reste encore insuffisante pour une utilisation du GPS en mode non différentiel.

Bien qu'il existe diverses sources bon marché de corrections différentielles (ex. : station de

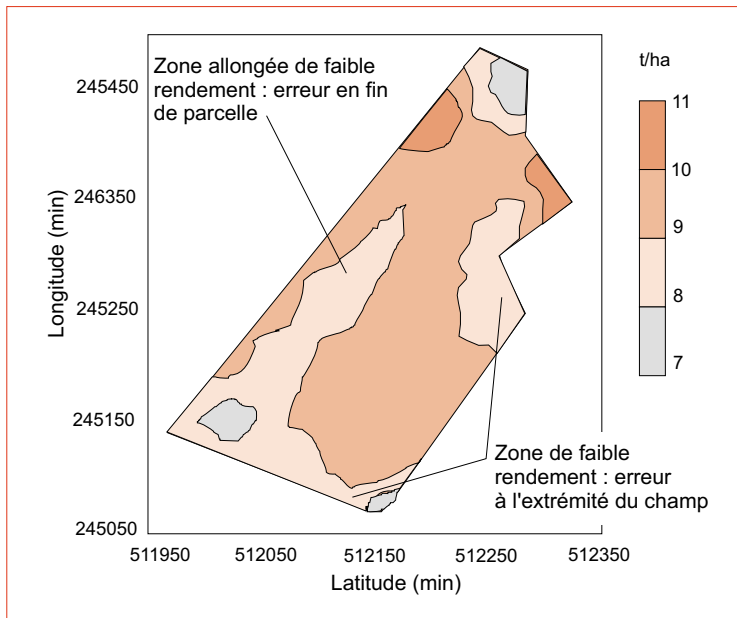
référence, balises côtières...), tous les constructeurs de moissonneuses-batteuses ont bâti leur offre à partir de prestations de service du secteur privé (Racal, Omnistar), qui permet de récupérer les corrections différentielles moyennant le paiement d'une redevance.

Simplifiant considérablement les problèmes de mise en œuvre rencontrés préalablement par les constructeurs en fonction de la situation géographique, cette approche qui, en contrepartie, a un coût pour l'utilisateur, a permis d'améliorer notablement la robustesse de la localisation par rapport à l'utilisation des signaux gratuits des balises côtières quand cela était possible. Occasionnellement, cependant, des pertes de signal GPS ou de corrections différentielles, dues par exemple à des masquages, peuvent encore conduire à des manques de données ou des données erronées. Si le nombre de points affectés est faible, les répercussions sur l'élaboration de la carte seront réduites, compte tenu du fait qu'en situation courante, le nombre de points dont on dispose pour établir la carte est supérieur à celui nécessaire. Par contre, si l'ensemble de points concernés devient significatif, ces erreurs de positionnement dans le fichier des données brutes doivent être corrigées manuellement, aucun algorithme suffisamment performant n'ayant été encore proposé (Blackmore et Moore, 1999).

Largeur de travail effective

Dans la pratique, la largeur réelle de travail correspond rarement à la largeur de la coupe de la moissonneuse-batteuse, cette dernière servant cependant à calculer la surface récoltée (surface récoltée = largeur de coupe x distance parcourue). Les situations les plus critiques sont observées surtout à chaque fin de parcelle (ou fin d'entaille) où la bande à récolter peut être très inférieure à la largeur de coupe.

La figure 2 (p. 56), issue du même article de Blackmore et Moore, illustre notamment l'impact de cette source d'erreur (zones allongées de bas rendement). Pour réduire ce problème, beaucoup de systèmes offrent la possibilité de sélectionner par tronçon la largeur de travail. Ce mode opératoire reste cependant d'une mise en œuvre contraignante.



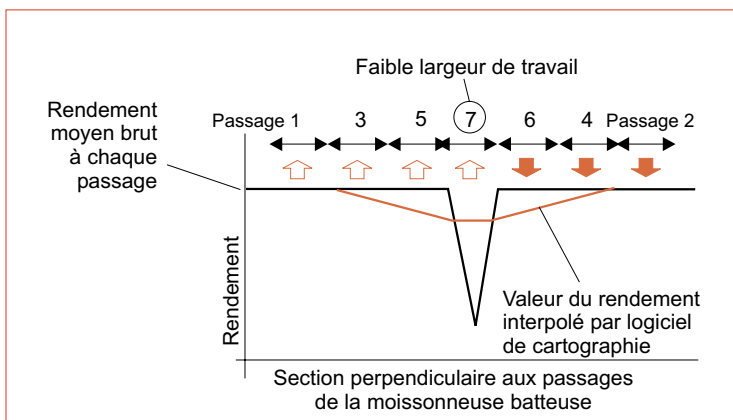
▲ Figure 2 – Illustration d'exemples d'erreurs sur cartes de rendement (d'après Blackmore et Moore, 1999).

Temps de retard

L'intervalle de temps entre le moment où la récolte est coupée à l'avant de la machine et celui marquant le passage du grain correspondant au niveau du capteur de débit peut se décliner sous trois formes différentes :

- le temps de retard en régime permanent en cours de récolte ;
- le temps de montée ou de remplissage lors du démarrage de la récolte ;
- le temps de descente ou de vidange en fin de passage.

▼ Figure 3 – Exemple du résultat d'interpolation de données brutes (d'après Moore et Kremmer, 1998).



Beaucoup de systèmes commerciaux ne font pas la différence entre ces trois temps, seule la notion de temps de retard étant considérée. Le système de Massey-Ferguson autorise cependant le chauffeur à calibrer les temps de montée et de descente (Nissen et Sodestrom, 1999).

On notera que ces trois valeurs de temps (comprises entre 10 et 40 s), qui diffèrent les unes des autres, évoluent elles-mêmes en fonction des conditions de travail, car de nombreux facteurs peuvent affecter le flux du grain dans la machine (intensité du débit, propriétés du grain [nature, propreté, humidité], pente ...).

À titre d'exemple, la figure 2 précédente illustre également ce type d'erreur à chaque extrémité du champ. De nombreux travaux sont conduits pour les réduire (Blackmore et Moore, 1999).

Traitement des données

Les logiciels de cartographie de rendement faisant appel à différentes techniques de traitement de données, des plus simples aux plus sophistiquées (ex. : moyenne arithmétique, poids inverse de la distance, krigeage) (Thylen, 1996 ; Juerschik et Giebel, 1999) permettent de réaliser les cartes de rendement à partir des données brutes recueillies.

Toutes ces techniques d'interpolation vont contribuer à lisser les erreurs de mesures (et aussi d'ailleurs les variations réelles) et donc à minimiser leurs poids, sans jamais cependant en supprimer tous les effets.

Le schéma de la figure 3 (Moore et Kremmer, 1998) illustre la capacité d'une méthode d'interpolation à lisser les erreurs dans le cas d'un artefact sur le rendement, dû à une mauvaise appréciation de la largeur réelle de travail en fin de parcelle.

Si le « pic » a été supprimé, on voit cependant que la méthode d'interpolation utilisée a conduit à créer, à l'inverse, des erreurs additionnelles dans la partie adjacente de la bande étroite d'origine.

Cette observation générale vaut pour toutes les techniques d'interpolation, aucune n'étant très supérieure à une autre, bien que chaque méthode ait ses spécificités propres, et donc un comportement différent en fonction de la nature des erreurs rencontrées.

À titre d'exemple Nissen et Soderstrom (1999) présentent les résultats fournis par quatre logiciels de traitements (MF Yieldmap, LH Agrosat, CLAAS Agromap, RDS Software) à partir des mêmes données brutes. Ils donnent (figure 4) l'histogramme de répartition en classes de rendement, réalisé à partir des données brutes et estimé par chaque logiciel (en privilégiant le mode automatique proposé en standard).

Nissen et Soderstrom, dans leur conclusion, émettent des recommandations : « les cartes de rendement doivent être interprétées avec précaution. Si l'apparence générale est conservée, chaque carte contient des caractéristiques qui ne sont pas présentes dans les autres cartes, et qui dépendent majoritairement des différentes méthodes d'interpolation utilisées ». Ils poursuivent en soulignant « que de petits changements dans les paramètres de réglage du logiciel de cartographie peuvent entraîner des différences importantes dans le résultat des cartes » et proposent « à l'utilisateur d'essayer de comprendre comment le logiciel fonctionne et peut être le plus important, de savoir comment les sources d'erreurs peuvent être minimisées dès le recueil des données au champ ».

Dans ce même ordre d'idée, Moore et Kremmer (1998) invitent à suivre un certain nombre de règles de « bonne pratique » lors de la récolte dont :

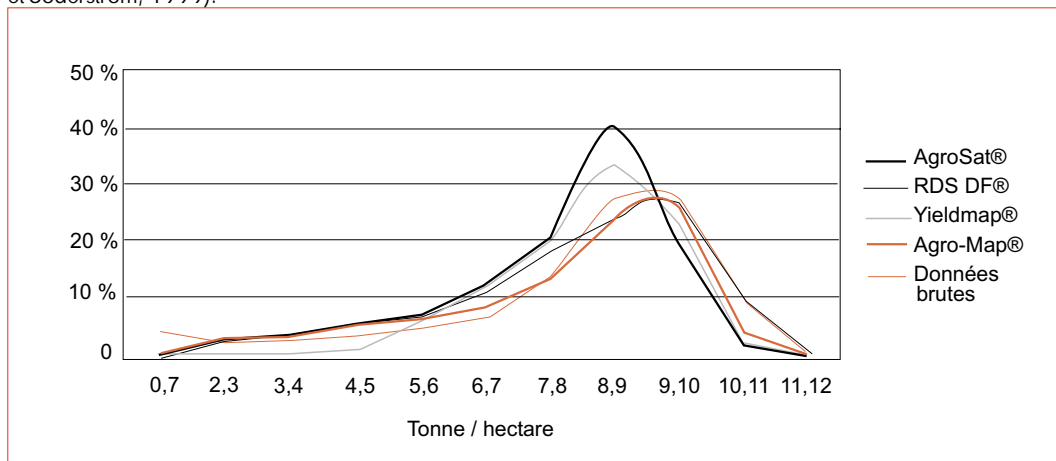
- recalibrer le capteur de rendement volumétrique aussi souvent que possible ;
- vérifier régulièrement l'encrassement du capteur de débit (ex. : colmatage par la poussière ou résidus divers) ;
- travailler toujours au maximum de la coupe et en ligne droite ;
- éviter le morcellement trop important de la parcelle (trop d'entailles) afin de réduire le nombre de bandes étroites en fin de travail ;
- relever la coupe à chaque fin de raie afin de suspendre le cumul de surface ;
- éviter le changement fréquent de vitesse d'avancement ;
- éviter si possible les manœuvres marche avant-arrière pour récolter autour des arbres et poteaux électriques ;
- abaisser la coupe toujours à la même distance du front d'attaque (répercussions sur le temps de montée en charge du capteur de débit).

■ **Généralisation des cartes de rendement à d'autres types de cultures**

De nombreuses initiatives conduites par les instituts techniques et les constructeurs sont en cours pour le développement et le test de capteurs de débit adaptés à la mesure du rendement de différentes cultures.

À titre d'exemple l'ATB (Institut für Agrartechnik Bornim) travaille sur un système par

▼ Figure 4 – Distribution classes de rendements estimées par chaque logiciel et données brutes (d'après Nissen et Soderstrom, 1999).



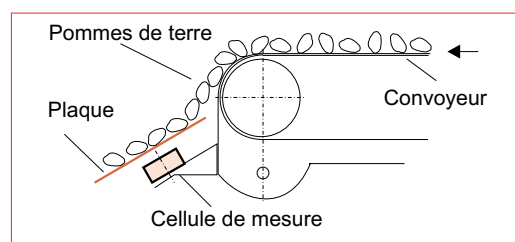
impact (figure 5) pour la mesure de débit de tubercules (pommes de terres, betteraves) (Ehlert, 1999).

Les premiers résultats d'essais sur pomme de terre, au banc de test à poste fixe, conduisent à une précision de 2-3 %. Dans le domaine de la récolte des fourrages, on citera encore les travaux réalisés par l'université catholique de Louvain (Missoten et Broos, 1997) et basés aussi sur un capteur à impact (figure 6a) ou ceux plus récents de l'ATB (Hannen et Ehlert, 1999) reposant sur le principe d'un pendule (figure 6b).

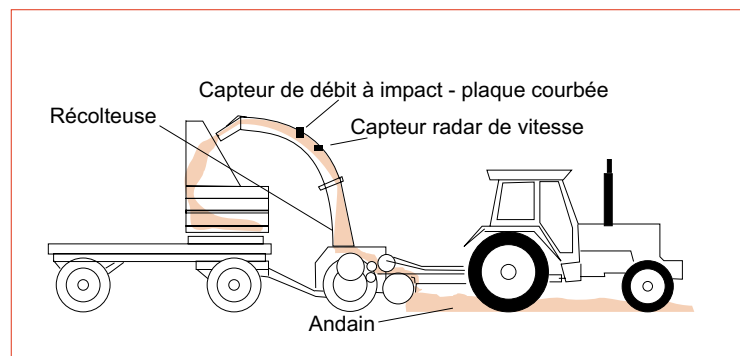
Perspectives d'évolution

■ **Besoins de nouveaux capteurs pour améliorer la pertinence des informations des cartes de rendement**

À partir de solutions existantes, ou sur la base de nouveaux principes, tous les constructeurs cherchent à améliorer leurs systèmes de cartographie de rendement (partie hardware et software).



► Figure 5 – Schéma du banc de test du capteur (d'après Ehlert, 1999).



▲ Figure 6a – Capteur à impact pour ensileuse (d'après Missoten et Broos, 1997).

Si l'amélioration de la précision des capteurs de débit en instantané reste certainement une priorité, il faut encourager l'intégration de nouveaux capteurs pour améliorer la pertinence des informations nécessaires à la constitution des cartes de rendement ou à leur interprétation.

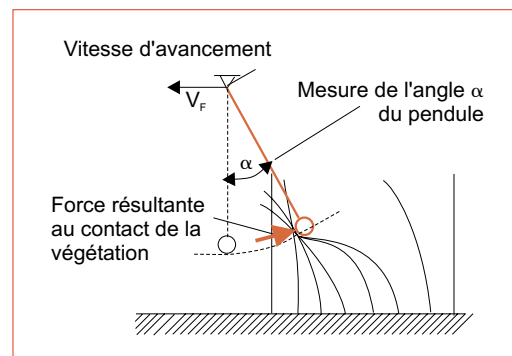
Maîtrise de la largeur réelle de travail

Compte tenu de sa répercussion importante sur le résultat final, la connaissance de la largeur réelle de travail dans le cas de la récolte des céréales mérite une attention particulière. Le recours à des systèmes de positionnement plus précis (ex. : précision décimétrique, voire centimétrique offerte par le GPS « cinématique ») pourrait constituer une voie, à condition que les coûts de ces systèmes diminuent. Un système tel que le « Laser Pilot® » présenté par la société Claas lors du dernier salon Agritechnica, assurant le guidage automatique de la moissonneuse-batteuse par détection du bord de fauche pourrait, peut-être, permettre également d'apprécier la largeur de travail de la bande restante en fin de parcelle (sachant que le reste du temps, en condition normale, le système de guidage doit permettre indirectement une pleine utilisation de la largeur de coupe).

Une autre solution serait le recours à des capteurs spécifiques de largeur de travail, tel que le propose l'université catholique de Louvain (De Baerdemaker et Strubbe, 1996) (figure 7).

Compléments à la cartographie de rendement : travaux menés par le Cemagref

La cartographie de rendement constitue un moyen privilégié pour obtenir une représenta-



▲ Figure 6b – Principe du capteur de type pendule (d'après Hannen et Ehlert, 1999).

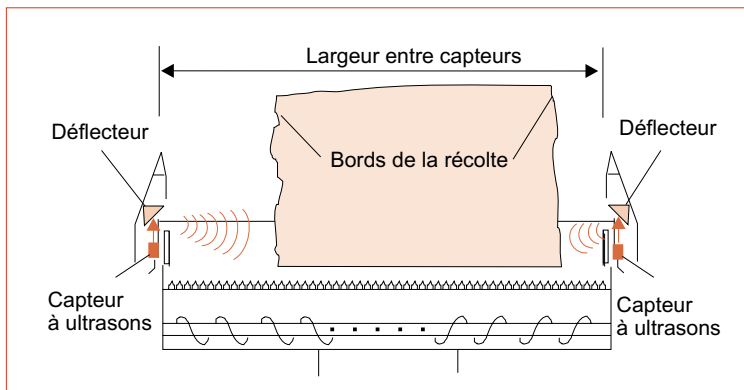
tion concrète de la variabilité intraparcellaire. S'il est communément admis de la nécessité de disposer au moins de trois années consécutives d'enregistrement, avant de tirer des enseignements significatifs, il n'en demeure pas moins que l'interprétation des cartes de rendement reste souvent difficile, les causes explicatives étant multiples et variées. Seule la prise en compte d'éléments complémentaires peut s'avérer déterminante pour lever des ambiguïtés, faciliter l'interprétation.

Le Cemagref investit donc sur le développement de nouveaux capteurs, destinés à être embarqués sur les machines agricoles et permettant la prise en compte de nouveaux paramètres locaux.

À titre d'exemple, on citera les travaux conduits par l'équipe de Clermont-Ferrand depuis 1999 avec l'INRA et l'INA-PG de Thiverval-Grignon sur la cartographie de la surface foliaire du blé à partir de données radiométriques. L'objet est ici d'utiliser l'information taux de réflectance de la couverture végétale, à différents stades végétatifs pour affiner l'interprétation des cartes de rendement.

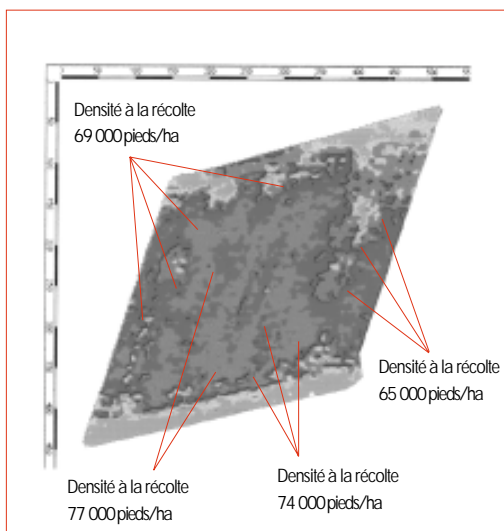
Dans un autre domaine, celui de la culture de maïs, compléter la cartographie des rendements à la récolte par une cartographie de peuplement peut s'avérer très intéressant, pour l'agriculteur ou le semencier, pour accéder dès la récolte à la connaissance des facteurs influant sur le rendement final. Des résultats de cartographies obtenus en 1998 (figure 8) ont montré des zones où les rendements par hectare évoluaient entre 100 et 170 q de grain humide (27 % d'humidité) pour des densités de peuplement contrôlées manuellement, respectivement comprises entre 65 000 et 77 000 pieds. La densité théorique de semis avait été fixée à 92 000 pieds/ha (Boffety et Coudrais, 2000).

Les zones décelées à faible densité de peuplement étaient caractérisées par des manques de pieds sur la ligne de semis dès la levée du maïs. Ce résultat issu de conditions météorologiques post-semis défavorables est à associer à la variabilité des sols de la parcelle, notamment la présence de zones plus argileuses. Cette analyse intraparcellaire de certaines composantes du rendement nécessite un travail d'observation contraignant à mettre en œuvre au sein



d'une parcelle. En 1999, l'instrumentation d'un bec cueilleur à maïs 5 rangs avec des dispositifs de comptage électromécaniques des pieds de maïs couplé à un système d'acquisition avec géoréférencement par GPS a permis d'évaluer la variabilité des densités de peuplement d'une parcelle de maïs simultanément à celle des rendements. Des cartographies de densité de peuplement et de rendement ont donc pu être établies. La précision des systèmes de comptage utilisés sur chacun des rangs du bec cueilleur, de l'ordre de 10 %, a limité cependant la résolution et l'interprétation des cartes de peuplement. Les améliorations apportées depuis, seront testées lors de la campagne de récolte de mai 2000 et permettront des gains significatifs au niveau de la précision.

▲ Figure 7 – Mesure de la largeur réelle de travail (d'après De Baerdemaker et Strubbe, 1996).



◀ Figure 8 – Relation entre rendement et densité de pieds à la récolte d'après une carte rendement maïs en 1998 – densité théorique de semis 92 000 pieds/ha.

■ **Avancées européennes en matière de positionnement par satellites**

Les enjeux considérables en matière de système de navigation pour les transports aériens, terrestres (automobiles, transports routiers, rails...) ont poussé l'Union européenne à réagir face à la dépendance de fait vis-à-vis des systèmes militaires américains (GPS) et russes (Glonass) (RDT 2000).

La réponse apportée par le programme GNSS (Global Navigation Satellite System), conduit dès 1995 par le groupe tripartite européen, Commission européenne, Agence spatiale européenne, Eurocontrol², (European Organisation for the Safety of Air Navigation), est structurée en deux étapes :

- GNSS 1 ou EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) utilisera des satellites géostationnaires (Inmarsat 3 et Artemis) pour accroître les performances de couverture et la disponibilité des systèmes GPS et Glonass en fournissant des signaux supplémentaires compatibles avec les réseaux précédents (notion d'augmentation de système), et en calculant également des corrections différentielles pour une meilleure précision de localisation (Bories, 2000).

Dans la pratique, ce système, qui doit être opérationnel en 2002 ou 2003 selon les sources, permettra de disposer gratuitement des corrections différentielles. La précision de positionnement annoncée (4 à 5 m) est, par contre, encore insuffisante pour les applications agricoles, telle que la réalisation de cartes de rendement, même si des gains sont à espérer, par exemple, avec une infrastructure de stations de corrections et de traitement au sol répartie de façon optimale sur tout le territoire couvert.

- GNSS 2 ou Galiléo, projet de deuxième génération qui, d'ici 2008, devrait déployer en orbite moyenne un réseau européen de 24 satellites de positionnement et de localisation à la fois autonome et interopérable avec les normes américaines et russes. Actuellement dans la phase de définition, c'est au second semestre 2000 que sera prise la décision définitive de réaliser Galiléo lors d'un Conseil européen des ministres des transports.

Trois types de services sont à ce jour avancés.

- OAS (Open Access Service), service gratuit grand public offert à tous les utilisateurs civils ;

- CAS 1 (Controlled Access Service level 1), service payant à accès contrôlé pour les applications commerciales ;

- CAS 2 (Controlled Access Service level 2), service payant à accès contrôlé pour les applications mettant en jeu la sécurité des personnes ou de type militaire.

■ **Caractérisation de la qualité de la récolte**

La gestion de la production à l'échelle intraparcellaire offerte par l'agriculture de précision, ouvre de vastes champs d'investigations. Au-delà des aspects liés aux rendements de la culture, on peut aussi chercher à s'intéresser aux caractéristiques de qualité du produit, et à leurs répartitions spatiales au niveau de la parcelle.

Dans le cadre des céréales (blé, orge), le taux de protéine constitue un critère majeur de qualité. Des travaux récents réalisés en Belgique (Reyns, 1999) montrent que, pour une parcelle de blé de 10 hectares, le taux de protéine d'échantillons prélevés manuellement et analysés au laboratoire par spectrométrie proche infrarouge, varie de 10 à 15 % avec une moyenne à 13 %.

En Angleterre, Stafford (1999) introduit l'intérêt de pouvoir disposer avant la récolte d'une carte de qualité, de façon à récolter séparément les différentes zones. Une autre possibilité, avance-t-il, serait de bénéficier d'un capteur directement embarqué sur la moissonneuse batteuse pour la mesure en temps réel du taux de protéine afin de réaliser un tri directement dans 2 ou 3 trémies indépendantes.

Thylen et Algerbo (1999) en Suède, avance pour sa part une plus value de 49 \$/ha en valorisant pour la brasserie une partie d'une récolte d'orge qui aurait été « triée à la source ».

Tous ces exemples empruntés au domaine de la recherche, témoignent de l'intérêt de disposer d'un capteur de protéines temps réel embarqué sur la machine de récolte. Sur cet aspect, les travaux qui semblent les plus avancés sont a

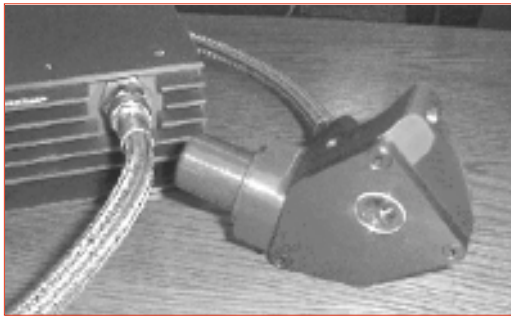
2. Cette dernière se chargeant de valider le système en regard des exigences de l'aviation civile.

priori ceux réalisés outre-Atlantique par l'université du Montana en relation avec les sociétés Textron System et Milestones Technologie (Long, 1997) (photo).

Conclusion

La réalisation des cartes de rendement à la récolte est et restera un maillon-clé de l'agriculture de précision.

Les différentes sources d'erreurs ou *artefacts* étant de mieux en mieux identifiés, des progrès seront réalisés pour tendre vers une représentation la plus proche possible de la réalité de terrain, condition indispensable pour que le management et les prises de décision ultérieures (ex. : modulation des intrants) s'appuient sur des bases solides et véritables.



◀ Photo – Capteur IR de taux de protéines embarqué sur moissonneuse-batteuse (source Textron systems).

La cartographie de rendement, mais également les cartes de paramètres qualitatifs établies à la récolte constituent de nouvelles informations qui permettront incontestablement de progresser dans les systèmes de conduite de production.



Résumé

Cet article, en s'appuyant sur des travaux menés en Europe et aux USA, évoque certaines sources d'erreurs et les précautions à prendre, en moissonnage-battage, pour obtenir des cartes de rendement aussi fiables que possible. Il présente également des travaux réalisés sur le développement de capteurs de débit pour d'autres machines de récolte. La dernière partie montre comment les nouvelles technologies développées pour l'agriculture de précision peuvent contribuer à l'amélioration de la démarche « qualité » de la production agricole.

Abstract

This article, through works realized in Europe and USA, gives errors and precautions to take into account, in order to obtain corrects yield maps with combine harvesters. It presents also some researches on the development of flow sensors for others reaping machines.

The last part shows how new technologies developed for precision agriculture can help in future to control quality criteria of the agricultural production.

Bibliographie

- BERDUCAT, M., 2000. Caractérisation du rendement et de la qualité de la récolte, Agriculture de précision, p. 237-248. *Actes du colloque Cemagref – Enesad, Dijon 29-30 Mai 2000*, Éducagri Éditions.
- BLACKMORE, MOORE, 1999. Remedial correction of yield map data. *Precision Agriculture*, Vol. 1, N °1, January 1999, p. 53-66.
- BOISGONTIER, 1999. Mesure de rendement parcellaire, Une pratique de plus en plus fréquente. *Perspectives Agricoles*, n° 249, sept 1999, p. 50-53.
- BORIES, 2000. Galileo, la navigation européenne par satellites. *Revue des télécommunications*, n°4, 1999, p. 286-291.
- BOFFETY, D., COUDRAIS J.-P., VIGIER, F., 2000. Mise en œuvre de cartographies de rendement et de peuplement en culture de maïs. *Colloque UMR – ENESAD – Agriculture de Précision, Avancée de la recherche technologique et industrielle, Dijon, 29-30 mai 2000*, p. 300.
- DE BAERDEMAEKER, STRUBBE, 1996. Accuracies of grain and straw yield map. *Proceedings of the 3th International Conference on Precision Agricultural W.E (Eds), ASA/CSSA/SSSA Madison, WI, USA*, p. 713-722.
- EHLERT, 1999. Measuring Mass Flow of Potatoes for yield mapping. *2 European Precision Farming*, p. 797-804.
- HAMMEN, EHLERT, 1999. The Pendulum-meter, A new on line sensor for determining grass yield for site specific farming. *2 European Precision Farming*, p. 781-787.
- HEINIGER, 1998. The role of Yield Maps in increasing Agricultural Productivity, Raleigh. *North Carolina state university, trimble conference*, 10 p.
- JUERSCHIK, GIEBEL, 1999. Processing of point data from combine harvesters for precision farming, ATB institute. *2nd european conference on precision agriculture*, p. 297-307.
- KUTZBACH, WACHER, 1996. Developments in European combine harvesters, paper 96 A - 069 - AGENG 96, Madrid.
- LONG, 1997. On the go grain sensing is near, Better Europ with plant food. *Potash & Phosphate Institute*, 81, p. 20-23.
- MISSOTEN, BROOS, 1997. A yield sensor for forage harvester. *Proceeding of the 1st European Conference on precision Agriculture*, p. 529-537.
- MOORE, KREMMER, 1998. An investigation into the factors influencing the accuracy of yield maps. *The International Fertiliser Society, Proceeding n °421*, 60 p.
- NISSEN, SODERSTROM, 1999. Mapping in precision farming, From the farmers perspectives. *Sweden. 2nd european conference on precision agriculture*, p. 655-664.
- REITZ, KUTZBACH, 1996. Investigations on a particular yield mapping system for combine harvesters, *Computers and Electronique in Agriculture*, Special issue, vol. 14 (2, 3), p. 137-150.
- REYNS, 1999. Site specific relationship between quality and yield. *2nd European conference on Precision agriculture*, p. 665-675.
- RDT Info, 2000. *Magazine de la recherche européenne*, 5^{ème} programme cadre, février 2000.
- STAFFORD, 1999. An investigation into the within-field spatial variability of grain quality. *2nd European conference on Precision agriculture*, p. 353-359.
- THYLEN, ALGERBO, 1999. Grain quality variations within field of malting barley. *European conference on Precision agriculture*, p. 287-295.
- TYLEN, 1996. The control of errors in momentary yield data from combine harvester, *J. agric. Engng. Res*, 1996, p. 271-278.