

ITADA

**Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique
Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landwirtschaft**



PROGRAMME ITADA III (2002-2006)

RAPPORT FINAL DU PROJET 02

Technologies avancées pour la modulation intraparcellaire des intrants

Septembre 2006

Projet cofinancé par l'initiative communautaire INTERREG III A Rhin supérieur Centre-Sud

**Secrétariat ITADA : 2 allée de Herrlisheim, F- 68000 COLMAR
Tel.: 00333 89229550 Fax: 00333 89229559 eMail: itada@wanadoo.fr www.itada.org**

ITADA

Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique
Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landwirtschaft

Le programme d'actions ITADA III est placé sous la maîtrise d'ouvrage du Conseil Régional d'Alsace et cofinancé par :

- le Fonds Européen pour le Développement Régional (programme INTERREG III Rhin supérieur Centre-Sud),
- le Ministère de l'Alimentation et de l'Espace Rural du Land de Bade-Wurtemberg,
- le Ministère de l'Agriculture français
- le Conseil Régional d'Alsace,
- l'Agence de l'Eau Rhin Meuse,
- les Cantons suisses de Bâle Ville, Bâle-Campagne, Argovie
- la Confédération helvétique

Projet 02

Technologies avancées pour la modulation intra-parcellaire des intrants

Chef de projet : Dr. R. Vetter, IfuL, Müllheim D
Dr. P. Reidelstürz; Gisgeo GmbH, Freiburg

Partenaires : F. Juncker Schwing, ARVALIS-Institut du végétal, Colmar F

Durée du projet : 2002 - 2005

Institut für umweltgerechte Landwirtschaft, D-Müllheim (IfuL)

Gisgeo GmbH, D-Wittbrietzen und Emmendingen

Arvalis - Institut du Végétal, F- Colmar



SOMMAIRE

1. Introduction	5
1.1 Position du problème	5
1.2 Objectifs	6
1.3 Situation initiale	7
2 Matériel et méthodes	23
2.1 Expérimentations	23
2.1.1 Parcelles d'essais en Alsace	23
2.1.1.1 Description des 2 parcelles étudiées en Alsace	25
2.1.1.1.1 Variabilité agronomique	25
2.1.1.1.2 Images satellite	25
2.1.1.1.3 Mesure de résistivité	25
2.1.1.1.4 Etude géostatistique	26
2.1.1.2 Expérimentation réalisée en 2003	27
2.1.1.3 Expérimentation réalisée en 2004	31
2.1.2 Parcelles d'essais en Bade-Wurtemberg	37
2.1.2.1 Description des sites expérimentaux	37
2.1.2.2 Etudes de la variabilité	39
2.1.2.2.1 Cartographies du rendement à la récolte	39
2.1.2.2.2 Analyses des reliquats en azote minéral Nmin	43
2.1.2.2.3 Analyses du sol	43
2.1.2.2.4 Récoltes manuelles sur placettes	43
2.1.2.2.5 Inventaires des accidents de culture et dégâts	44
2.1.2.2.6 La mesure de la conductivité électrique avec EM38	44
2.1.2.2.7 Mesure des réserves en eau du sol	47
2.1.2.3 Modulation des applications d'azote	49
2.1.2.3.1 Modulation de l'application d'azote (technique offline) en 2003	51
2.1.2.3.2 Réalisation d'une carte d'application d'azote interparcellaire selon la méthode offline (bonnes pratiques agricoles) en 2004	64
2.1.2.3.3 Application d'azote au niveau intraparcellaire intégrant un modèle de croissance (Apollo) en 2005	72
2.1.2.3.4 Mise en œuvre d'une méthode online disponible (Cropmeter)	80
2.1.2.3.5 Tests du potentiel des méthodes de télédétection	82
2.1.2.3.6 Réduction de la charge de travail lors de l'obtention de la carte d'application par l'approche cartographique	92
2.1.2.3.7 Etudes de l'influence de différentes doses minimales prédéfinies	97
2.2 Enquête sur l'utilisation de l'agriculture de précision en Alsace et en Bade-Wurtemberg	102
2.2.1 Questionnaire	103
2.2.2 Réalisation de l'enquête	104
3 Résultats	106
3.1 Résultats des essais en Alsace	107
3.1.1 Etats des lieux des 2 parcelles étudiées en Alsace	107
3.1.1.1 Variabilité agronomique	107
3.1.1.2 Images satellite	111
3.1.1.3 Mesure de résistivité	112
3.1.1.4 Etude géostatistique	115
3.1.1.5 Conclusion	116
3.1.2 variation de la densité de semis (2003)	117
3.1.3 Variation de la dose d'azote (2004)	125
3.2 Résultats des essais en Bade-Wurtemberg	133
3.2.1 Résultats relatifs à la variabilité	133
3.2.1.1 Distribution des rendements	133

3.2.1.2	Variabilité du reliquat d'azote	136
3.2.1.3	Détermination de la variabilité à l'aide de EM 38	140
3.2.1.4	Etudes relatives à la capacité de rétention d'eau des sols.....	140
3.2.2	Résultats relatifs à la faisabilité de la modulation	143
3.2.2.1	Aptitude à un usage pratique de l'approche cartographique	143
3.2.2.1.1	Complications.....	143
3.2.2.1.2	Potentiel lié à l'extension de la méthode en direction d'une exploitation en flots de parcelles.....	154
3.2.2.1.3	Potentiel lié à l'intégration d'une simulation de croissance	155
3.2.2.1.4	Potentiel lié à l'intégration de données de télédétection	158
3.2.2.1.5	Résumé des approches de transfert de l'approche cartographique	174
3.2.2.2	Aptitude à un usage pratique de l'approche online	176
3.2.2.2.1	Complications.....	176
3.2.2.2.2	Potentiel de l'approche online testée.....	177
3.2.2.2.3	Potentiel lié à l'intégration d'autres méthodes online	179
3.2.2.2.4	Résumé des solutions possibles de transfert de l'approche online dans la pratique	181
3.2.3	Résultats relatifs à l'impact de la modulation	182
3.2.3.1	Impact sur les reliquats d'azote	182
3.2.3.2	Impact sur le rendement.....	190
3.2.3.3	Impact de la modulation sur le niveau de fertilisation.....	197
3.2.3.4	Bilan d'azote en cas de modulation (respect de l'environnement)	203
3.2.3.5	Rentabilité de la modulation	211
3.3	Résultats de l'enquête sur l'application de l'agriculture de précision en Alsace et en Bade-Wurtemberg.....	214
3.3.1	Partie descriptive : les exploitations.....	214
3.3.2	Les types d'exploitations.....	214
3.3.3	Les surfaces	216
3.3.4	Type de sols et analyses	219
3.3.5	Répartition des cultures	220
3.3.6	Homogénéité des parcelles	221
3.3.7	Exploitation et travaux agricoles	222
3.3.8	Le conseil agricole	223
3.3.9	Fertilisation	224
3.3.10	L'informatique	225
3.3.11	Connaissance et utilisation d'un GPS.....	225
3.3.12	Niveau d'information relative à l'agriculture de précision	226
3.3.13	Intérêts vis à vis de l'agriculture de précision	226
3.3.14	Motivations pour la mise en oeuvre de l'agriculture de précision.....	227
3.3.15	Acceptation à investir dans l'agriculture de précision	227
3.3.16	Expériences acquises en agriculture de précision	231
3.3.17	Avantages et inconvénients.....	231
3.3.18	Partie analytique : relation entre les facteurs individuels	232
4	Discussion des résultats	236
4.1	Discussion des résultats d'essais.....	236
4.1.1	Utilité des résultats	236
4.1.2	Mise en oeuvre pratique des résultats.....	240
4.1.3	Validation des résultats.....	241
4.2	Discussion des résultats de l'enquête	247
5	Conclusion	248
6	Résumé.....	251
7	Répertoires.....	257
	ANNEXES	271

1. Introduction

1.1 Position du problème

La date, la quantité et la façon d'apporter les intrants ont toujours été source d'interrogations pour les exploitations agricoles.

La multiplicité des possibilités d'apporter un intrant a recouvrée une nouvelle dimension depuis que l'utilisation de satellites géostationnaires a rendu possible la localisation par géo-positionnement et aussi la modulation d'une intervention.

La position exacte d'outils agricoles peut être déterminée en temps réel grâce au DGPS (LUDOWICY, SCHWAIBERGER et LEITHOLD (2002); www.garmin.com ; www.magellangps.com).

Par cet intermédiaire, la réalisation d'un mode d'exploitation adapté au contexte local peut être améliorée en passant d'un niveau d'intervention forfaitaire moyen pour la parcelle à un niveau de modulation intra-parcellaire..

La combinaison avec la technologie moderne des capteurs conduit à la possibilité de l'enregistrement en temps réel et de la localisation intra-parcellaire de nombreux paramètres sur la parcelle.

Parmi ces possibilités, il y a la mesure géocodée continue et intra-parcellaire du rendement pour les espèces récoltées à l'aide d'une moissonneuse batteuse (MB).

A partir de cela, il s'ouvre pour les intrants des possibilités d'application de précision, différenciées à l'intérieur de la parcelle (modulation). Des solutions techniques sont ainsi proposées pour l'exploitation intra-parcellaire modulée pour par ex. le travail du sol, le semis, la fertilisation et la protection de la culture (www.preagro.de/index.php3).

Une telle agriculture de précision essaye de mieux adapter les interventions agricoles aux besoins des plantes, en prenant largement en compte les conditions naturelles et l'environnement. Différents objectifs sont poursuivis, tels que par exemple :

l'optimisation des coûts de production par l'optimisation de l'emploi des intrants,

l'amélioration du rendement des cultures grâce à une meilleure connaissance du rendement potentiel d'une parcelle,

une meilleure protection de l'environnement par conséquence d'un meilleur ajustement des intrants

de plus, les informations produites alimentent une base pouvant aider à justifier des décisions et favoriser la documentation de la traçabilité que réclament les clients.

Afin de pouvoir mettre en œuvre une agriculture de précision conforme à ces objectifs, trois étapes sont nécessaires, à savoir :

- mise en évidence et description de la variabilité intra-parcellaire
- prise en compte de cette variabilité lors des décisions par la modulation des apports d'intrants et finalement :
- la mise en oeuvre des décisions de modulation sur la parcelle

Dans la suite du rapport, toutes les possibilités de mise en œuvre de l'agriculture de précision envisageables pour atteindre une modulation des intrants à l'échelle intra-parcellaire dans les conditions particulières des petites structures de la plaine du Rhin supérieur à l'aide de „technologies avancées, sont examinées.

1.2 Objectifs

Conformément au titre du projet « technologies avancées de modulation intraparcélaire des intrants en parcelle individuelle ou en groupe de parcelles», deux aspects essentiels de l'agriculture de précision sont considérés dans le cadre du projet. Il s'agit

- des technologies avancées et
- de la modulation des intrants.

Par définition, le terme *technologie* renvoie à toutes les „techniques et savoirs dans un domaine de travail technique“ (BÜNTING K.D., 1996).

L'adjectif *avancée* peut être compris d'un côté sous le sens de « qui accélère, active ». On va donc considérer les technologies qui ont pour objet de permettre d'avancer dans le thème de la modulation. D'un autre côté, „avancée“ peut être aussi pris dans le sens de „moderne“ ou „de pointe“. Les développements des technologies doivent tenir compte des deux sens .

Le terme de *modulation* est défini comme la capacité à modifier quelque chose dans « son intensité ou bien dans l'art et la manière de faire ». On peut le comprendre comme la capacité à mettre en évidence quelque chose de manière différente (BÜNTING K.D., 1996).

La modulation des intrants est donc comprise comme l'adaptation de leurs applications aux différences intérieures aux parcelles. Ainsi, on détermine les plus petites unités homogènes de la parcelle et l'adaptation des techniques culturales se fait en fonction de ces petites unités sous la notion de „modulation intraparcélaire des intrants“.

Dans le présent projet, l'application de la fertilisation azotée est l'objet principal de l'intérêt porté à la modulation intraparcélaire à l'aide de technologies avancées. A ce niveau, on ne s'arrête pas à considérer la réalisation à une parcelle individuelle mais aussi à la possible application agrégative dans laquelle la parcelle est prise en compte au sein de la gestion d'un lot de parcelles.

A côté du test du potentiel de différentes technologies il a été également envisagé d'enquêter le comportement des agriculteurs vis à vis du thème et éventuellement de rechercher de possibles solutions afin de contourner les freins à la mise en œuvre de la modulation des intrants.

1.3 Situation initiale

(1) Etat actuel de la technique

Il faut constater que dans le domaine de **l'agriculture de précision**, un mouvement très dynamique s'est mis en œuvre dans le secteur des technologies. Les outils et les technologies existantes mais aussi de nouvelles applications font l'objet de nouveaux développements en permanence et testés dans des essais. Jusqu'à présent, il n'existe pas vraiment une technique qui se soit véritablement établie. Des nouveautés arrivent régulièrement sur le marché et cela influence sans aucun doute la mise en oeuvre concrète de l'agriculture de précision, car une évolution permanente et la poursuite des progrès apportent avec elles une insécurité dans le choix de technologie ou pour le moins dans les projets d'investissement.

Répondant à un tel développement rapide et dynamique, de nouvelles publications apparaissent aussi en permanence faisant le point sur l'état actuel. Sur ce point, il convient de prendre en compte quelques unes des multiples publications afin de pouvoir donner une idée du processus de développement en cours.

Les publications sur le développement de l'agriculture de précision sont rassemblées sous les chapitres thématiques :

- Généralités sur l'agriculture de précision
- Développements dans le domaine des applications techniques
- Développement dans le domaine des capteurs en ligne
- Développement dans le domaine du pilotage

En Allemagne, l'hebdomadaire « WOCHENBLATT MAGAZIN (3/2004) » présente de manière complète des **informations générales sur l'agriculture de précision**. Il y est conseillé d'utiliser des récepteurs GPS robustes. Il y est aussi présentée l'importance du système LBS/ISO BUS et la nécessité de points de découpe normés.

Dans AGRA-EUROPE (17/2004), il est rapporté qu'une initiative de standardisation a été portée par le centre scientifique de l'Université de Weihenstephan, avec pour objectif d'aider à la percée de l'agriculture de précision. Afin de prendre en compte la problématique des échanges de données entre logiciels et supports de marques spécifiques, plusieurs normes ISO sont prévues. De bonnes bases existent déjà avec la standardisation actuelle du système agricole BUS (LBS) (DLG-Merkblatt 317).

RÖSCH C. et DUSSELDORP M. (2005) jugent que la navigation satellitale et la technique de modulation pilotée par ordinateur peuvent être déjà mis en oeuvre ou se trouvent juste avant leur maturité d'application. Au contraire, AGRA-EUROPE (10/2004) juge que jusqu'à présent, il n'y a pas encore de véritables progrès pour la mise en oeuvre en agriculture de système de géopositionnement GPS. De même, GANDORFER M. et HEIßENHUBER A. (2003) jugent, que dans de nombreux cas, les attentes mises dans la modulation des apports de fertilisants N sur le plan économique ne sont actuellement pas satisfaites.

Le BW AGRAR cite WERNER A. (2005) que pour ce qui concerne la modulation intraparcellaire de la fertilisation azotée, la technologie de l'information peut s'utiliser de manière indépendante de la taille des parcelles et du site.

Il apparaît clairement combien est récente la technologie de l'usage du GPS en agriculture avec l'exemple de la société NEETZOWER AGRARHOF Peenetal GmbH. On y utilise la

technique GPS depuis 1997. L'exploitation appartient avec la KSG Agrar GmbH Kassow en Mecklenburg-Vorpommern aux pionniers de l'agriculture modulée (BAUERNZEITUNG, 2004). KRAMER E. und VON HASELBERG C. (2004) rapporte les domaines d'intérêt dans le développement des innovations techniques.

LANDTECHNIK (1/2004) conseille une introduction pas à pas de l'agriculture de précision et renforce l'intérêt en annonçant des gains de rendement possibles jusqu'à 4 q/ha à l'aide d'une fertilisation modulée en intraparcellaire. Le journal BAUERNZEITUNG (2002) décrit à l'aide de l'exemple de la KSG Agrar GmbH Kassow l'introduction possible de techniques de modulations intraparcellaires. WEIGERT G. et WAGNER P. (2003) présentent des règles de décision pratique pour une application d'azote modulée. ZEDDIES J. (2004) souligne la nécessité d'une surface minimale et rappelle que le nombre d'exploitations va probablement diminuer de deux tiers en une génération tandis que la taille moyenne des exploitations devrait tripler. Il cite l'ordre de grandeur de 800 à 1500ha pour lequel une bonne valorisation des grosses machines agricoles serait atteint. MOHN R. (2005,b) cite prenant en compte les conclusions du rapport PREAGRO – un seuil d'environ 300ha, pour lequel la mise en œuvre des technologies de l'agriculture de précision serait intéressante.

RECKLEBEN Y. (2003) fait état du potentiel d'amélioration de l'agriculture de précision par l'intégration de la prise en compte de la qualité, pour laquelle les différences de rendement et de protéines sont au centre de ses préoccupations. De même, il est fait mention de l'effet positif des peuplements homogènes des végétations des cultures comme il est possible de les atteindre par les techniques de l'agriculture de précision (DLZ 5/2004).

Dans les communiqués de l'académie de l'agriculture allemande (DLG Mitteilungen 11/2003), les différentes méthodes disponibles pour appréhender les différences du sol et dans les végétations sont présentées et jugées sur leur coût et leur disponibilité. Sont ainsi pris en compte : cartographie du rendement, caractérisation du sol, échantillonnage du sol, carte des sols de l'exploitation, modèle digital de cartographie du territoire (Digitales Geländemodell), mesures de la résistivité électrique du sol, capteurs pendulaire et Hydro N, cartographie des mauvaises herbes et exploitations d'images.

KERSCHBERGER M, KERSCHBERGER E. et LEITHOLD P (2004) s'intéressent au potentiel d'analyses des sols et de la fertilité en éléments fertilisants de fond pour la caractérisation de la variabilité intraparcellaire.

JANTSCHKE C., KNAPPENBERGER T et KÖLLER K. (2005) communiquent sur l'humidité du sol comme variante supplémentaire pour l'agriculture de précision. Dans un autre article, JANTSCHKE C., SPREER W., MÜLLER C. et KÖLLER K. (2005) rapportent les méthodes permettant d'améliorer des mesures d'humidité du sol. Une autre possibilité pour atteindre une fertilisation de précision repose également dans l'analyse des plantes (LEHRKE U. et MÖLLER K, 2005).

LAMP J., HERBST R., et REIMER G présentent les possibilités de cartes d'application pour une agriculture de précision à partir de cartographies digitales des sols de l'exploitation. De même BOESS J. et BENNE I. (2003) décrivent les possibilités permises par les cartes des sols de l'exploitation pour une modulation de la conduite des cultures pilotée par satellite.

Le potentiel de mesures en spectrométrie gamma pour la modulation de la conduite des cultures fait l'objet d'une présentation par SAUER J (2003).

DOMSCH H., KAISER T., WITZKE K et SACHSE H. (2003) décrivent des corrélations significatives entre la conductivité des sols et le pH ainsi que les teneurs K et Mg du sol.

L'utilisation pour une orientation de la prise d'échantillons du sol fait en particulier l'objet d'une présentation (DOMSCH, 2002).

Les intérêts et les défis posés par la variation progressive de la profondeur de semis dans le cadre de l'agriculture de précision font l'objet d'une description par KNAPPENBERGER et KÖLLER (2005), tandis que SOURELL et AL-KARADSHEH (2005) détaillent le potentiel de la modulation intraparcellaire de l'irrigation. Le thème est aussi largement abordé par AL-KARADSHEH.

AUERNHAMMER H. et ROTHMUND M. (2004) considèrent les différents systèmes de description de données et font la critique des inconvénients de l'usage exagéré de nouvelles technologies. En conséquence, l'utilisation de mini PC (pocket PC) bons marché en combinaison de la technologie GPS est largement discutée, avec la conclusion que cette solution à bas coût convient bien ma mesure des surfaces des parcelles (DLZ 5/2004), (WOCHENBLATT-MAGAZIN 3/2004).

La plaquette de la DLG n°316 informe de manière complète sur les utilisations de la technologie GPS en agriculture. PALSTEK (2005) informe sur les propriétés, les problèmes et les points à considérer en lien avec le GPS. TRUNK K. (2003) décrit des expériences acquises sur une grande exploitation avec la technologie GPS et met en avant des expériences positives pour l'optimisation du rendement et du coût de fertilisation.

L'enregistrement du rendement par la moissonneuse batteuse fait aussi constamment l'objet de discussions. Différents appareils de mesure du rendement tels que le mesureur de volume QUANTIMETER de CLAAS et CERES 2 de la société RDS ou le mesureur de masse DATAVISION FLOWCONTROL de MASSEY FERGUSON et DATAVISION II ou FIELDSTAR de FENDT, YIELD MONITOR de AGLEADER, LH565 de LH AGRO, AFS de CASE et TCS de DEUTZ FAHR, GREENSTAR de JOHN DEERE, FIELDSTAR N-SET de AGCO/DRONNINGBORG, font l'objet de présentations et de commentaires (plaquette DLG 303, 2001).

RADEMACHER J. (2003) présente les effets sur la précision de la mesure des protéines en direct par la MB, pour laquelle on utilise la spectrométrie NIR. [NIR - Spektroskopie](#). Il rapporte ultérieurement les effets d'une fertilisation ajustée sur le rendement et les performances de la MB (2004).

La firme CIS GmbH a développé un filtre „ExpertFilter“, pour éliminer les mesures les plus aberrantes lors du battage. FEIFFER A. (2003) analyse le potentiel d'économie de charges lors du battage, tandis que JUNG (2004) s'intéresse au management effectif (« Flottenmanagement ») avec AGRO-COMBINE Online.

A côté de ces domaines, le potentiel d'application de **l'exploitation d'îlots de parcelles regroupées** fait aussi l'objet d'intérêts, et l'idée que l'on fera l'économie de temps de travail et de charges grâce à une plus grande surface travaillée fait consensus (LANDTECHNIK 3/2005), LANDPOST (2005). LATACZ-LOHMANN U. (2005) fait état de baisse des coûts de production grâce à la coopération au niveau de l'usage des outils agricoles permise par l'exploitation de surfaces regroupées.

Les possibilités de satisfaire grâce à l'agriculture de précision aux obligations de documentation des pratiques agricoles mises en place par directive de l'UE depuis 2005 en Allemagne et plus récemment en France sont pareillement devenues une thématique (DLZ 3/2005). MOHN R. (2005,a) pte de manière complète les avantages de l'exploitation de lots de parcelles regroupées pour l'agriculture et l'environnement à l'aide de l'exemple „Riedhausen“. Ainsi, le

potentiel d'économie en passages d'outils atteint 25 % pour les bordures de parcelles et 45 % pour les fourrières.

Un grand nombre d'auteurs s'intéressent en particulier au domaine du **développement des technologies d'applications**. LANGNER, BÖTTGER et EHLERT (2003) abordent les exigences de la dynamique dans le domaine des applications techniques de la modulation intra-parcellaire. Des problèmes techniques d'application sont ainsi identifiés et des possibilités de résolution montrées à l'aide de différents exemples.

TOP AGRAR (11/2004) rapporte une expérience d'application de l'agriculture de précision pour la réduction des applications d'herbicides, dans laquelle il est testé des associations de produits ainsi qu' une conduite modulée en intraparcellaire avec plusieurs interventions ciblées. ENGELKE B. (2002) décrit pour sa part les possibles régulations du désherbage mécanique à l'aide de passages de herse étrille d'intensités différenciées.

Une forte dynamique existe également dans l'amélioration des épandeurs à engrais. Dans la revue TOP AGRAR (1/2004), les limites des équipements distributeurs de 5 épandeurs courants sont passés à la loupe. Les différents systèmes font l'objet d'une description et d'une appréciation. D'autres améliorations sont apparus en réaction aux exigences du décret sur la fertilisation (Düngeverordnung) lequel précise que l'engrais ne doit pas tomber au delà des bordures et que le lessivage et le ruissellement doivent être évités. Une description de la mise en œuvre pratique de cette obligation est faite par CHAPPUIS A. Les fondements, les concepts et les solutions techniques font l'objet d'une description complète dans le journal de la DLG « Merkblatt 315 » (1999). WENZLAFF R. et RECKLEBEN s'intéressent aux exigences et aux possibilités d'application modulée des épandeurs à engrais ainsi qu'à l'application d'une fertilisation variable sur la largeur d'apport. LEINKER M., KIELHORN A., LEHMANN B, et TRAUTZ D. (2003) rapportent des effets positifs de l'application modulée en intraparcellaire des fertilisants de synthèse.

Il a été fait publicité à de nombreuses reprises du **guidage automatique des interventions**. Les avantages mis en avant par des publicités telles par exemple celles de FENDT et AGCO pour l' AUTO-GUIDE sont : baisse du stress, conduite à la nuit et sans marqueurs de passages, gages de gains de performances dans le débit des chantiers, la qualité du travail des interventions à n'importe quelle heure et une diminution sensible des coûts/ha. BW AGRAR (43/2004) présente et commente le système de guidage automatique de JOHN DEERE „AutoTrac“. NOAK O. (2004) s'intéresse aux offres du marché pour les systèmes de guidage automatiques pilotés par GPS et fait une description de chaque type de fonctionnement et donne ainsi un aperçu complet du marché. Les DLG-MITTEILUNGEN (12/2004) font aussi un point d'actualité en la matière.

Dans BLW (2004), les systèmes de guidage automatiques les plus courants pour un travail précis et plus facile sont comparés. Les systèmes „Autotracc“ de JOHN DEERE, „E-Drive“ de CLAAS Agrocom et „Auto-GuidetM“ de FENDT sont concernés. De même, l'offre importante en systèmes de guidage automatique est abordée dans le BLW (19/2004). A côté des

particularités des systèmes, les avantages et inconvénients ainsi que les possibles développements futurs sont commentés.

A côté des avantages techniques, SCHIEVELBEIN C. (2005) dans un article cynique attire l'attention sur les retombées négatives lorsqu'il est naturellement attendu des exploitants agricoles, qu'avec l'aide de nouvelles technologies, ils travaillent à n'importe quelle heure et que le repos nocturne auquel chacun aspire soit menacé.

KRAMER E. et SCHWARZ J. (2004) s'intéressent à la demande en applications futures de **robots des champs autonomes**. Par l'exemple de la maîtrise des adventices, un scénario de mise en œuvre concret est examiné, dans lequel la sécurité occupe une place fondamentale. Selon l'état actuel de la technique, il est visé tout d'abord de laisser plusieurs robots des champs sous la surveillance d'un ouvrier. Des mots clés tels que soin individuels des plantes (phytotechnologie) et auto-apprentissage des systèmes autonomes sont fondamentaux. Des scénarii d'application existent où l'on épargne des interventions ou bien la période d'intervention d'un passage peut être élargie.

EHLERT D. et LANGNER H.-R. (2004) présentent une plateforme mobile (Field Scout) pour l'acquisition d'information.

KIELHORN A (2004) s'intéresse à la précision du positionnement du signal de satellite dans l'utilisation de **récepteurs GPS CompactFlash**.

Une dynamique très forte existe aussi dans le domaine des **capteurs sensoriels Online**. RECKLEBEN Y. (2005) fait une synthèse très complète des systèmes de capteurs actuels. Le potentiel du EM 38 pour le secteur sol fait l'objet d'une description. Dans le domaine des systèmes Offline, sont présentés „Agro Sat“ et „Kemira“ et dans celui des capteurs Online „Crop Meter“, „Yara N – Sensor“ et „miniVeg N“.

RECKLEBEN Y. et ILSensee E. (2005) comparent différents systèmes de capteurs pour la fertilisation azotée. KERSCHBERGER M. et LETHOLD P. (2005) concluent dans leur rapport d'études que les stratégies de fertilisation pilotées par capteurs sont valables.

SPANNER L. (2003) s'intéresse aux avantages et inconvénients de l'application pilotée par des cartes ou des capteurs de l'agriculture de précision, et donne des informations pour une aide à la décision entre les deux pratiques. Il conclut que la combinaison des deux systèmes est à conseiller et que la rentabilité d'un de ces systèmes est très dépendant des cas particuliers.

RECKLEBEN Y. (2005) ainsi que SCHMID A. et MAIDL F. – X divergent dans leur avis sur les économies d'azote, les augmentations de rendement et de qualité permises par l'innovation des systèmes de capteurs pour la conduite de culture.

Les capteurs qui mesurent le salissement en adventices et la densité de la masse de végétation sont décrits par EHLERT D. et LANGNER H.-R. (2004). LANGNER H.-R. et BÖTTGER H. (2004) communiquent sur la reconnaissance des mauvaises herbes pilotée par images, où ils insistent sur les demandes en informations techniques. SÖKEFELD M. et GERHARDS R. (2004) rapportent aussi des cartographies automatiques de salissement en adventices à l'aide de l'exploitation de photos digitales avec pour point principal la production de cartographies de répartition des mauvaises herbes. GERHARDS R. (2005) informe de la poursuite du développement de ce système, chez qui des cartes de répartition des adventices, établies grâce à l'automatisation de la reconnaissance des m. h., peuvent être transformées en cartes d'applications à l'aide de seuils économiques de nuisibilité, à l'aide desquelles les

herbicides peuvent être apportés de manière sélective et localisée avec un pulvérisateur à trois cuves piloté par GPS.

RUCKELSHAUSEN A., TRAUTZ D., KIELHORN A. et LINZ A. (2005) décrivent une possibilité de **binage et d'étrillage** pilotée par capteur.

MACHÈ R. informe des possibilités de mesure en temps réel de l'état du sol à l'aide de la technique **MuCEP** en relation avec le système **Soil – Doctor**. La conductivité électrique du sol est mesurée automatiquement par l'appareil lors d'un passage sur la parcelle à 10km/h. Il a été constaté une corrélation avec la teneur en nitrates du sol de presque 95 %.

SCHUTTE B., HERRMANN L., SCHREIBER M. et KUTZBACH H.D. (2004) s'intéressent à la cartographie du besoin en carburant comme information de base supplémentaire pour la conduite de précision des cultures.

EHLERT D., DAMMER K.H. et VÖLKER U (2004) ainsi que EHLERT D. (2004) et WOCHENBLATT-MAGAZIN (3/2004) décrivent le mode opératoire d'un des rares capteurs en temps réel, disponible sur le marché, à savoir le pendule **CROP – Meter (Pendelsensor)**. Ce capteur enregistre par un pendule les variations de biomasse à l'intérieur d'une culture et a reçu en 2003 la médaille d'argent de l'innovation au salon Agritechnika de Hanovre.

MAIER J. (2004) rapporte les difficultés d'utilisation de ce pendule dans le maïs.

Les intérêts et le potentiel d'un autre outil disponible Yara ou (Hydro) N-Sensors sont présentés par KERSCHBERGER M. et HESS H. (2004), AGRI Con et HYDRO AGRI.

TRAPHAN K. (2005) présente des résultats d'études sur la fertilisation N ajustée précisément aux besoins à l'aide de l'outil Yara N – Sensors (2005). Le mode de fonctionnement est aussi présenté dans la revue dlz (7/2005) et les DLG - MITTEILUNGEN (7/2005).

SCHWARZ J. et SCHLAUDERER R. (2004) dissertent sur les avantages économique et écologique de l'usage de capteurs en **protection des cultures**.

PAUL W. et SPECKMANN H. (2004) rapportent l'utilisation de capteurs radars pour la conduite de précision et ZIEKUR R. et SCHURICHT R. (2002) informent de l'utilité du géoradar pour la modulation intraparcélaire.

THÖSINK G., PRECKWINKEL J., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. ou MARQUERING J. (2004) s'intéressent aux systèmes de **capteurs sensoriels optoélectroniques** pour la mesure de la densité de végétation. BILLER (2004) informe de l'état d'avancement du projet „Advanced Optoelektronik System“ (AOS). Il s'agit d'application de précision de produits de phytoprotection au moyen d'une technique de capteurs, où la distinction entre mauvaises herbes et plantes cultivées est faite par « rayon spectral » au moyen d'un système multi-sensoriel.

Le passage à la **télé-détection** est devenu possible avec AVIS et GVIS, des systèmes de prises d'images hyperspectrales. SCHMIDT T. et MAUSER W. informent sur l'optimisation économique et environnementale de la production végétale avec l'aide de ces systèmes. Ils comblent le fossé entre les capteurs terrestres (au contact du sol) et les capteurs aériens et se distinguent par une haute définition spectrale jusqu'au domaine du proche infrarouge.

ZILLMAN E., LILIENTHAL H. SCHRAGE T. et SCHNUG E. (2004) décrivent la signification des d'images de radar ou de télé-détection pour la pratique agricole. Différentes espèces peuvent être distinguées de manière précise. De plus, les variations internes aux parcelles sont

reconnaissables. Malgré des difficultés avec l'interprétation des ondes reflétées, les systèmes radars offrent des informations précieuses en particulier lorsque pour des raisons climatiques aucune information ne peut être livrée par des systèmes optiques.

Par contre, les différences intraparcellaires sont cartographiées tout au long de la phase de végétation par **LORIS® Maps** et une image aérienne en infrarouge livre les bases de pour le calcul de l'utilisation modulée des intrants (www.kemira-growhow.de).

Le paquet starter de LORIS® Maps pour 50ha (image aérienne en proche infrarouge, carte de la biomasse, carte des zones homogènes, carte d'application N, carte fongicide) coûte 450 €.

Pour de grandes exploitations, le prix diminue jusqu'à 7 €/ha selon la revue TSL allemande (LANDWIRTSCHAFT OHNE PFLUG (1/2005)).

DOHMEN B., REH A. et HOPPE B. (2004) ainsi que AGROSAT (2005) font état d'une variante de coût minimum pour la modulation intraparcellaire prête pour la pratique. Une carte qui distingue trois zones de haut-, moyen et faible rendement sur la base de la télédétection ou de la cartographie des rendements sert de carte d'application visuelle et joue un rôle central. De manière alternative, les données d'estimation de la richesse du sol peuvent être prises en compte. Une application de la pratique manuelle est possible à partir de 2 €/ha et par an.

AGROSAT (2005) propose son **monitoring de la chlorophylle** pour l'analyse des points faibles pour lequel le domaine spectral du vert réclame une caméra vidéo digitale ultra sensible. Les cartes thématiques sont livrées par Internet 48 heures après le survol réussi.

PANTEN K. produit une présentation complète sur le thème de la mesure de la variabilité intraparcellaire des caractéristiques du sol et de la végétation à l'aide de la télédétection.

LILIENTHAL H présente le développement d'un système de télédétection concernant le sol et à utilisation pour l'agriculture avec un système de mesure appelé LASSIE.

En revanche, l'institut de recherche fédéral pour l'agriculture (FAL) met en garde contre les erreurs lors de la mesure pour calcul de la fertilisation azotée. Dans l'état des connaissances, les capteurs sensoriels pour l'azote montreraient des déficits méthodiques trop importants (BAUERNZEITUNG, 2005).

A côté de ces pratiques de télédétection assez simples, un service professionnel appelé *FARMSTAR* a été développé en France par ARVALIS - Institut du Végétal en partenariat avec EADS-Astrium et le CETIOM et proposé aux agriculteurs depuis 2002. Déjà commercialisé à grande échelle sur blé et colza et utilisé sur une surface d'environ 180 000 ha en 2005, principalement en régions centre, centre-ouest et dans le nord-est du bassin parisien, il est encore en cours de test pour le maïs. L'outil en 2005 est proposé par 15 coopératives, trois chambres d'agriculture et deux négociants.

FARMSTAR analyse l'état des cultures à partir d'images satellites qui mesurent l'indice foliaire (très corrélé avec la biomasse) et la teneur en chlorophylle (très corrélé avec le statut azoté de la plante) et établissent des cartes de la végétation des parcelles concernées dans la région survolée. L'interprétation des images se fait à l'aide de modèles agronomiques mis au point avec les instituts techniques sur la base des données culturales et climatiques des parcelles. L'objectif est de donner des conseils simples et pratiques à l'échelle de la parcelle.

Ainsi pour le blé d'hiver, des conseils personnalisés seront produits à 5 reprises :

- à la sortie de l'hiver, azote absorbé et calcul de la dose totale prévisionnelle d'azote,
- à la sortie de l'hiver, à la reprise de la végétation, une carte de la biomasse de la végétation (peuplement) et du potentiel de rendement,

- au début montaison, une estimation précoce du risque de verse,
- au stade montaison, une carte de l'état du développement de la végétation et une réactualisation du potentiel de rendement
- et finalement fin montaison une carte de préconisation de dose optimale de fertilisation azotée pour le 3^{ème} apport. La fourniture sur demande du fichier de données permet à l'agriculteur équipé d'automatiser la modulation intra-parcellaire des apports d'azote sur sa parcelle.

Les conseils techniques sont donnés aux agriculteurs par l'intermédiaire de leurs organismes agricoles par mél ou en consultant *FARMSTAR* directement en ligne..

Jusqu'à présent, seul un petit nombre d'agriculteurs abonnés à *FARMSTAR* pratiquent la modulation des apports d'azote (faute d'équipements).

Depuis janvier 2005, le CDER Informatique de la Marne propose son service AGRIMAP+ développé en collaboration avec John Deere et Arvalis - Institut du Végétal. Les données *FARMSTAR* ainsi traitées peuvent être converties en cartes de préconisations et exportées vers une carte PCMCIA qui peut ainsi être utilisée par l'électronique embarquée du tracteur afin de piloter l'application d'azote modulée.

Ce type de technologie qui donne des préconisations de fumure azotée sans prises d'échantillons de sols et d'analyses se développe rapidement. L'utilisation d'images satellites permet aux agriculteurs de disposer de conseils disponibles rapidement après la prise de vue ainsi que l'appréciation des différences de végétation sur leurs parcelles, ce qui n'est pas possible directement avec des cartographies des sols.

Selon BÖRNER G. (2004), l'utilisation **d'outils SIG** dans le cadre de l'agriculture durable, renforce l'enregistrement et la documentation de données environnementales, mais aussi un management efficace des surfaces comme par ex. la planification et le suivi.

Un système SIG totalement original a été développé chez NEETZOWER AGRARHOF Peenetal GmbH avec ADAM (Alternatives Digitale Agrar-Managementsystem), sans lequel l'application avancée de l'agriculture de précision chez cette exploitation pionnière ne serait pas pensable (BAUERNZEITUNG, 2004).

La fonctionnalité de ce „Alternativen Digitalen Agrar-Managementsystems“ (ADAM) a été décrit sous ETLéV.

LÜCK E., EISENREICH M. et DOMSCH H. (2002) rassemblent des méthodes de cartographies innovantes pour une agriculture modulée en intraparcellaire, dans laquelle il est traité aussi bien de l'acquisition des données que de la méthode d'exploitation.

Un cahier de l'institut KTBL en 2004 fait un tour d'horizon complet des développements potentiels et des déficits des systèmes d'information géographiques en agriculture et dans l'espace rural. Lors d'un colloque KTBL/DAF en octobre 2004, les domaines d'application possibles des SIG et de l'agriculture de précision ont été présentés. La disponibilité mais aussi les déficits dans l'utilité de géobases de données ont été rapportées (LANDTECHNIK 1/2005). Il faut dire en plus de cela que début 2005, la déclaration PAC basée sur un SIG a été introduite dans laquelle les parcelles sont définies par des photos aériennes ortho-référencées (dlz 3/2004).

Comme pour la modulation des apports d'intrants il est beaucoup attendu des **techniques online** et parce que dans le cadre du projet il a été testé un capteur online, quelques uns de ces capteurs sont présentés dans la partie qui suit. La présentation faite ne se veut pas exhaustive en raison du développement très dynamique de l'utilisation de ces équipements.

Un point commun à tous les capteurs en ligne pour la modulation d'intrants est qu'ils relèvent directement durant le passage (online) les valeurs d'application de l'intrant à moduler. Pour cette raison, une interface ou environnement SIG externe n'est pas absolument nécessaire.

Lors de l'usage d'outil online, il s'en suit la production d'une carte d'application :

- en même temps que l'application (online)
- sans surplus de travail à son PC au bureau
- automatiquement et sans plus de travail, abstraction faite de la nécessité d'un calibrage

Avec le système **Hydro-N-Sensor**, des capteurs optiques mesurent la réflexion de la lumière visible sur la végétation. La Figure 1 présente l'intégration de 2 capteurs de chaque côté de l'appareil sur le toit du tracteur.



Fig. 1 : Hydro-N-Sensor : un outil pour la conduite culturale

A l'aide de la réfraction, des conclusions sont tirées de l'état de la végétation. Pour cela, les éléments sont en particulier pris en compte :

- l'absorption dans le domaine des ondes infra-rouges due à l'activité de la chlorophylle dans la photosynthèse (Fig. 2) et
- la réfraction dans le domaine proche de l'infra-rouge, à partir duquel des diagnostics peuvent être tirés sur la biomasse. La réfraction est ici dépendante en premier lieu de la structure des cellules des plantes (Fig. 2)

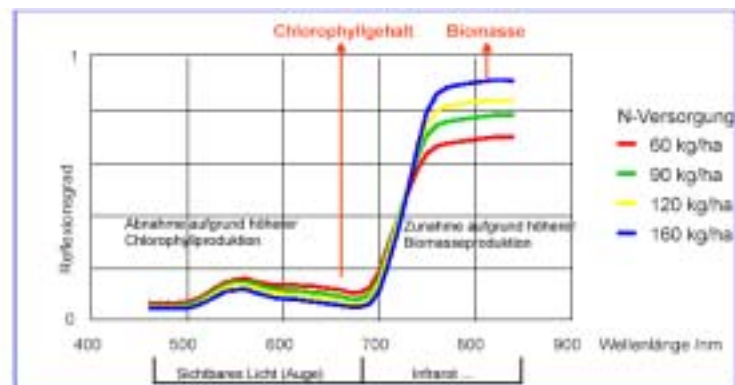


Fig. 2 : différenciation du comportement de réfraction pour différents régimes d'apports en N

Le système travaille aussi indépendamment de GPS car il applique les mesures sur site immédiatement. Avec l'intégration de GPS, une carte d'application online peut toutefois être produite. Un inconvénient indiscutable est que le capteur optique ne peut être utilisé que de jour et que l'influence de différentes conditions d'éclairage n'est finalement pas discuté. Dans le monde entier, dans les huit dernières années, environ une centaine d'essais ont été réalisés, pour lesquels en moyenne, un gain de rendement assuré d'environ 3 % a été constaté. En parallèle, il a été possible d'économiser les intrants pour environ 10 %, ce qui était dépendant de l'intensité de fertilisation et de l'hétérogénéité du peuplement.

A l'heure actuelle, en Allemagne, 150 appareils sont en usage pour une surface fertilisée d'environ 300 000 ha. A l'échelle mondiale, il existe environ 350 appareils d'utilisés.

Chez l'entrepreneur associé au projet, il existait voici déjà quelques années un premier prototype de l'hydro-N-sensor en utilisation pour le maïs. Les résultats obtenus autrefois n'ont toutefois pas été satisfaisants. Pour cette raison, il a été dans le cadre de ce projet tout d'abord renoncé à l'utilisation de l'hydro-N-sensor. A moyen terme, l'utilisation d'outils de nouvelle génération serait à nouveau envisageable chez l'entrepreneur (BINDER, 2004).

Sous la dénomination „**RADAR**“, il s'agit de l'abréviation pour „**RA**dio **D**etecting **A**nd **R**anging“. Il s'agit avant tout d'un système de télédétection dans le domaine proche. Les capteurs radar se distinguent des autres capteurs online par le fait qu'il s'agit de capteurs *actifs*. Des signaux sont émis dans le domaine du spectre électromagnétique de radar et leur réflexion est mesurée. Dans le domaine des capteurs agricoles, un radar émetteur dotée d'une faible force d'émission est utilisée si bien qu'il n'existe pas de discussions sur les répercussions pour la santé.

Le procédé est adapté à la mesure de distance dans le domaine proche, comme ceci est connu dans le domaine du surveillance de la circulation sur routes. Dans les conditions agricoles, il est intéressant de pouvoir mesurer la transmission réfléchissante de la culture (Fig. 3).

De plus, les paramètres suivants sont mesurables :

- distances
- vitesse (par effet Doppler)
- humidité du sol
- peuplement végétatif

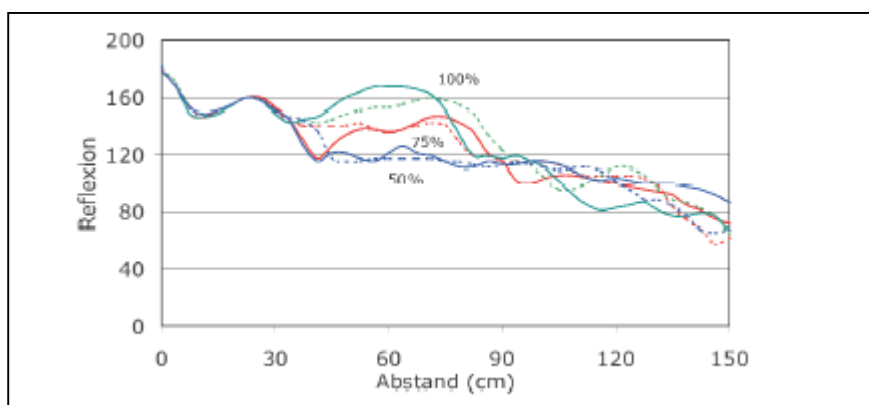


Fig. 3 : différence de réflexion radar pour différents états végétatifs

Le capteur sensoriel se trouve encore actuellement en développement. On ne sait encore rien d'une éventuelle commercialisation. En raison du manque de disponibilité de l'outil, il n'était pas

question de le tester durant le projet. On peut s'attendre à ce que dans le futur, avec l'aide de radar on puisse appréhender d'autres paramètres intéressants en agriculture, par exemple :

- avec l'utilisation de deux fréquences de travail : tassement du sol
- avec l'utilisation de deux fréquences de travail + part virtuelle de la rétrodiffusion : état nutritif du sol, adaptation online de la fertilisation.

Depuis 2003, un capteur pendulaire (Pendelsensor) est disponible sur le marché sous la dénomination „Crop-Meter“. Il a été développé par Agrartechnik Bornim (ATB) et fabriqué par la société „Müller Elektronik“. Il est distribué entre-temps par la Firme « Agrocom » et obtenu au salon Agritechnika 2004 une médaille d'argent dans la catégorie innovation et technologie avancée. Le capteur a montré son intérêt en céréales à paille dans de nombreuses expérimentations. Les essais en cours pour le maïs laissent espérer une application potentielle mais ne sont pas encore achevés. Comme des contacts existaient avec un des développeurs du capteur, ce dernier était disponible pour un test.

L'appareil se compose d'un simple pendule, qui est tirée à travers la végétation. La déviation du pendule est alors une mesure de la densité de végétation et sert à piloter la répartition du fertilisant. Comme les valeurs minimale et maximale sont choisies librement par l'exploitant agricole, le capteur sert essentiellement à la modulation intraparcellaire du fertilisant en fonction de la densité de végétation. La figure 4 présente une description du principe de fonctionnement si bien que l'on peut éviter ici une description plus complète.

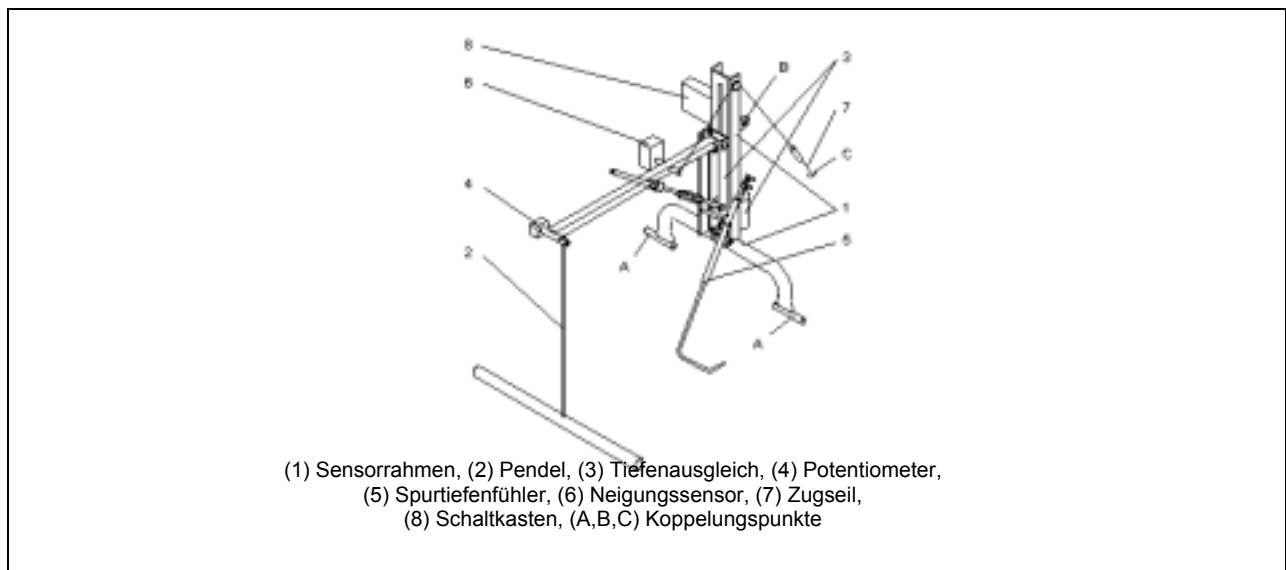


Fig. 4 : description du principe du capteur pendulaire

GVIS est l'abréviation de „Groundbased Visible Near Infrared Imaging Spectrometer“. Il s'agit d'un capteur capable de produire des données hyperspectrales pour lesquelles le domaine du spectre électromagnétique pris en compte va de la lumière visible jusqu'au « proche infrarouge ». Au contraire d'AVIS (Airborne Visible Near Infrared Imaging Spectrometer), le capteur n'est pas transporté par un avion. Au contraire, il travaille depuis le sol. Dans le cas d'application en agriculture, il est installé sur un tracteur. La figure 5 présente l'utilisation de GVIS et AVIS dans la pratique. Le tableau 1 présente les données techniques. La figure 6 présente le domaine spectral efficace pour la télédétection avec mise en évidence du domaine

de longueurs d'ondes électromagnétiques de la lumière visible. Une comparaison avec les données techniques montre que GVIS et AVIS ainsi que déjà au préalable le Hydro-N-Sensor utilisent une partie de la lumière visible ainsi que le proche infrarouge. La spécificité réside ici dans *la très haute définition spectrale*.

GVIS et AVIS sont utiles en particulier pour des questions relatives dans les domaines du suivi de l'environnement (monitoring) et de l'agriculture de précision. La recherche sur les comportements de réflexion des plantes des principales cultures sous différentes conditions comme par exemple une alimentation variable en éléments nutritifs à l'intérieur d'un domaine spectral de longueurs d'ondes étroit est en pleine évolution (GRAEFF, S. 2003).



Fig. 5 : GVIS et AVIS

Données techniques GVIS :	Données techniques AVIS :
Domaine longueurs d'ondes : 540 à 1020 nm	Domaine longueurs d'ondes : 550 à 1035 nm
Canaux : 120	Canaux : 240
Définition spatiale : env. 0.8 m	Définition spatiale : env. 2,5 m
Variation 12.7 m	Pour hauteur du vol de 1000 m)
Capacité : 6 ha/h	Positionnement précis par DGPS et INS

Tab. 1 : données techniques sur GVIS et AVIS

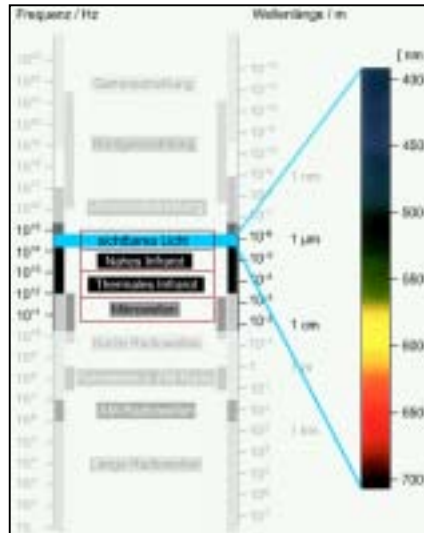


Fig. 6 : spectre électromagnétique sous accentuation de longueurs d'ondes de la lumière visible

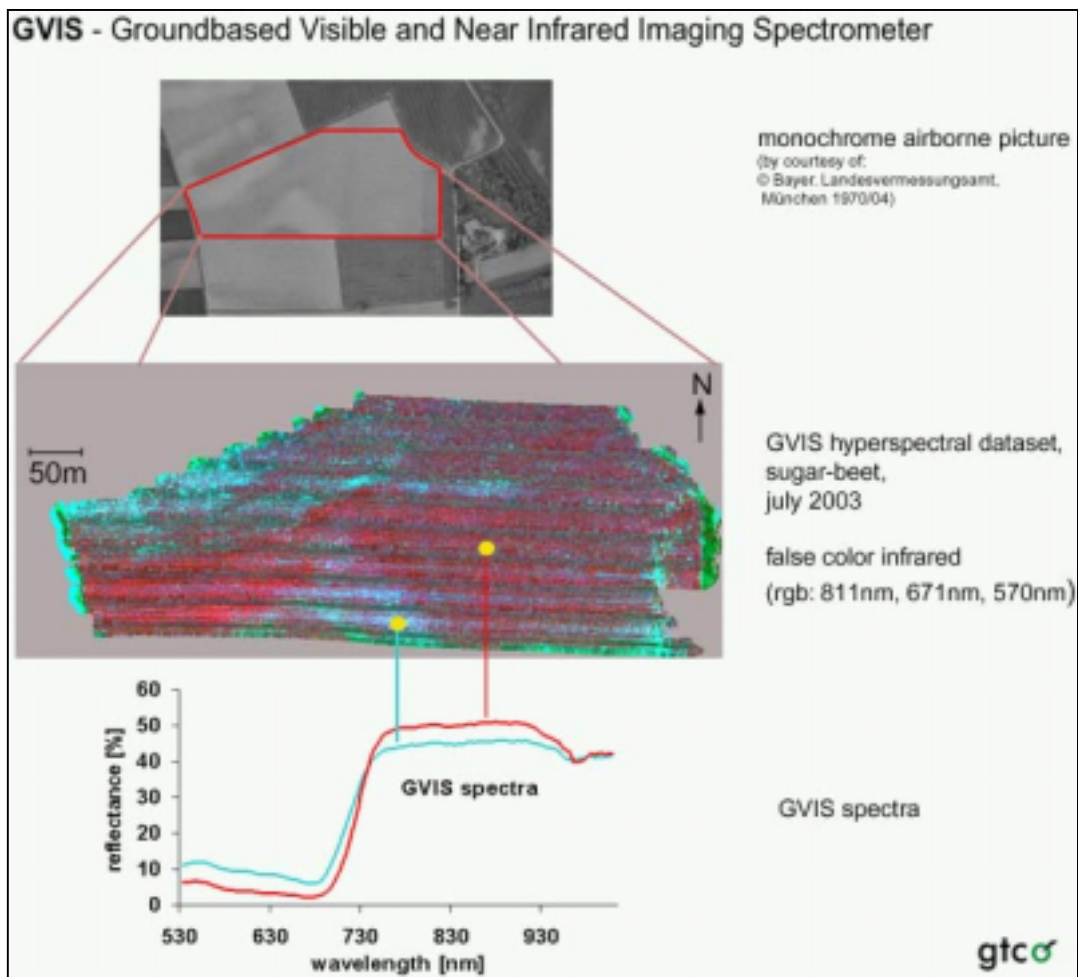


Fig. 7 : un exemple d'application de GVIS sur betterave à sucre

En raison de sa haute définition spectrale et aussi spatiale, GVIS est une technologie qui donne des images très bien adaptées à l'agriculture. Comme avec une photo satellite, la combinaison de différents canaux permet d'obtenir de nombreux paramètres souhaités (par ex. NDVI).

Des informations peuvent être tirées sur la chlorophylle, les teneurs en nitrates ou en carbone. L'identification et l'estimation de dégâts de ravageurs est aussi possible. La figure 7 montre un exemple d'application sur betterave à sucre, dans lequel la répartition spatiale des plantes avec différentes masses végétales peut être précisée par réflexion dans l'infrarouge proche.

Pour GVIS, il est encore impossible de savoir à quel moment le capteur sera commercialisé et pour cette raison il ne sera pas utilisé pour le test envisagé dans le cadre du projet.

(2) Situation initiale

Le présent travail s'inscrit en poursuite d'un précédent projet dont le titre était : « faisabilité des technologies de l'agriculture de précision dans le Rhin supérieur, analyse et interprétation de la variabilité des parcelles agricoles de la plaine rhénane » (RÜHLING, 2001). Tandis que ce travail s'orientait sur l'étude et la description de la variabilité de surfaces agricoles dans les conditions données, l'objectif du présent travail de prendre en compte cette variabilité par une *application modulée* des intrants. Afin de pouvoir mettre en œuvre la modulation, du côté alsacien comme du côté badois, il a été décidé de conserver les surfaces d'essais du projet précédent et de poursuivre leur caractérisation.

On dispose sur ces parcelles de cartes de rendement sur une période de plusieurs années et de bases de données intraparcellaires issues de grilles de prélèvements.

A partir des études de la variabilité intraparcellaire, des modèles de rendement ont pu être établis et des indications sur le potentiel de rendement des parcelles déterminées.

Avec des techniques continues ou orientées sur des grilles de prélèvements, la variabilité intraparcellaire et l'hétérogénéité des parcelles ont pu être déterminées. Il a été déduit que des grilles de prises d'échantillons d'environ 6 échantillons par ha sont nécessaires afin de pouvoir émettre des conclusions sur la variabilité intraparcellaire du potentiel de fournitures en éléments nutritifs d'un site. Pour cerner la variabilité de caractéristiques relativement plus homogènes, tels que la granulométrie, la matière organique ou la valeur pH du sol, 4 échantillons par hectare sont généralement suffisants. La détermination de la conductivité électrique a été décrite comme un outil rapide et efficace. L'interprétation et les corrélations des données avec les différents paramètres de départ différenciés en intraparcellaire pour la modulation des intrants n'est pas toujours possible. La nécessité de fastidieux dénombrements de données par prélèvements selon les grilles et les difficultés des interprétations pour des pratiques effectives continues laissent présager d'une forte charge de travail pour l'application dans le cadre de la modulation intraparcellaire envisagée dans le projet.

Le problème de départ est que malgré qu'il existe aujourd'hui quantité de solutions techniques, il n'existe encore pas de clarté sur la stratégie de fertilisation appliquée. C'est en particulier pour cette raison qu'il a été décidé dans ce projet en premier lieu de viser une réalisation pratique fondée sur la technologie des cartographies. Ainsi l'on peut envisager „*la praticabilité d'une stratégie de fertilisation selon les Bonnes Pratiques Agricoles*“ en modulation intraparcellaire.

Pour ce faire, les démarches suivantes ont été retenues dans la réalisation du projet (Figure. 8, du côté gauche) :

- test de la praticabilité technique selon la „bonne pratique agricole“ de l'utilisation de cartographie (test de la faisabilité)
- en cas d'application réussie : optimisation de cette pratique et en parallèle : mise en oeuvre d'une alternative avec utilisation de capteur (phase d'optimisation)
- élaboration de conclusions et de recommandations à partir de l'expérience acquise, pour une utilisation optimale (phase d'évaluation)

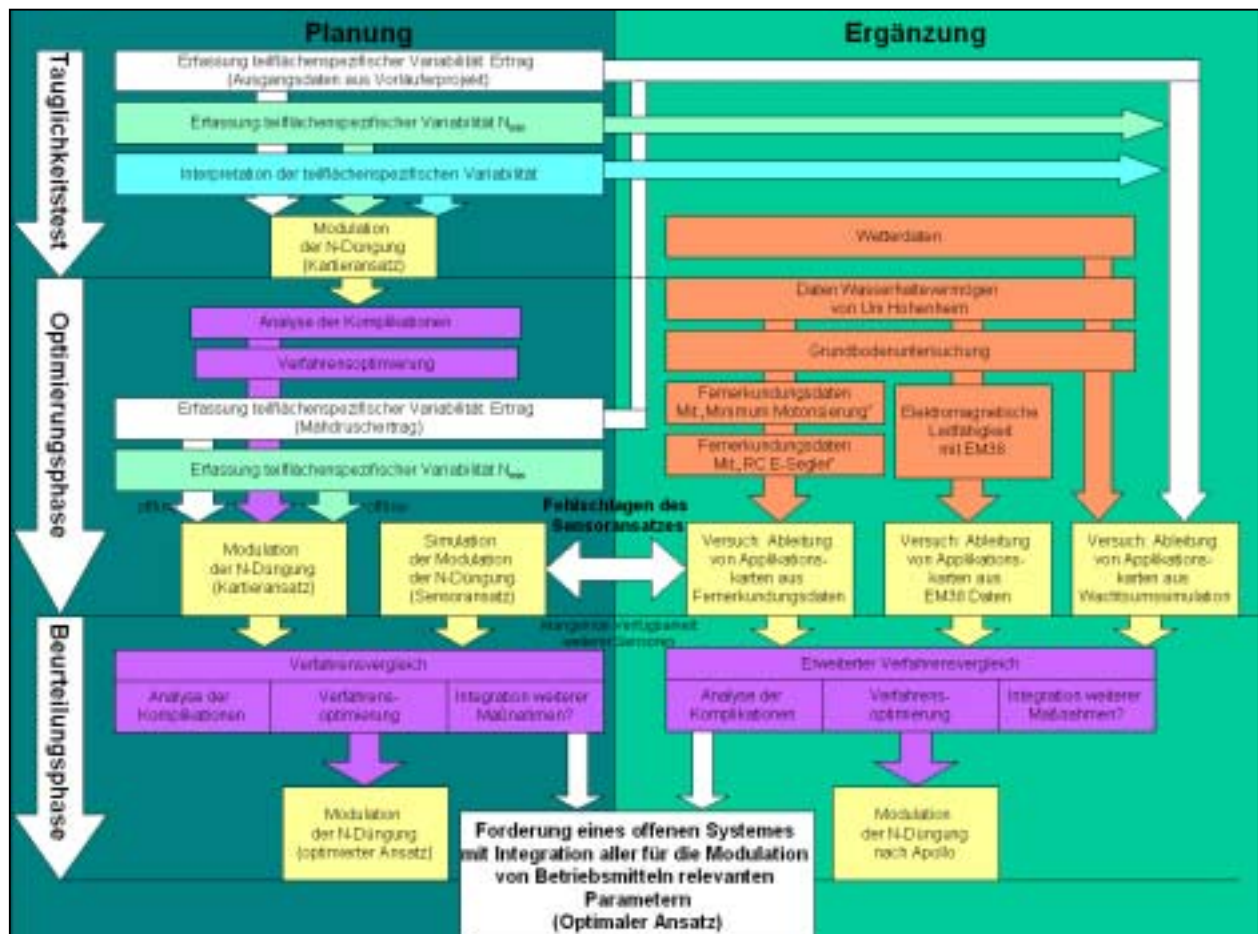


Fig. 8 : plan de projet initial et compléments apportés ultérieurement

Comme l'essai de mise en oeuvre d'une technique alternative (on line) n'a pas pu être mis en oeuvre sans complications, d'autres efforts ont été déployés au delà de la planification initiale afin de pouvoir collecter des expériences sur l'applicabilité de technologies alternatives durant cette phase d'optimisation. Dans la moitié droite de la figure 8, les autres technologies testées sont listées, lesquelles n'étaient pas à l'origine prévues dans le projet. Il a donc été également possible dans la phase d'évaluation d'élargir la comparaison des techniques.

L'intégration d'un **modèle de croissance** a été le fruit de la coopération avec l'université de Hohenheim. De même, la mesure de la **conductivité électrique** a été rendue possible car l'université a mis à disposition un engin de mesure „EM 38“. L'intervention avec cet engin a été considéré comme nécessaire car les données disponibles issues du projet précédent avec l'engin « VERIS » ne répondaient pas l'objectif. L'intégration de données issues de **télé-détection** a été une suite logique pour une considération complète des possibilités de transposition à la conduite d'une modulation intraparcellaire de la fertilisation. L'exploitation s'est limitée à l'utilisation de plateformes lowcost afin de ne pas déborder le cadre du projet.

Pour la même raison, la réflexion sur l'applicabilité de la modulation intraparcellaire des intrants a été ramenée à l'exemple concret de la fertilisation azotée. Les compléments signalés ont été réalisés en prenant l'exemple des parcelles allemandes.

Comme il n'existait pas de technique de modulation de disponible sur les parcelles d'essais en Alsace, on a recherché l'obtention des bases supplémentaires pour l'application d'interventions modulées. Ainsi, des essais ont été poursuivis pour *appréhender la variabilité* et le potentiel *d'utilisation d'images satellites* et des mesures de la *conductivité électrique*, pour finalement arriver à un essai de modulation avec des mises en oeuvre *géostatistiques*.

2 Matériel et méthodes

Les parcelles d'expérimentations ainsi que les méthodes mises en oeuvre dans le cadre des études du projet font l'objet de descriptions ci-après. Les méthodes employées se résument à différentes parcelles d'essais, des concepts théoriques pour l'optimisation des pratiques et en une enquête.

Comme les méthodes appliquées en Alsace et en Bade Wurtemberg divergent en particulier en raison de différences dans la disponibilité des outils, elles font l'objet de présentations séparées. Toutefois, elles poursuivent toutes le même objectif de test de l'application de la modulation des intrants et font ensuite l'objet d'une discussion commune.

2.1 Expérimentations

2.1.1 Parcelles d'essais en Alsace

Rappel de l'objectif du projet

La conduite de la plupart des parcelles agricoles se fait actuellement en considérant qu'elles sont homogènes. Cette hypothèse n'est pas toujours réaliste. Lorsqu'il existe une variabilité spatiale à l'intérieur de la parcelle, la prise en compte de cette variabilité intra parcellaire dans la conduite de la parcelle constitue la base de "l'agriculture de précision" ou "modulation intra parcellaire".

La modulation des pratiques culturales à l'échelle intra parcellaire se fait classiquement en trois étapes.

La première étape consiste à caractériser la variabilité intra parcellaire avec précision, en estimant les valeurs prises sur un grand nombre de coordonnées de la parcelle par les différentes variables agronomiques d'intérêt (teneurs en éléments minéraux, type de sol, pH, réserve utile, ...). Il en résulte des cartes des zonages de zones homogènes. C'est cette étape qui a été réalisée dans la première partie du programme, de 2000 à 2002 sur les 2 parcelles d'Ebersheim et de Witternheim (cf. rapport intermédiaire ITADA).

La deuxième étape a pour but d'interpréter l'information acquise à la première étape. Classiquement, les modèles agronomiques utilisés à l'échelle de la parcelle sont appliqués en l'état au niveau intra parcellaire. L'application des modèles agronomiques donne naissance à une ou plusieurs cartes de préconisation.

La troisième étape consiste en la mise en œuvre des cartes de préconisation au moyen d'un matériel réglable pendant le travail.

Pour que la modulation intra parcellaire puisse être mise en œuvre, trois conditions élémentaires doivent être respectées :

- Il faut que la parcelle présente une **variabilité suffisante**. En effet, si la parcelle est peu hétérogène, il y a peu d'intérêt à faire de la modulation intra parcellaire. Cette variabilité a été mise en évidence dans la première partie du programme, à la fois sur des caractéristiques pérennes du sol et sur des critères agronomiques (données plante sur 3 ans) (cf. rapport intermédiaire).

- La variabilité observée doit se situer dans une **plage agronomiquement "sensible"**. Si on s'intéresse, par exemple, à la modulation de l'apport de P2O5, et que la teneur en P2O5 se situe toujours au-dessus d'un seuil nécessitant un apport, il n'y aura pas de modulation intra parcellaire, même si la variabilité des teneurs est importante.
- La variabilité intra parcellaire doit être structurée spatialement et représenter des entités compatibles avec une différenciation de conduite. On définit classiquement le terme "structure spatiale" en disant que si une variable agronomique est structurée spatialement, cela signifie que 2 points proches sont plus semblables que 2 points éloignés. La présence d'une structure spatiale sur une parcelle et la nature de cette structure est essentielle dans une optique de modulation intra parcellaire.

La première étape passe par un grand nombre de mesures géoréférencées. Elle est relativement lourde à mettre en œuvre car elle nécessite de faire de nombreux prélèvements, à la fois au niveau du sol et sur les plantes, et de nombreuses analyses de laboratoire. Dans le cadre de notre travail expérimental, cette étape a été complétée par une interprétation agronomique des corrélations entre les propriétés du sol et les variables sur les plantes, et par une étude géostatistique pour vérifier que la variabilité est structurée spatialement et que la parcelle est bien "apte" à la modulation d'intrant.

D'une part, parce que, dans la plupart des cas, il n'est pas possible de réaliser une modulation sur une parcelle en continu. Le matériel utilisé présente une certaine largeur en dessous de laquelle il n'est pas possible de descendre, et il présente également un certain temps de réponse à un changement de consigne. Pour qu'une mise en œuvre efficace de la modulation soit possible, il est donc nécessaire que la variabilité observée se présente sous forme de zones suffisamment vastes et homogènes. D'autre part, parce que la caractérisation d'une variable est d'autant plus facile qu'elle présente une structure spatiale importante. En effet, si on souhaite, par exemple, réaliser une carte de teneur en P2O5 sur une parcelle et que l'on analyse un échantillon de sol prélevé à un endroit donné, si cette variable est structurée spatialement, la valeur observée à cet endroit apporte de l'information sur les observations voisines et sa caractérisation en est facilitée.

N.B. : on définit une zone homogène comme étant une sous région d'un champ exprimant une combinaison relativement homogène du facteur étudié et pour laquelle un taux unique d'intrant pour une culture spécifique est approprié.

Depuis le démarrage de ce programme, les technologies ont évolué et on s'oriente actuellement vers des méthodes plus "rapides" d'acquisition de données sur la variabilité de la croissance des plantes, basées sur l'interprétation d'images aériennes (ex : Farmstar), de matériel équipés de capteurs "on line", etc...qui, bien sûr, nécessitent également un référencement et une validation préalables relativement longs et coûteux.

Toutefois, il n'existe pas encore, à l'heure actuelle, de matériel ou de technologie de modulation des apports de ce type opérationnelle en maïs.

2.1.1.1 Description des 2 parcelles étudiées en Alsace

2.1.1.1.1 Variabilité agronomique

Pendant la première étape du projet « Variabilité intra parcellaire en Alsace » nous avons acquis pendant 3 années (2000 à 2002) des références, tant sur la caractérisation du sol que sur celle de la culture en place sur 2 parcelles situées dans le Bas-Rhin, à Witternheim et Ebersheim. Nous avons mis en évidence une certaine hétérogénéité des données et une variabilité du rendement au sein de ces parcelles (cf. rapport intermédiaire).

L'analyse de la variabilité globale des variables mesurées a été réalisée au moyen de statistiques classiques ; elle est illustrée par les valeurs du minimum, du maximum, de la moyenne, de l'écart-type et du coefficient de variation. Un autre critère qui permet de mesurer la variabilité des données est l'écart entre le quantile 95 et le quantile 5 (plage de données telles que 5% des valeurs sont supérieures et 5% des valeurs sont inférieures). C'est un bon indicateur de la variabilité globale de la parcelle puisqu'il représente l'amplitude de variation sur 90 % de surface de la parcelle. Il a en plus l'avantage de ne pas être influencé par les valeurs extrêmes, qui peuvent certes avoir des conséquences sensibles sur la culture, mais qui ne représentent qu'une surface faible de la parcelle (10%).

2.1.1.1.2 Images satellite

Nous avons pu récupérer des prises de vue de nos parcelles expérimentales depuis un satellite américain (Terra Aster) en août 2003, alors que le maïs était en pleine végétation, afin d'apprécier la superposition entre des variabilités de sol et d'états de croissance des plantes.

Malheureusement, compte tenu de la surface des parcelles, plutôt faible, et de la résolution du satellite (15 m), il n'est pas possible de déceler nettement des zones différenciées à l'intérieur des parcelles.

2.1.1.1.3 Mesure de résistivité

En mars 2002, une mesure de la résistivité électrique a été réalisée sur les 2 parcelles de Witternheim et Ebersheim par la société GEOCARTA avec un matériel (ARP) dérivé d'un système mis au point par le CNRS il y a plusieurs dizaines d'années.

En effet, la mesure de la résistivité ou de l'induction électrique du sol, déjà largement utilisée dans le domaine de la géophysique (prospection minière, recherche archéologique, ...) est l'un des moyens actuellement disponible pour réaliser un zonage des propriétés globales du sol à l'échelle intra parcellaire.

La résistivité électrique du sol dépend des paramètres physico-chimique du sol et principalement : la profondeur, la texture, la chimie (CEC, pH, ...) et l'humidité.

C'est donc un des moyens de caractérisation de la variabilité intra parcellaire. Ce type de mesure met en évidence des zones dont la profondeur, la texture, l'humidité et la chimie donnent une résistivité équivalente. La méthode utilisée pour cette caractérisation consiste à envoyer un courant électrique dans le sol par des électrodes et à le récupérer par trois couples d'électrodes localisées en arrière des premières. Chaque couple d'électrodes donne des informations différentes sur la résistivité électrique du sol.

La résistivité électrique (exprimée en Ohm.m) permet d'avoir des informations sur trois couches de sol : 0-50 cm de profondeur, 0-100 cm de profondeur et 0-200 cm de profondeur. Au sein d'une même carte, deux zones ayant la même couleur possèdent la même résistivité électrique, ce qui ne signifie pas forcément qu'il s'agit du même type de sol.

L'intérêt de cette méthode est aussi d'avoir le découpage des zones a priori plutôt que de les définir a posteriori à partir d'un grand nombre de prélèvements et mesures.

Les cartes de résistivité peuvent être utilisées lors du traitement des données pour évaluer l'importance de l'influence des types de sol par rapport à l'importance de l'intrant modulé sur les rendements ou sur une teneur en protéines. Par exemple, est-ce que la différence de rendement mesurée dans une parcelle est plus importante entre les types de sol (effet sol) ou au sein d'un type de sol donné (effet de la modulation de l'intrant) ?.

Le système de mesure électrique utilisé sur nos parcelles consiste en un quad 4 roues motrices (cf. photo ci-dessous) ainsi qu'en un système électronique de mesure des résistivités et de contrôle en temps réel des différents paramètres, résistivité et positionnement. Celui-ci a été effectué par un GPS Ag114 avec un abonnement aux corrections différentielles (Racal). Le système est piloté en temps réel par un PC embarqué permettant l'acquisition, le contrôle et la mémorisation des données de position et électrique. L'ensemble du système est breveté.



Fig. 9 : mesure de la résistivité électrique avec un quad équipé d'un matériel ARP

2.1.1.1.4 Etude géostatistique

Comme nous l'avons vu plus haut, un des préalables à la modulation intra parcellaire est la présence d'une "structure spatiale" de la variabilité intra parcellaire, attestant du caractère non aléatoire de la valeur pouvant être attribuée à des erreurs et permettant de définir des zones compatibles avec la mise en œuvre de la modulation (si une variable agronomique est structurée spatialement, cela signifie que 2 points proches sont plus semblables que 2 points éloignés).

La caractérisation de la structure spatiale des variables étudiées pour les 2 parcelles d'Ebersheim et Witternheim a été réalisée par le service des études statistiques d'Arvalis-Institut du végétal, au moyen d'une analyse variographique.

Cette étude géostatistique permet donc de vérifier si ces parcelles sont susceptibles de remplir les conditions nécessaires à la modulation intra parcellaire.

La caractérisation des parcelles effectuées lors de la première partie du programme a porté sur des mesures effectuées suivant une grille régulière avec un maillage de 10 points par hectare. Les variables mesurées au niveau du sol étaient :

- la teneur en argile, en limons et en sables
- la teneur en MO (%)
- le pH
- la teneur en P₂O₅
- la teneur en K₂O
- la teneur en MgO
- la profondeur de sol
- la RU
- la résistivité

Remarque importante : l'analyse géostatistique a été réalisée dans le courant de l'année 2004. Pour la mise en œuvre de l'expérimentation en 2003, nous n'avions donc pas connaissance de ces conclusions.

2.1.1.2 Expérimentation réalisée en 2003

De façon à ne pas perdre les références acquises au cours des années 2000 à 2002 sur les parcelles expérimentales et pour valoriser l'équipement de la moissonneuse-batteuse en capteurs de rendement, il nous a paru judicieux de mettre en œuvre en 2003 une expérimentation selon la méthodologie BRUNT (Bâtir des Références en Utilisant les Nouvelles Technologies).

Afin de ne pas introduire un intrant qui aurait une influence sur les caractéristiques de sol de la parcelle et donc sur la variabilité intra parcellaire (comme l'azote par exemple), il a été choisi de faire varier la densité de peuplement de la culture.

La méthodologie BRUNT

L'expérimentation selon la méthodologie BRUNT (Bâtir des Références en Utilisant les Nouvelles Technologies) consiste à effectuer des essais dans des parcelles d'agriculteurs en utilisant un dispositif en bandes parallèles alternées avec répétitions.

Cette méthode valorise la variabilité intra parcellaire. Par exemple pour une comparaison de densités, comme c'est le cas en 2003, il est possible, avec ce type de dispositif en bandes, d'avoir la valeur moyenne du rendement pour chacune des zones (ici 3 types de sol par exemple). Le logiciel utilisé (Arc View de ESRI) permet de générer en fait plusieurs cartes de rendement : une pour la densité A, une pour la densité B et une de la différence A-B.

Pour ces essais, la mise en œuvre de l'ensemble capteur de rendement et système dGPS (differential Global Positioning System) est indispensable, mais elle ne nécessite pas d'appareil spécifique pour la modulation.

La figure 10 montre la démarche suivie avec cette méthode de manière schématique.

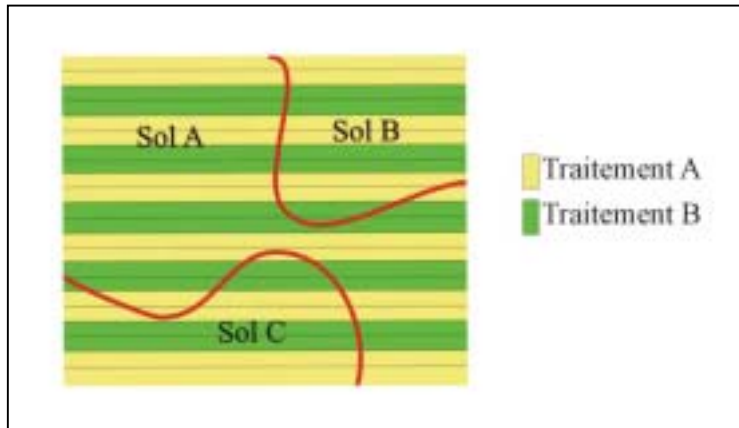


Fig. 10 : mise en oeuvre théorique de l'application de la méthodologie « Brunt »

La figure 11 montre les données brutes pour la définition des cartes de rendement pour les différentes variantes.

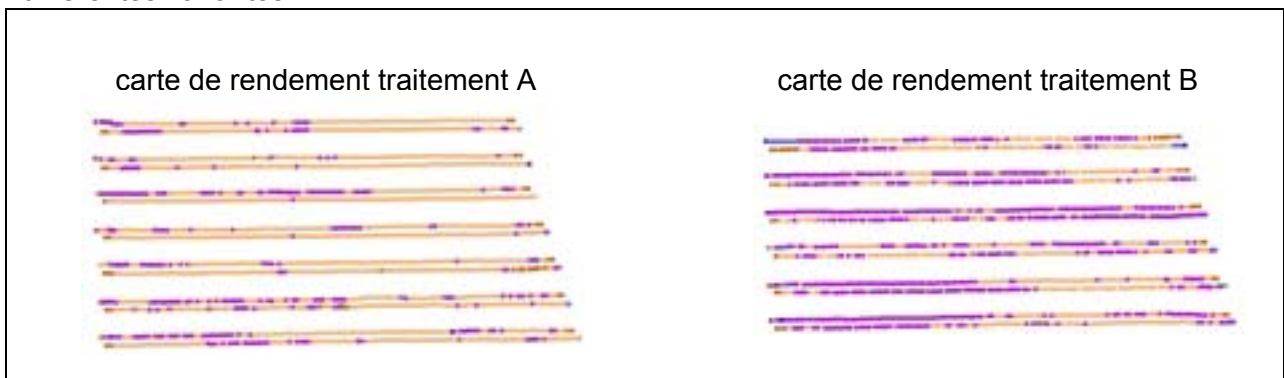


Fig. 11 : données brutes dont sont issues les cartes de rendement pour les différentes variantes

Le traitement de l'information se fait avec un logiciel de type SIG, ce qui permet d'obtenir des cartes interpolées, respectivement du traitement A et du traitement B (Fig. 12). L'interpolation permet d'avoir une idée des rendements obtenus si la totalité de la parcelle avait reçu le traitement A ou le traitement B. La différence entre les deux traitements permet de localiser des zones où l'un des deux traitements aurait été plus avantageux que l'autre. Dans notre exemple ci-dessous, le traitement B permet d'obtenir des rendements plus élevés presque quelques soient les zones de la parcelles (Fig. 13).

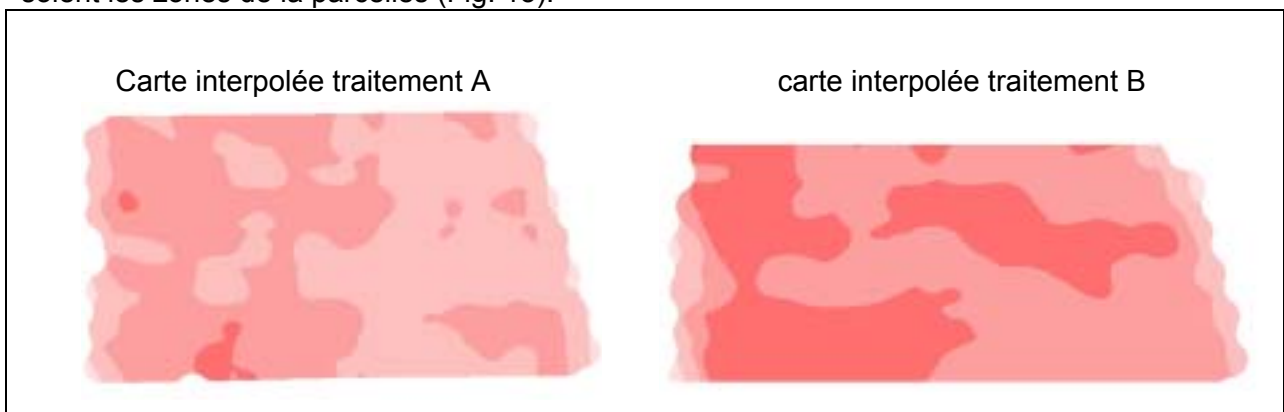


Fig. 12 : cartes de rendement interpolées pour les différentes variantes

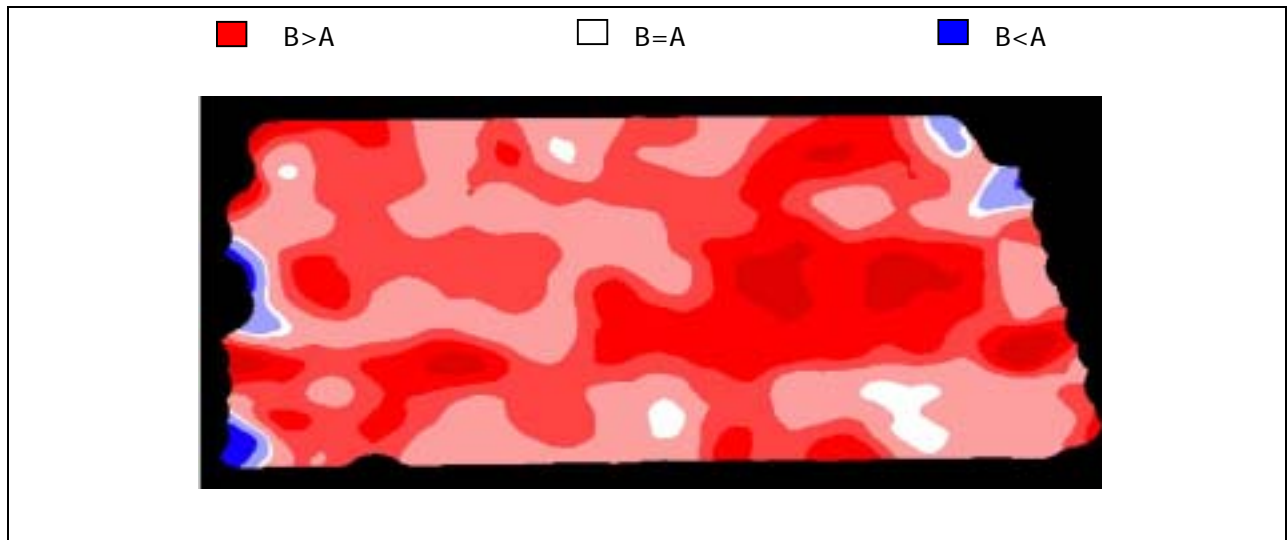


Fig. 13 : carte interpolée des différences de rendement entre les deux variantes

Dans notre expérimentation nous avons trois traitements correspondant à 3 densités différentes.

- A Witternheim l'essai densité a été réalisé sur la variété PR 38 F10 (demi-précoce) à raison de 3 densités, adaptées à la précocité de l'hybride :
 - 75 000 plantes/ha = densité 1
 - 85 000 plantes/ha = densité 2
 - 95 000 plantes/ha = densité 3
 Seule la densité de semis a été modifiée, les autres techniques culturales étant égales par ailleurs sur l'ensemble de la parcelle. Les 3 densités ont été répétées 3 fois sur des bandes de 24 rangs (Fig. 14).
 L'itinéraire technique de la parcelle est joint en annexe.
- A Ebersheim l'essai densité a été réalisé sur la variété DK 312 (demi-précoce) à raison de 3 densités, adaptées à la précocité de l'hybride :
 - 80 000 plantes/ha = densité 1
 - 90 000 plantes/ha = densité 2
 - 100 000 plantes/ha = densité 3
 Seule la densité de semis a été modifiée, les autres techniques culturales étant égales sur l'ensemble de la parcelle. Les 3 densités ont été répétées 6 fois sur des bandes de 6 rangs (Fig. 14).
 L'itinéraire technique de la parcelle est joint en annexe.

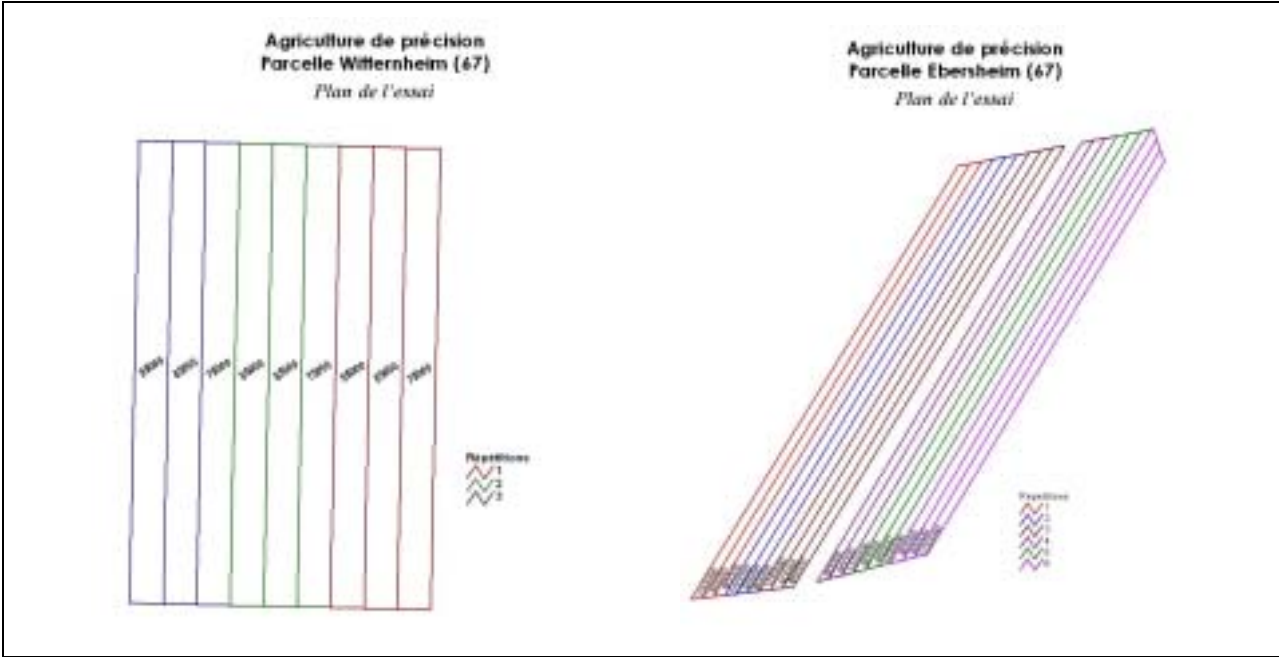


Fig. 14 : plan des essais sur les parcelles de Witternheim et Ebersheim en 2003

2.1.1.3 Expérimentation réalisée en 2004

Les résultats de l'étude géostatistique ont montré que chacune des parcelles n'offrait pas une structure spatiale suffisante à la mise en œuvre de la modulation intra parcellaire (cf. résultats). Cependant, pour rester dans la cohérence du projet et respecter l'objectif de départ, qui était de moduler la dose d'azote sur la base de cartes de rendement, nous avons appliqué une fertilisation azotée différenciée en bandes (méthode *BRUNT*). En absence de structure spatiale, l'idée est de voir si en limitant la fertilisation azotée, on induit une plus grande variabilité du rendement par rapport à une fertilisation confortable.

Il faut noter toutefois que cette expérimentation a été réalisée avec un an de retard, puisque les conclusions de l'étude géostatistique, basée sur les résultats et les mesures acquises pendant la première période du projet, n'étaient pas disponibles au démarrage de l'expérimentation en 2003.

En France, la fertilisation azotée du maïs est basée sur la méthode du bilan.

Plus particulièrement, la méthode communément utilisée en Alsace et qui sert de base aux conseils divulgués aux agriculteurs à travers les opérations Ferti-mieux, est basée sur l'équation suivante :

$$\text{Dose } X = (\text{objectif de rendement} \times 2.3) + 20 \text{ kg/ha (azote non disponible)} - FS$$

(FS = fournitures du sol)

Fig. 15 : formule pour le calcul de la fertilisation azotée en Alsace

Cette méthode a l'avantage d'être beaucoup plus souple et moins onéreuse que celle utilisée en Allemagne où la dose d'azote est calculée sur la base d'une mesure de reliquats d'azote dans le sol au stade 6 feuilles du maïs.

Grâce à un grand nombre de références acquises par l'ARAA et les Chambres d'Agriculture pour les différents types de sol d'Alsace, une grille de fournitures minimales du sol a été établie régionalement.

Ainsi, pour le sol de la parcelle de Witternheim, ces fournitures sont celles d'un sol Ried brun plus ou moins caillouteux, c'est à dire 100 kg/ha. Par ailleurs comme la parcelle est irriguée et que l'on se situe sur un type de sol qui se réchauffe assez vite, on estime que l'azote apporté se comporte de la même façon partout.

Pour le sol de la parcelle d'Ebersheim, ces fournitures sont celles d'un ried brun profond, c'est à dire 105 Unités. Comme le sol est relativement homogène et que la parcelle est irriguée, on estime là aussi que l'azote apporté se comporte de la même façon dans les différents endroits de la parcelle.

On peut signaler ici, qu'en l'absence de mesures des reliquats azotés dans les parcelles, nous n'avons aucune connaissance sur leur structure spatiale.

Comme on l'a vu dans la première partie du projet (cf. rapport intermédiaire ITADA 2003) :

- le rendement ne présente pas de corrélation avec les variables de sol,
- la variabilité observée une année, ne se répète pas l'année suivante (cartes de rendement pas reproductibles d'une année sur l'autre),
- il n'y a pas de corrélation entre le rendement et l'azote absorbé par les plantes en condition d'alimentation en azote non limitante.

A partir de ce constat, il a été décidé de faire une carte inter annuelle des rendements, à partir des résultats acquis sur les 3 années de la première partie du projet, 2000, 2001 et 2002. Cette nouvelle carte permettant d'identifier des zones où le rendement est toujours élevé, des zones où le rendement est toujours bas et des zones où il est régulièrement moyen, et d'y adapter une fertilisation azotée.

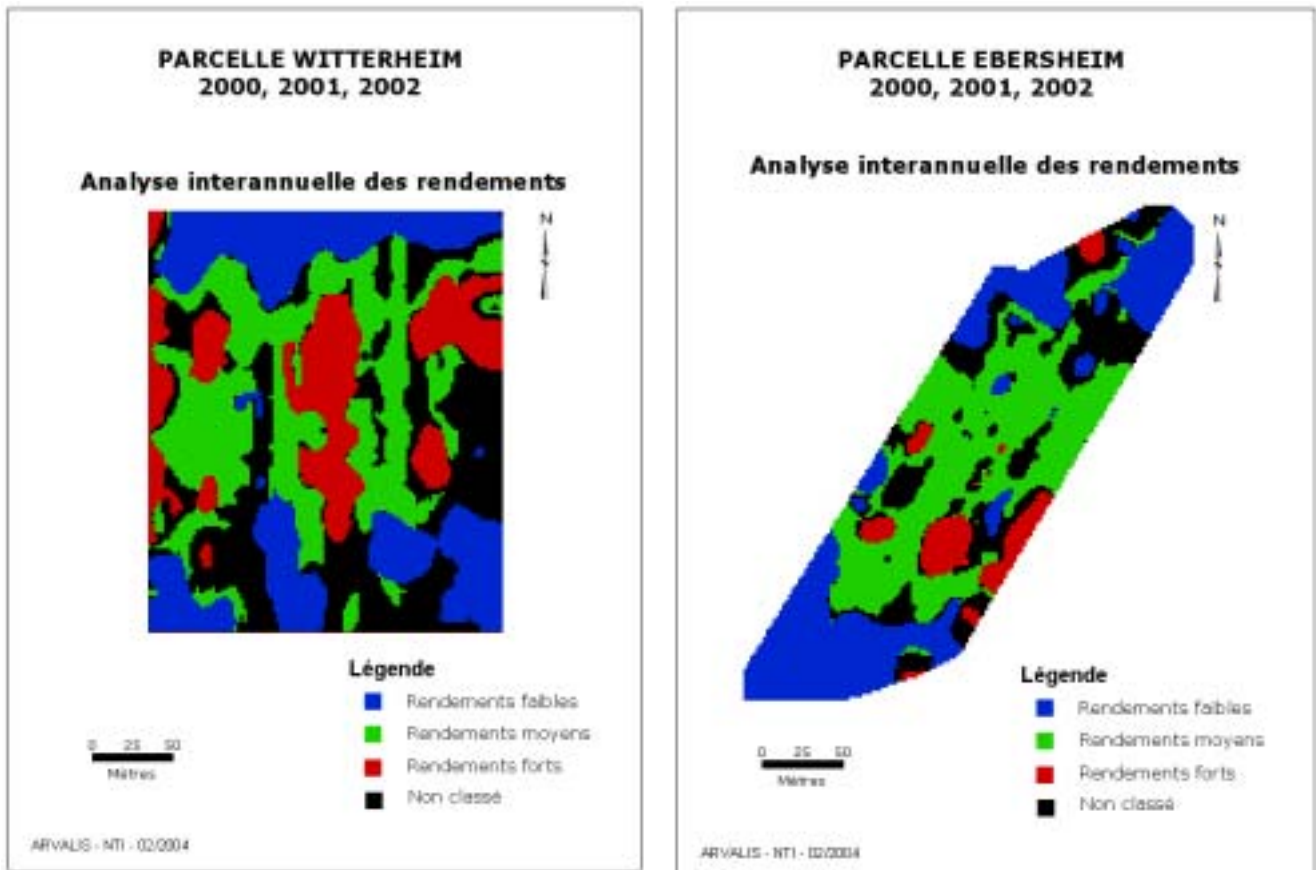


Fig. 16 : carte inter-annuelle de rendements à Witternheim

Fig. 17 : carte inter-annuelle de rendements à Ebersheim

A Witternheim, l'analyse inter annuelle des rendements fait apparaître 2 zones de niveau plus faible aux extrémités Nord et Sud de la parcelle (Fig. 16). Or ces zones ne correspondent pas au temps de montée en charge de la moissonneuse lors de la récolte, ni à des fourrières car la partie de la parcelle consacrée à l'essai ne démarre pas au bord de la parcelle « agriculteur ». Le reste de la parcelle, ne permet pas de définir des zones homogènes suffisamment nettes. Les écarts de rendement sont relativement faibles, de l'ordre de 10 à 15 q.

On a donc adopté la règle de décision suivante : selon un dispositif *BRUNT* on compare 3 modalités :

- dose X sur la totalité d'une longueur de bande (une bande correspond à la largeur de l'épandeur à engrais, soit 12 m),
- dose X – 50 sur la totalité d'une longueur de bande,
- dose X – 50 sur la partie de la bande correspondant à la zone de plus faible rendement, et dose X dans le reste de la bande correspondant à la partie médiane, (ce qui constitue la partie "modulée"),

- un « témoin zéro », de façon à vérifier le niveau de fourniture du sol sans fertilisation azotée, sur une largeur correspondant à une demi-bande et sans répétition (cf. plan).

***N.B.** : la bande “témoin zéro” ne constitue pas un véritable témoin zéro car l’agriculteur apporte un engrais ternaire avant le semis (650 kg de 8/10/20, soit 52 unités d’azote. Il s’agit donc plus exactement d’un “témoin 50 U”.*

La différence entre les doses d’azote se fait donc lors du 2^{ème} apport, au stade 6-8 feuilles.

Méthode pour le calcul de la dose X :

Comme on l’a signalé plus haut, on estime que l’azote apporté se comporte de la même façon partout dans la parcelle. Par ailleurs, l’engrais azoté est d’autant mieux utilisé qu’il est apporté en cours de végétation près des besoins les plus importants de la culture. Dans notre expérimentation, la fraction la plus importante de l’engrais azoté est apportée au stade 6 feuilles du maïs. Or les plantes n’utilisent pas tout l’azote apporté et la proportion utilisée varie en fonction du stade ; d’où l’utilisation de coefficients apparents d’utilisation (CAU).

On estime une utilisation de 60% entre le semis et le stade 2-3 feuilles, et 80% au-delà.

Pour le calcul de notre dose X, au lieu d’utiliser la méthode du bilan « Alsace », décrite plus haut, nous avons utilisé une méthode du bilan « Arvalis », qui intègre ces coefficients apparents d’utilisation et le fait que les besoins en azote varient en fonction du potentiel de rendement, selon la grille ci-dessous.

Equation : dose X = [(objectif de rendement*c) – Fournitures du sol] / CAU

Fig. 18 : méthode de bilan d’Arvalis

Maïs grain			
Objectif de rendement (q/ha)	< 100	100 à 120	> 120
Besoins en azote (kg/q) (c)	2.2	2.1	2.0

Source : Manuel de Référence Technique – AGPM Technique 2001

Tab. 2 : variation du besoin en azote (kg/q) en fonction du niveau de rendement

L’objectif de rendement est fixé à 120 q, ce qui correspond à un niveau de rendement tout à fait réaliste dans cette parcelle, et qui par ailleurs correspond à la moyenne des rendements enregistrés sur les 3 années d’acquisition de références, de 2000 à 2002.

Pour cet objectif de rendement, les besoins totaux en azote sont donc de 120 x 2 = 240 unités. Or d’après les grilles de l’ARAA les fournitures de sol de la parcelle sont estimées à 100 U (valeur du 1^{er} quintile). Il faudra donc fournir 140 unités sous forme d’engrais.

De par l’engrais ternaire apporté en pré-semis, l’agriculteur a déjà apporté 52 unités, dont 31 efficaces pour le maïs (CAU = 60%).

Il reste alors à fournir 140 – 31 = 109 unités qui ne seront utilisées qu’à 80% (CAU à 6 feuilles), soit 140 U (arrondi) lors du 2^{ème} apport.

La dose totale X sera donc de 140 + 50 = 190 U.

Nous mettrons en œuvre également la dose : X – 50, soit 140 U, c’est à dire 90 U au 2^{ème} apport.

Comme la forme d’engrais apporté en végétation est de l’urée à 46%, exprimés en kg d’urée cela revient à : dose X = 300 kg/ha et dose X – 50 = 200 kg/ha

L'urée a été épandue le 8 juin 2004, grâce à un épandeur pneumatique de 12 m (15 rangs de maïs). Compte tenu de la largeur de la parcelle, chaque modalité a pu être répétée 5 fois. Une bande de 8 rangs n'a pas reçu d'urée et constitue le « témoin 50 U» (Fig. 19).

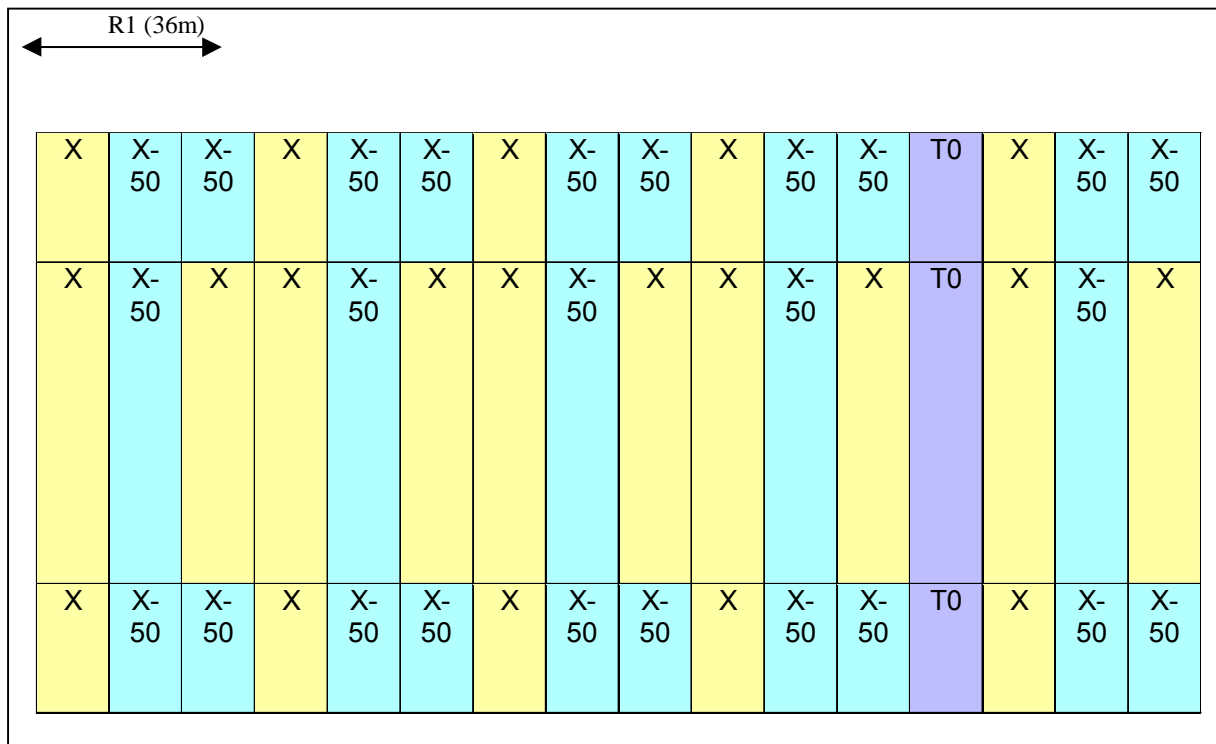


Fig. 19 : plan schématique de la parcelle d'essai de Witternheim

A Ebersheim, la cartographie de l'analyse inter annuelle des rendements ne permet pas de distinguer clairement des zones homogènes. En marge de la parcelle on observe toutefois des zones de rendement faible, mais qui dans ce cas là, correspondent au temps de montée en charge de la machine lors de la récolte et à cet endroit on ne sait pas très bien ce que l'on mesure. De plus ce sont des zones tassées correspondant au demi-tour des engins agricoles (fourrières).

Si l'on se place dans la partie médiane de la parcelle, on n'observe pas de variabilité du rendement.

Malgré cette relative homogénéité, nous avons néanmoins décidé de faire varier la dose d'azote afin d'obtenir une plus grande précision au niveau de l'itinéraire technique, du moins sur un des principaux intrants. En effet, les autres facteurs de productions n'étant pas limitants, (eau, structure de sol,...), il nous a paru intéressant de tenter d'affiner la dose d'azote, facteur sur lequel il est le plus facile d'intervenir.

Sur la base d'un rendement objectif de 120 q, qui là aussi est tout à fait conforme au potentiel de cette parcelle, nous mettrons en œuvre les doses suivantes : X, X – 50 et X + 30, en bandes selon la méthodologie BRUNT. Nous y ajouterons également un « témoin zéro azote » qui ne sera pas un vrai « témoin zéro » puisque l'agriculteur épand un engrais starter avant le semis.

On ne peut guère aller plus loin dans la modulation car la parcelle présente trop de micro-hétérogénéité, c'est à dire des zones trop petites qui posent des problèmes de méthodologie.

Méthode pour le calcul de la dose X :

Pour l'objectif de rendement de 120 q/ha, les besoins totaux en azote sont donc de $120 \times 2 = 240$ unités/ha. Or les fournitures du sol de la parcelle étant estimées à 105 U (valeur du 1er quintile), il faudra fournir 135 unités sous forme d'engrais.

De par l'engrais starter apporté en pré-semis (150 kg de 18/46), l'agriculteur a déjà apporté 27 unités d'azote, dont 16 efficaces pour le maïs (CAU = 60%).

Il reste alors à fournir $135 - 16 = 119$ unités en provenance d'un engrais qui ne sera utilisé qu'à 80% (CAU à 6 feuilles), soit 150 U (arrondi).

La dose X est donc de $150 + 27 = 180$ U (arrondi).

Sont également appliquées les doses : X - 50, soit 130 U, c'est à dire 100 U en végétation et X + 30, soit 210 U, c'est à dire 180 U lors du 2ème apport.

La forme d'engrais apportée en végétation (stade 6 feuilles) est de l'urée à 46%. Cela revient donc à épandre : dose X = 330 kg/ha, dose X - 50 = 220 kg/ha et dose X + 30 = 390 kg/ha.

L'urée a été épandue le 9 juin 2004, grâce à un épandeur pneumatique de 12 m (15 rangs de maïs). Compte tenu de la largeur de la parcelle, et de la place pour le passage d'irrigation, chaque modalité n'a pu être répétée que 2 fois. Une bande de 8 rangs n'a pas reçu d'urée et constitue le « témoin 30 U » (fig. 20).

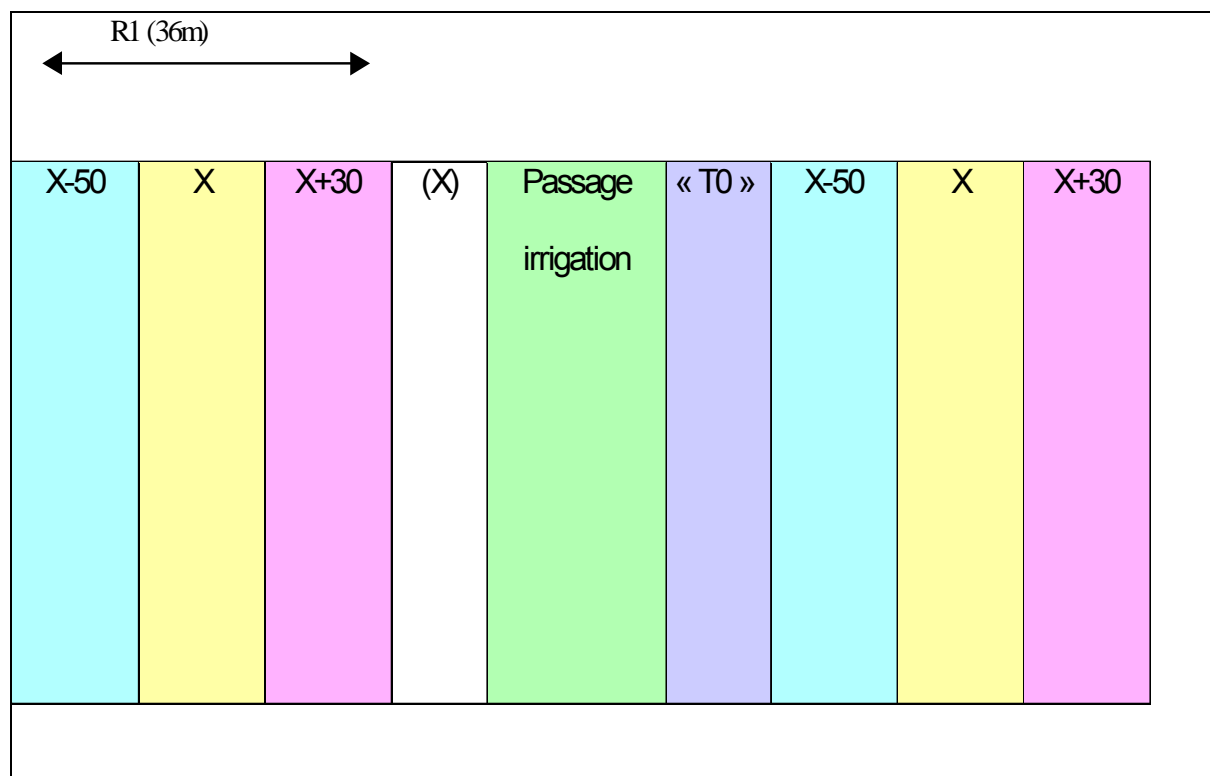


Fig. 20 : plan schématique de la parcelle d'essai d'Ebersheim

Dans les 2 parcelles, une mesure du niveau d'alimentation des plantes en azote par la méthode H N Tester a été réalisée au moment de la floraison dans les différentes modalités testées.

Cette méthode, basée sur la mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles, elle-même dépendante de la dose d'azote, renseigne sur le degré de satisfaction de la nutrition azotée des plantes. La mesure s'effectue à l'aide d'une pince sur 30 feuilles successive d'une même

modalité (feuille de l'épi à floraison) ; elle donne une valeur qui doit être comparée à celle obtenue sur un étalon « surfertilisé » placé dans la parcelle. Le rapport entre les valeurs lues sur la parcelle agricole ou la modalité testée et « l'étalon » permet de calculer l'indice « N tester » lui-même bien corrélé avec l'indice de production et avec la dose d'azote complémentaire à apporter. Un dernier apport d'azote se justifie tant que l'indice « N tester » n'a pas atteint 0.98.

En fait, cette mesure s'effectuant à un stade où il n'est généralement plus possible d'apporter de l'azote au maïs, hormis par fertigation, ce type de diagnostic est plutôt indiqué pour déceler des carences.

Dans les parcelles, il n'y avait pas d'étalon « surfertilisé ». Nous avons alors calculé un indice « N tester » par rapport à la valeur maximum enregistrée.

Après la récolte, des analyses de reliquats d'azote minéral ont été effectuées dans les différentes modalités afin de vérifier l'ajustement de la dose d'engrais aux besoins de la plante exprimés à travers le rendement, et le risque environnemental en cas d'excédent.

Les prélèvements de sol ont été faits sur les 3 horizons : 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm.

A Ebersheim, les prélèvements de sol ont été faits peu de temps après la récolte (6/10), le 12 octobre, mais après 71 mm de pluie.

A Witternheim, la récolte s'est faite tardivement, le 28 octobre ; or il a beaucoup plu pendant tout le mois (176.2 mm) et le sol de la parcelle de Witternheim étant sensible au lessivage, nous n'avons pas jugé bon de mesurer les reliquats, estimant que la plus grande part était lessivée.

2.1.2 Parcelles d'essais en Bade-Wurtemberg

2.1.2.1 Description des sites expérimentaux

Les parcelles d'essais retenus pour la réalisation du projet ont été celles étudiées lors du projet précédent pour lesquelles une grande quantité d'informations avaient été enregistrées en intraparcellaire : données de rendement et résultats de prélèvements sur des placettes.

Ces données avaient fait l'objet d'une compilation rigoureuse et d'une exploitation intensive (RÜHLING 2001). De même, il a été possible de profiter d'expériences issues d'autres travaux préalables (BACH et RÜHLING, 2001; CLAUPEIN, GRAEFF, HERMANN et KAUTER, 2003, MAIER, 2003).

Les trois parcelles d'essais sont situées les uns à côté des autres mais appartiennent à des propriétaires différents. Les semis et fumures de fond sont réalisées directement par les agriculteurs alors que la fertilisation azotée et la récolte sont confiées à un entrepreneur agricole qui possède une des parcelles.

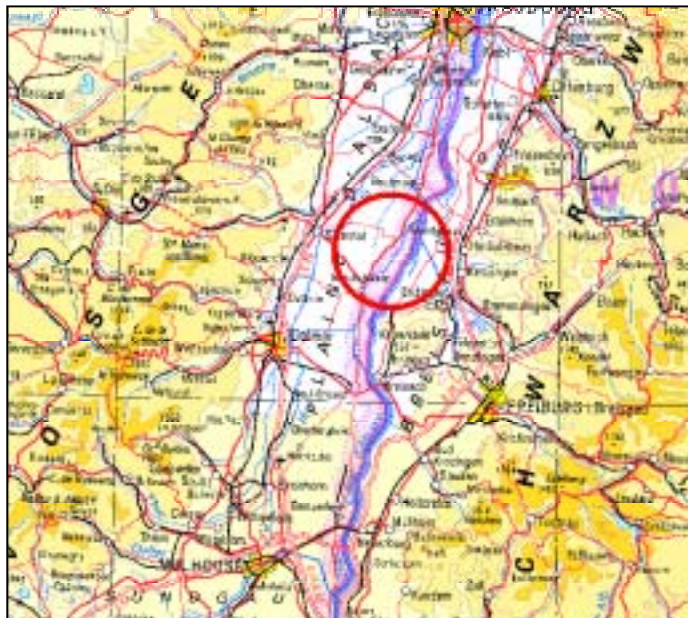


Fig. 21 : localisation des surfaces d'essais dans la plaine rhénane



Fig. 22 : localisation des surfaces d'expérimentations D au sud de Weisweil

Les trois parcelles sont localisées dans le canton de Emmendingen au nord du Kaiserstuhl sur la commune de Weisweil (Fig. 21 et 22) dans un secteur au parcellaire très fractionné typique de la plaine rhénane.

Un autre élément caractéristique de ce secteur est une forte proportion d'exploitations dont l'activité est une activité professionnelle secondaire en comparaison du reste du Land de Bade Wurtemberg. Ainsi, la moyenne de la taille des parcelles est en dessous d'un hectare.

La proportion de maïs sur ces terres est très forte, en lien directe avec la sécurité de rendement importante apportée par la culture de maïs. On retrouve ainsi environ 75 % des surfaces de la région cultivées en maïs grain. (STÖCKLIN 1998 ou RÜHLING, 2001). En plus de cela, on retrouve des céréales à paille et des cultures spéciales (légumes, tabac, pépinières). Il n'y a pas d'irrigation systématique comme cela est le cas le long du Rhin et dans la plaine du centre Alsace.

La figure 23 présente la position des parcelles individuelles avec leurs codes d'identification utilisés par la suite I-01, I-02 et I-03, leurs dimensions ainsi que les positions des points de prélèvements sur les grilles définies pour chacune d'entre elles. Les parcelles se trouvent sur les terrasses alluviales basses limoneuses du nord du Kaiserstuhl (SCHULER, 1991).

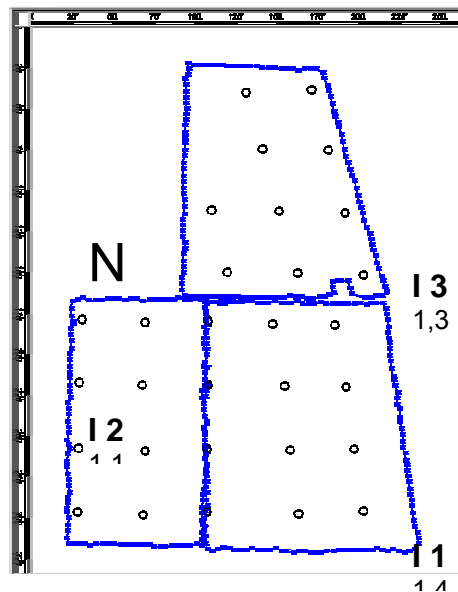


Fig. 23 : surfaces d'essais du côté allemand

Les sols ont été fortement transformés par des siècles d'exploitation. On y retrouve essentiellement des sols pseudo-bruns qui sont transformés en des pseudo-rendzines. Les sols pseudo-bruns des zones d'assainissement du centre et du nord sont exceptionnellement fertiles avec des valeurs agronomiques (Ackerzähle) de 80 et 100. Ils se composent de 4 à 8 dm de lehm sur des limons calcaires qui reposent eux mêmes sur des graviers sableux et calcaires.

Dans le secteur au sud proche de Weisweil, ils sont plus mélangés avec des sols d'alluvions ou des sols de gley. Les valeurs agronomiques des sols varient ici entre 60 et 80 (GLA, 1990). Les sols « Auenböden » et « Auegleye » se composent eux mêmes de 4 à 6 dm limon légèrement caillouteux ou de Lehm sur graviers. La nappe phréatique est située ici 9 à 13 dm plus bas, voire plus. On retrouve également des Gley avec Lehm (3 à 6 dm) sur limon reposant sur sables et graviers (selon RÜHLING, 2001).

La somme des précipitations atteint dans ce secteur du Rhin supérieur en moyenne environ 700 mm (1984 – 1993), ROHMANN et RÖDELSPERGER, 1994 selon RÜHLING, 2001). La nappe phréatique repose en moyenne à 4 m de profondeur. La température moyenne annuelle est de 10°C.

2.1.2.2 Etudes de la variabilité

2.1.2.2.1 Cartographies du rendement à la récolte

Sur la durée du projet, de 2003 à 2005, les trois parcelles d'expérimentations ont été récoltées par l'entrepreneur avec utilisation de cartographies de rendement fondées sur GPS. Comme les parcelles d'expérimentations étaient déjà utilisées lors des projets précédents, des cartographies de rendement pour les années 2000, 2001 et 2002 étaient également à disposition .

A l'aide de ces cartographies de rendement, il a été possible :

- de décrire et de juger l'**acquisition de données** comme instrument d'estimation de la variabilité
- de montrer les **possibilités d'exploitation de ces données**
- de faire une comparaison entre les **rendements et les valeurs de rendement attendues**
- de présenter les **différences de rendement selon différents critères** et
- de comparer les **variations de rendement** les unes aux autres

Acquisition de données

Pour les **acquisitions de données** nécessaire à la **production de cartographies de rendement**, il a été utilisé des moissonneuses batteuses équipées de capteurs de rendement et qui en relation avec un récepteur GPS caractérisent ponctuellement l'évolution du rendement. Selon le constructeur, le système d'enregistrement de données varie (système de mesure volumétrique, système de mesure « *Kraft-/Impulsmesssysteme* » et autres systèmes de mesure indirecte (cf. LUDOWICY C., SCHWAIBERGER R. et LEITHOLD P. (2002)).

L'exemple du battage du 12.09.2003 a montré clairement que l'utilisation de technologies avancées n'est pas toujours sans problèmes. A la date de la récolte, l'entrepreneur disposait de 8 machines équipées de la technologie GPS. Sur ces 8 machines, 7 étaient équipées avec un ordinateur embarqué ACT. Ce système embarqué avait été également utilisé pour la l'application de la fertilisation azotée le 4 juin 2003. Dans une autre moissonneuse se trouvait un ordinateur de bord du système CEBIS.

L'entrepreneur a utilisé pour la récolte des parcelles d'essais la même machine CLAAS LEXION 480, qui était équipée avec CEBIS. Mais l'information sur le type d'ordinateur de bord à utiliser n'avait pas été retransmise pour la préparation des ordres de pilotage de la machine, le support d'informations (carte PCMCIA) n'a pas été préparée pour une lecture par „CEBIS“, mais par „ACT“. Pour cette raison, la carte était non déchiffrable par l'ordinateur embarqué et l'erreur n'a pas pu être décelée avant l'arrivée sur site. Ceci a donc obligé à préparer à nouveau le support d'information en allant au bureau de l'entrepreneur ce qui a provoqué d'importantes

pertes de temps. De plus des pertes d'informations sont intervenues chez l'entrepreneur. Dans la précipitation, des données de rendement internes à l'exploitation qui se trouvaient encore sous la forme de données brutes sur une carte PCMCIA ont été effacées chez l'entrepreneur par inadvertance sans que celles ci aient été au préalable sauvegardées.

Possibilités d'exploitation des données

Après une lecture avec succès des fichiers de données brutes préparées en externe – les données de la moissonneuse ont pu finalement être enregistrées en direct (online), sauvegardées sur une carte PCMCIA et transférées sur le PC de bureau. La figure 24 montre la répartition des données brutes (sans normalisation à l'humidité de stockage) des trois parcelles d'essais, après qu'elles aient été recalculées sur une grille identique de pixels.

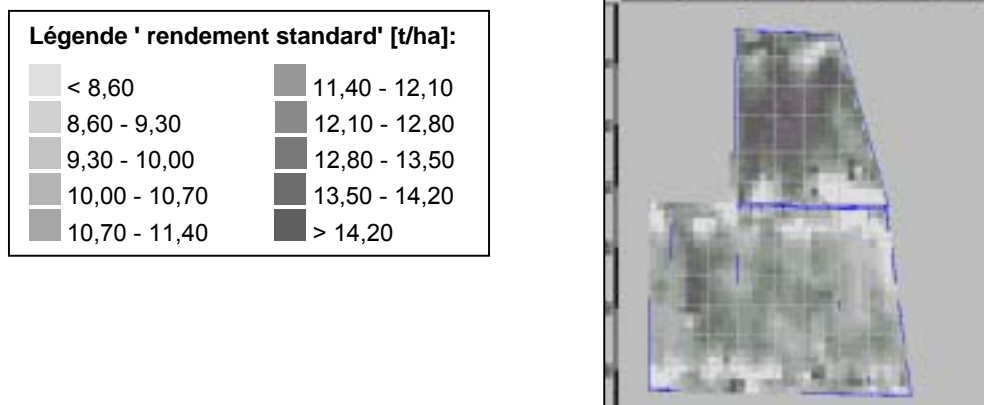


Fig. 24 : données brutes du battage 2003 sur une largeur régulière de pixel (6m de largeur de coupe)

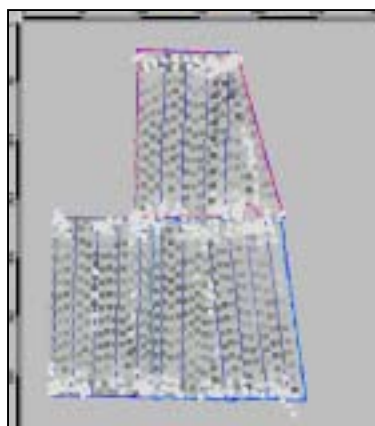


Fig. 25 : données brutes en pourcents, rapportées à chaque parcelle

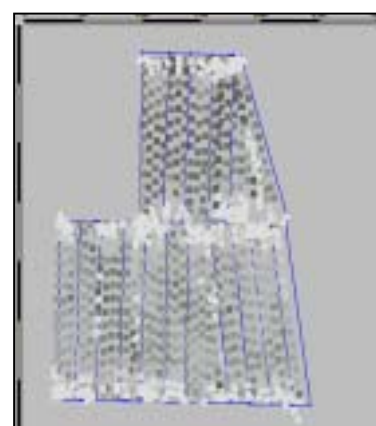


Fig. 26 : données brutes en pourcents rapportées à toutes les parcelles

Il est facile de constater le log du chemin entre les parcelles I-01, I-02 et I-03 la problématique des tournières : les Pixel les plus clairs symbolisent des valeurs de rendement nettement plus faibles. Les figures 25 et 26 présentent des répartitions en pourcentages des valeurs brutes.

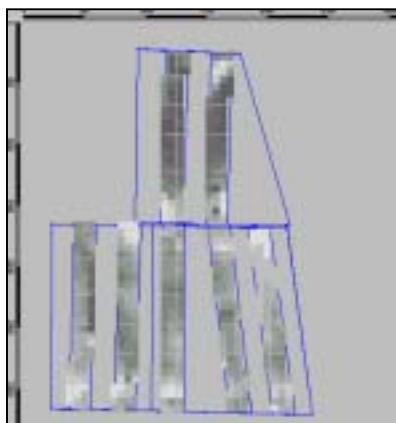


Fig. 27 : données brutes rendement 2003, application modulée

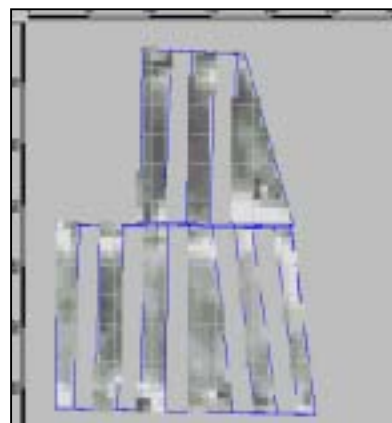


Fig. 28: données brutes du rendement 2003 application classique

Les figures 27 et 28 présentent la possibilité de distinguer ces données brutes selon différents traitements. La figure de gauche présente le rendement brut de bandes avec une application d'azote modulée et la figure de droite présente les données de rendement brut des surfaces ayant reçues une application forfaitaire classique selon les recommandations de la bonne pratique agricole La légende est identique à celle de la figure 24.

Si l'on calcule à partir de ces données brutes pixels une carte des données interpolées, on obtient une carte qui reflète la répartition spatiale des rendements (Fig. 29). On peut aussi produire des cartes distinctes pour les différents traitements (Figures 30 et 31).

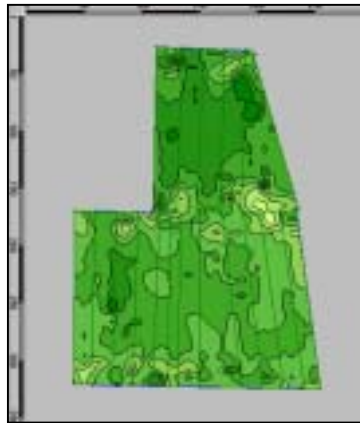


Fig. 29 : carte interpolée 2003 Rendement machine données brutes non corrigées

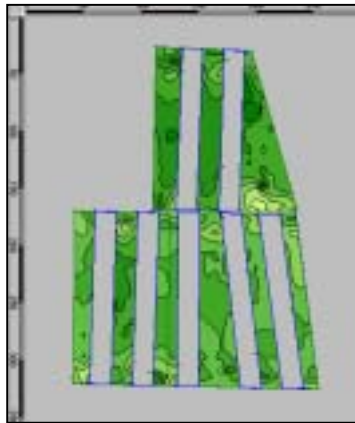


Fig. 30 : séparation selon l'application forfaitaire

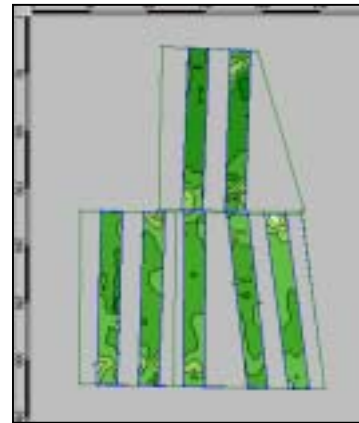
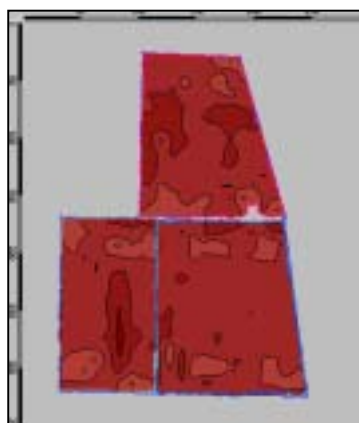


Fig. 31 : séparation selon l'application modulée

Comparaison des rendements avec les attentes de rendement établies

Comme lors de chaque année d'expérimentation, les cartes de répartition des rendements attendus ont été réalisées pour l'application de la modulation, il est concevable de faire une comparaison avec la répartition des rendements finalement enregistrés.

Il est possible de montrer un exemple à partir de l'année 2003. La figure 32 présente la répartition des rendements attendus, telle qu'elle a été prise en compte pour le calcul de l'application d'azote modulée en 2003. Cette répartition a été déduite des répartitions enregistrées lors des trois années précédentes et rapporté au niveau de rendement objectif moyen. Les résultats de l'étude sont présentés au chapitre 3.1.2.



Valeur moyenne :
11,88 t/ha
quantité totale : 11,88 t/ha *
4,5864 ha = 54,47 t

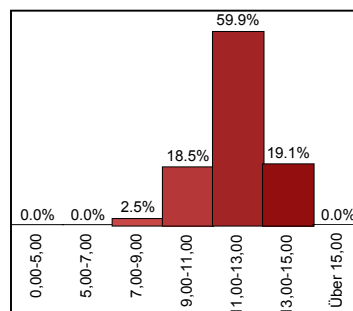


Fig. 32 : carte des rendements attendus établie pour la fertilisation

Afin de pouvoir décrire les **différences de répartition entre rendement réalisé et l'attente de rendement estimé** sous forme d'une carte de contours interpolés, les données brutes pour le rendement réel et le rendement estimé ont été recalculées pour une même grille de 10 mailles de 10 m². Il en résulte une comparabilité rapportée au pixel des valeurs, si bien que la différence peut être calculée pour chaque point individuel de la grille (Fig. 33).

A partir de ce résultat partiel, il est possible de produire une carte de contours des valeurs interpolées (carte des différences) qui décrit les différences de distribution.

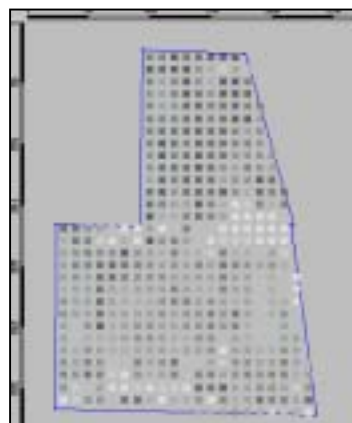
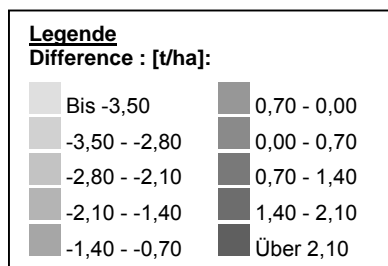


Fig. 33 : données brutes de différence entre le rendement réel et le rendement attendu (gris = identique, clair = plus faible, foncé = plus élevé)

Comparaison de la différence de rendements selon différents traitements

La différence de rendement calculée précédemment a été distinguée selon les traitements.

De plus, la différence de rendement calculée a été séparée selon les parcelles et les valeurs ont été comparées entre elles. Les résultats sont présentés au chapitre 3.1.2.

Comparaison des distributions du rendement les unes aux autres

Comme le rendement attendu est issu des répartitions de rendement des années précédentes et dépend donc plus ou moins des similitudes de répartition entre années, il est intéressant de tester cette supposition. Si cela n'était pas le cas, il conviendrait alors de se demander quel sens il y a à essayer de déterminer la répartition du rendement attendu pour une année particulière à partir des répartitions de rendement des années précédentes. Pour cette raison, les répartitions de rendement sur les surfaces d'essais ont été comparées les unes aux autres.

Pour ce faire, les données brutes de chacune des répartitions ont été recalculées pour une grille pixel identique. Par une comparaison des valeurs de pixel identique il a été possible de tester les répartitions en faisant des corrélations. Les résultats indiquent s'il y a réellement des équivalences dans les répartitions spatiales. Les résultats sont présentés au chapitre 3.1.2.

2.1.2.2.2 Analyses des reliquats en azote minéral Nmin

Les reliquats en azote minéral Nmin sont un élément important pour le calcul de l'application d'azote. Ils ont donc fait l'objet d'une détermination sur les points de la grille des dispositifs d'essais peu avant l'application de l'azote et à des fins de contrôle immédiatement après la récolte. Dans le projet, on a recherché la répartition des Nmin

- entre les prélèvements de printemps des différentes années
- entre les prélèvements d'automne des différentes années

entre les prélèvements de printemps et d'automne

entre les prélèvements réalisés à des dates proches par différents preneurs d'échantillon.

Les corrélations entre ces répartitions ont alors été calculées. Des cartes de répartition ont été interpolées et évaluées visuellement. Les résultats sont présentés au chapitre 3.1.2.

2.1.2.2.3 Analyses du sol

Afin de prendre en considération d'autres paramètres importants pour l'application de la modulation des intrants, des analyses de sols complémentaires ont été réalisées. Il s'agit de :

- la texture aux points de la grille. Grâce à la collaboration existante, les données issues des prélèvements faits par l'Université de Hohenheim ont été mises à disposition.
- les données acquises dans le cadre du projet concernant l'analyse de fond des sols, en particulier la répartition des valeurs de pH, des teneurs en phosphore (P2O5), en potassium (K2O5) et en magnésium (MgO).

Les données ont été travaillées pour obtenir des cartes des contours et évaluées visuellement.

Les répartitions ont été comparées entre elles, et les corrélations existantes testées. Les résultats des analyses sont présentés au chapitre 3.1.2.

2.1.2.2.4 Récoltes manuelles sur placettes

En relation avec le contrôle de l'applicabilité de la modulation des intrants, d'autres paramètres ont été enregistrés afin de caractériser la variabilité des parcelles. A cette fin, des récoltes manuelles sont intervenues en 2003 et 2004 à des points définis des grilles. Les paramètres suivants ont été déterminés (Tab. 3).

Inventaire	Date	Paramètre
Relevé de paramètres non des tructifs (Chapitre 1.2)	09.09.2003 07.10.2004	- Plantes/m2 - Hauteur des plantes sur 5 plantes - nombre d'épis/plante - nombre de rangs de grains/épi - grains/rangée - grains /épi

<p>Récolte manuelle (Chapitre 1.2)</p>	<p>11.09.2003 07.10.2004</p>	<ul style="list-style-type: none"> - - Plantes/m² - Hauteur des plantes sur 5 plantes - nombre d'épis/plante - nombre de rangs de grains/épi - grains/rangée - grains / épi - poids frais grains et paille - matière sèche séparée grain et paille - N,P,K séparés selon grain et paille
---	----------------------------------	--

Tab. 3 : mesures de données sur les points de la grille en 2003

Les données ont été exploitées pour obtenir des cartes des contours (interpolations) et ont été évaluées visuellement. Les répartitions individuelles ont été comparées à celles des autres afin de tirer d'autres conclusions sur les liens de la variabilité dans les parcelles. Les résultats les plus significatifs pour les questions posées dans le cadre du projet sont rassemblés au chap. 3.1.2.

2.1.2.2.5 Inventaires des accidents de culture et dégâts

Pour une approche complémentaire de la variabilité intraparcélaire, des relevés et inventaires des accidents ont été réalisés en 2003 et 2004 sur les parcelles d'essais. Ainsi, le nombre et la répartition ont été évalués pour la pyrale du maïs, le charbon (Beulenbrand), le liseron des champs, la verse et les maladies cryptogamiques.

Les données ont été exploitées pour obtenir des cartes des contours (interpolations) et ont été évaluées visuellement. Diverses corrélations avec d'autres paramètres ont fait l'objet d'études.

2.1.2.2.6 La mesure de la conductivité électrique avec EM38

Selon DOMSCH et WARTENBERG (2000), la mesure géoréférencée de la conductivité électrique du sol est une technique de mesure pour l'investigation des différences du sol avec un fort rendement parcellaire. Elle peut être réalisée à grande vitesse et ainsi à faible coût.

La conductivité électrique est corrélée positivement avec les teneurs en argile, en eau et en sel du sol, à la capacité au champ et à la température. Une étude avec une sonde EM38 (Geonics Limited, Ontario) n'a toute fois pas démontré de lien entre la conductivité électrique et la teneur en sel dans la solution du sol mais en revanche avec la capacité au champ (SCHMIDHALTER et ZINTEL 1999). Dans les composants minéraux du sol, l'argile possède la plus forte conductivité, suivie du limon et du sable. C'est pourquoi à l'aide de cette mesure que l'on peut appréhender les changements de type de sols et leur caractériser leur répartition dans les différentes couches de sols étudiées (Domsch, Lück et Eisenreich 1999). On peut par ex. identifier des compactations liées à la texture par de plus fortes teneurs en argile. On peut aussi tirer des conclusions sur la réserve en eau du sol. En liaison avec la texture du sol (SCHEFFER et al. 1984).

La conductivité électrique du sol des parcelles d'essais avait déjà été géoréférencée dans le projet ITADA préalable „faisabilité des techniques d'agriculture de précision dans le Rhin supérieur. Interprétation de la variabilité des parcelles agricoles dans la plaine du Rhin“ (RÜHLING, 2001). Les mesures avaient été réalisées avec la machine VERIS 3100. Avec cet appareil, la mesure est faite avec des disques électrodes qui entrent dans le sol sur quelques centimètres (Fig. 34).

L'affaiblissement du courant transmis par le sol est mesuré par chute de tension (induction électromagnétique). Le champ électrique peut pénétrer dans quelques décimètres du sol . Les coutres sont tirés à travers le sol par le véhicule motorisé et l'on enregistre ainsi une mesure continue en [mS/m]. A l'aide d'une antenne GPS installée sur le capteur et le récepteur GPS (ACT) sur le véhicule, la position est précisée pour chaque mesure. Sur les parcelles d'essais, la conductivité électrique a été mesurée le 10.03.2001 avec l'appareil, avec une mesure par seconde et pour deux horizons 0-30 cm et 0-90 cm, simultanément relevés. Avec une vitesse d'environ 10 km/h , cela amène à une densité de mesures d'environ une mesure tous les 2 à 3 mètres, ce qui correspond à environ 860 à 960 valeurs par ha (Fig. 35). Cela permet une performance d'environ 4 ha par heure sans les temps de préparation.



Fig. 34 : mesure de la conductivité électrique enregistrée avec GPS avec „Veris 3100“

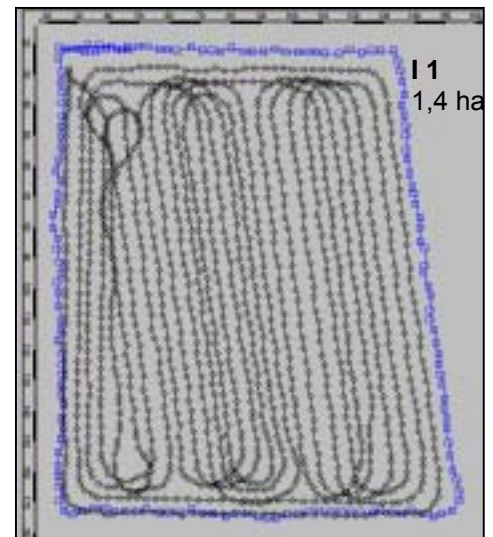


Fig. 35 : densité de relevés de la conductivité électrique avec 1389 points de mesures (ex. de I-01)

Ces données de conductivité électrique avec l'appareil VERIS ont fait l'objet de recherche de corrélations avec les autres paramètres lors de la première phase du projet, mais aucune relation forte n'a été constatée. Mais comme cela serait extrêmement important pour la modulation des intrants de pouvoir caractériser la variabilité intraparcellaire d'autres caractéristiques à l'aide d'un procédé simple, il a été décidé de renouveler l'enregistrement de la conductivité électrique du sol avec un autre appareil. En raison des bonnes relations existantes avec les responsables d'un projet parallèle de l'Université de Hohenheim sur les mêmes parcelles d'essais, il a été possible de disposer de l'outil „EM38“.

L'appareil de mesure de la conductivité électrique EM38 combiné avec un récepteur DGPS est un outil peu coûteux pour produire des cartographies à haute définition de la conductivité électrique. Dans ces cartes, il est possible de distinguer les variations intraparcellaire de teneurs moyennes en argile dans le profil du sol. Ceci peut être utilisé pour réaliser des prélèvements d'échantillons de sol de manière plus pertinente. Il permet d'acquérir des informations détaillées sur l'hétérogénéité de l'inventaire du sol, qui rendent possible les premières décisions concernant la conduite d'une modulation intraparcellaire.

DOMSCH, H. (2002) („cartographie de la conductivité électrique et sa contribution à la modulation intra-parcellaire“, dans la revue de Géologie appliquée 3/02, Hrsg Office nationale pour les géosciences et les services géologiques de la République allemande).

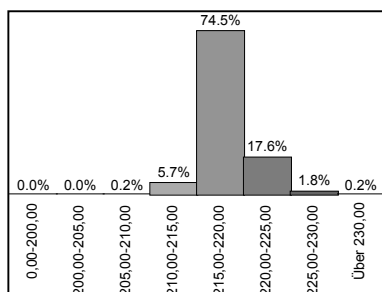


Fig. 36 : mesure de la conductivité électrique avec „EM 38“



Fig. 37 : densité de relevés de la conductivité (toutes parcelles) localisée avec GPS

Les parcelles d'essais ont été mesurées le 29.03.05 avec l'appareil „EM38“. L'appareil se trouvait dans une caisse de bois, tiré plus ou moins régulièrement à distance suffisante d'une voiture tout terrain sur les parcelles d'essais (Fig. 36). La Figure 37 présente les données brutes à partir desquelles le modèle de passage est produit. A côté des valeurs de conductivité électrique, les valeurs d'altitude mesurées en même temps par GPS sont aussi présentées. Des cartes (Figures 38 et 39) ont été interpolées à partir de ces données brutes .



Valeur moyenne : 218,47

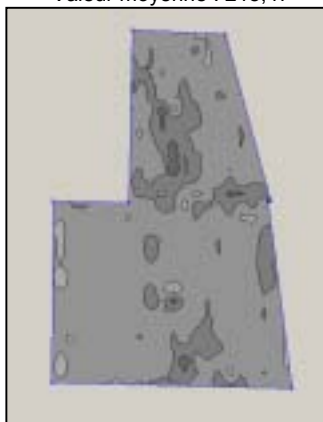
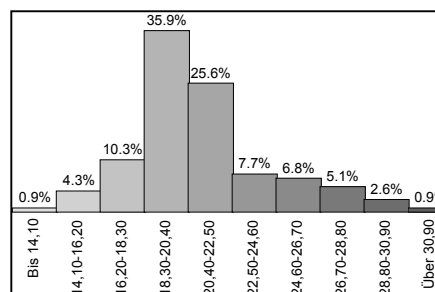


Fig. 38 : répartition de l'altitude avec mesures EM38



valeur moyenne : 21,03 mS



Fig. 39 : répartition de la résistivité électrique

A partir de ces cartes de répartitions, les valeurs mesurées ont été finalement déterminées pour un système de référence unique, si bien que des tests de corrélation ont pu être réalisés avec d'autres paramètres explicatifs de la variabilité. Les test de corrélation ont été réalisés avec les répartitions de :

- N_{\min} à l'automne 2005,
- N_{\min} au printemps 2005,
- le rendement 2004,
- la maturité au 03.09.2004, au 24.09.2004 et au 06.10.2004,
- les teneurs en C et N du grain et de la paille,
- les répartitions des teneurs en sable, limon et argile pour l'horizon superficiel (0-30 cm),
- les répartitions de la conductivité électrique avec „VERIS“ ainsi que
- les répartitions des réfractions des canaux R, G et B lors d'un survol à bas coût le 07.07.04 à titre expérimental

Les résultats de ces études en lien avec faisabilité de la modulation intraparcellaire des intrants sont rassemblés dans le chapitre 3.1.2 .

2.1.2.2.7 Mesure des réserves en eau du sol

En relation avec le projet de recherche de l'Université de Hohenheim qui se déroulait en parallèle, des mesures d'humidité du sol (TDR) ont été réalisées aux points déterminés par la grille de la parcelle I-03. Les résultats des mesures réalisées à l'aide de ces capteurs ont été amicalement mis à disposition pour les études du projet ITADA. Ils ont été utilisés pour vérifier les corrélations existantes entre les réserves en eau du sol et les autres données variables en intraparcellaires disponibles. Pour les données relatives aux capacités hydriques du sol, il s'agit de relevés des 26. et 27.07.2005.

La Figure 40 présente les données brutes.



Fig. 40 : données brutes de répartition de l'humidité du sol

Les capteurs ont été installés par l'Université de Hohenheim de telle façon que les enregistrements des humidités du sol [%] ont pu être réalisés pour les trois tranches de profondeurs 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm.

Les corrélations ont été testées entre les valeurs mesurées et les répartitions des principaux autres paramètres mesurés en intraparcellaire. Les paramètres testés dans les corrélations ont été :

- les trois inventaires de maturité réalisés en 2004 par prélèvements
- les inventaires de maturité réalisés depuis les airs en 2004 (image aérienne avec une technologie simple)
- les paramètres de réflexion du survol du 13.09.2004 pour la parcelle I-03
- les paramètres de réflexion du survol du 05.10.2004 pour la parcelle I-03
- les paramètres de réflexion du survol du 13.10.2004 pour la parcelle I-03
- la répartition des N_{\min} du 02.06.2004
- la répartition des N_{\min} du 23.07.2004
- la répartition des N_{\min} du 19.11.2004
- la répartition des N_{\min} du 29.03.2005
- la répartition de la composition de la granulométrie argile, sable et limon (07. 05.2004)
- la répartition du rendement 2004
- les valeurs d'analyses de plantes 2004 (teneurs carbone et azote pour grain et tige)
- les valeurs de l'analyse de fond du sol du 19.11.2004 :
valeur pH , phosphore (P_2O_5), potassium (K_2O) et magnésium (MgO)

2.1.2.3 Modulation des applications d'azote

On peut distinguer trois grands types de démarches pour la mise en œuvre de la modulation intraparcellaire des intrants. Il s'agit de :

- l'utilisation de cartes (mapping approach)
- l'utilisation de capteurs (realtime sensor approach)
- l'utilisation de capteurs avec superposition de cartes.

Pour **l'utilisation de cartes (mapping approach)** encore appelée « technique offline », l'application modulée se fait à partir d'une carte d'application préparée. Celle-ci a été calculée au préalable avec un SIG dans un environnement extérieur, où il est tenu compte des unités intraparcellaires déterminées et des valeurs d'application à atteindre.

L'utilisation de capteurs (**realtime sensor approach**) encore appelée « technique online » se définit par le fait que la fertilisation modulée est déterminée pendant le passage au moyen de capteurs (online). Un environnement SIG extérieur n'est donc pas nécessaire. Les valeurs d'applications sont calculées en ligne.

Pour **l'utilisation de capteurs avec superposition de cartes**, il s'agit d'une combinaison entre les deux techniques. La fertilisation azotée modulée en intraparcellaire est calculée à partir de cartes préparées au préalable et en combinaison avec des capteurs pendant le passage.

Les paramètres importants sont alors déjà pris en compte au préalable dans un environnement SIG. Pendant le passage, les données mesurées « online » entrent en compte pour le calcul de la valeur finale d'application.

Le Tableau 4 présente les principales différences entre les différentes méthodes.

Utilisation de cartes (mapping approach)	Utilisation de capteurs (realtime sensor approach)	Utilisation de capteurs avec superposition de cartes
Techniques offline	Techniques online	Combinaison de techniques Offline-et Online
Préparation		
- avec une préparation longtemps au préalable - devant son PC - coûteux en temps	- en même temps que l'application - sans travail supplémentaire devant son PC - besoin de temps uniquement pour la calibration	- à l'avance - devant son PC - coûteux en temps
Application		
- fertilisation de fond - fertilisation oligo-éléments - premiers apports fertilisation N - protection des cultures	- gain d'information - pour des propriétés variables des plantes et du sol - pour lutte contre adventices - premiers apports fertilisation N	- fertilisation de fond - fertilisation oligo-éléments - premiers apports fertilisation N - protection des cultures
Particularités des méthodes		
- prise en compte d'une quantité de paramètres complexes	- significatif sitôt qu'une technique Online fonctionne avec assurance pour une intervention; - actuellement protection des cultures et fertilisation N	- prise en compte d'une quantité de paramètres complexes
- si les capteurs Online ne sont pas couronnés de succès - quand plusieurs paramètres doivent être pris en compte en même temps		quand plusieurs paramètres doivent être pris en compte en même temps et qu'un paramètre doit être totalement d'actualité

Tab. 4 : principales différences entre les technologies pour l'application de la modulation

Afin de pouvoir appliquer une modulation intraparcellaire des intrants agricoles, la technique retenue doit être capable de réagir à la variabilité estimée préalablement sur la parcelle. Ceci signifie qu'à l'aide de la technologie, l'information sur l'application doit être acquise (ou bien lue) et appliquée en modulation intraparcellaire. Pour satisfaire à ces exigences techniques, une standardisation internationale est actuellement en développement (CLAAS, 2003).

Sans que l'on puisse rentrer ici dans tous les détails, les exigences techniques posées vis à vis des machines peuvent être résumées :

- la possibilité de préciser la position par dGPS
- l'équipement avec de l'informatique embarqué pour l'exploitation des cartes d'application ou bien des paramètres mesurés en direct (online), et
- l'utilisation d'un appareil de culture dotés d'outils électroniques de lectures compatibles.

2.1.2.3.1 Modulation de l'application d'azote (technique offline) en 2003

Lors de l'année d'expérimentation 2003, l'objectif était d'essayer de moduler l'application d'intrants (application N) en prenant en compte la variabilité intraparcellaire avec les possibilités à disposition. Après l'accomplissement de cette entreprise, il devait être testé d'autres alternatives, ainsi que les possibilités d'une modulation au delà de l'échelle de l'exploitation (modulation interparcelles, gestion d'îlots de parcelles attenantes).

Dans le dispositif expérimental, il a été porté attention à la possibilité de pouvoir comparer une technique de modulation pratiquée avec succès et de vérifier. Pour ce faire, il a été mis en place des bandes correspondant à différents traitements. Il a pu être obtenu qu'une même variété de maïs (peso) soit utilisée sur les trois parcelles, mais comme le semis était réalisé par l'agriculteur et non par l'entrepreneur, les dates de semis ont différé.

Allant au delà des données déjà disponibles, la répartition des reliquats d'azote minéral N_{min} a été relevée à partir d'une grille de points de prélèvements. De plus, il a été pris en compte une quantité d'autres données relatives aux plantes et aux sols des parcelles d'essais, car ces parcelles servaient également de parcelles d'expérimentations pour un projet de recherche conduit par l'Université de Hohenheim (titre : « étude et modélisation d'une stratégie de fertilisation azotée adaptée au potentiel optimisé pour les matières premières renouvelables au regard des émissions en azote et aux pertes d'éléments fertilisants »). Des contacts coordonnés, l'échange d'information et de données se sont avérés très avantageux pour les deux parties.

Exception faite du second prélèvement de N_{min} réalisé pour le projet ITADA, tous les relevés réalisés pour l'Université de Hohenheim en 2003 ont été faits aux mêmes points de prélèvements. Il a été défini des sécantes, qui sont des lignes de prélèvements à travers les parcelles avec les points de prise tous les 10 mètres.

La figure 41 indique les positions des points individuels de prélèvements. Les points de mesures appelés points de la grille („Rasterpunkte“) dans la suite du projet se situent sur un grand rectangle dans un polygone ouvert et les points de prélèvements sur des lignes transversales forment de petits carrés dans un polygone fermé. Les lignes à travers les 3 parcelles indiquent les limites des applications.

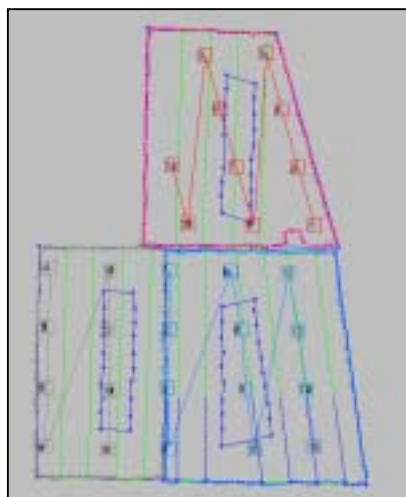


Fig. 41 : points de prélèvements, lignes transversales et limites d'application

Afin de pouvoir appliquer une modulation intraparcellaire des intrants, la technique utilisée doit pouvoir réagir à la variabilité établie au préalable. Pour la technique de 2003 qui utilise des cartographies, cela signifie que l'information qui va conduire l'application d'azote doit pouvoir être lue et appliquer l'apport de manière modulée. Une standardisation internationale est en cours (CLAAS, 2003) pour ce qui concerne les exigences techniques posées pour cette démarche.

Pour la coopération envisagée dans le projet, il avait déjà été établi contact avec un entrepreneur qui en plus de connaissances techniques dans le domaine de l'agriculture de précision et de motivations personnelles à la collaboration, disposait des techniques nécessaires et d'engins équipés. En 2003, pour le projet ITADA, on disposait d'une des huit moissonneuses batteuses LEXION de la marque CLAAS (www.claas.de), avec laquelle des cartographies des rendements pouvaient être réalisées. A côté de cela, il y avait un épandeur à engrais moderne BOGBALLE MR3 (Tab. 5) qui disposait d'un équipement de pilotage de la répartition avec ordinateur ACT embarqué. Ce dernier a été également utilisé sur la MB Lexion. Le logiciel „Agromap basic“ (Agrocom) exportait les données lisibles par l'ACT (Tab.6).

Données :	
Largeur application	: 12-36 m
contenance	: 1.500 – 2.800 litres
débit	: 0,35-400 kg/min.
poids	: min. 430 kg
Dim. cuve	: max 140x250 cm

Tab. 5 : données techniques sur l'épandeur à engrais Bogballe MR 3

agrocom.© 2000 Agrocom GmbH & Co. Agrarsystem KG	
ACT: système de pilotage mobile, enregistrement d'information , pour les machines agricoles	
AGROCOM Computer Terminal ACT	
-	Industrie-PC (486er)
-	système d'exploitation DOS élargi
-	variantes (ACT 2-40 et ACT 2-60)
-	mémoire du programme 4 MB (2-40) à 10 MB (2-60)
-	6,5-Zoll Aktiv-Display
-	lecteur de carte PCMCIA
-	Externer Streifendrucker (option)
-	Internes DGPS (option)
-	Externes DGPS (option)
-	communication données (option)
-	multifonctionnalité

Tab. 6 : données techniques sur ACT (www.ccgis-agrar.de)

„l'épandeur à engrais Bogballe M3 base est construit de manière modulable et peut par tranche de 650 litres être adapté aux conditions de l'exploitation de 1500 à 2800 litres.

Le revêtement du M3 base est protégé avec "Flexi Coat" particulièrement résistant à la corrosion. Tous les boulons, les disques distributeurs, et les trémies sont en acier galvanisé.

Le M3 base est épandeur très flexible. L'épandeur M3base dispose du système d'épandage BOGBALLE-Vierfachüberlappung. Ceci permet le passage d'une fertilisation à la dose normale à un apport limité grâce aux variations d'orientations des disques épandeurs sans changement de disques.

Il est possible d'utiliser le système électronique de dosage et d'épandage „Calibrator“ pour une fertilisation dépendante à 100% du positionnement. (www.bogballe.com).

La Figure 42 présente le rôle de la carte d'application d'azote déterminée dans la technologie choisie (2003) pour la modulation intraparcellaire avec usage de cartes (offline). Comme déjà indiqué, la carte d'application est préparée au préalable (offline) devant son PC et rendue accessible pour l'ordinateur de bord. A l'aide du récepteur GPS sur le tracteur, le géo-positionnement est déterminé et la dose d'application fournie par la carte d'application, laquelle est finalement transmise à l'ordinateur de l'épandeur d'engrais.

Pour l'application concrète, on utilise les informations nécessaires issues des paramètres utilisés pour la réalisation de la carte d'application, lesquels sont nécessaires au calcul de la dose d'azote selon la „bonne pratique agricole“ et pour qui les valeurs ont été distinguées en intraparcellaire. Le calcul des besoins en azote pour les parcelles d'essais selon la formule „N-Bedarf 3.3“ (LEL Schwäbisch Gmünd, LAP Forchheim avec IfuL Müllheim, 2001).

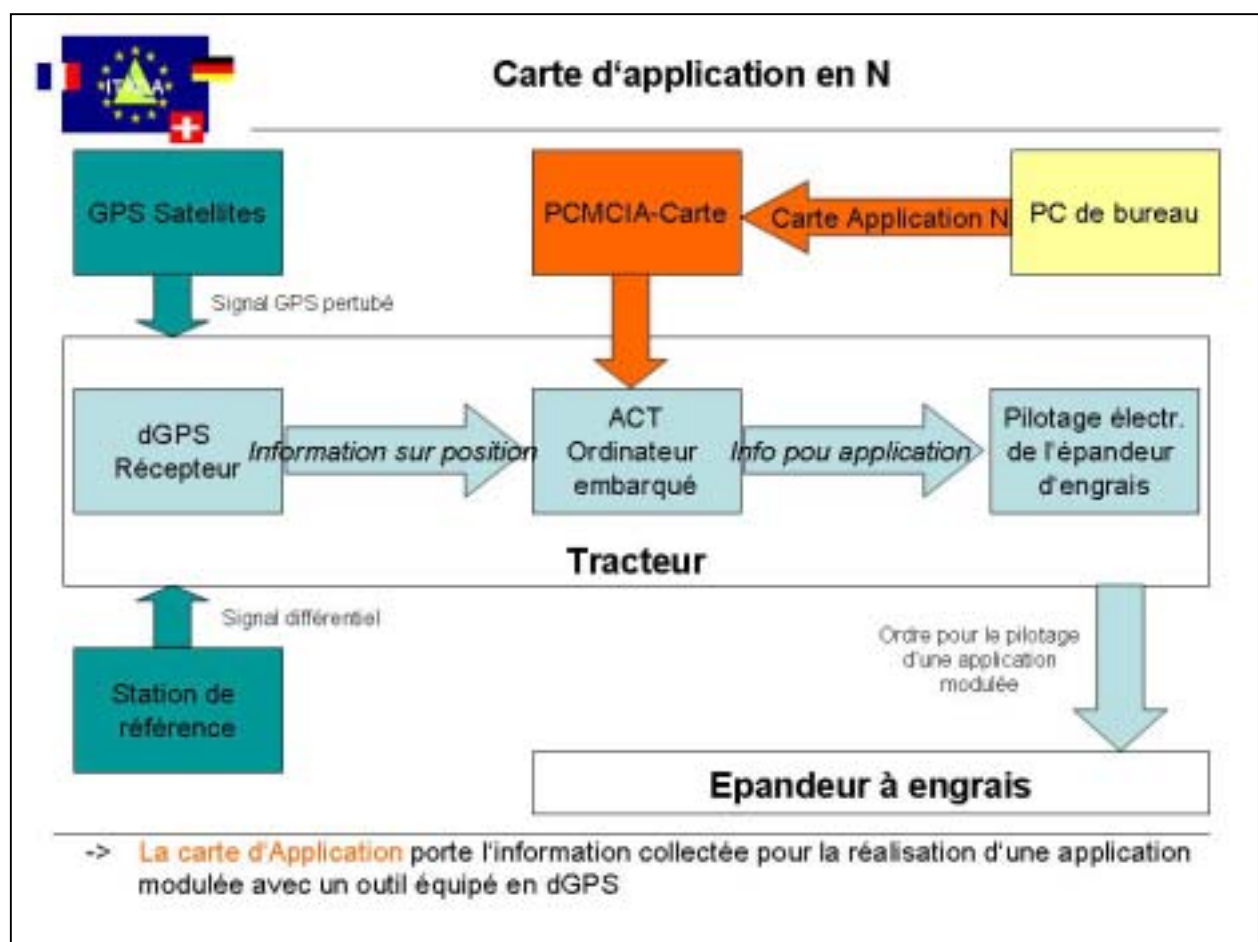


Fig. 42 : rôle de la carte d'application en N élaborée offline dans le flux de données de la technologie retenue en 2003

Le Tab. 7 liste l'essentiel des différentes étapes avec les partenaires associés et donne renseignement sur le type d'acquisition d'information et si les valeurs sont différenciées en intraparcellaire ou bien si les valeurs sont disponibles de manière forfaitaire pour l'ensemble de la parcelle.

Paramètre	Spécification intraparcellaire	Acquisition d'information
Rendement attendu [q/ha] Facteur pour valeur absorbé [kg N / q produit] N absorbé supplément pour les résidus non exportables -> besoin en azote	différenciation intraparcellaire facteur différenciation intraparcellaire forfaitaire pour parcelle différenciation intraparcellaire	Valeur établie par l'entrepreneur comme valeur moyenne attendue, par communication des cartes de rendement intraparcellaire des 2 dernières années Valeur établie en relation avec les paramètres spécifiques à la parcelle Calculé à partir du rendement attendu et de la valeur pour le facteur d'exportation. Valeur établie à partir de formule de calcul Résultat du calcul
Fertilisation dans la raie du semis (minoration) reliquats sol N-min au printemps (minoration) minéralisation N du sol (plusieurs paramètres) (minoration) -> fertilisation N selon la bonne pratique agricole minorations - fertilisation N selon MEKA, - fertilisation organique -> besoin en fertilisation azotée minérale -> calcul quantité pour l'engrais utilisé	Forfaitaire parcelle différenciation intraparcellaire différenciation intraparcellaire différenciation intraparcellaire forfaitaire par parcelle, (n'entre pas en compte pour les parcelles d'essais présentes) différenciation intraparcellaire	Apport par les propriétaires ou l'entrepreneur Carte interpolée des N-min des prélèvements sur des points représentatifs répartis régulièrement Valeurs préétablies mais toujours en relation avec la variation intraparcellaire du rendement attendu Résultat du calcul Apport par les propriétaires voire le LU Résultat du calcul

Tab. 7 : paramètres entrant dans la détermination de la dose d'engrais

La figure 43 présente la démarche schématique suivie au niveau de la technique. Concrètement, il a été procédé pour la mise en oeuvre de la technologie des cartographies, à l'aide des logiciels „Agromap Basic“ de chez „Agrocom, à la constitution d'une **carte du rendement attendu** à partir des cartes de rendement des années 2000 et 2001, où la variabilité sur la parcelle avait été appréhendée et la valeur moyenne totale adaptée à l'objectif du rendement attendu de 120 q/ha. En résultat, on a produit une carte du rendement attendu pour chaque parcelle pour un rendement moyen de 120 q/ha et avec une répartition variable du rendement attendu qui était orientée selon les rendements réels enregistrés les dernières années.

Avec les mêmes logiciels, il a été réalisé une carte de **répartition des N_{min}** pour chaque parcelle d'essai réalisée à partir d'interpolation des résultats N_{min} des points de la grille de prélèvements.

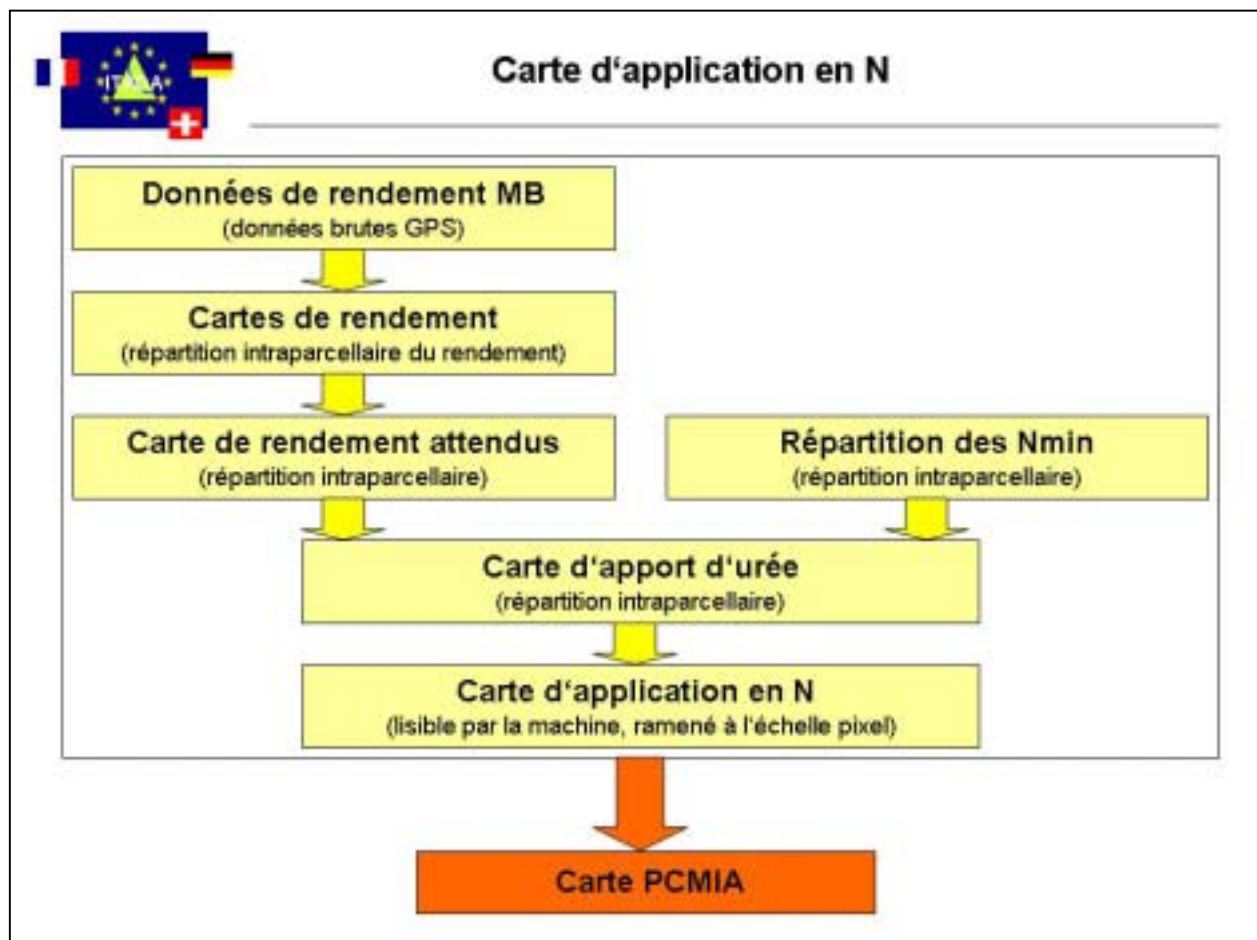


Fig. 43 : flux de données dans la détermination de la carte d'application en N

Par l'importation de ces cartes dans le logiciel „Agromap professionell“ sur „arcview“ (agrocom), les données ont été converties en cartes de grilles pour lesquelles une taille de grille de 10 mètres a été retenue pour base. Les données disponibles ASCII rapportées en grilles pour le rendement objectif (x, y , rendement objectif) et les N_{min} (x, y, N_{min}) ont été finalement importées dans un tableau de calcul (Excel), dans lequel la formule de calcul pour la bonne pratique agricole, présentée ci-dessus, a été intégrée (Tab. 7).

Un fichier ASCII est finalement produit dans lequel les besoins en azote sont listés en grilles de pixels de 10 mètres de larges (x, y , besoin en N). Ces données sont à nouveau importés dans l'environnement de travail „Agromap-Basic“ et calculées en une carte des apports avec contours interpolés (**carte apports urée**). A partir de ces données, un ordre lisible par la machine a pu être produit (**carte d'application N**). Dans cette carte d'application en N, l'apport d'azote est déterminé selon la BPA pour les plus petites parties homogènes des parcelles.

Le process complet a été finalement quelque peu plus complexe car il a été distingué à l'intérieur des parcelles des bandes d'essais avec modulation intraparcellaire et fertilisation classique forfaitaire.

Les calculs correspondants (apport modulé ou apport homogène forfaitaire) ont été coordonnés avec chaque bande d'essai.

Finalement, on peut décrire les étapes intermédiaires dans les pratiques mises en oeuvre :

Il s'agit :

- la production des cartes des rendements des années 2000 et 2001
- la carte de rendement attendu qui en est dérivée et
- la carte de répartition des N_{\min} interpolée à partir des prélèvements sur les points de la grille
- la carte des apports d'urée déduite de la carte des rendements et de la carte des répartition de N_{\min} et
- la carte d'application lisible par la machine.

Cartes des rendements

Les cartes des rendements sont déduites de données brutes qui sont acquises lors du battage par les moissonneuses batteuses. La figure 44 présente à titre d'exemple la visualisation des quantités et la position des valeurs recueillies. Ainsi, un pixel de données brutes une certaine surface qui est en relation avec la largeur de coupe (6m) et le passage de la machine. Pour l'exemple de la parcelle I-02, 277 mesures existent pour une surface de 1,249 ha. Ainsi, une mesure est rapportée à une surface d'environ 44 mètres carrés. Pour une largeur de coupe de 6m, cela signifie que la détermination d'une valeur de rendement se fait tous les 7,5 m d'avancement.

On distingue nettement les différenciations à l'intérieur des parcelles. On remarque que les valeurs les plus faibles se retrouvent dans les secteurs où se font les demi tours de la moissonneuse batteuse. Ce constat est typique et s'explique en plus du tassement du sol qui s'accumule à ces endroits là par le déroulement plus hétérogène de la mesure du rendement. Enfin une explication est que l'alimentation en grains après le virage doit immédiatement reprendre si bien que sur les premiers mètres les mesures sont faussées et donnent de trop faibles rendements. A l'inverse, après la dernière coupe des restes de grains peuvent être mesurés de manière erratique dans le système. Dans la figure 44, on remarque nettement cet effet sur le secteur extrême du sud-ouest où également en dehors de la parcelle quelques valeurs de rendements apparaissent. Une autre erreur de mesure peut aussi être provoquée par une variation de largeur de coupe dans le secteur de bordure, conséquence d'un avancement de travers et de la récolte d'un plus petit nombre de rangées de plantes (Schnittkeil) (LUDOWICY, SCHWAIBERGER und LEITHOLD, 2002). Toutefois, cette erreur est éliminée par l'intermédiaire de l'interpolation de surface des valeurs.

De manière indépendante à ces erreurs potentielles, les investigations conduites ont montré que la précision des différents systèmes de mesures est semblable. L'erreur de mesure des différents capteurs se situe de $\pm 3,5$ à $\pm 4\%$ (DEMMELE, 1999 nach LUDOWICY, SCHWAIBERGER und LEITHOLD, 2002).

Des **cartes de rendement** sont interpolées à partir des données brutes GPS visualisées dans la figure 44, pour lesquelles l'application de la méthode „Kriging“ a été préférée. Les figures 45 et 46 présentent les cartes de rendement élaborées à partir des données brutes avec la méthode „Kriging“ et qui ont été utilisées pour la détermination des applications d'azote modulées en intraparcellaire.

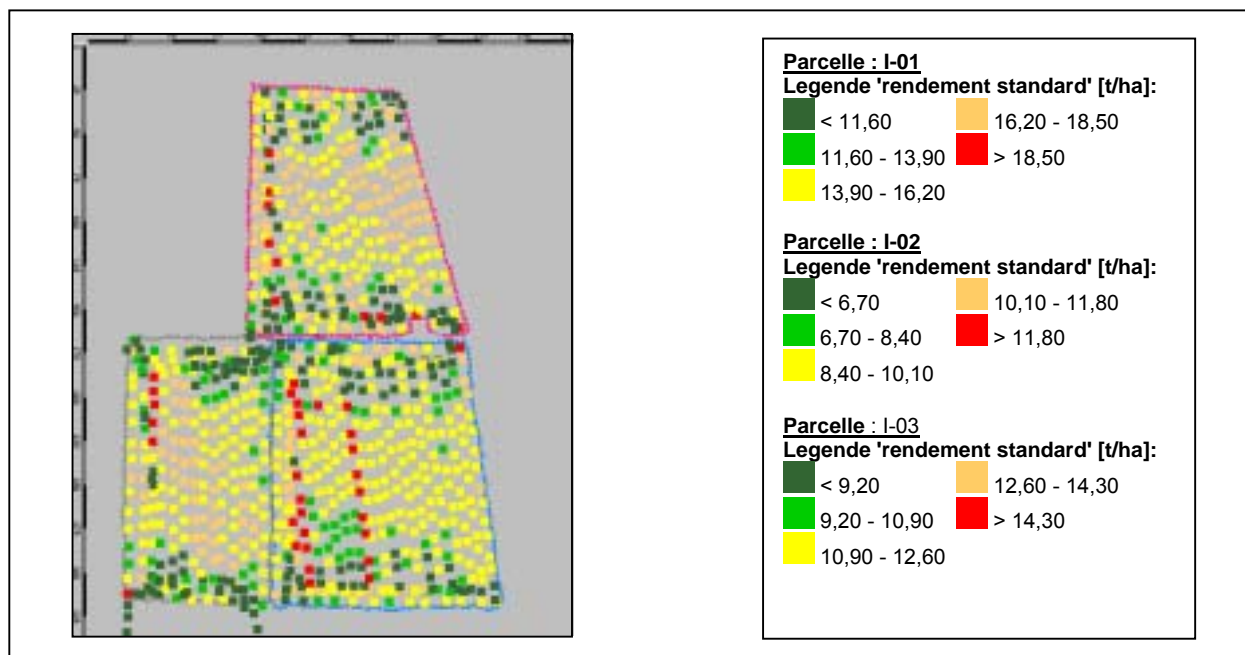


Fig. 44 : données brutes de rendement GPS

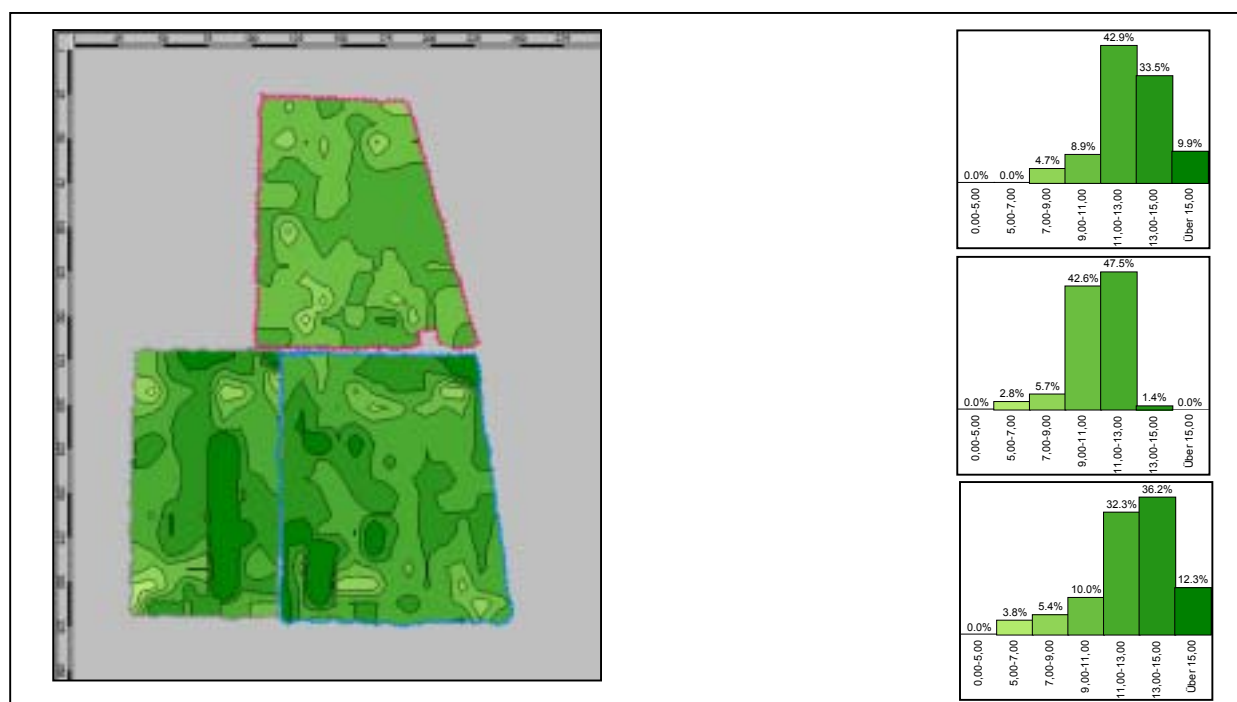


Fig. 45 : carte des rendements en maïs de l'année 2000

Le „Kriging“ est une méthode d'interpolation très flexible et applicable à presque toutes séries de données. Kriging passe en général pour la méthode d'interpolation la plus utilisée. [...] La valeur de la cellule de la grille est estimée par une moyenne des valeurs mesurées voisines. Les valeurs sont optimisées dans le modèle géostatistique utilisé car la fonction d'estimation évalue la valeur réelle en moyenne et ne fait pas d'erreur systématique. La base de la fonction d'estimation est un modèle géostatistique (intrinsic stationärer stochastischer Prozess) et un variogramme, qui décrit le lien avec l'espace du process . [...]. La méthode d'interpolation „Kriging“ donne en théorie les résultats les plus proches de la réalité. En pratique, on admet cependant que la qualité des cartes (en particulier cartes de rendement) produites avec Kriging peut également être atteinte par la méthode des distances inverses (sous réserve de l'application de paramètres adéquats) à condition que la densité de mesures soit grande (JÜRISCH & GIEBEL, 1999) et (LUDOWICY, SCHWAIBERGER und LEITHOLD, 2002).

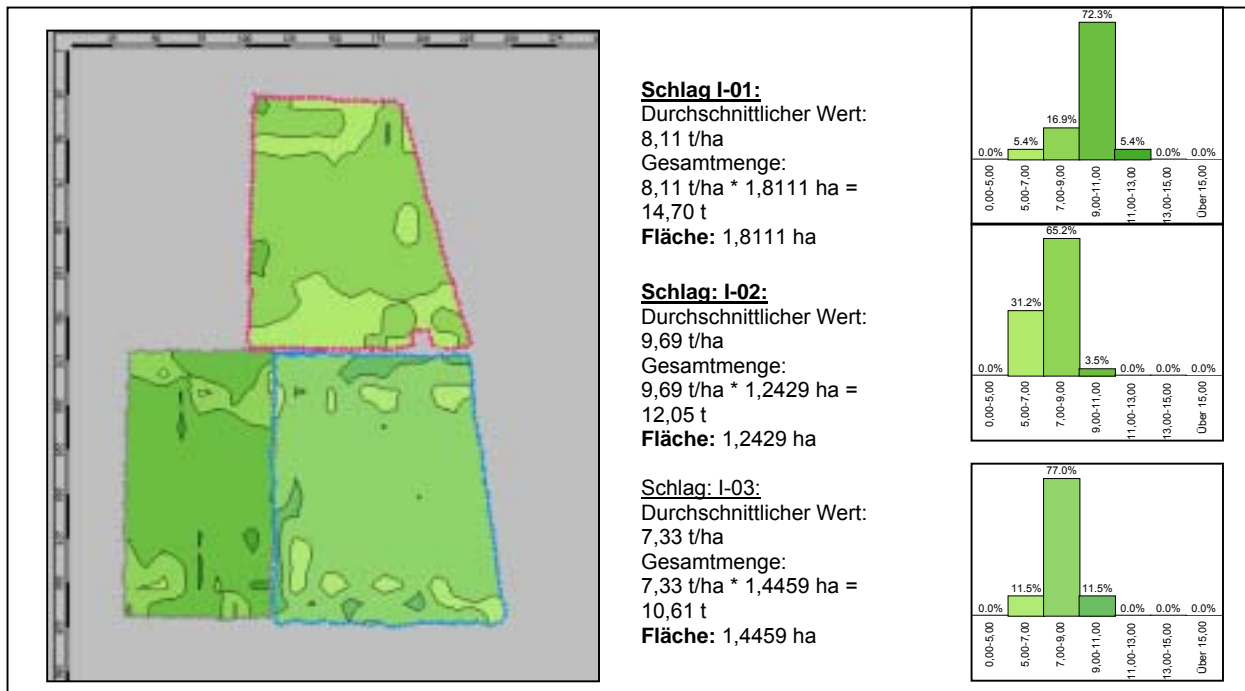


Fig. 46 : carte des rendements en maïs de l'année 2001

Carte des rendements attendus

Une carte du rendement attendu pour la prochaine récolte adaptée à l'objectif de rendement moyen de 120 q réalisée à partir des cartes de rendement des années 2000 et 2001. Le rassemblement des données de plusieurs années doit garantir une répartition représentative du rendement. Seules deux années ont été prises en compte pour la répartition des rendements, car en 1999 une des parcelles était emblavée avec du blé. Afin de garantir la volonté d'homogénéité de la surface d'essai – composée des trois parcelles rassemblées – il a été renoncé à tenir compte des parcelles cultivées en maïs en 1999.

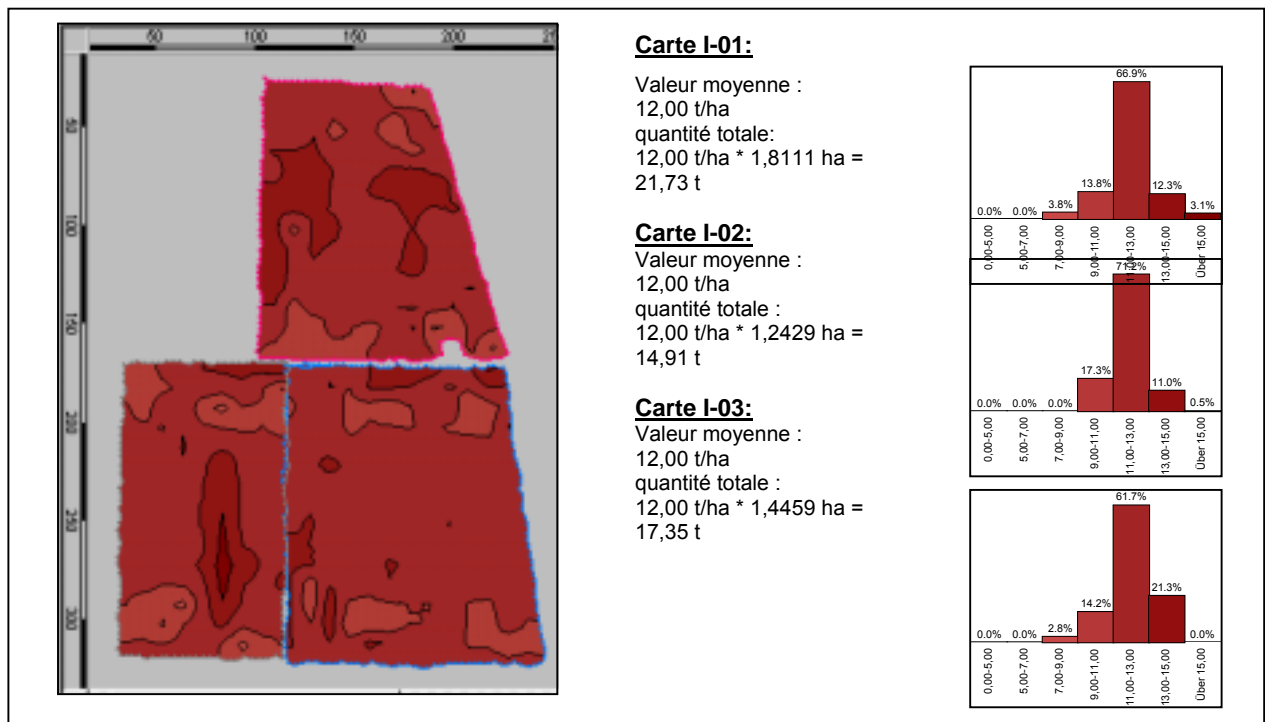


Fig. 47 : carte du rendement attendu en 2003

Les données de répartition intraparcellaire de l'année 2002 n'ont également pas été prises en compte suite à une mise à disposition trop tardive conséquence de difficultés internes à l'entreprise de l'entrepreneur agricole. De plus en 2002, un essai de fertilisation modulée avec différents niveaux avait été introduit sur les parcelles (MAIER, 2002), et la discussion reste ouverte si une carte des rendements en résultant aurait influencé ou non le rendement objectif potentiel des surfaces. La figure 47 présente la répartition des classes qui résulte du rendement potentiel attendu sur les parcelles individuelles. La répartition spatiale du rendement attendu (Fig. 47) s'explique par la comparaison entre les figures 45 et 46.

Carte de répartition des N_{min}

Pour pouvoir calculer les besoins en fertilisants azotés selon la « bonne pratique agricole » et avec une modulation intraparcellaire, il est nécessaire de disposer du rendement objectif mais aussi la variabilité de la disponibilité en azote minéral du sol. Pour une application intraparcellaire modulée, la répartition spatiale de cette information doit aussi être disponible. C'est pour cette raison que le 17.05.2003 un prélèvement d'échantillons a eu lieu sur les points de la grille des dispositifs expérimentaux. Afin d'obtenir des résultats représentatifs, il a été prélevé à chaque point de la grille 6 échantillons qui ont permis le calcul d'une valeur moyenne. Ainsi, à l'intérieur d'une distance d'un mètre, 3 échantillons ont été prélevés avant et après le point de la grille. Le maïs se trouvait alors au stade « 2-3 feuilles ». Les analyses d'échantillons en N_{min} et en eau ont pu être achevés par le laboratoire du Staatlichen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg au 23.05.2003.

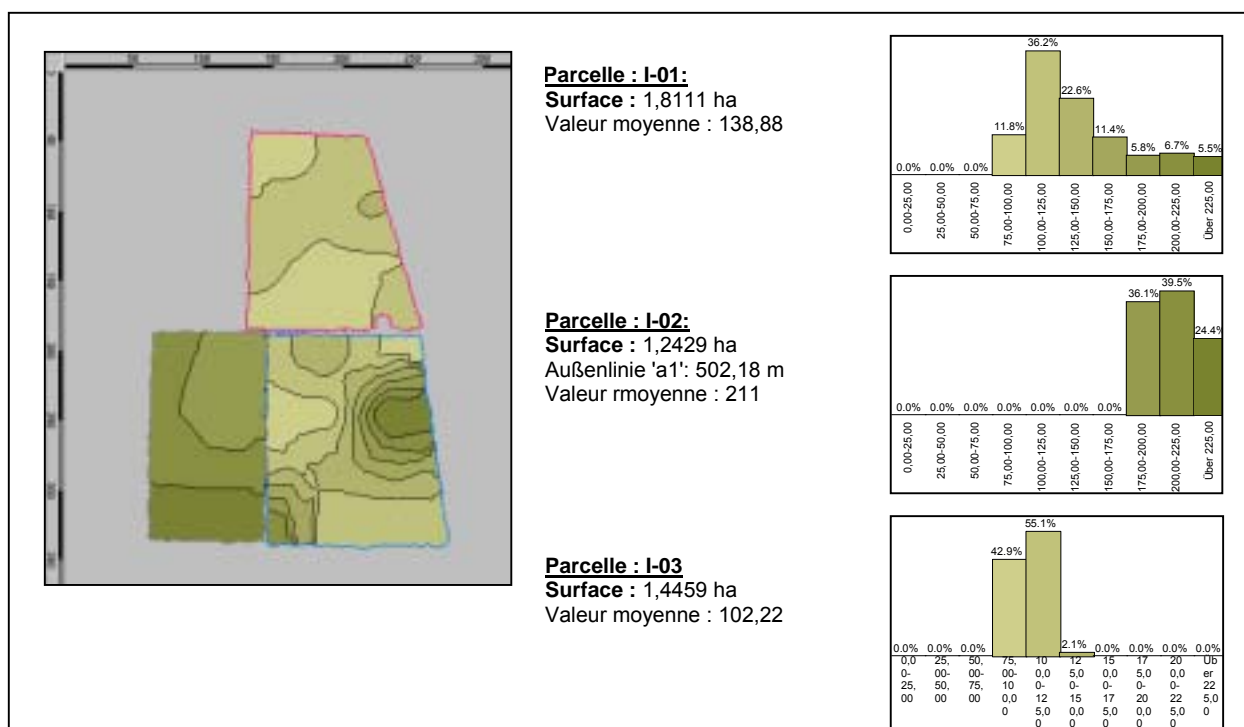


Fig. 48 : répartition des valeurs N_{min} mesurées sur les surfaces d'essais en 2003

Les résultats d'analyse ont été finalement exploitées en format ASCII- (X,Y, N_{min}) à partir des fichiers de données brutes, ce qui permet avec la version du logiciel „Agromap Basic“ utilisée de finalement produire une carte interpolée de la répartition des N_{min} (Fig. 48). Pour ce faire on a à nouveau utilisé la méthode „Kriging“. La Figure 48 présente les classes de répartition des valeurs N_{min} sur chacune des parcelles. On voit facilement, que l'azote minéral est disponible

est disponible en quantité supérieure à la moyenne (couleur plus sombre) dans la parcelle I-02 (sud-ouest), tandis que la disponibilité dans la parcelle I-03 (au nord) est relativement faible. La répartition des classes dans I-01 (sud-est) est caractérisée par une grande variabilité autour de la moyenne, et montre une répartition spatiale irrégulière.

Carte des apports en urée

La répartition spatiale du rendement attendu et de l'azote minéral disponible dans le sol sont introduites comme paramètres dans la formule de calcul évoquée ci dessus pour la détermination du besoin en apport de fertilisant azoté minéral (Tab. 7, p. 54). La figure 49 présente un extrait de la feuille de calcul dans laquelle la fertilisation azotée est déterminée selon la „bonne pratique agricole“ à l'échelle du pixel. Pour cette détermination, la nature précise de l'engrais doit être prise en compte – le pourcentage d'azote dans l'engrais appliqué. Dans la détermination pour les essais, il a été retenue une utilisation d'urée sous la forme de granulés avec 46 % d'azote. Finalement, à nouveau avec l'aide de la méthode „Kriging“, il est possible, à partir des nouvelles données brutes obtenues, de produire une carte interpolée d'application avec modulation intraparcellaire de l'urée .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N		
			N _{min}	Urea	Erw. d. Urea	Erw. N	Ertrag	Zuschlag	Unterstützung	Abzug N _{min}	Abzug	Abzug	N-Düngung	in Harnstoff (40 % N)	Restmenge	
3								richt. orientiert	gegeben	N Lieferang	Entfernte	gült. Lieferang				
4								Restfläche		des Bodens	Verlust	Plan				
4	N048	1900999	E007	6779766	111,00	11,22	112,20	245,84	266,84	266,84	155,84	105,84	95,84	95,84	209,26	10
5	N048	1900900	E007	6779769	111,00	11,45	114,50	251,90	271,90	271,90	160,90	110,90	100,90	100,90	219,36	10
6	N048	1896001	E007	6779813	107,00	10,62	108,20	233,64	253,64	253,64	148,62	98,62	88,62	88,62	199,51	10
7	N048	1896002	E007	6779836	101,14	11,34	113,40	249,48	269,48	269,48	168,34	118,34	108,34	108,34	235,53	10
8	N048	1897402	E007	6779959	95,27	11,90	119,00	263,56	283,56	283,56	188,29	138,29	128,29	128,29	270,90	10
9	N048	1896003	E007	6779880	89,58	12,47	124,70	274,34	294,34	294,34	204,70	154,70	144,70	144,70	314,75	10
10	N048	1896604	E007	6779905	91,24	12,61	126,10	277,42	297,42	297,42	206,18	156,18	146,18	146,18	317,80	10
11	N048	1894705	E007	6779928	95,32	12,52	125,20	275,44	295,44	295,44	200,12	150,12	140,12	140,12	304,52	10
12	N048	1893806	E007	6779951	99,40	12,77	127,70	280,94	300,94	300,94	201,64	151,64	141,64	141,64	307,71	10
13	N048	1892907	E007	6779975	103,30	13,32	133,20	289,04	313,04	313,04	209,74	159,74	149,74	149,74	329,53	10
14	N048	1892008	E007	6779998	126,62	13,26	132,60	291,72	311,72	311,72	185,10	135,10	125,10	125,10	271,57	10
15	N048	1891109	E007	6790021	156,64	13,04	130,40	286,68	306,68	306,68	150,24	100,24	90,24	90,24	196,16	10
16	N048	1890210	E007	6790044	186,66	13,24	132,40	291,28	311,28	311,28	124,43	74,43	64,43	64,43	140,07	10
17	N048	1889311	E007	6790067	212,64	13,09	130,90	287,98	307,98	307,98	95,34	45,34	35,34	35,34	76,63	10
18	N048	1888412	E007	6790090	219,00	13,16	131,60	289,52	309,52	309,52	90,52	40,52	30,52	30,52	66,26	10
19	N048	1887513	E007	6790113	219,00	12,53	126,30	275,66	295,66	295,66	76,66	26,66	16,66	16,66	35,22	10

Fig. 49 : tableau de détermination du besoin en fertilisant azoté minéral avec modulation intraparcellaire

Cette modulation calculée a été mise en oeuvre à l'intérieur des bandes tests de la modulation, tandis que la valeur moyenne d'urée calculée pour la surface totale a été apportée sur les bandes traitées de manière conventionnelle si bien que celles-ci ont été fertilisées selon la « bonne pratique agricole » de manière forfaitaire et spécifique pour chacune des parcelles.

La figure 50 présente la carte des apports d'urée et les variantes adaptées aux conditions d'expérimentation après application pour les différents traitements (carte des apports d'urée), tandis que la figure 51 montre les classes de répartition des quantités à appliquer.

Sur les parties recevant une application forfaitaire homogène, on constate facilement, que les quantités de fertilisants à apporter se distinguent selon les parcelles. Le plus faible apport se retrouve sur la parcelle I-02 (sud-ouest), où des valeurs très élevées de N_{min} avaient retrouvées. Cela se retrouve aussi sur les bandes aux apports modulés bien que de plus petites surfaces aient été prises en compte. On remarque aussi la large gamme des quantités apportées sur la parcelle I-01 (sud-est), ce qui est justifié avant tout par une répartition correspondante des N_{min}. Les parcelles I-02 (s-o) et I-03 (nord) se distinguent fortement dans les doses d'applications calculées. Dans cette dernière, la modulation intraparcellaire des apports est faible (Fig. 51).

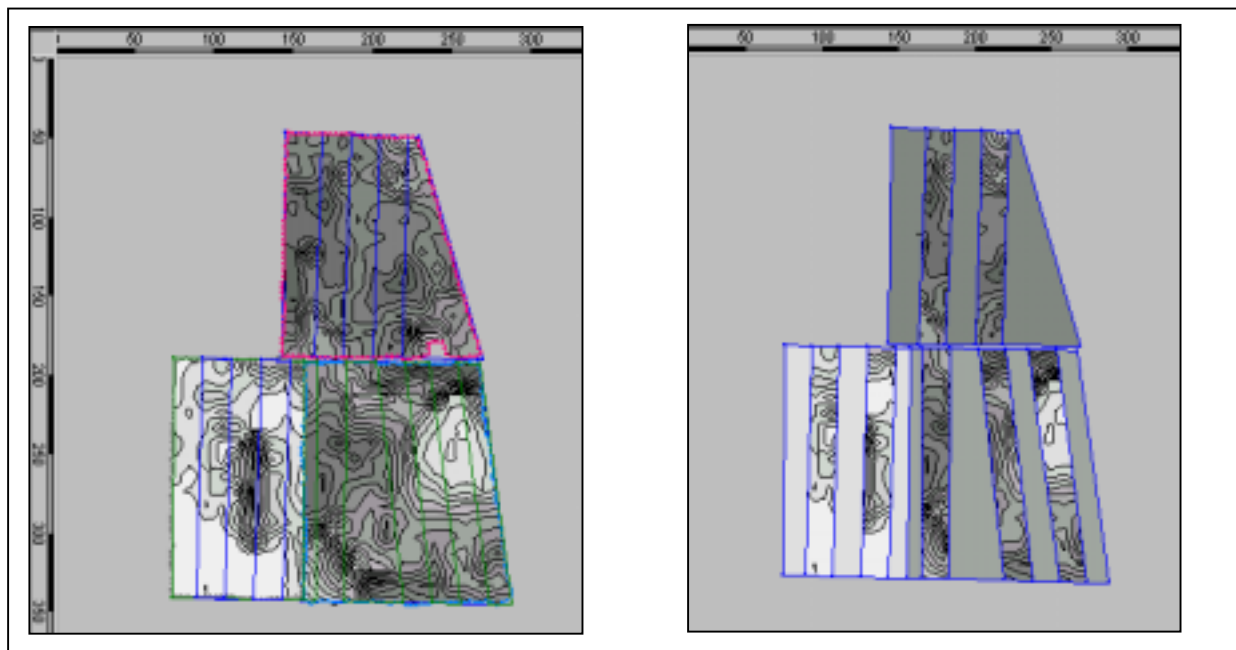


Fig. 50 : carte d'application en urée pour les essais en 2003

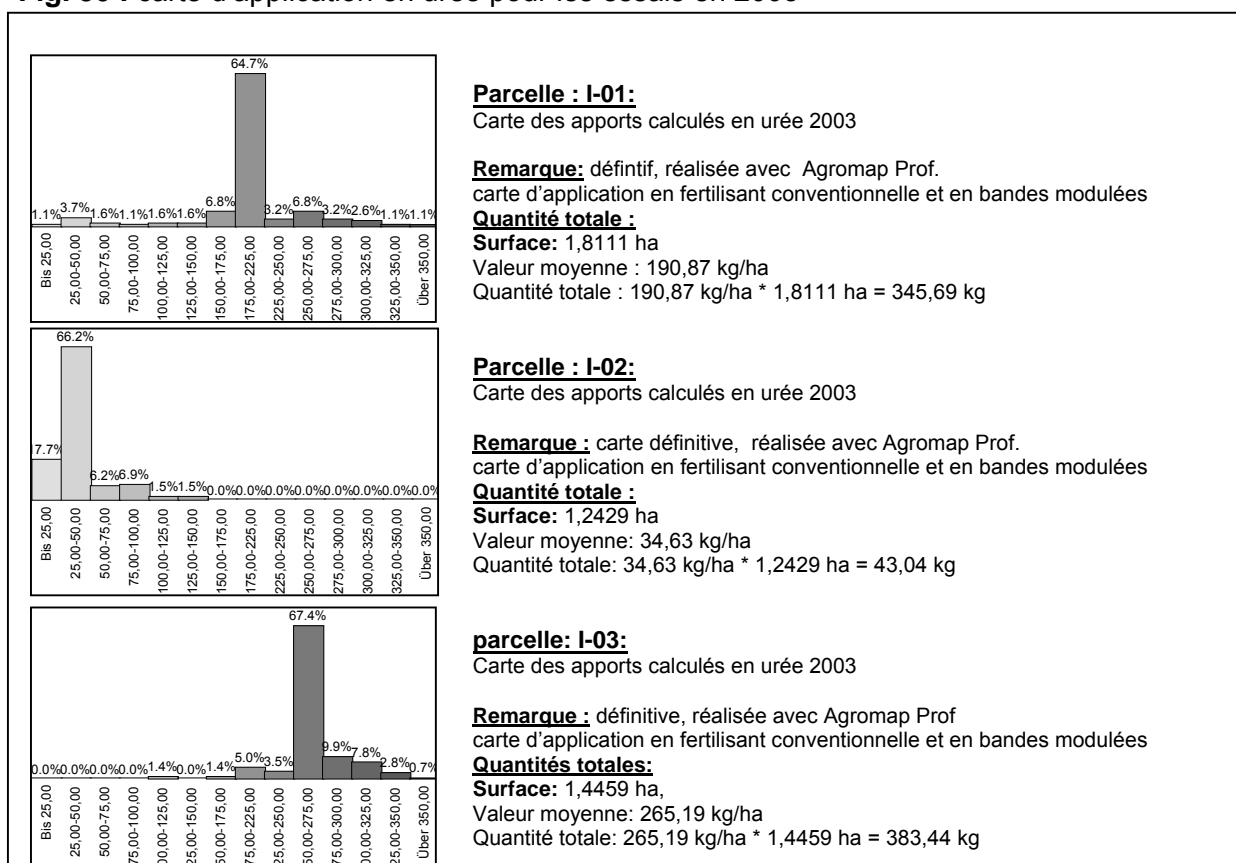


Fig. 51 : répartition des classes d'apports d'urée sur les parcelles d'essais

Carte d'application

La carte des doses en urée calculée et interpolée à faible échelle ne peut pas être transposée sous cette forme par un épandeur à engrais piloté par informatique. C'est pourquoi, dans une étape supplémentaire, la carte des doses d' en urée a été transformée en une carte d'application lisible par le système embarqué.

Celle-ci se distingue de la carte des doses d'urée fondamentalement par le fait que les données sont rapportées selon des pixels et présentées sous la forme d'une grille. De manière optimale, la largeur des pixels correspond à la largeur de distribution du matériel d'épandage. Une carte d'application différenciée au niveau de très petits espaces n'a pas de sens car celle-ci ne peut pas être prise en compte lors de l'application par une largeur d'épandage correspondante. Il est d'ailleurs mieux de moyenniser, sur les surfaces correspondantes aux pixels, les besoins en azote calculés en modulation intraparcellaire afin de ne pas appliquer sur l'ensemble de la largeur du pixel par hasard des valeurs extrêmes correspondantes à de petites surfaces. Toutefois pour que cela ait un sens d'adapter les tailles des pixels d'application à la largeur de l'épandeur d'engrais, il faut aussi pouvoir s'assurer que le tracteur puisse se positionner précisément au milieu de la rangée de pixels, ce qui peut être rendu possible avec l'aide d'un système de navigation géo-positionnée automatique.

Comme cette option n'a pas été mise en œuvre dans le cas rapporté, dans des secteurs de recouvrement des pixels voisins, il existe une application dérivante vis à vis des quantités modulées calculées due à l'avancement du tracteur non parfaitement central aux pixels d'application. Sans moyen d'aide à la navigation, ce problème n'est pas à écarter. Par une préparation préalable la plus soignée possible du positionnement des bandes d'expérimentations, ce problème a été réduit au minimum. La figure 52 présente la carte d'application d'azote utilisée.



Fig. 52 : carte d'application praticable avec l'outil d'épandage pour la modulation des apports d'urée en considération du dispositif de l'essai. (taille pixel = 10m, une valeur claire signifie un apport faible, une valeur sombre un apport important)

Réalisation de la fertilisation

Le 4 juin 2003, les parcelles d'essais ont été fertilisées selon la carte d'application en urée lisible par la machine (Fig. 52).

Les plantes de maïs à cette date se trouvent aux stades de développement suivants :

- parcelle I-01: 9 feuilles
- parcelle I-02: 8 feuilles
- parcelle I-03: 12 feuilles

A l'aide de cartes PCMCIA, la carte d'application a pu être transférée dans l'ordinateur embarqué du tracteur et l'essai de fertilisation a pu être réalisée avec succès.

La position exacte a été établie à l'aide du DGPS du tracteur agricole et comparée à la position sur la carte d'application. La valeur d'application correspondant à la position a été alors prise en compte et transmise au système de pilotage de l'épandeur d'engrais. De cette manière, la valeur prévue dans la carte d'application a été appliquée précisément à l'endroit correspondant. Un contrôle visuel des quantités épandues annoncées au display du calculateur de l'épandeur (für den Bogballe Düngestreuer) avec les quantités précalculées dans la carte d'application affichées par l'ordinateur du tracteur (ACT) a confirmé tout comme le contrôle du curseur mécanique de pilotage de la quantité apportée directement sur l'outil – l'application correcte de la fertilisation. La figure 53 est une photographie prise lors de la réalisation de l'essai de fertilisation modulée. On distingue bien l'antenne du DGPS sur le toit du tracteur. Les résultats de cet essai de modulation d'intrants sont rassemblés dans le chapitre 3.1.2 .



Fig. 53 : réalisation des apports dans l'essai fertilisation

2.1.2.3.2 Réalisation d'une carte d'application d'azote interparcellaire selon la méthode offline (bonnes pratiques agricoles) en 2004

En 2004, la fertilisation azotée a été effectuée à nouveau de manière modulée dans le cadre de la méthode offline, car la faisabilité de principe de cette approche a été confirmée au cours de l'année d'étude précédente, et surtout car la mise en pratique de la stratégie de fertilisation reconnue selon les « bonnes pratiques agricoles » est possible. A des fins d'amélioration et de développement de la méthode, l'application a dû être effectuée sur les trois sous-parcelles, dans la mesure où la carte d'application, laissant possible une application potentielle pour une possible future exploitation à l'échelle d'un îlot de parcelles regroupées, devait être réalisée au niveau interparcellaire. En 2003, la préparation d'une carte d'application pour chaque parcelle a généré une charge plus importante en termes de préparation et de réalisation de la fertilisation elle-même. De plus, des complications sont nées du changement de carte entre les différentes parcelles. Il est nécessaire de vérifier si une préparation interparcellaire de la carte d'application permet de réduire la charge de préparation et d'éviter des complications techniques.

En outre, la réussite de la mise en pratique de cette approche constitue une condition pour une modulation des intrants à l'échelle interparcellaire ou même inter-exploitations, dans le sens de l'exploitation d'un lot de parcelles regroupées.

De ce fait, l'approche cartographique, qui est lourde dans une structure agricole de petite échelle, pourrait gagner en efficacité et se justifier.

La préparation d'une telle carte d'application interparcellaire au cours de l'année d'étude 2004 ainsi que la réalisation de la fertilisation azotée associée sont décrites ci-dessous.

Densification du réseau d'échantillonnage

En 2004, afin de gagner en précision lors de la vérification de la réussite de l'intervention, il a été jugé utile de densifier le réseau d'échantillonnage, malgré la lourde charge de travail associée. Il était nécessaire de s'assurer que tous les paramètres importants étaient réellement collectés de manière représentative. La figure 54 présente le réseau d'échantillonnage densifié pour l'année d'étude 2004. Les points de maillage existants (en jaune) ont été complétés à intervalles réguliers par des points intermédiaires (en blanc).

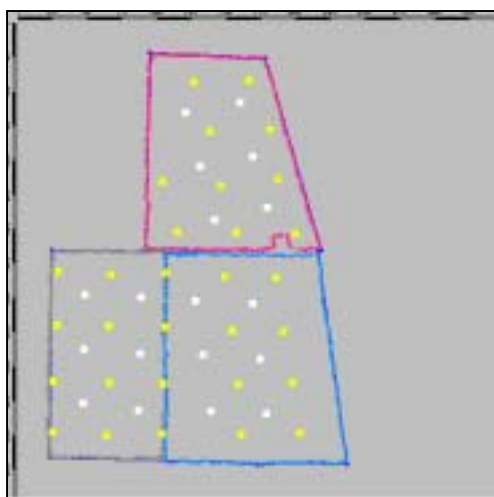


Fig. 54 : densité du réseau d'échantillonnage

Répartition des N_{min} prise en compte

On a utilisé pour le calcul de la carte d'application la répartition des reliquats d'azote issue de l'échantillonnage du 2 juin 2004. On constate clairement dans la figure 55 que la distribution n'a pas été préparée par parcelle comme en 2003, mais au niveau interparcellaire.

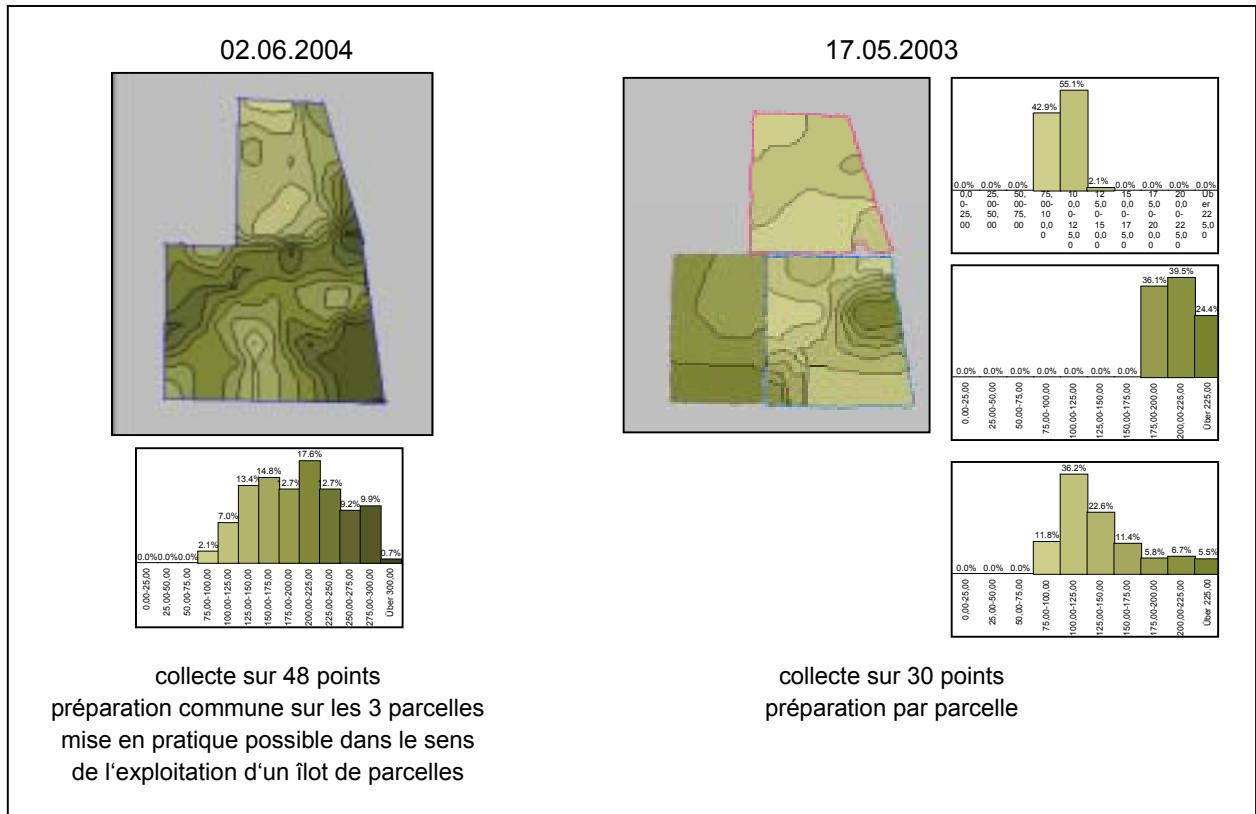


Fig. 55 : préparation interparcellaire de la répartition des N_{min} pour l'essai 2004

Répartition prise en compte du rendement potentiel attendu

Pour la réalisation de la carte d'application en azote, en plus de la répartition spatiale des N_{min} du sol, il est aussi nécessaire de disposer de la répartition des rendements potentiels attendus au sein de la parcelle. Afin d'appréhender cette répartition des rendements potentiels, il a été pris en compte les répartitions des rendements du maïs relevés lors des 4 dernières années. Ce sont donc les cartes de rendement des années 2000, 2001, 2002 et 2003 qui ont été prises en compte. La figure 56 présente ces différentes cartes. Après prise en compte des répartitions de rendement des 4 années, il a été relevé un rendement moyen de 12 t/ha. La figure 57 présente la carte de répartition intraparcellaire du rendement potentiel.

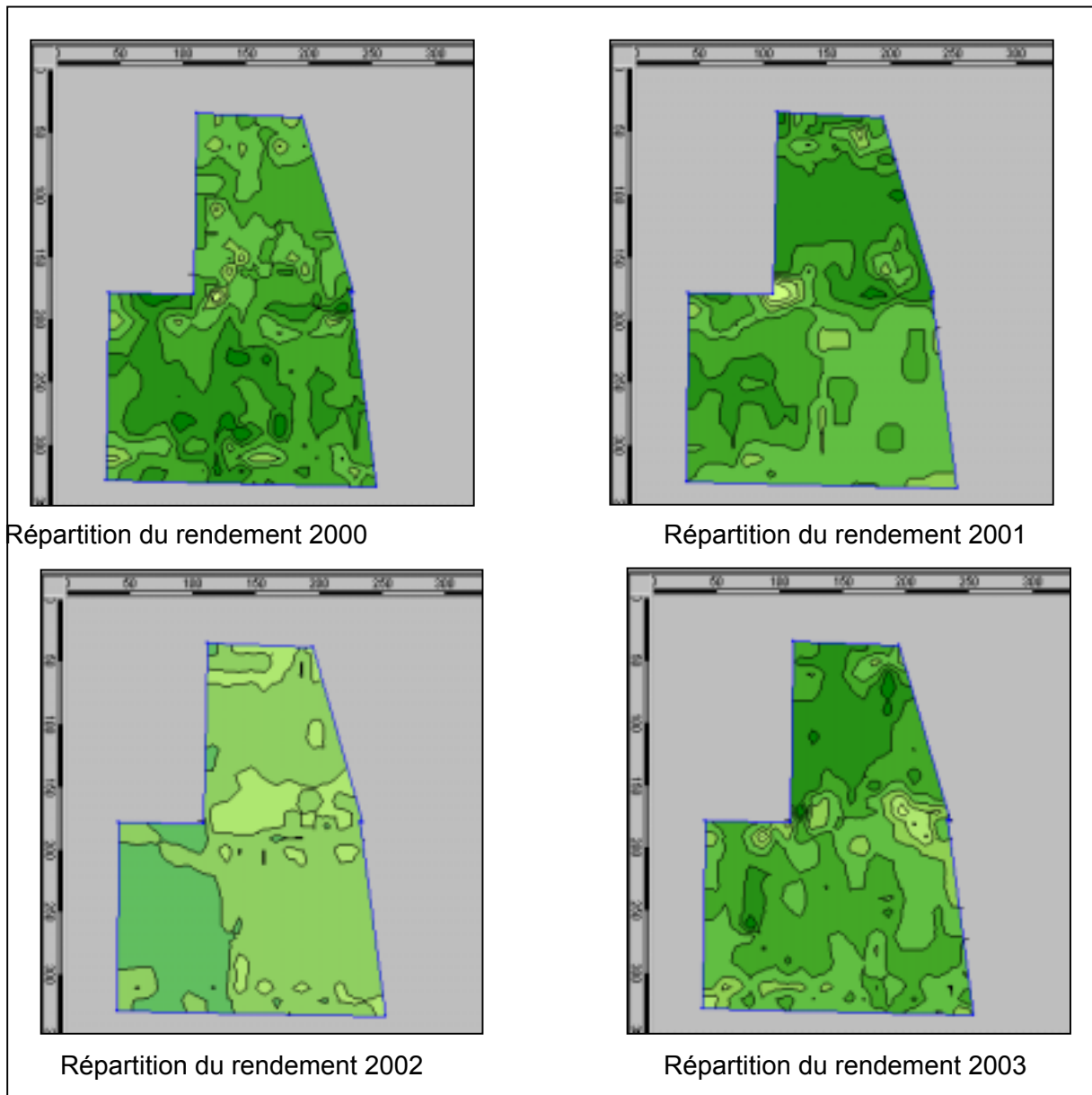


Fig. 56 : répartition des rendements pris en compte pour la répartition du rendement potentiel

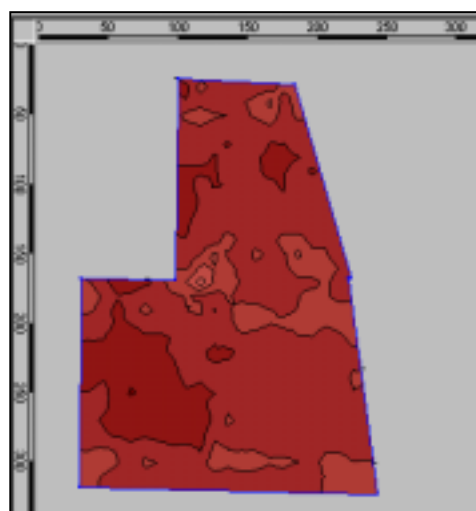


Fig. 57 : carte de répartition du rendement potentiel attendu pour le calcul de la carte d'application en N

Carte d'urée dérivée

Comme en 2003, les cartes d'application d'azote ont été dérivées des paramètres d'entrée décrits, soit « la répartition des N_{\min} » et « la répartition du rendement potentiel attendu ». Le fertilisant utilisé étant constitué d'urée à 46 %, on obtient finalement une carte d'application d'azote sous forme de « carte d'urée ». L'obtention et le calcul de cette carte ont été effectués de la même manière que l'année précédente et sont décrites dans la section 2.1.2.3 (1). En 2004 toutefois, contrairement à cette description, les données issues de toutes les parcelles ont été rassemblées dans un fichier unique. Avec cette méthode, il est possible d'envisager une utilisation interparcellaire de la carte d'application dans le sens de l'exploitation potentielle d'un îlot de parcelles.

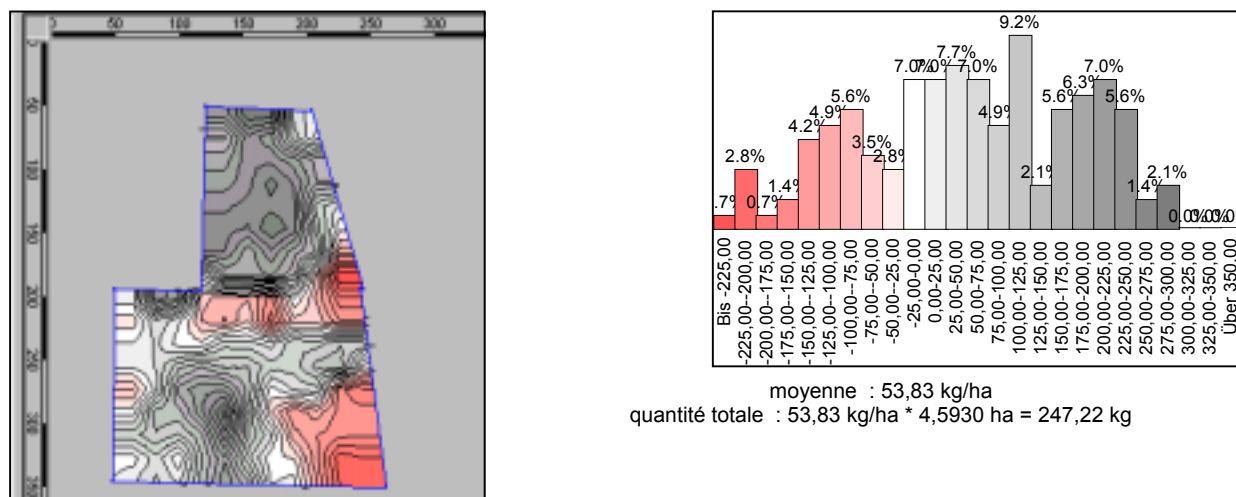


Fig. 58 : carte d'application d'urée (pour les deux parcelles du bas) basée sur les N_{\min} après la fertilisation

La figure 58 présente la carte d'urée telle qu'elle résulte du calcul selon les « bonnes pratiques agricoles ». La préconisation par l'entrepreneur d'une obligation concernant une application minimale n'est pas encore prise en compte ici. Il s'agit donc de valeurs d'application telles qu'elles proviennent des valeurs de reliquats d'azote réels et des objectifs de rendement ciblés sur la base du calcul selon les bonnes pratiques agricoles. La répartition des classes correspondante est représentée dans partie droite de la figure 58.

Un examen plus attentif de cette carte montre des zones de valeurs négatives (zones rouges) dans les parties sud des parcelles I-01 et I-02, ce qui indique un excédent d'azote disponible dans le sol déjà au moment de l'échantillonnage des reliquats d'azote.

Il s'est finalement avéré que, pour des motifs de manque de clarté et de malentendus, les propriétaires des parcelles I-01 et I-02 avait réalisé une fertilisation azotée en dehors du planning prévu, puisqu'ils avaient appliqué peu avant l'échantillonnage de N_{\min} une dose forfaitaire unique sur l'ensemble de la parcelle. Pour cette raison, la modulation prévue sur ces deux parcelles n'a pas pu être effectuée.

Bien que la carte d'application ait été préparée pour toutes les parcelles, la parcelle I-03 a finalement dû être traitée séparément. Cette évolution imprévue du déroulement de l'essai et les fertilisations effectuées à l'initiative des propriétaires sur les parcelles I-01 et I-02 (toutes les deux au sud) a finalement permis d'évaluer ce que seraient sans doute les pratiques véritables des exploitants dans une démarche de modulation intraparcellaire.

C'est pourquoi seule la parcelle I-03 a finalement été fertilisée de manière modulée. Pour cette parcelle, la fertilisation azote théorique prévue et celle effectivement réalisée sont comparées ci-dessous. La figure 57 présente la carte d'urée calculée pour la seule parcelle I-03.

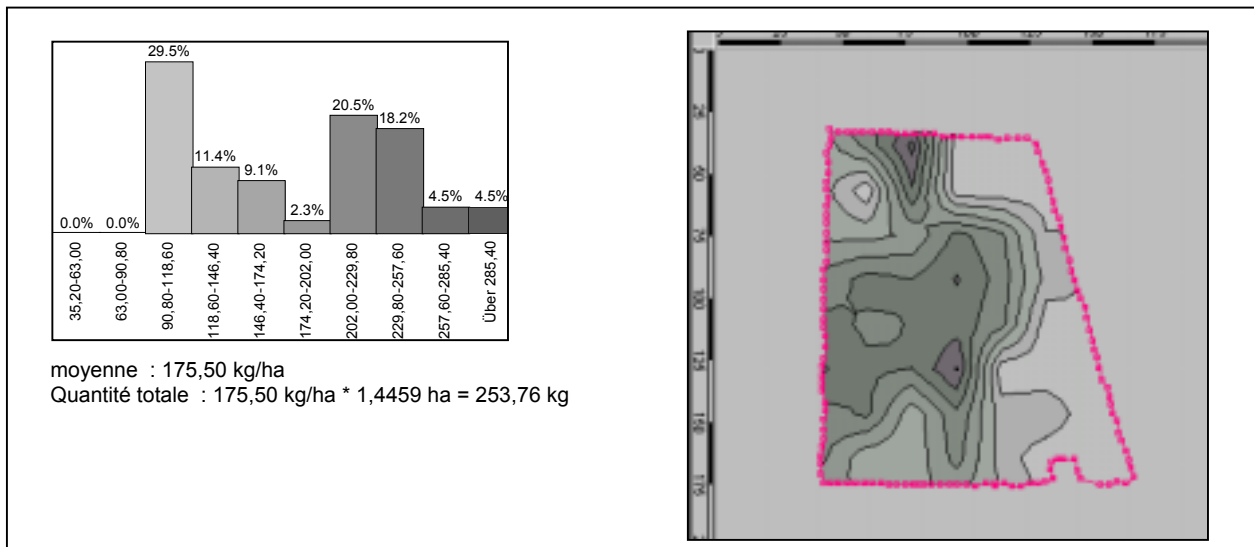


Fig. 59 : carte d'urée dérivée de la parcelle I -03 (fragment de la parcelle I-03)

Comme l'année précédente, cette carte d'urée a été divisée en bandes expérimentales en vue du protocole d'essai prévu, comprenant des parties dans lesquelles sont prises en compte d'une part la modulation intraparcellaire et d'autre part une valeur moyenne forfaitaire issue du calcul selon les bonnes pratiques agricoles (figures. 60 et 61).

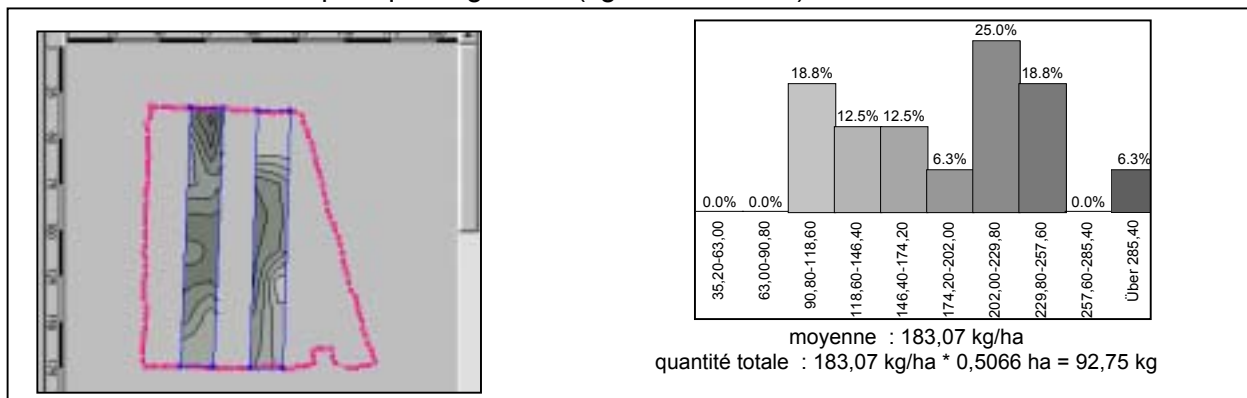


Fig. 60 : carte d'urée au niveau intraparcellaire uniquement dans les bandes d'essai

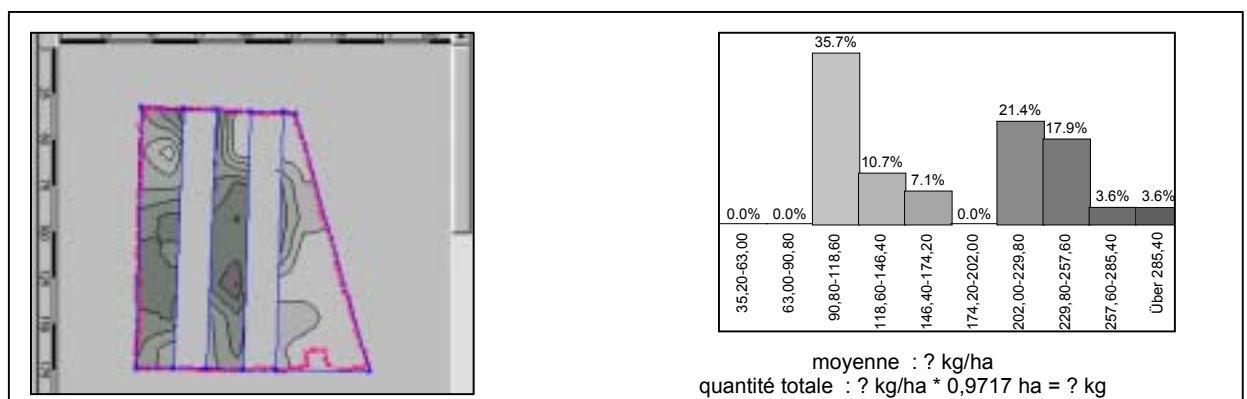


Fig. 61 : fertilisation modulée théoriquement dans les bandes traitées conventionnellement

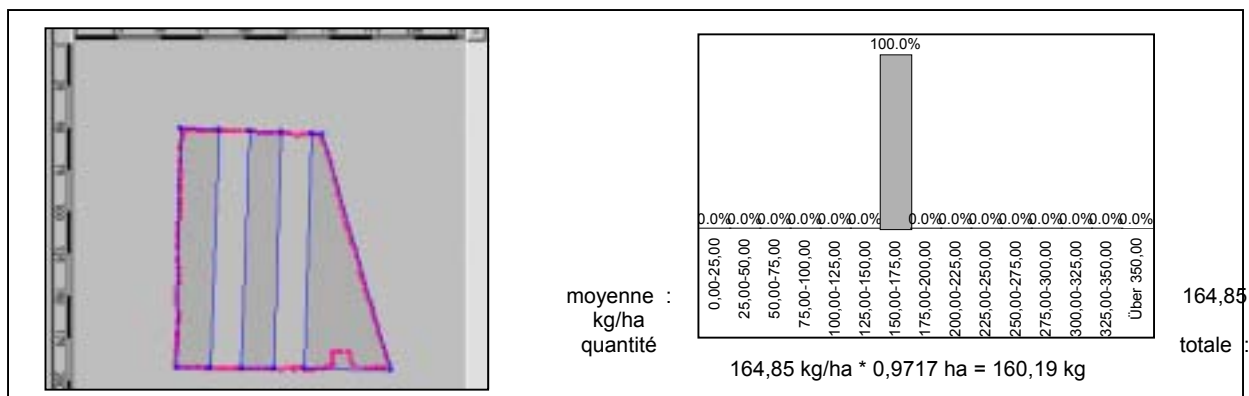


Fig. 62 : fertilisation forfaitaire basée sur la moyenne dans les bandes traitées conventionnellement

La figure 62 montre l'échange entre les données calculées au niveau intraparcélaire et la moyenne pour les bandes à traiter conventionnellement. La figure 63 montre les deux traitements réunis dans une seule carte d'urée et la figure 64 la répartition des classes correspondante.

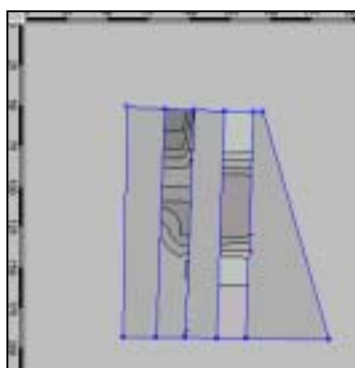


Fig. 63 : jonction des deux traitements en une unique carte d'urée selon le dispositif d'essai

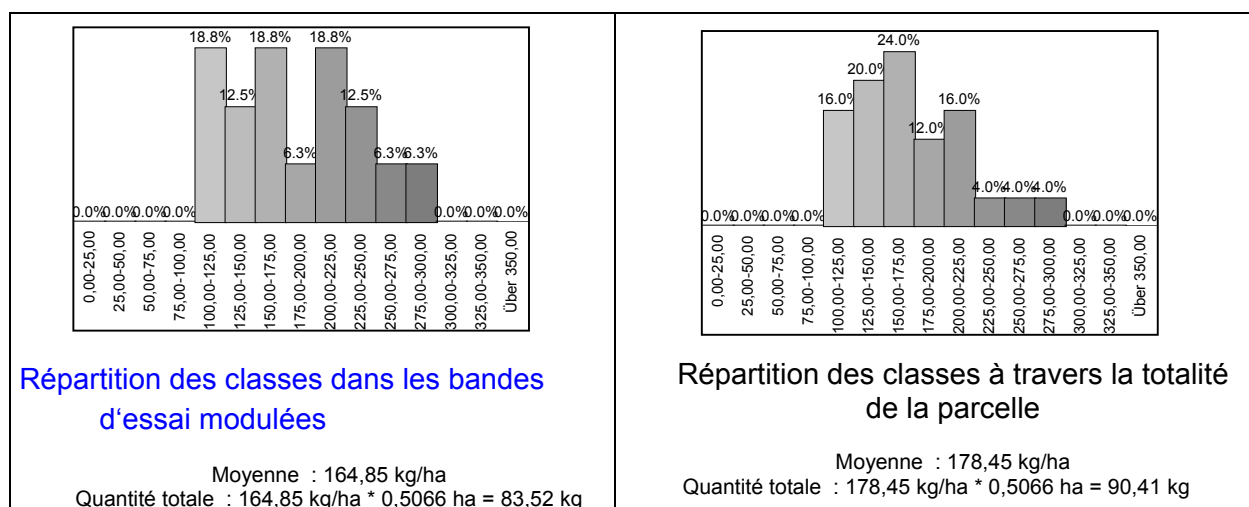


Fig. 64 : répartition des classes

La carte d'application lisible par la machine a finalement été dérivée de cette carte d'urée. Dans ce cadre, on a sélectionné en 2004 des pixels d'application de 18 m fois 18 m en raison du dispositif d'essai basé sur des bandes d'essai de 18 m de large (Fig. 65).

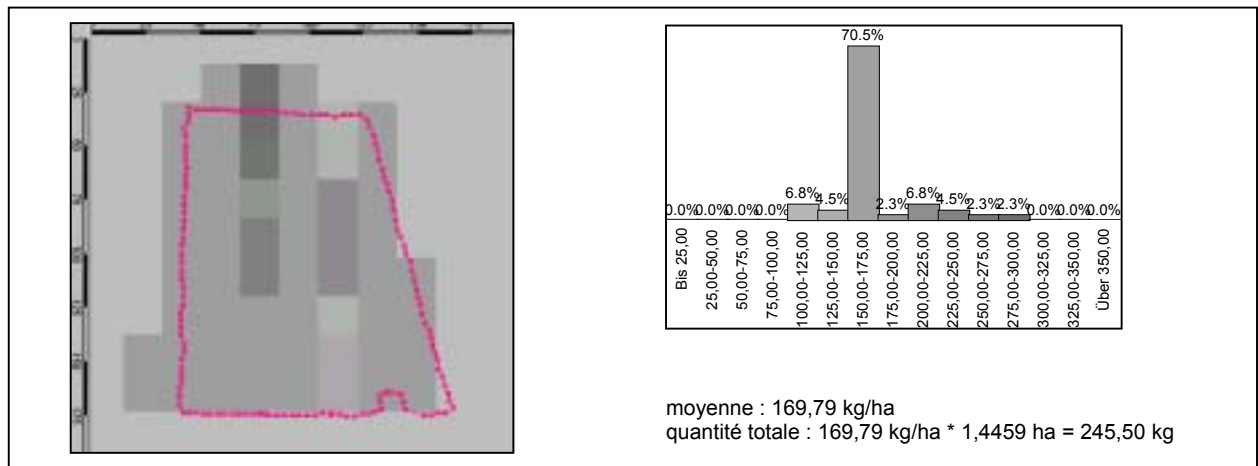


Fig. 65 : carte d'application utilisée sur la parcelle I-03

Mise en pratique technique

Pour la mise en pratique de la fertilisation azotée intraparcellaire, la carte d'application calculée lisible par la machine a comme l'année précédente été mise en mémoire dans l'ordinateur de bord du tracteur par le biais d'une carte PCMCIA. Cet ordinateur de bord reçoit des informations de positions instantanées par l'intermédiaire d'un récepteur GPS, ce qui permet de connaître la valeur d'application calculée pour la position correspondante et de la transmettre au boîtier de commande de l'épandeur à engrais.

La justesse de la mise en oeuvre de l'application peut être vérifiée par comparaison entre la quantité appliquée affichée sur l'écran du boîtier de commande et la quantité prévue par la carte d'application dans l'ordinateur de bord du tracteur (ACT), et aussi par le contrôle du réglage du curseur mécanique commandant la quantité à épandre sur l'épandeur lui-même.

Au cours de l'application, ces moyens de contrôle ont permis d'identifier que des instructions non conformes étaient fournies à l'épandeur à engrais. Il en résulte que le premier tour de la parcelle I-03 a également été fertilisé à une dose forfaitaire. Après correction de l'erreur, la fertilisation du reste de la parcelle a été réalisée à l'aide de la carte d'application, qui prenait en compte la dose minimale prérequisse par l'entrepreneur (100 kg d'urée/ha). La figure 66 montre la fertilisation effective de la parcelle I-03.

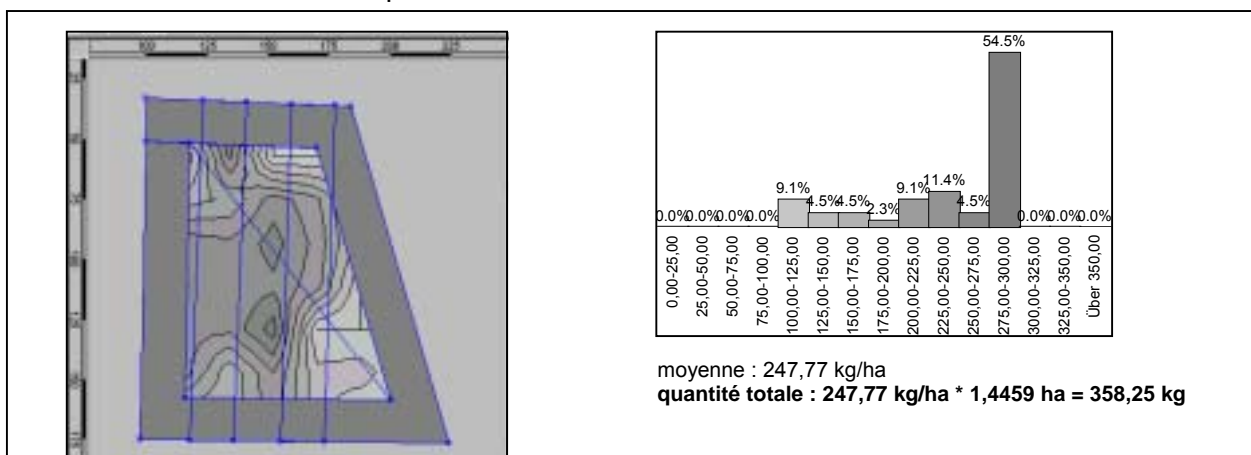


Fig. 66 : carte d'urée intraparcellaire avec la variante de fertilisation supplémentaire intégrée

La figure 67 montre à nouveau les différences entre les fertilisations prévue et réalisée sur la parcelle I-03 sur la base de la répartition des classes de la carte d'urée correspondante. La variante comportant la fertilisation complémentaire non prévue des contours de la parcelle est bien visible en raison du niveau élevé d'application sur cette sous-parcelle.

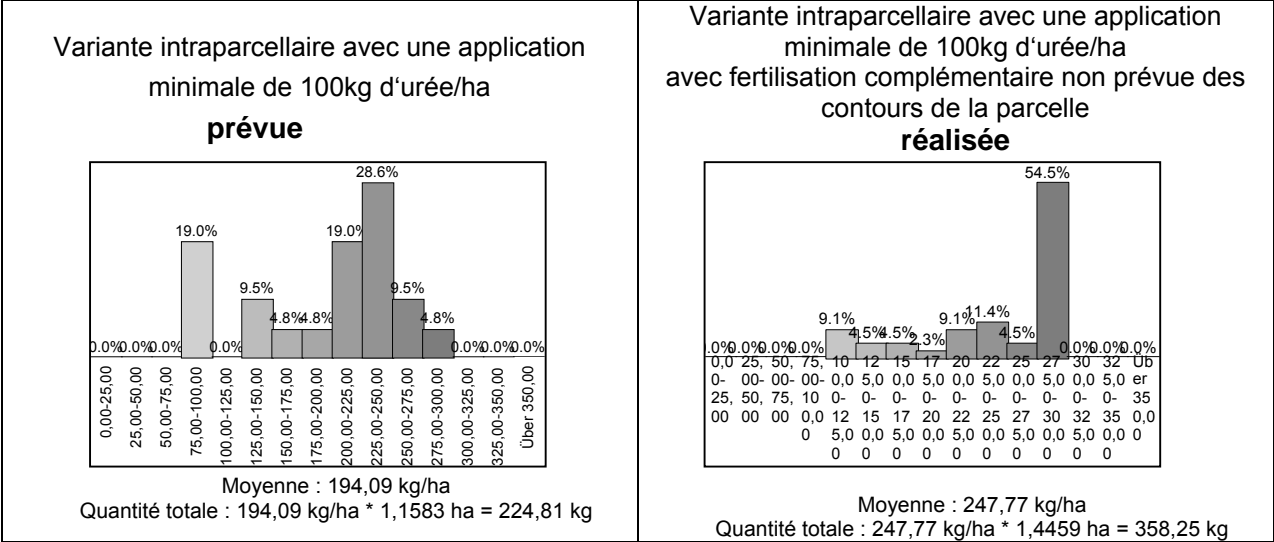


Fig. 67 : répartition des classes de fréquence d'apports des cartes d'urée ha concernées

En tant que résultat de cet essai, l'importance des mesures réalisées pour la mise en pratique de la modulation des intrants dans les conditions de structure agricole à petite échelle présentes dans le Fossé rhénan est présentée dans le chapitre 3.1.2.

2.1.2.3.3 Application d'azote au niveau intraparcellaire intégrant un modèle de croissance (Apollo) en 2005

Au cours des années d'étude 2003 et 2004, on a démontré la faisabilité de principe de la modulation des intrants à l'aide de l'application cartographique dans nos conditions de structures agricoles à petite échelle. En plus de nombreuses complications, ce sont en particulier des facteurs tels qu'une forte charge de préparation, la multiplicité des échantillonnages des reliquats d'azote nécessaires, ainsi que la nécessité de réaliser ces travaux dans un très faible intervalle de temps avant la mesure de modulation elle-même, qui ont conduit à la recherche de méthodes alternatives ou d'améliorations.

Ainsi, l'année d'étude 2004 a été marquée par des essais de détermination du potentiel d'autres méthodes et de collecte de données dans les domaines des capteurs online et de la télédétection.

En 2005, en raison de la mauvaise adaptation ou d'une faible disponibilité des capteurs online, l'accent dans l'optique de la modulation des intrants a été remis sur la cartographie. On a toutefois recherché des voies permettant de minimiser largement les inconvénients mis en évidence. Grâce à la collaboration entretenue jusqu'alors avec l'Université de Hohenheim sur les parcelles d'essai, une voie commune a été finalement trouvée dans ce sens, impliquant une modification totale de la méthodologie. Ainsi, en 2005, le calcul des cartes d'application n'a plus été effectué selon les « bonnes pratiques agricoles ». Avec le soutien de l'Université de Hohenheim, un modèle scientifique de croissance a été intégré dans le processus de production des cartes d'application.

Ce modèle prenant en compte un grand nombre de paramètres issus des années précédentes, on évite ainsi l'inconvénient d'une collecte de données juste avant l'application. Ses avantages résident dans une réduction du travail de collecte des paramètres d'entrée ainsi que dans un découplage temporel des cartes d'application. Cependant, ces avantages ne sont valables qu'une fois que les paramètres d'entrée nécessaires à la modélisation de la croissance sont collectés.

Le modèle scientifique de croissance

Le **modèle APOLLO** (Application of Precision Agriculture for Field Management Optimization)

est un modèle de croissance des végétaux. Les simulations calculées sont basées sur les algorithmes « CERES » et « CROPGRO ». Le modèle simule au pas de temps quotidien l'effet :

- du climat,
 - du sol,
 - de l'eau du sol,
 - du génotype, ainsi que
 - de la dynamique de l'azote dans le sol et dans la plante
- sur la croissance de la plante et le rendement de la culture.

Le modèle nécessite des informations sur :

- le climat (températures, précipitations, rayonnement solaire,...),
- les caractéristiques pédologiques (texture, teneur en éléments nutritifs,...)

- la culture, les caractéristiques variétales, et les rendements sur une durée minimum de trois ans, ainsi que
- la gestion de la parcelle (semis, fertilisation, récolte,...)

Ainsi, sur la base de données historiques de rendement, il est possible de calculer le rendement potentiel de la parcelle et de calibrer le modèle. Cette étape nécessite également des données sur des caractéristiques pédologiques, comme la présence d'une semelle de labour, la perméabilité du sol au réseau racinaire et la disponibilité en eau. Les rendements simulés et réels sont adaptés de la façon la plus homogène possible par le biais de différents scénarios. Le résultat de la calibration se présente sous forme de graphique, qui renseigne sur la précision avec laquelle le modèle est capable de simuler le rendement potentiel d'une parcelle. Pour cela, le rendement en grain effectivement mesuré est comparé avec le rendement simulé sur plusieurs années (Fig. 68).

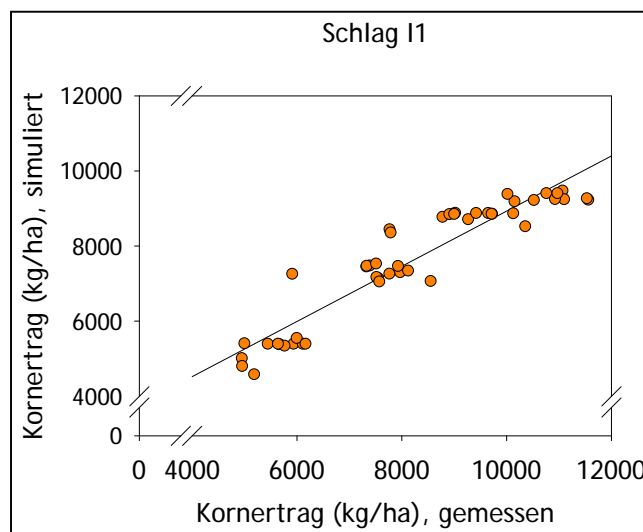


Fig. 68 : résultat de la calibration du modèle de croissance

A l'aide de cette calibration, on a déterminé sur les parcelles d'essais des sous-parcelles ayant chacune un rendement potentiel propre. C'est ce rendement potentiel qui sert de base au calcul des recommandations de fertilisation.

Afin de consolider les résultats des simulations, le rendement potentiel a été suivi sur une longue période. On a utilisé pour cela les données météorologiques des 30 dernières années du district d'Emmendingen (station météorologique d'Emmendingen-Mundingen, Service Météorologique Allemand).

Le calcul de la dose optimale de fertilisation azotée est effectué d'après un point de vue économique, c'est-à-dire avec une hypothèse du prix de l'azote et des recettes par le maïs. Cependant, un minimum de 80 kg N/ha doit être apporté pour garantir un rendement correct (brève description d'après LINK, J.2005). Les calculs des valeurs d'azote à appliquer ont été effectués en totalité à l'Université de Hohenheim et mis à disposition du présent projet, qui a en contrepartie pris en charge la mise en pratique technique de la mesure d'application.

Prérequis pour la réalisation des cartes d'application selon Apollo

Pour cet essai, on a également conservé en 2005 l'agencement utilisé jusqu'alors, afin qu'une fertilisation azotée unique et intraparcellaire soit organisée sur les bandes expérimentales des trois parcelles d'essai.

La figure 69 montre l'agencement des bandes d'essai, où les bandes recevant un traitement spécifique sont représentées en grisé. Cet agencement est identique à celui des deux années précédentes. La nouveauté réside dans une subdivision supplémentaire en sous-parcelles, qui reçoivent chacune un traitement homogène en tant que plus petites unités intraparcellaires. Comme les années précédentes, les bandes ont une largeur de 18 m.

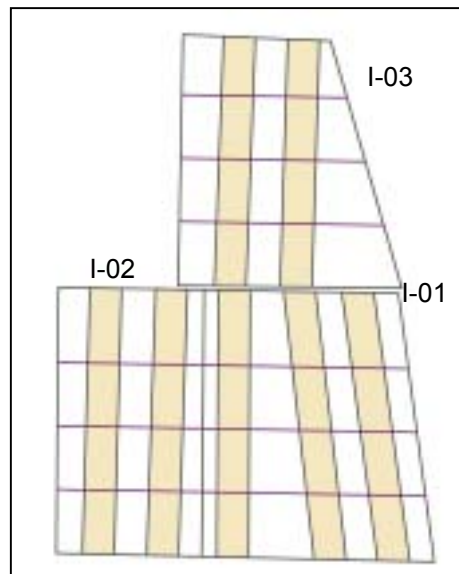


Fig.69 : agencement des bandes d'essai (mesures spécifiques intraparcellaires en grisé)

Alors que, cette année là, la fertilisation intraparcellaire est calculée à l'aide du modèle Apollo, les surfaces fertilisées de manière homogène jouent le rôle de parcelles de contrôle.

Dans ce cadre, la stratégie de fertilisation suivante a été mise en œuvre (Fig. 70)

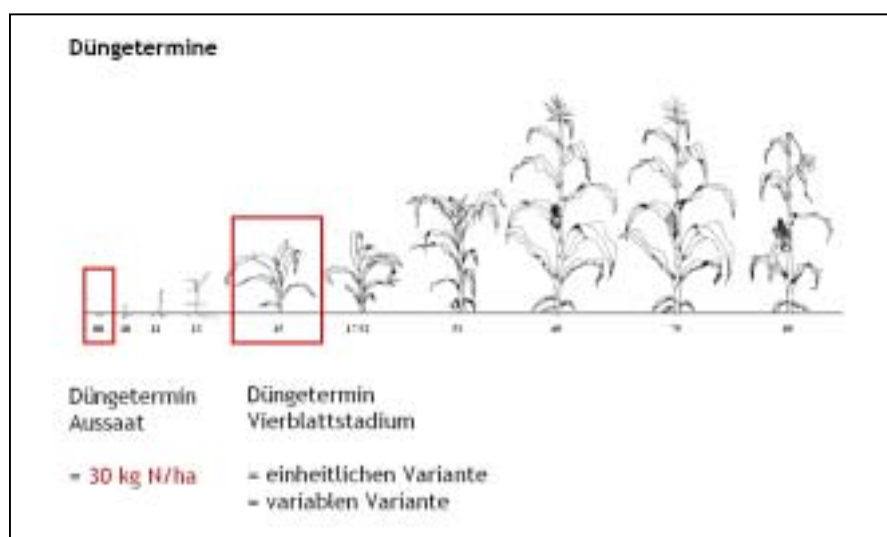


Fig. 70 : dates de fertilisation selon le dispositif d'essai de 2005

- La **première** dose devait être combinée avec le semis. Une dose homogène de 30 à 40 Kg N/ha sous forme d'engrais de démarrage devait être appliquée sur la totalité de la parcelle.

- La **seconde** dose devait intervenir au stade « quatre feuilles »

Le calcul de la quantité d'engrais à apporter **de façon homogène** sur les parcelles a ainsi été effectué selon « les bonnes pratiques agricoles » en prenant en compte la valeur N_{min} du printemps. Le calcul de la quantité d'engrais à appliquer sur les parcelles à traiter **au niveau intraparcellaire** a été effectué à l'aide du modèle de croissance « Apollo ».

Pour cela, l'université de Hohenheim a effectué une simulation de 30 doses d'engrais différentes (0 à 300 kg N/ha) sur la base de données météorologiques sur une longue période, et a procédé à une analyse des rendements et des résidus d'azote dans le sol. Le calcul de la fertilisation azotée optimisée pour chacune des plus petites sous-parcelles a été réalisé d'après la formule de la figure 71 :

$$NR_{n,t} = Y_{n,t} * P_M - N_{n,t} * P_N + CP_{n,t}$$

$NR_{n,t}$	= Rendement net (€/ha) dans la grille n et l'année t
$Y_{n,t}$	= Rendement de maïs (kg/ha) dans la grille n et l'année t,
P_C	= Coût du maïs (€/kg),
$N_{n,t}$	= Quantité de fertilisation azotée (kg N/ha) dans la grille n et l'année t,
P_N	= Coût de la fertilisation azotée (€/kg)
$CP_{n,t}$	= Compensation financière dans les zones de protection des eaux (165 €/ha) in Grid n et l'année t.

Fig. 71 : formule de calcul de la fertilisation optimale sur les plus petites sous-parcelles

Sur la base de ce modèle de croissance, on obtient les variantes intraparcellaires de fertilisation présentées dans la figure 72 : on distingue clairement la variante de contrôle homogène de 97 kg N/ha appliquée sur toutes les parcelles d'essai. Au sein des bandes d'essai, les quantités de fertilisant sur les plus petites sous-parcelles varient entre 80 et 120 kg N/ha.

En raison des limites temporelles du présent projet, la poursuite du suivi des parcelles d'essai relatif à l'épandage effectuée par l'Université

modulé des intrants est de Hohenheim.

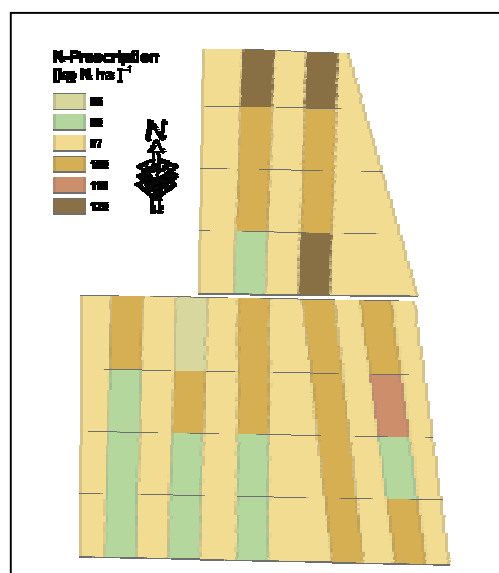


Fig. 72 : dispositif d'essai selon « Apollo » avec bandes de traitement modulées et non modulées

Il est ici prévu de comparer la fertilisation azotée appliquée uniformément avec la fertilisation intraparcellaire sous l'angle des rendements et des résidus d'azote dans le sol. De plus, les données suivantes sont relevées :

- biomasse (stade « quatre feuilles », floraison, récolte)
- teneur en azote de la plante (stade « quatre feuilles », floraison, récolte)
- teneur en azote du sol (avant le semis, au stade « quatre feuilles », après la récolte)
- éventuellement le degré de compaction du sous-sol
- mesure de la teneur en eau du sol

Réalisation des cartes d'application

Comme les années précédentes, la mise en pratique de la modulation des intrants aux doses définies par les simulations « Apollo » a été réalisée dans le logiciel « Agromap Basic ».

La figure 73 présente la « carte des valeurs de mesure », qui est composée des bandes de contrôle ayant des valeurs moyennes forfaitaires, et des bandes modulées au niveau intraparcellaire selon « Apollo ». Enfin, cette carte d'application a été convertie en une carte de « valeurs à atteindre » exploitable informatiquement.

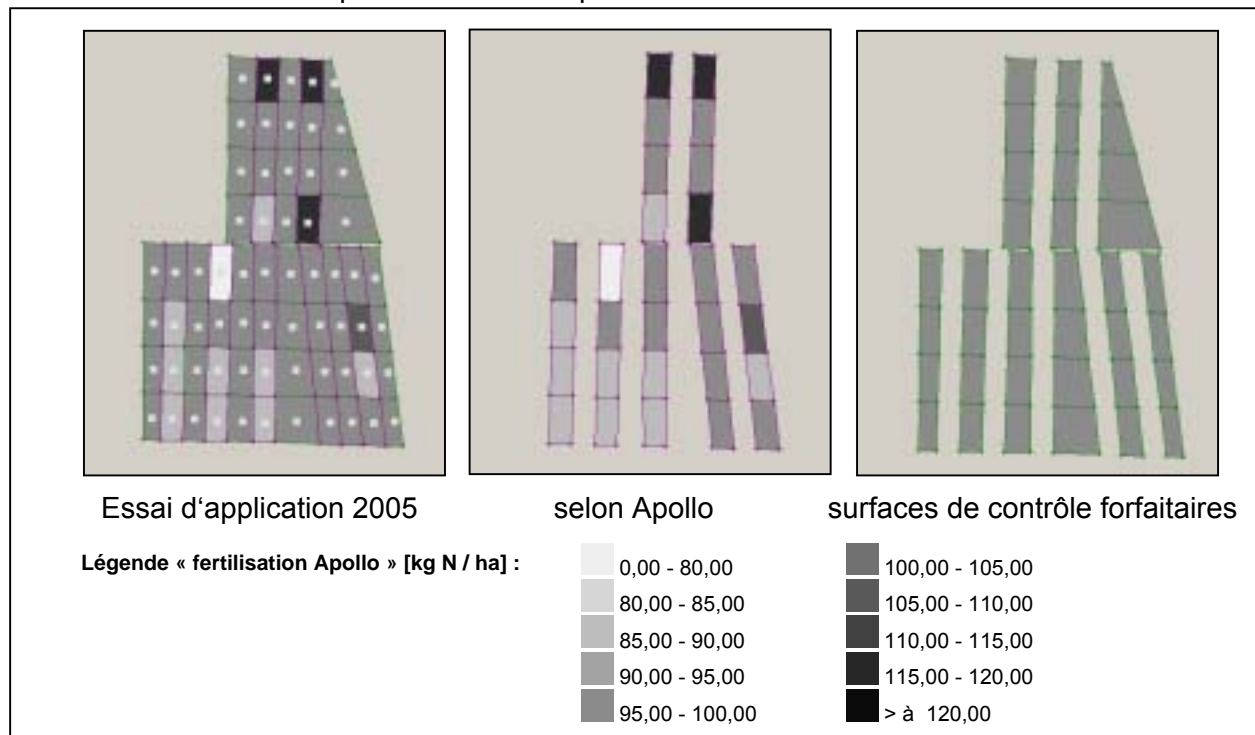


Fig. 73 : Protocole d'essai 2005 d'après « Apollo », transposé en « carte de valeurs de mesure » dans « Agromap Basic »

La figure 74 montre la carte d'application telle qu'elle a été effectuée sur les parcelles d'essais au cours de l'année d'étude, et transmise à l'ordinateur de bord ACT du tracteur par le biais d'une carte PCMCIA. Le fait de pouvoir établir la carte dès le mois de mars grâce aux simulations effectuées par le modèle de croissance, sans être pressé par le temps, a été ressenti comme très agréable. Ainsi, la carte d'application a été achevée trois mois avant sa mise en application et aurait été disponible pour l'entrepreneur à tout moment. La pertinence de la carte d'application a été vérifiée avant sa mise en pratique. Dans ce but, on a réalisé des mesures de N_{\min} sur les points du maillage, et calculé comme précédemment une carte d'application intraparcellaire selon les « bonnes pratiques agricoles ». Ce test de pertinence est décrit plus précisément ci-dessous.

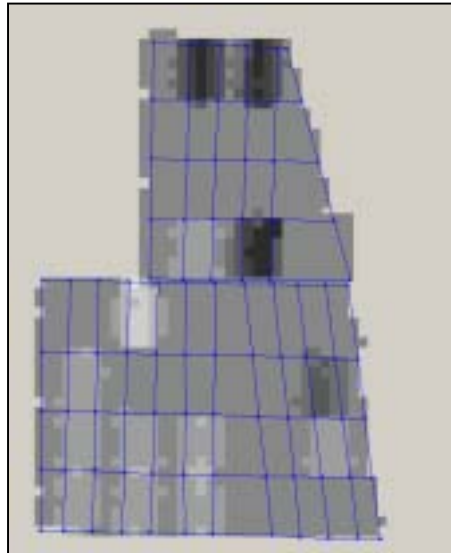


Fig. 74 : carte d'application destinée à la mise en pratique de l'essai de fertilisation en intégrant le modèle de croissance « Apollo », telle qu'elle a été effectuée au cours de l'année d'étude 2005

Contrôle de la pertinence par calcul de l'application selon les bonnes pratiques agricoles

Le 3 juin 2005, un échantillonnage des reliquats d'azote a été effectué comme précédemment sur les mailles des parcelles d'essai. La répartition des reliquats d'azote qui en résulte est présentée dans la figure 75 sous forme de carte de répartition spatialement interpolée.

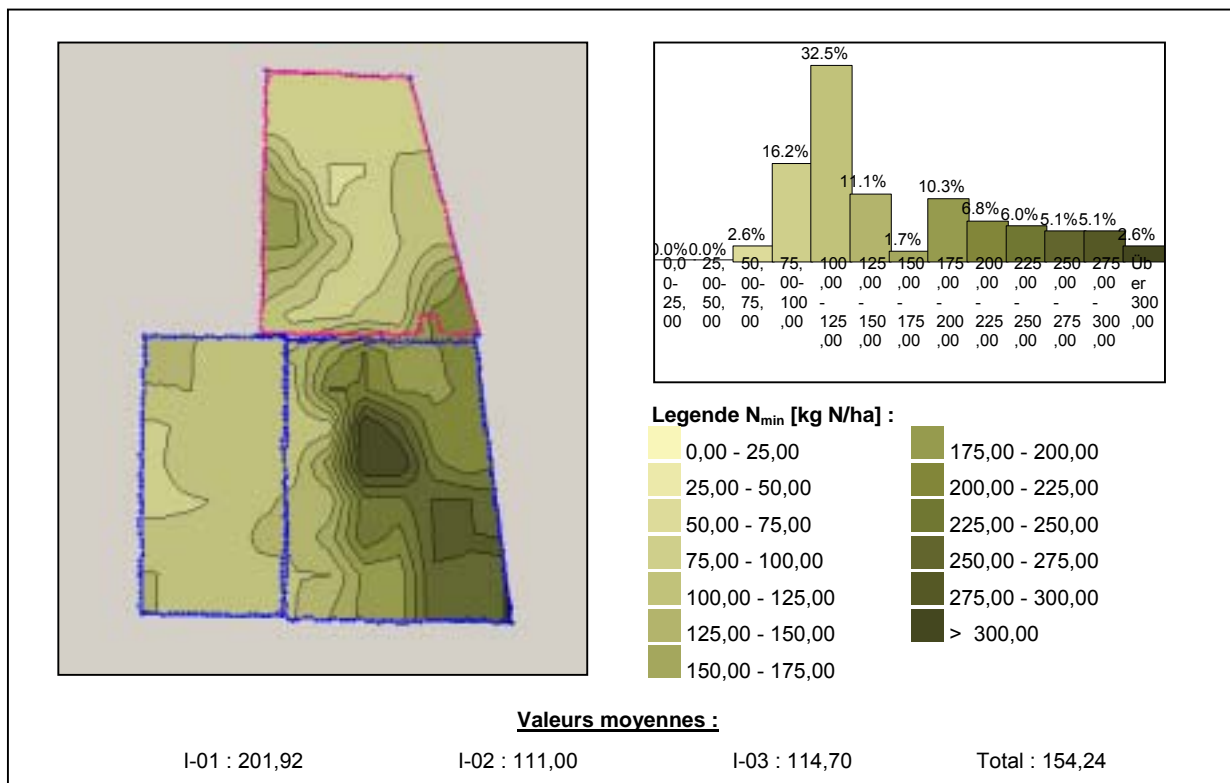


Fig. 75 : répartition des reliquats d'azote d'après l'échantillonnage du 03 juin 2005
 Comme les deux années précédentes, on a calculé à partir de ces valeurs actuelles de reliquats d'azote une carte d'application selon les « bonnes pratiques agricoles ». En 2005, elle avait pour objectif de tester la pertinence des mesures « Apollo ». La figure 76 montre cette carte d'application sous forme de carte de répartition spatialement interpolée.

Selon le calcul des « bonnes pratiques agricoles », il apparaît qu'aucune fertilisation supplémentaire ne devrait être apportée dans une grande partie de la parcelle I-3, les valeurs de N_{\min} y étant déjà supérieures aux besoins en azote calculés (sous-parcelles en rouge). Toutes les surfaces en rouge dans la figure 76 devraient ainsi être exclues de la fertilisation. Il s'est finalement avéré que le propriétaire avait épandu au printemps sur ces surfaces – en ne respectant pas les règles de l'essai – une dose préalable de 170 kg N/ha de fertilisant ENTEC. De toute évidence, ce fertilisant à effet retard qui permettrait de couvrir la totalité des besoins annuels a toutefois été lessivé sur une partie de la parcelle.

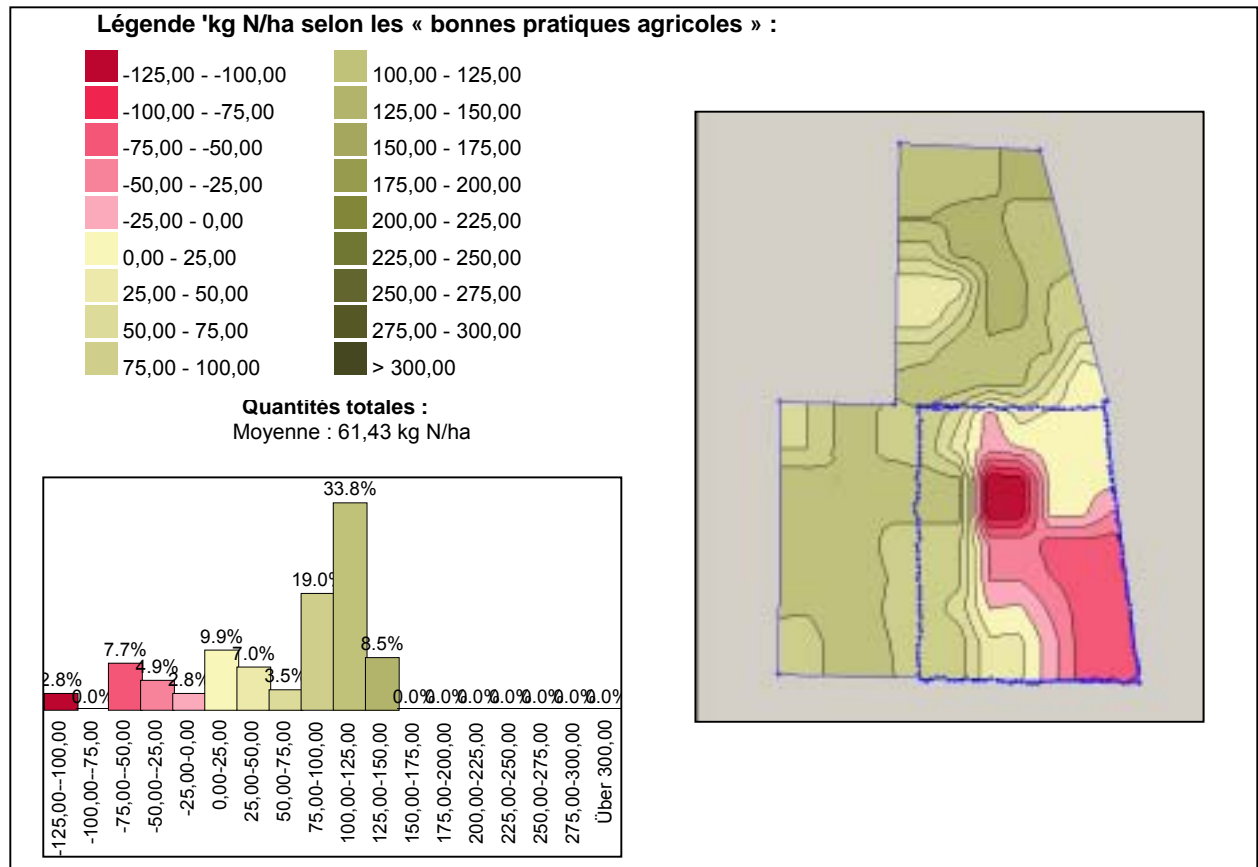


Fig. 76 : application intraparcellaire d'azote (2005) calculée selon les bonnes pratiques agricoles sous forme de carte de répartition interpolée (carte des valeurs de mesure dans Agromap Basic)

Pour la réalisation de l'essai, ceci signifie qu'un traitement particulier est nécessaire pour la sous-parcelle I-01, hors du protocole d'essai prévu.

Sur les surfaces restantes, la pertinence de la fertilisation selon « Apollo » a pu être démontrée grâce à la comparaison avec les calculs basés sur les « bonnes pratiques agricoles » (Tab. 8).

	Apollo	Bonnes pratiques agricoles	Différence
Moyenne – toutes parcelles	210 kg urée/ha	159,90 kg urée /ha	-50,10 kg urée /ha
Moyenne I-01	210 Kg urée /ha	93,67 kg urée /ha	-116,33 kg urée /ha
Moyenne I-02	206 Kg urée /ha	223,30 kg urée /ha	17,30 kg urée /ha
Moyenne I-03	212 Kg urée /ha	224,98 kg urée /ha	12,98 kg urée /ha

Tab. 8 : quantités moyennes de fertilisant selon « Apollo » et selon les « bonnes pratiques agricoles »

Réalisation de la fertilisation selon Apollo

A la suite de la confirmation de la pertinence de la mesure « Apollo » par le calcul basé sur les « bonnes pratiques agricoles », le dispositif d'essai correspondant a été mis en œuvre. Après discussion avec l'opérateur chargé des prélèvements d'échantillons de sol, qui émet également des recommandations de fertilisation, les surfaces dont les reliquats d'azote étaient trop élevés suite à la fertilisation ENTEC ont été exclues de la mesure de fertilisation. Toutes les autres surfaces ont été fertilisées au niveau intraparcellaire suivant la carte d'application préparée selon « Apollo » (Fig. 74).

La figure 77 montre les zones exclues de la mesure de fertilisation. Les résultats concernant la mise en pratique de la modulation de la fertilisation azotée selon cette approche sont décrits dans le chapitre 2.1.2.3.(3).

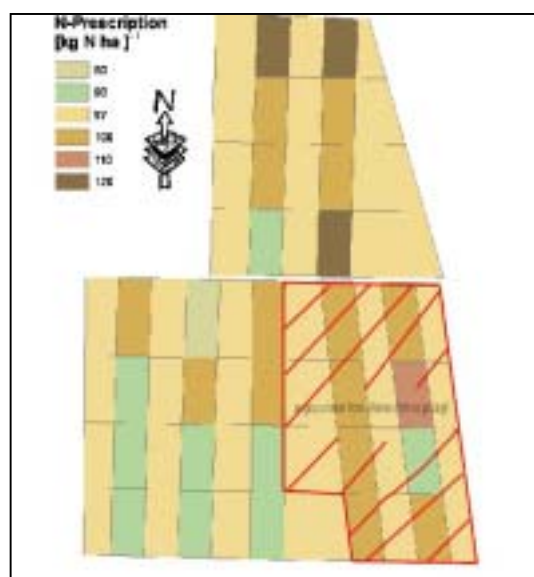


Fig. 77 : surfaces exclues de la mesure Apollo en 2005

2.1.2.3.4 Mise en œuvre d'une méthode online disponible (Cropmeter)

En raison des multiples complications intervenues lors de la mise en œuvre de la méthode offline utilisée en 2003, on a jugé important de considérer la possibilité que d'autres méthodes puissent se montrer efficaces dans le cadre d'une modulation pratique des intrants, parallèlement à la poursuite de la méthode cartographique. En raison de la problématique d'un parcellaire de petite taille, et de l'augmentation importante du volume de préparation correspondant, les méthodes online sont particulièrement à considérer. Avec ces méthodes, les paramètres d'entrée destinés à déduire une application intraparcellaire sont collectés lors de l'application même. La charge de travail préparatoire est ainsi réduite au minimum.

C'est pourquoi l'un des capteurs online présentés dans la section 1.3 (1) devait être intégré dans l'essai en 2004. La parcelle d'essai devait être scannée avec l'un de ces capteurs, sans apport d'azote. La carte d'application résultante devait être comparée avec la carte correspondante établie avec les méthodes offline, afin d'évaluer les modes de réalisation, la charge de travail nécessaire, ainsi que sa pertinence.

Le capteur « Cropmeter » étant le seul capteur online disponible dans le cadre de ce projet, c'est lui qui a été choisi pour la comparaison prévue.

Comme pour tous les capteurs présentés, on dispose d'une faible expérience de mise en œuvre du Cropmeter sur *maïs-grain*. Ceci a constitué lors de la planification du projet une raison supplémentaire pour effectuer à nouveau la fertilisation azotée intraparcellaire effective à l'aide de la méthode cartographique basée sur la technique offline, qui bien qu'étant plus lourde, peut être mise en œuvre, et de n'utiliser le capteur online que pour le scan des parcelles.

Installation et mise en service du capteur pendulaire

La mise en place du capteur pendulaire mis à disposition s'est révélée aisée et facile à comprendre :

L'appareil est fixé à l'accrochage 3 points de l'hydraulique frontal. Les capteurs de collecte sont reliés dans le boîtier électronique du « Cropmeter » à des connecteurs clairement identifiés. Ce boîtier électronique nécessite en outre une alimentation électrique 12 Volt provenant du tableau de bord du tracteur, ainsi qu'une liaison avec l'ordinateur de bord « ACT », qui communique lui-même avec l'épandeur Bogballe MR3.

Bien que des contacts aient été pris avec la société « Agrocom » avant la réalisation de l'essai afin de discuter de la configuration du tracteur, des problèmes ont été rencontrés comme l'année précédente avec le câble de liaison, car le câble d'adaptation destiné à la connexion avec « l'ACT » n'était pas le bon.

L'ACT de l'entrepreneur faisait partie de la première série. Entre-temps, on est passé à une troisième série. Ils se différencient entre autres par le type de connecteur de l'interface de connexion. Sans adaptateur, la prise du Cropmeter aurait été adaptée à la troisième série ACT. L'adaptateur livré correspondait à la seconde série. Ce format inhabituel de connecteur difficile à trouver a failli faire échouer l'essai.

Ce jour-là, une manifestation d'information sur l'agriculture de précision se tenait dans le cadre du projet, et un entrepreneur participant a pu ramener un ACT du modèle correct, auquel le capteur a pu être connecté sans problème via la bonne interface. Le capteur pendulaire « Cropmeter » connecté et prêt à l'usage est présenté dans la figure 78.



Fig. 78 : le capteur pendulaire « Cropmeter » prêt à l'usage

Mise en œuvre du capteur pendulaire pour la réalisation des cartes d'application

Le « Cropmeter » standard disponible étant étalonné pour les céréales et les études pour une utilisation de l'appareil sur maïs n'étant pas encore achevées, l'appareil a d'abord dû être modifié en vue du test prévu de mesure de la densité sur maïs.

Les interrangs de maïs sont relativement larges, et chaque plante présente une résistance relativement importante. Dans les céréales au contraire, la mesure de densité du pendule se base sur une grande quantité de tiges peu rigides.

En raison de ces différences fondamentales, la modification du pendule devait assurer à la fois une résistance adéquate du pendule et une uniformité de mesure de la culture.

Afin d'obtenir une mesure de la résistance des plants de maïs au stade « sept feuilles », - soit à hauteur de genou – le pendule a provisoirement été élargi de manière à prendre en compte trois rangs à la fois. Un essai de scan de la parcelle d'essai a été effectué avec le pendule modifié de cette manière.

Les résultats de l'essai de faisabilité de la modulation des intrants sont décrits dans la section 3.1.2.

2.1.2.3.5 Tests du potentiel des méthodes de télédétection

Ainsi, il s'agissait en 2004 de tester le potentiel de modulation de la fertilisation azotée par le biais de la méthode cartographique et par l'utilisation d'un capteur online. Afin de compléter les possibilités d'utilisation des cartes d'application, ces essais ont finalement été complétés par des études sur le potentiel de la télédétection, en particulier à cause de la mauvaise mise en œuvre du capteur online. Dans ce cadre, on a dû se concentrer pour des raisons d'organisation sur des données de télédétection « lowcost », pour éviter de déborder largement du cadre du projet.

Ci-dessous, il faut comprendre par données de télédétection « lowcost » des informations utilisables des données acquises à distance sans contact direct avec l'objet à considérer. « Lowcost » signifie ainsi que le surcoût lié à leur production est si faible qu'elles peuvent être intégrées au projet sans avoir été initialement prévues.

Les particularités et les possibilités offertes par la télédétection sont les suivantes :

- possibilité de couvrir de larges zones à la fois
- différence de perspective
- possibilité de déduire des données géométriques à l'aide de différentes méthodes (corrections d'images simples, images orthonormées, méthodes de mesures stéréophotogrammétriques)
- possibilité de relier réellement et sur de grandes surfaces des caractéristiques visibles du ciel à des objets terrestres (interprétation d'images, garanties par des clés d'interprétation vérifiées)

En temps normal, bien que la télédétection se base habituellement sur des capteurs satellitaires ou sur des capteurs embarqués sur avion, le passé recèle tout de même de nombreux exemples pour lesquelles des images aériennes « lowcost » recueillies par des plates-formes alternatives ont pu se montrer efficaces pour des objectifs particuliers.

Une telle plate-forme d'enregistrement doit être capable de positionner le capteur adapté à l'objectif dans une position d'enregistrement correcte. La production de ces photographies aériennes « lowcost » ne coûte qu'une fraction d'un vol professionnel, classique et coûteux. De plus, la mise en œuvre de ces solutions alternatives est souvent bien plus souple.

La prise d'images aériennes professionnelles n'est possible que 14 à 20 jours par an ; la prise d'image pour l'objectif de documentation prévu de différents stades de croissance à faible coût et dans de brefs délais doit être possible de nombreux jours. Les avantages de l'intégration spontanée et dans des délais courts avec un faible coût se payent généralement par une réduction de la résolution et sont justifiés lorsque la précision restante des données est suffisante pour le but recherché.

Les slogans publicitaires du type « nous volons là où les autres ne volent pas » montrent bien que les plates-formes alternatives ne peuvent pas remplacer les photographies aériennes classiques, mais permettent de combler un vide là où les premières n'entrent pas en ligne de compte pour des raisons de coût, d'estimation des risques et de spontanéité. Dans ce projet, ce sont principalement les facteurs de coût et de spontanéité de la documentation qui ont conduit à intégrer l'étude de plates-formes alternatives complémentaires.

Les différentes plates-formes d'enregistrement utilisables

Dans le sens décrit ci-dessus, les plates-formes d'enregistrement alternatives les plus diverses sont utilisées dans les buts les plus variés. On peut mentionner par exemple les grands deltaplanes monoplaces comme le deltaplane « Cody » pouvant emporter une personne, les ballons dirigeables reliés au sol ou téléguidés, les avions et hélicoptères téléguidés, les drones, les UPV's (Autonome Unpiloted vehicels»), ou bien les avions ultra-légers pour des enregistrements d'arpentage utilisés dans les endroits inaccessibles dans les domaines de l'architecture et de l'archéologie, les analyses de paysage, etc. Le travail ci-dessous présente une réussite exemplaire de ce type de mise en œuvre.

MARZOLFF. I.; (1999) : « Großmaßstäbige Fernerkundung mit einem unbemannten Heißluftzeppelin für GIS - gestütztes Monitoring von Vegetationsentwicklung und Geomorphodynamik in Aragón (Spanien) ». (Télétection à grande échelle à l'aide d'un dirigeable inhabité pour le suivi à l'aide d'un SIG de la dynamique de la végétation et de la dynamique morphologique en Aragón (Espagne)).

Parmi les nombreuses plates-formes alternatives potentielles, on a testé dans le cadre de ce projet un ULM monoplace ainsi qu'un planeur télécommandé, afin d'étudier le potentiel des images aériennes « lowcost » pour la mise en pratique de la modulation des intrants. Ces deux plates-formes sont brièvement présentées avant la description des essais réalisés.

ULM monoplace (« motorisation minimale »)

L'ULM est destiné à un usage sportif, ce qui rend son coût d'acquisition et d'entretien assez faible. De plus, il peut facilement être transporté. La motorisation simple apporte également une grande indépendance d'utilisation. Son montage est aisé et peut être effectué en 45 min. Pour la prise de photographies à la verticale, la position du pilote est quasi-idéale (Fig. 79). En outre, il ne nécessite qu'un faible espace pour le décollage et l'atterrissage. A une altitude de vol de 600 m (Fig. 80), on peut recueillir à l'aide d'un appareil photographie reflex classique des vues d'excellente qualité sur de grandes surfaces.



Fig. 79 : position du pilote avec un accès aisé à la caméra embarquée



Fig. 80 : prises de vue à une altitude de vol d'environ 600 m

A titre d'illustration, la figure 81 montre une prise de vue oblique, et la figure 82 une image à la verticale aisément utilisable, des parcelles d'essai.



Fig. 81 : environnement des parcelles d'essai par une image oblique du 10 juin 2004 ; MERKEL, 2004)



Fig. 82 : image à la verticale de la parcelle d'essai à l'aide d'un appareil photo numérique à une altitude de vol de 600 m (image originale non retravaillée).

Planeur motorisé télécommandé à moteur électrique

Parallèlement à l'ULM monoplace, on a utilisé un dispositif téléguidé (plate-forme RC, rc= radio control). Un planeur motorisé semblait parfaitement adapté à cet usage. En premier lieu, les améliorations constantes de la technique des batteries et de la propulsion au cours des dernières années ont permis de disposer d'une réserve de puissance suffisante pour embarquer une charge relativement élevée. En second lieu, son utilisation est bien plus simple que celle d'un modèle à moteur thermique. La figure 83 présente le modèle un peu âgé utilisé.



Fig. 83 : le planeur motorisé télécommandé utilisé pour les prises de vue

Les deux appareils photo utilisés (un appareil APS d'un poids de 250 g environ et un appareil numérique d'une résolution de 2,2 M de pixels et pesant environ 100 g) ont tout simplement été fixés directement sur le centre du gravité près du fuselage à l'aide de scotch « Powertape ». Les appareils photo étaient déclenchés de façon fiable par le biais d'un miniservo provisoirement fixé avec du scotch et utilisant un canal libre du récepteur (Fig. 84).



Fig. 84 : à titre d'exemple, mode de fixation et de déclenchement de l'appareil APS directement fixé sur le centre de gravité et sur le fuselage du planeur

L'appareil était constitué de composants standard, et même en partie de composants anciens et bon marché. Malgré un surpoids allant jusqu'à 260 g (+ 17 %), les vols se sont déroulés sans encombre. Bien que les capacités de prise d'altitude et de planage soient notablement réduites, elles ne posent aucun problème pour l'utilisation souhaitée. De même, les atterrissages précis et contrôlés dans les champs de maïs, en raison de l'absence de prairies dans les environs, se sont révélés très faciles, et aucun dégât n'a été constaté au cours des nombreux atterrissages. Le montage sur l'appareil d'un signal sonore de repérage a facilité la recherche du planeur après l'atterrissage.

L'utilisation de moyens de propulsion plus modernes et de portées plus importantes permet d'étendre considérablement la durée des vols, les capacités de prise d'altitude ainsi que l'altitude de vol, qui est surtout limitée par la perte de visibilité du modèle. Dans le cadre de

prise de vue aériennes, même une configuration haut de gamme d'un avion de modélisme peut être qualifiée de solution « lowcost » à grande flexibilité de mise en œuvre.

Images aériennes recueillies

Différentes images aériennes ont été recueillies et analysées sur la base des deux plates-formes de prise de vue « lowcost » décrites (Tab. D-71).

Tab. 9 : prises de vues effectuées à partir des plates-formes « lowcost »

Date	Plate-forme et appareil photo
10.06.2004	<u>ULM motorisé</u> : - appareil photo reflex Autofocus : distance focale 50 et 100 mm - appareil photo numérique 4 M Pixels
06.07.2006	<u>Planeur motorisé télécommandé</u> avec Appareil photo APS (distance focale 35mm)
07.07.2004	<u>Planeur motorisé télécommandé</u> avec appareil photo numérique (2,2 M Pixels)
05.10.2004	<u>Planeur motorisé télécommandé</u> avec appareil photo numérique (2,2 M Pixels)
13.10.2004	<u>Planeur motorisé télécommandé</u> avec appareil photo numérique (2,2 M Pixels)

De nombreux paramètres ont pu être dérivés de ces images aériennes. Ils sont uniquement présentés dans les grandes lignes ci-dessous afin de ne pas s'éloigner du thème de ce rapport. Ces résultats sont présentés en détail dans un autre rapport. La distinction est faite entre les données géométriques dérivées et les données de réflexion propres des images.

Données géométriques : topographie et modèle numérique de terrain

Dans la série de prises de vues analogiques du 10 juin 2004, il a été possible d'orienter une paire d'images à l'aide d'une table traçante analytique stéréo. On a utilisé un AM 2000 de la société LH Systems avec les logiciels « Orima », « Pro 600 » et « Microstation » (Bentley).

A partir de ce modèle stéréographique, il a été possible de mesurer la topographie ainsi que de faire un maillage de la surface à une échelle de 5 fois 5 mètres.

Données géométriques : isolignes

Sur la base du modèle numérique de surface de terrain, les isolignes ont pu être déduites à l'aide du module « Geograf » de l'environnement CAO de « Microstation » (Bentley).

Données géométriques : analyse des pentes

A partir de ces données, l'altitude, les pentes, ainsi que l'orientation des pentes (exposition) ont pu être déterminées à n'importe quel endroit de la zone d'essai, à l'aide du module « Geopak » du logiciel CAO de « Microstation ».

Données géométriques : analyse du profil du terrain

A l'aide du même module, il est possible de définir des transects à tout endroit et d'obtenir les profils topographiques correspondants.

Données géométriques : correction d'images

Les images « lowcost » ont pu être corrigées aisément. Dans le cas présent, une simple correction mathématique des images (par projection) basée sur 15 amers permet d'obtenir en deux étapes de correction une précision de 0,5 m sur le plan horizontal et de 0,4 m sur le plan

vertical (Fig. 85). On a utilisé dans ce but le module Descartes de l'environnement CAO de Microstation.

Actual Model: (4 pts or +) Projective (Project)									
Control Point #	On	Base System		Uncorrected System		Residuals			
		X	Y	X	Y	X	Y	XY	
1	X	3401867.4000	5340130.4000	3401868.6653	5340130.1123	-1.5380	-0.0466	1.5387	
2	X	3401785.3244	5339972.4933	3401785.9435	5339972.2717	-0.2175	0.1224	0.2496	
3	X	3401783.8156	5340109.0567	3401784.3525	5340108.5189	-0.4137	0.7959	0.8970	
4	X	3401769.0600	5340135.4100	3401768.3377	5340135.9516	0.7970	-0.1243	0.8067	
On/Total:		15 / 17		Standard Deviations:		0.4089	0.2772	0.3771	

Fig. 85 : erreur résiduelle après 2 étapes de correction d'image par projection (15 amers)

On a préalablement utilisé en tant que points de référence des endroits remarquables déterminés par mesure stéréoscopique. La figure 86 présente l'image corrigée superposée avec les données vectorielles de référencement. On peut établir que la correction est suffisamment précise pour l'objectif prévu de collecte de paramètres différenciés au niveau intraparcellaire.



Fig. 86 : image aérienne géoréférencée corrigée par une méthode simple ; prise de vue du 10 juin 2004 avec l'ULM, trois jours après une fertilisation du maïs au stade 7 feuilles (hauteur de genou) ; points de références issus des mesures stéréoscopiques effectuées précédemment

Données géométriques : direction et longueur des pentes aux points du maillage

Une analyse des pentes a pu être réalisée au niveau des points du maillage à l'aide des outils mentionnés. Ainsi, il est possible de calculer la direction et l'angle de la pente à n'importe quel point du maillage.

Données géométriques : correction et « mosaïques » d'images

Parallèlement à la correction d'images présentée, il a également été possible de joindre plusieurs images corrigées individuellement, afin de former une mosaïque d'images. Ceci est

particulièrement important dans le cas des images acquises à l'aide du planeur motorisé. D'une part, il est dans ce cas impossible de sélectionner les fragments d'images pendant les prises de vue, et il arrive que plusieurs vols soient nécessaires pour que la totalité de la parcelle soit photographiée. D'autre part, la hauteur de vol limitée (par la perte de visibilité du planeur utilisé, qui fait 2,1 m d'envergure) et l'utilisation d'un simple appareil photo sans grand angle ne permet pas de photographier les trois parcelles à la fois. On est ainsi contraint de constituer une mosaïque à partir de plusieurs enregistrements (Fig. 87).

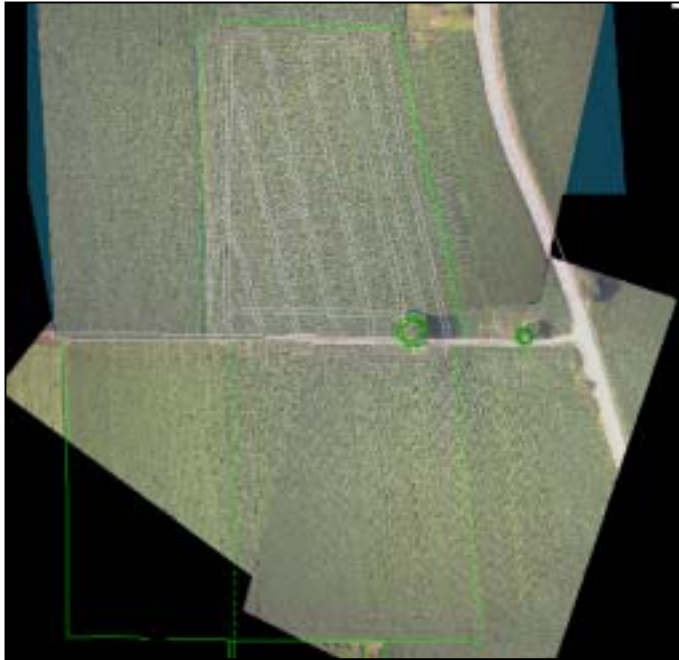


Fig. 87 : mosaïque d'images constituée à partir de trois images corrigées (prise de vue du 7 juin 2004 effectuée à l'aide du planeur motorisé, images n°5b, 6 et 8)



Fig. 88 : image orthographique dérivée

Données géométriques : correction d'images orthographiques et collecte « lowcost » de données 3D

En plus des corrections d'images simples précédemment décrites, il a également été possible d'effectuer de véritables corrections d'images orthographiques à partir des enregistrements « lowcost » effectués à l'aide de l'ULM. Des points communs peuvent être automatiquement déterminés lors du processus de construction du modèle photogrammétrique, qui améliorent et stabilisent la construction du modèle.

Sur la base de cette orientation, il est possible d'analyser de façon stéréoscopique la topologie sur écran à partir d'une paire d'images et de générer automatiquement la surface topographique, qui peut à son tour constituer la base d'une ortho-image. La figure 88 présente une ortho-image issue d'une prise de vue lowcost effectuée avec l'ULM.

Parallèlement à la détermination réussie de telles données géométriques, il a aussi été possible de calculer à partir de ces images aériennes simples des valeurs de réflexion dans le sens de capteurs de télédétection.

Données de réflexion ; description des informations spectrales dérivées

Pour l'obtention de données de réflexion, les images issues du planeur motorisé ont été redressées et regroupées pour former une mosaïque. La position des points de maillage et des points intermédiaires, pour lesquels on dispose d'une grande quantité de données de référence, a été marquée par un cadre noir sur les images aériennes. A l'aide d'un simple logiciel de traitement d'image, on a déterminé dans ces zones l'intensité du rayonnement réfléchi dans les canaux du rouge (R), du vert (V) et du bleu (B). Ces canaux représentent les couleurs de base de la partie visible du spectre électromagnétique (Fig. 89).

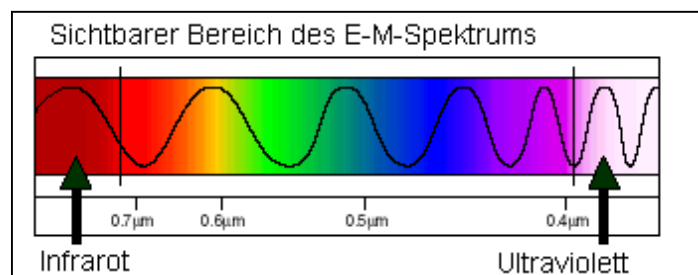


Fig. 89 : partie visible du spectre électromagnétique (lumière)
(axe de la zone spectrale inversé par rapport à la figure 90).

La télédétection permet d'utiliser différentes parties du spectre électromagnétique, car les courbes de réflexion de différents objets se comportent de manière relativement caractéristique (Fig. 90). 3 variantes différentes ont été sélectionnées lors du calcul des valeurs de réflexion R, V et B (Fig. 91).

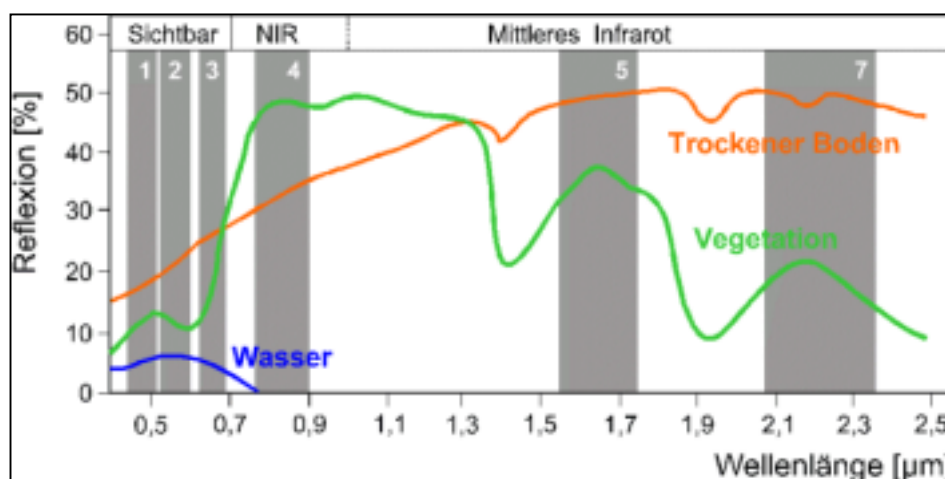


Fig. 90 : courbes de réflexion caractéristiques dans la zone du spectre électromagnétique

En premier lieu ont été déduites les valeurs de réflexion à partir des points de maillage et des points intermédiaires d'une mosaïque d'images obtenue après géoréférencement des images. Ceci a permis d'éviter un ajustement individuel des couleurs de chaque image. Par ailleurs, la mosaïque est constituée d'images prises à des altitudes et des dates différentes, ce qui induit de grandes variations de qualité d'image.

En second lieu, les réflexions ont été déduites à partir de l'image couvrant le maximum de la parcelle d'essai. Il s'agit donc d'une image relativement homogène. Toutefois, l'analyse a été effectuée sur l'ensemble des parcelles, afin que les particularités de chaque parcelle – par exemple les différences de variétés culturales - n'interfèrent pas dans les calculs de corrélation. Enfin, et **troisièmement**, les réflexions n'ont été déterminées à chaque fois qu'à partir d'une seule image par parcelle, ce qui a permis d'éliminer les différences interparcelles lors de l'analyse statistique.

Ces trois analyses ont été réalisées chacune pour trois dates de prises de vue différentes (07.07.2004, 05.10.2004 et 13.10.2004). Des paramètres supplémentaires ont alors pu être dérivés des paramètres de base R, V et B (Tab. 10) :

Tab. 10 : Paramètres dérivés des valeurs de réflexion

R/V	R-V	(R-V)/(R-B)
R/B	R-B	(R-V)/(V-B)
V/B	V-B	(R-B)/(V-B)

Ces paramètres ont été corrélés avec les valeurs disponibles aux points du maillage et aux points intermédiaires, afin de déterminer si la répartition intraparcellaire de l'un des paramètres se reproduit dans l'image aérienne en couleurs vraies. Les valeurs suivantes ont été déterminées par corrélation :

Maturation :

- maturation A : maturation au 13.09.04 et au 27.09.04 estimée du sol (en 8 étapes)
- maturation B : maturation au 09.10.04 estimée du sol (en 8 étapes)
- Différence : maturation B – maturation A et Différence : maturation C – maturation B
- Zone à aspect « hirsute » sur l'image aérienne
- Maturation au 06.10.04 et au 13.10.04 à partir d'image aérienne

Données de l'analyse des reliquats d'azote (N_{min}) du 19.11.2004 :

- N_{min} (0-30) ; - N_{min} (30-60) ; - N_{min} (60-90) ; -N_{min} total

Données de l'analyse granulométrique du 07.05.2003 :

- **Argile (%) (07.05.2003) :** **Sable (%) (07.05.2003) :** **Limons (%) (07.05.2003) :**
- Argile (0-30) - Sable (0-30) - Limons (0-30)
- Argile (30-60) - Sable (30-60) - Limons (30-60)
- Argile (60-90) - Sable (60-90) - Limons (60-90)

Données de l'analyse pédologique du 19.11.2004 :

- PH ; - P₂O₅ ; - K₂O₅ ; - MgO

Rendement 2004

- données de rendement brut à la récolte déduites pour les points de maillage et les points intermédiaires

Teneur en carbone et en azote de la plante en 2004

Les résultats de ces vérifications, qui jouent un rôle important dans la mise en pratique de la modulation des intrants, sont rassemblés dans le chapitre 3.1.2.

2.1.2.4 Etudes de l'optimisation de la modulation des intrants

A l'aide d'autres sous-études, on a tenté d'aller plus loin dans l'optimisation de la mise en pratique de la modulation des intrants.

La mise en pratique concrète de la modulation des intrants s'est heurtée à la *très grande charge de travail* nécessaire à la détermination de la variabilité des reliquats d'azote. Sur la base de réflexions théoriques, une réduction de cette charge de travail a été simulée afin d'examiner s'il était possible d'optimiser les aspects pratiques de la méthode par ce biais.

Un point particulièrement frappant dans le cadre de la mise en pratique de la modulation réside dans le fait que l'entrepreneur fixe des quantités minimales prédéfinies. L'influence de cet aspect sur la précision de la méthode est testée dans une autre sous-étude.

Les sous-études ci-dessous visant à l'optimisation de la modulation ont également pour but

- d'examiner la réduction de la charge de travail, et
- de garantir une précision suffisante des pratiques dans le cadre de l'approche cartographique.

2.1.2.3.6 Réduction de la charge de travail lors de l'obtention de la carte d'application par l'approche cartographique

Comme cela est apparu au cours des essais réalisés en 2003 et 2004, la grande masse de travail préparatoire constitue un problème considérable de l'approche cartographique utilisée. En effet, les quantités à épandre doivent être calculées à l'avance pour la moindre unité de surface (pixel) prise en compte. Tous les paramètres sont ainsi entrés au niveau intraparcellaire :

Alors que les données de rendement, issues du calculateur « on line » de rendement de la moissonneuse-batteuse et permettant de calculer le rendement potentiel attendu, sont immédiatement disponibles au niveau intraparcellaire, la répartition des reliquats d'azote au niveau intraparcellaire doit être déterminée par le biais d'un échantillonnage très dense et dans un délai très bref avant la fertilisation. Outre la charge de travail importante requise, cet aspect rend particulièrement rigide et inattractive l'adaptation de cette méthode à une mise en pratique opérationnelle de la modulation des intrants.

Il paraît donc logique de vérifier si la faisabilité de la méthode peut être améliorée par une diminution de la charge de travail liée à la détermination des reliquats d'azote.

C'est pourquoi on a étudié l'influence du paramètre « reliquats d'azote » sur la déduction de la carte d'application, soit lorsqu'il est pris en compte au niveau intraparcellaire, soit lorsque pour simplifier on applique une valeur unique forfaitaire sur la totalité de la surface. Ceci permet de déterminer l'influence exercée par la prise en compte différenciée des reliquats d'azote sur les résultats de la carte d'application. Si cette différence se révélait minime, on pourrait considérer lors de l'élaboration de la carte d'application la possibilité d'entrer une valeur unique de reliquats d'azote sur la parcelle, afin de réduire le surplus considérable de préparation. L'impact de différentes valeurs de reliquats d'azote est simulé ci-dessous.

Détermination des reliquats d'azote différenciés au niveau intraparcellaire

La figure 92 présente la répartition des reliquats d'azote au niveau intraparcellaire, obtenue lors de l'année d'étude 2003 pour le calcul de la carte d'application.

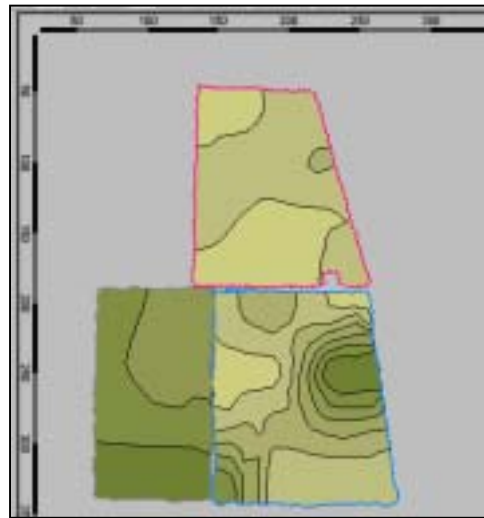


Fig. 92 : répartition des reliquats d'azote prise en compte (carte en isolignes, issue des valeurs échantillonnées aux points du maillage en mai 2003)

Elle a été obtenue par interpolation à partir des données de mesure échantillonnées aux points du maillage. Afin de permettre d'autres usages, les valeurs de cette carte en isolignes ont été converties sur une grille de 10 * 10 m pouvant être comparée par référencement à un système de coordonnées unique avec les sets de données de tous les paramètres d'entrée. La carte d'application correspondante a été déduite et comparée aux deux variantes des reliquats d'azote (par unité de surface et simplifiée). Dans la figure 93, on peut clairement voir pour les différentes parcelles les différents niveaux de reliquats d'azote ainsi que la variance des paramètres selon cette méthode.

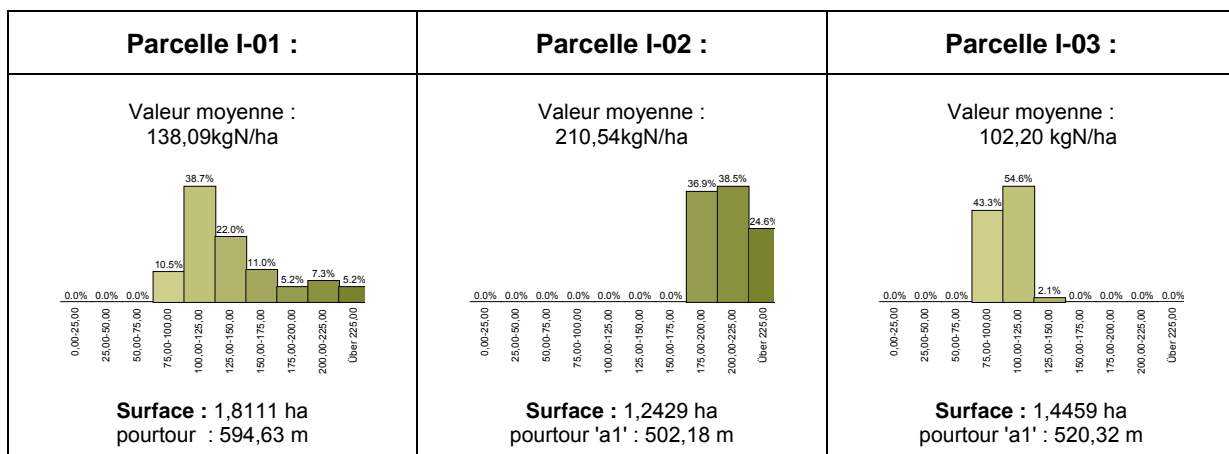


Fig. 93 : différences de niveau et de variance des reliquats d'azote pour les différences parcelles

Prise en compte d'une valeur moyenne forfaitaire de reliquats d'azote pour toute la parcelle

Afin de réduire la charge de travail liée à la prise en compte des reliquats d'azote, on a également simulé l'impact sur l'élaboration de la carte d'application avec l'hypothèse qu'une valeur moyenne unique représentative de tous les échantillons d'une même parcelle soit utilisée. Ainsi, avec cette méthode, une seule valeur N_{min} est définie de façon représentative pour chaque parcelle et la répartition intraparcellaire des reliquats d'azote précédemment obtenue n'est pas prise en compte (Fig. 94).

L'utilisation de ces paramètres d'entrée donne lieu à une carte d'application qui représente la quantité d'azote à épandre pour chaque pixel de 10 * 10 m. Les pixels étant les mêmes que ceux de la carte d'application d'origine, il est possible de comparer les valeurs calculées et de dériver une carte de différences à partir des deux calculs.

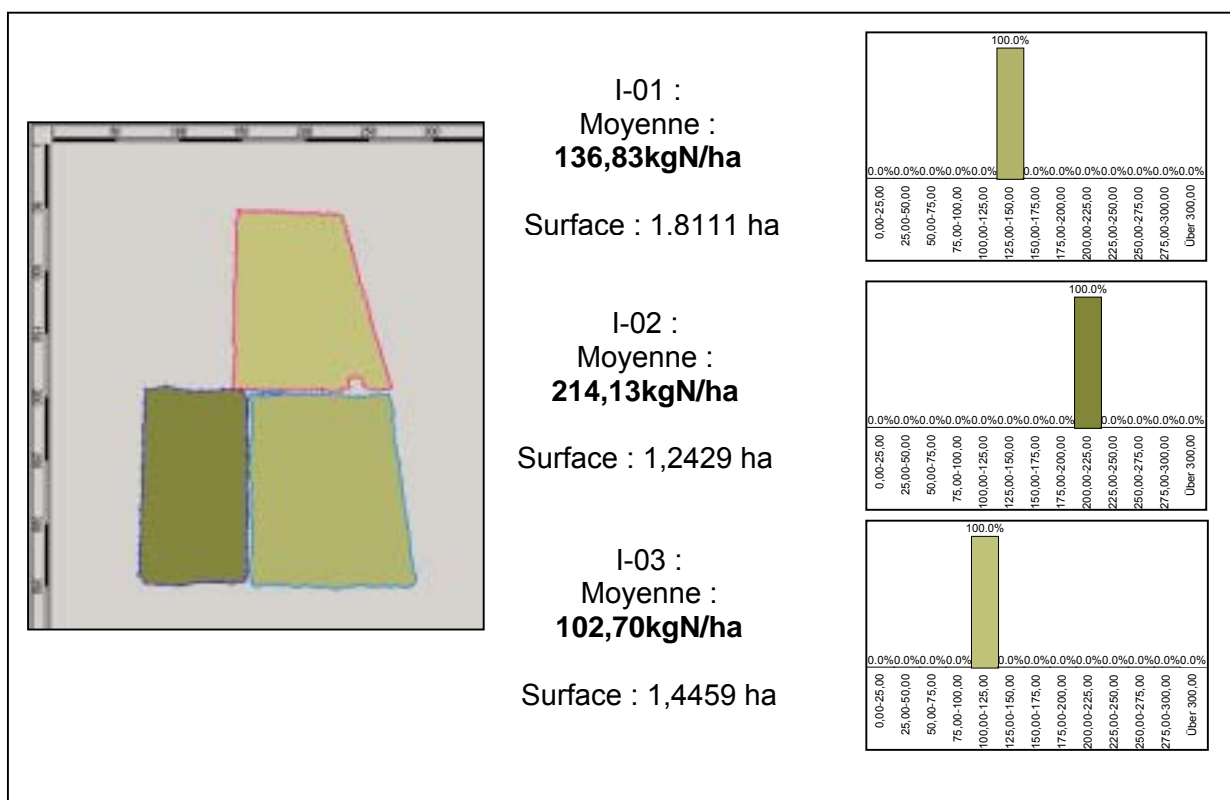


Fig. 94 : valeur moyenne représentative de la répartition des reliquats d'azote

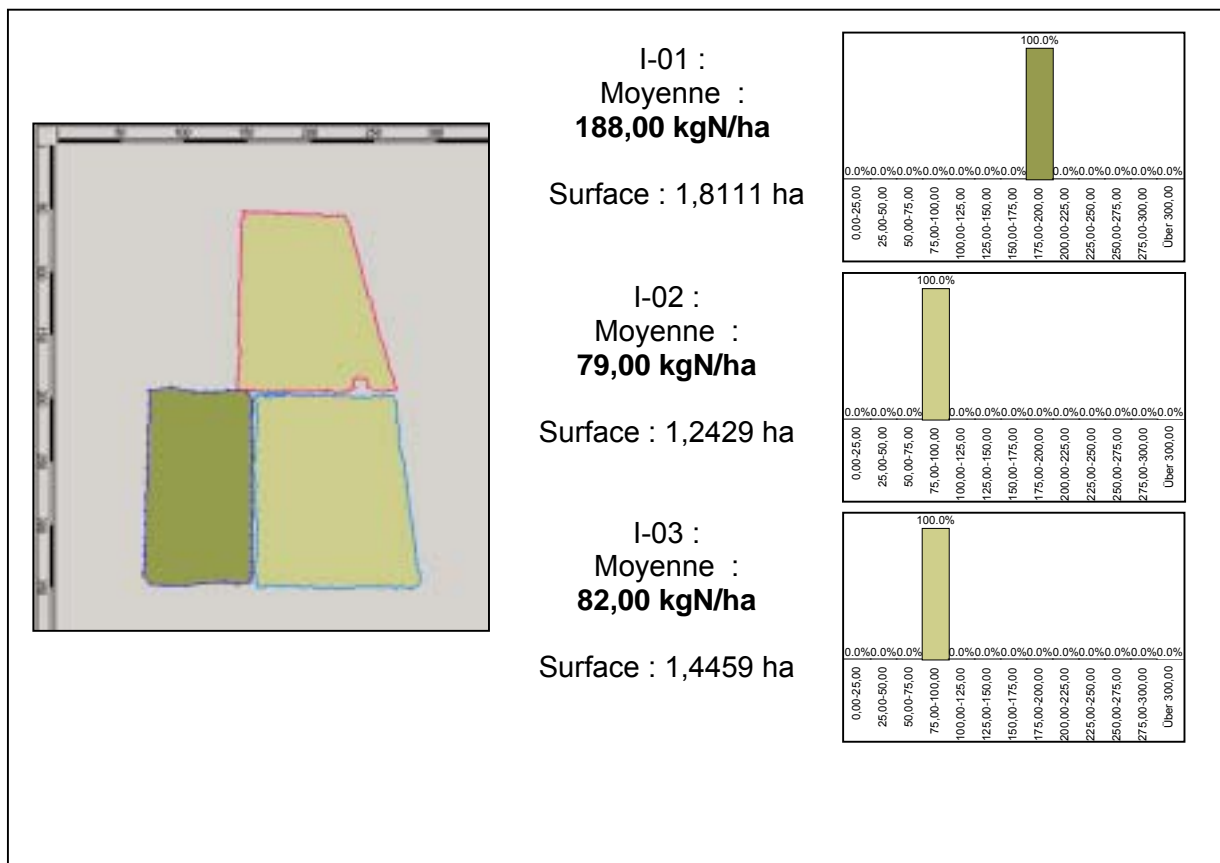


Fig. 95 : répartition des reliquats d'azote en cas de prise en compte forfaitaire de la valeur minimum

Prise en compte d'une valeur minimum de reliquat d'azote pour toute la parcelle

On a également simulé l'impact d'une valeur unique par parcelle du paramètre « reliquat d'azote » pris non pas en tant que valeur moyenne représentative mais en tant que valeur minimum. En effet, un seul échantillonnage par parcelle ne permet pas de garantir la détermination précise d'une valeur moyenne représentative (Fig. 95).

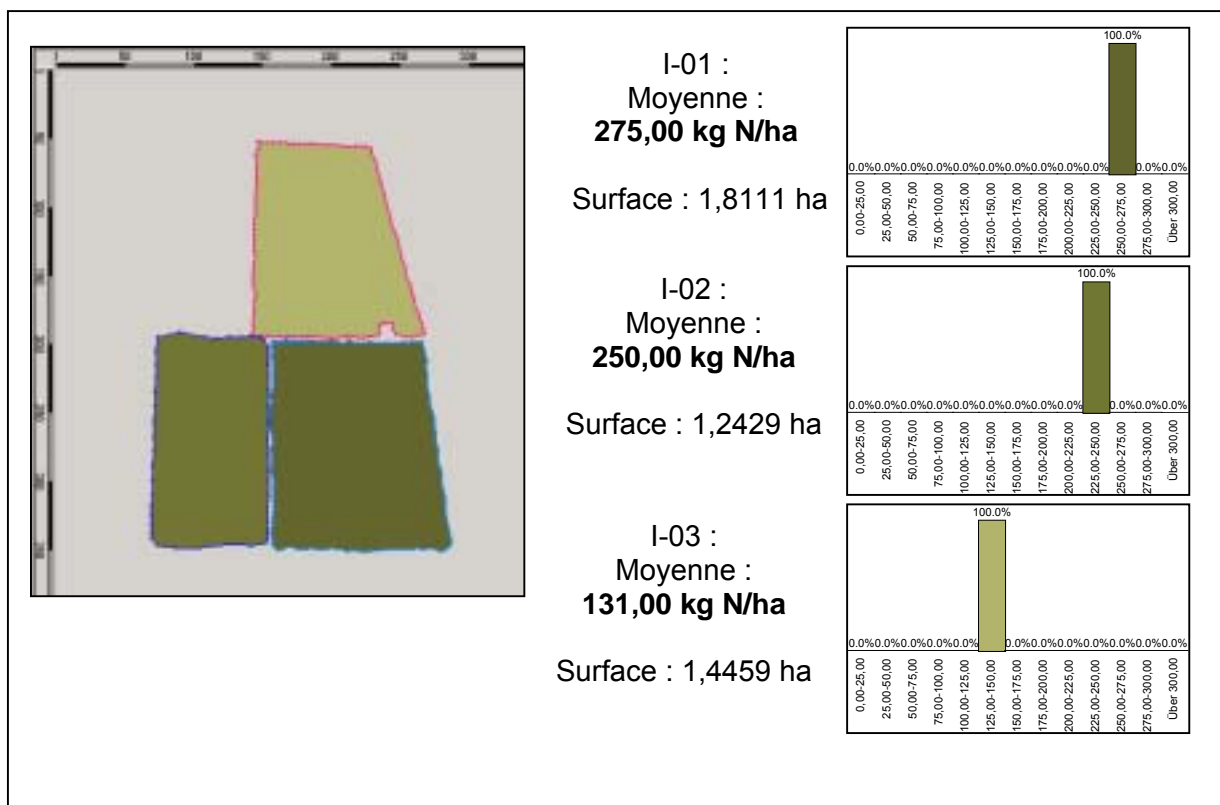


Fig. 96 : répartition des reliquats d'azote en cas de prise en compte forfaitaire de la valeur maximum

Prise en compte d'une valeur maximum de reliquat d'azote pour la totalité de la parcelle
Enfin, on a simulé l'impact de la prise en compte de la valeur maximum N_{min} obtenue (Fig. 96).

Les figures 94 à 96 illustrent les différentes cartes en isolignes avec les classes de répartition correspondantes.

Les résultats de cet essai intéressant la mise en pratique de la modulation des intrants sont présentés dans le chapitre 3.1.2.

2.1.2.3.7 Etudes de l'influence de différentes doses minimales prédéfinies

L'entrepreneur ayant imposé des doses d'application minimale et maximale (100 – 500 kg d'urée/ha) lors de l'année d'étude 2004, il est nécessaire d'étudier l'influence de tels seuils issus d'une expérience pratique sur les résultats de calcul intraparcellaires. Un besoin d'urée atteignant la dose de 500 kg/ha n'ayant pu être calculé pour aucune des sous-parcelles, la problématique se réduit à l'étude de l'impact d'une dose minimale prédéfinie.

Ainsi, les cartes d'urée suivantes ont été comparées les unes aux autres :

- la carte d'urée issue des résultats de calcul directs de l'application d'azote de 2004
- la carte d'urée selon les pratiques courantes dans laquelle toutes les valeurs d'application négatives sont remplacées par 0
- la carte d'application selon les doses minimales prédéfinies par l'entrepreneur dans laquelle toutes les valeurs < 100 sont remplacées par la quantité minimale de 100 kg d'urée/ha.

Carte d'urée dans la parcelle I-03 selon les calculs

La figure 97 montre la carte d'urée calculée pour la parcelle I-03, dans laquelle les besoins (valeurs négatives) sont déjà partiellement dépassés par l'azote disponible. On obtient à l'issue de ce calcul une valeur totale de 222,96 kg d'urée (154,20 kg/ha * 1,4459 ha), ce qui correspond à une valeur moyenne de 154,20 kg d'urée/ha. Le diagramme de la figure 33 montre la répartition des classes correspondante.

Carte d'urée dans la parcelle I-03 sans valeurs négatives

La figure 98 présente la carte d'urée pour la parcelle I-03, dans laquelle les valeurs négatives mesurées ont été remplacées par 0 (aucune quantité d'azote ne pouvant être retirée du sol durant la fertilisation). On obtient à l'issue de ce calcul une valeur totale de 256,43 Kg d'urée (177,35 kg/ha * 1,4459 ha), ce qui correspond à une valeur moyenne de 177,35 kg d'urée/ha. La répartition des classes correspondante est montrée une nette réduction de son étalement.

Cartes d'urée dans la parcelle I-03 avec au minimum 100 kg/ha d'urée

La carte d'urée de la parcelle I-03 avec mise en œuvre d'une quantité minimale de 100 kg N/ha se trouve dans la figure 99. L'application calculée aboutit à une quantité totale de 260,61 Kg d'urée (180,24 kg/ha * 1,4459 ha), ce qui équivaut à une valeur moyenne de 180,24 kg d'urée/ha. La répartition des classes correspondante est présentée dans le diagramme joint.

Dans le chapitre 3.1.2, les résultats de cet essai décrivent l'influence de ces différentes cartes d'urée dans des conditions limitantes prédéfinies sur la mise en pratique d'une modulation des intrants

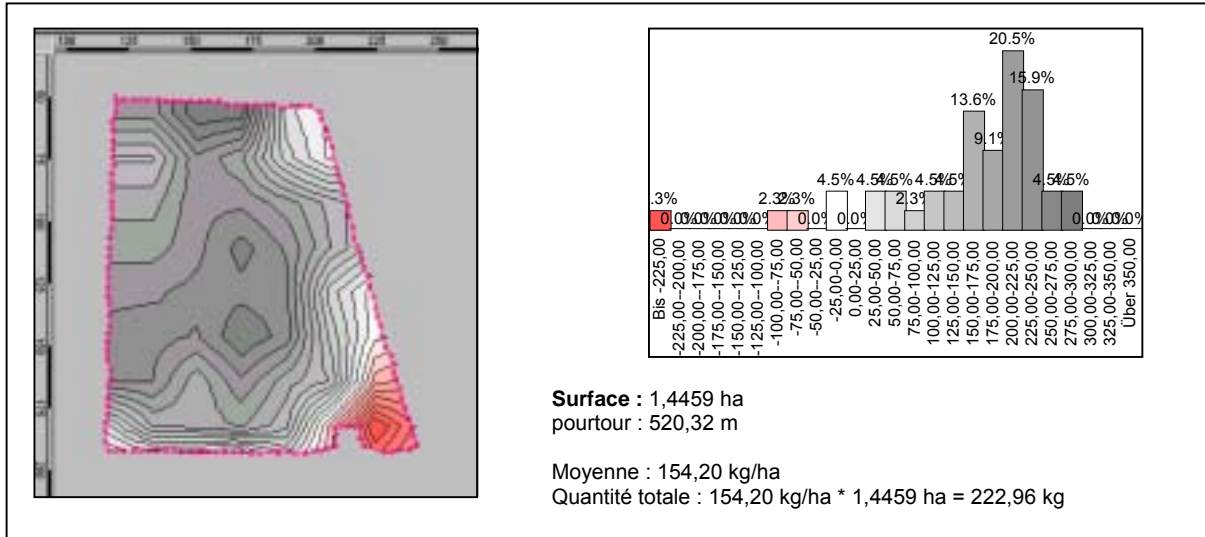


Fig. 97 : carte d'urée dans la parcelle I-03 selon les calculs (valeurs négatives incluses)

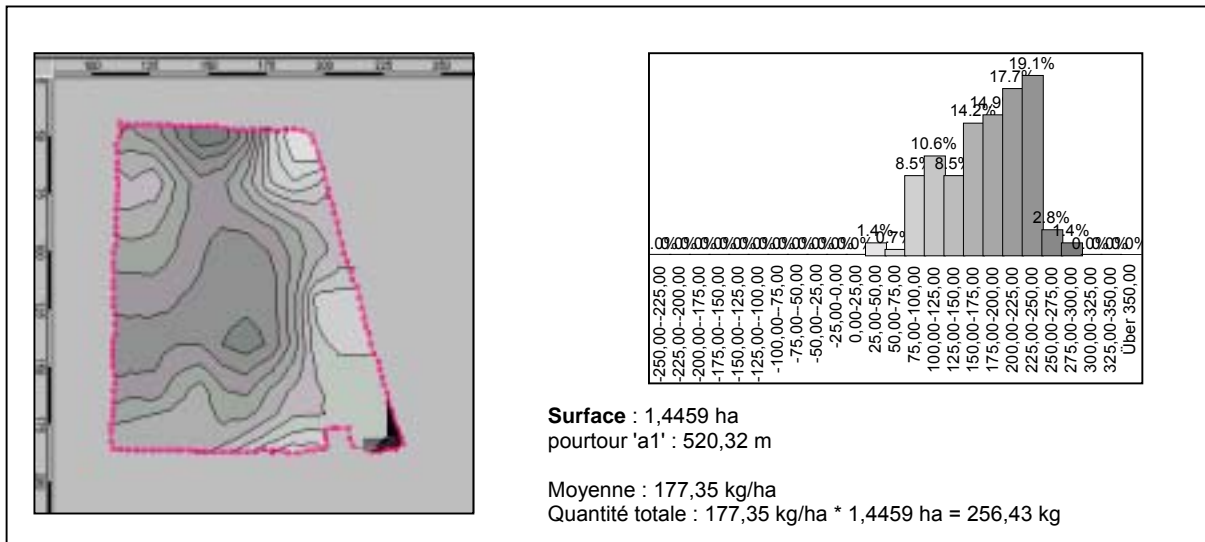


Fig. 98 : carte d'urée dans la parcelle I-03 (valeurs négatives non incluses)

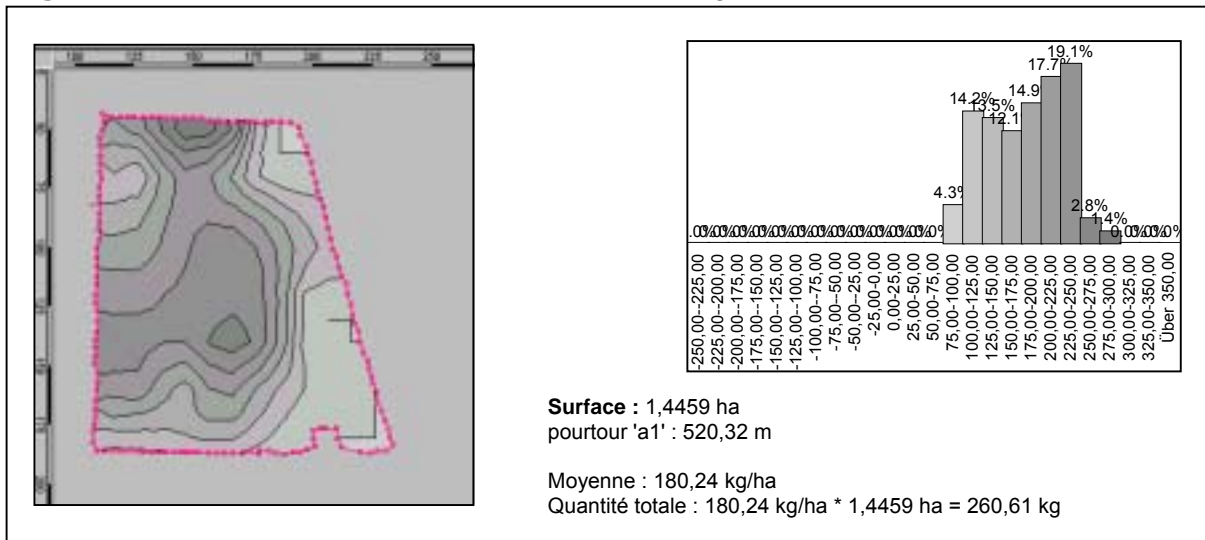


Fig. 99 : carte d'urée dans la parcelle I-03 avec épandage minimum de 100kg d'urée/ha

Toutefois, ces cartes d'urée déterminées par l'épandeur à engrais n'ont pas pu être appliquées à la précision obtenue. En effet, la largeur d'épandage étant de 18 m, les détails fins de la carte d'urée ont été transformés dans la carte d'application lisible par l'appareil en des pixels de 18*18m. C'est pourquoi il est intéressant de déterminer dans quelle mesure les seuils imposés par l'exploitant ont un impact sur la carte d'urée détaillée, mais également sur la carte d'application utilisée dans la pratique. Les cartes d'application résultantes ont ainsi également été comparées sur la base de pixels de 18 m.

Dans ce cadre, on a effectué une différence entre les rendements potentiels attendus entrés sous forme intraparcellaire ou forfaitaire.

Sont considérées ci-dessous **les cartes d'application lisibles par l'appareil** dans le cas de **rendements potentiels attendus différenciés au niveau intraparcellaire**.

Epandage minimum de 0 kg d'urée/ha

Le calcul de la carte d'application sur la base de pixels de 18 m de côté aboutit à une quantité moyenne de 151,57 kg d'urée/ha. La figure 100 montre la carte d'application résultante destinée à l'épandeur à engrais. On y trouve une large gamme de valeurs car toutes les différences obtenues sont prises en compte. Finalement, les plus grandes différences sont obtenues avec cette variante, tant pour le rendement potentiel attendu que pour la quantité d'engrais résultante.

Epandage minimum de 100 kg d'urée/ha

La figure 101 présente la carte d'application calculée dans laquelle le rendement potentiel attendu est également pris en compte pour chaque sous-parcelle, avec toutefois un apport minimum de 100 kg d'urée/ha. Ceci fait passer la quantité moyenne à appliquer de 151,57 kg d'urée/ha à 173,82 kg/ha, soit une augmentation de 17,7 %. La répartition des classes montre clairement la diminution de l'intervalle qui en résulte.

En plus de ces cartes d'application ont également été calculées des variantes dans lesquelles le **rendement potentiel attendu** n'est pas entré au niveau intraparcellaire, mais sous forme d'une valeur d'objectif de rendement **forfaitaire pour la totalité de la parcelle**.

Rendement potentiel attendu forfaitaire, épandage minimum de 0 kg d'urée/ha

La figure 102 présente la carte d'application lisible par l'appareil dans laquelle on s'est basé sur une valeur unique de rendement potentiel attendu de 120 q/ha pour toute la parcelle. On y distingue clairement les différences bien plus faibles que sur la même carte basée sur des répartitions de rendement intraparcellaires. La quantité moyenne d'engrais y est aussi relativement bien plus faible, avec 71,77 kg d'urée/ha. On constate déjà distinctement que lorsque le rendement potentiel attendu n'est pas déterminé au niveau intraparcellaire, l'application d'engrais est nettement moins différenciée et moins bien adaptée.

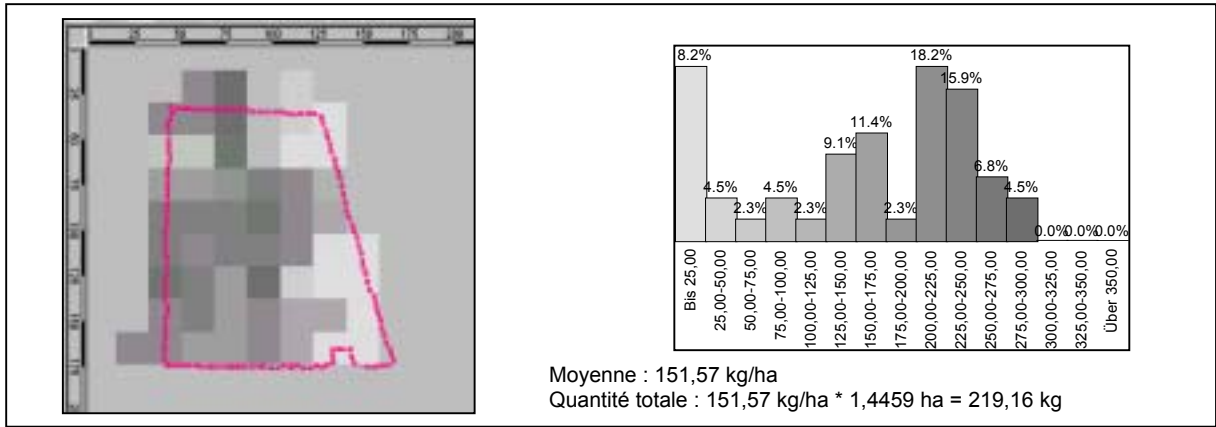


Fig. 100 : carte d'application (rendement attendu différencié, au minimum 0 kg d'urée/ha)

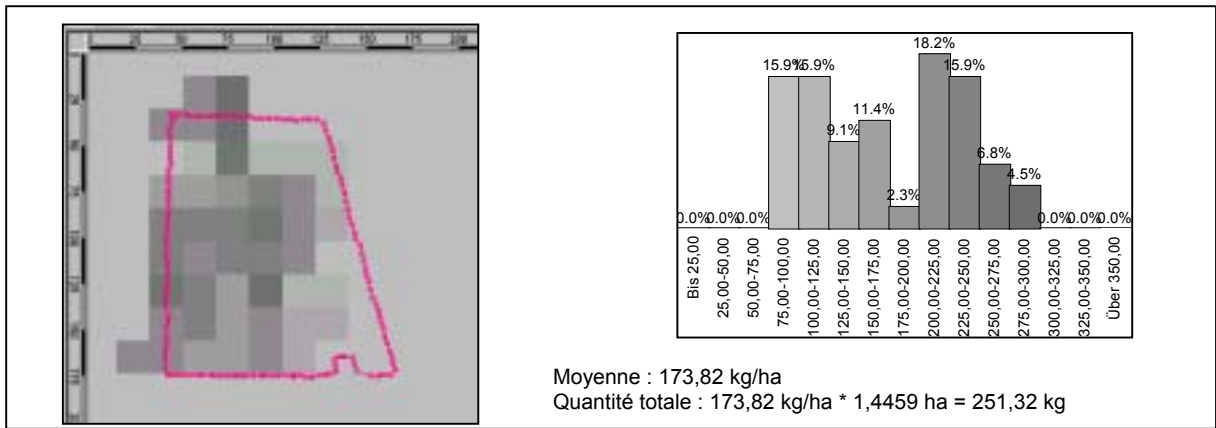


Fig. 101 : carte d'application (rendement attendu différencié, au minimum 100 kg d'urée/ha)

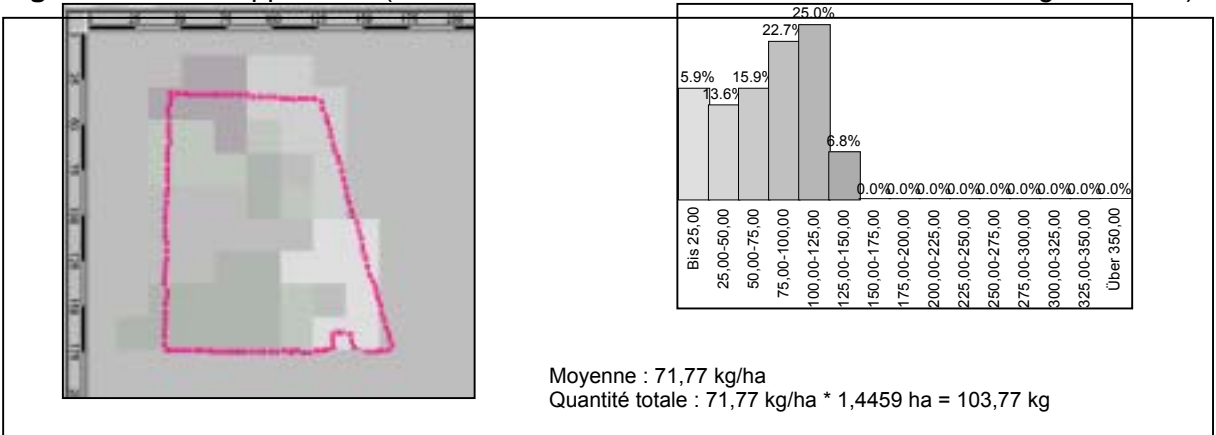


Fig. 102 : carte d'application (rendement attendu forfaitaire, au minimum 0 kg d'urée/ha)

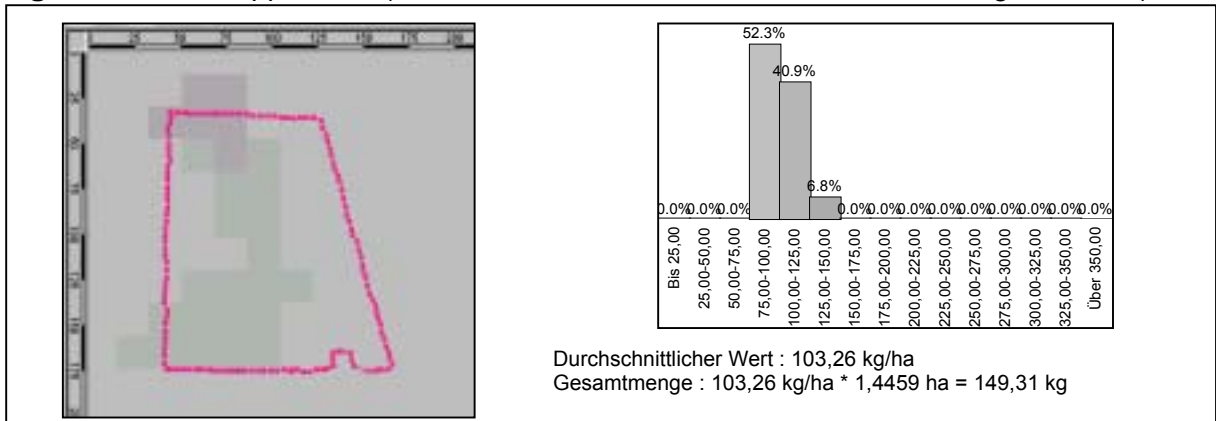


Fig. 103 : carte d'application (rendement attendu forfaitaire, au minimum 100 kg d'urée/ha)

Cependant, il est impossible de savoir si la variante la plus adaptée est aussi basée sur une distribution réaliste du rendement attendu. Si l'on considère maintenant pour cette variante une application minimum de 100 kg d'urée/ha, les différences au sein de la carte d'application se réduisent encore. La figure 103 illustre clairement le fait que seules subsistent trois classes d'application, ce qui limite encore davantage l'intervalle. Un épandage modulé de cette manière n'est plus très éloigné d'une fertilisation forfaitaire. La suppression de la différenciation pour les valeurs les plus faibles conduit à une application moyenne de 103,26 kg/ha, ce qui équivaut à 138,10 % de la valeur obtenue sans la valeur minimale, et ne représente donc pas une différence insignifiante.

Les principaux résultats de cette sous-étude relative à la mise en pratique de la modulation des intrants sont décrits dans le chapitre 3.1.2.

2.2 Enquête sur l'utilisation de l'agriculture de précision en Alsace et en Bade-Wurtemberg

Dans le cadre du présent projet sur l'agriculture de précision, il a été décidé d'achever l'étude sur la mise en pratique de la modulation des intrants par une enquête complémentaire auprès de la profession agricole, afin de déterminer l'état actuel d'information des chefs d'entreprises agricoles en Alsace et en Bade sur ces nouvelles technologies concernant la prise en compte de différences intraparcellaires.

Ont participé à cette étude :

- Arvalis-Institut du Végétal, Colmar pour la partie alsacienne
- IfuL - Institut für umweltgerechte Landwirtschaft Müllheim , ainsi que
- Gisgeo GmbH & Co KG Wittbrietzen/Freiburg pour la partie badoise.

Côté alsacien, cette enquête a été soutenue par les deux Chambres d'Agriculture et par l'APCO (Association des Producteurs de Céréales et d'Oléagineux du Haut-Rhin). En outre, des élèves de Lycée Agricole et futurs exploitants ont également été interrogés, afin de prendre connaissance de l'avis et des attentes de la jeune génération vis-à-vis de l'agriculture de précision.

Dans le Bade-Wurtemberg, le questionnaire a été soutenu par les bureaux de l'Agriculture des « Kreisse » (équivalents de cantons) du sud du Rhin Supérieur. Un soutien particulier est également venu de la part du professeur Mohn (FH Nürtingen) qui a permis un élargissement de l'enquête aux étudiants de son établissement de formation agricole.

Enfin, il a paru intéressant de recueillir également l'avis des conseillers agricoles, ceux-ci étant chargés du conseil aux exploitants.

2.2.1 Questionnaire

Le questionnaire utilisé dans cette enquête a été élaboré en collaboration entre les partenaires du projet concernés. Il visait à déterminer l'attitude des agriculteurs de la zone d'étude vis-à-vis de l'utilisation de l'agriculture de précision. Il permet d'estimer jusqu'à quel point la mise en pratique de la modulation des intrants est possible, en fonction de la position des exploitants.

Afin d'obtenir des réponses sincères, les questionnaires étaient anonymes, ce qui était favorisé par l'envoi d'une enveloppe pré-affranchie pour le renvoi.

Pour répondre aux objectifs de l'enquête, il a été décidé de rassembler les questions selon 4 thèmes :

- Thème 1 : questions relatives au mode d'exploitation actuel
- Thème 2 : Questions relatives à l'intégration de l'informatique dans l'exploitation
- Thème 3 : Questions relatives à l'agriculture de précision et à la gestion intraparcellaire
- Thème 4 : Questions relatives au chef d'exploitation

Le **thème 1** rassemble des questions relatives au type d'exploitation, à la main d'œuvre présente sur l'exploitation, au cheptel, à la surface de l'exploitation, au nombre et à la surface des parcelles, aux types de culture, à l'estimation de l'homogénéité des parcelles, aux méthodes de travail, au recours à des conseils, et à la mise en œuvre de la fertilisation.

Le **thème 2** questionne sur l'aisance et le mode d'utilisation des PC ainsi que sur l'expérience avec les GPS.

Le **thème 3** questionne sur le degré de connaissance de l'agriculture de précision ainsi que sur l'attitude de principe vis-à-vis d'une mise en pratique de cette méthode. En outre figure la possibilité de formuler des motifs d'obstacle éventuels ainsi que des propositions de modifications permettant de favoriser la mise en pratique de l'agriculture de précision. Les questions suivantes concernent la volonté de s'investir dans l'agriculture de précision et l'expérience antérieure. Il est possible d'exprimer ses inconvénients et avantages.

Le **thème 4** rassemble des questions sur l'âge et la formation professionnelle des chefs d'exploitation, puis sur la question de la relève de l'exploitation. Finalement, l'avenir économique et l'évaluation écologique de l'exploitation peuvent être estimés.

Le questionnaire transfrontalier élaboré communément peut être consulté en annexe.

2.2.2 Réalisation de l'enquête

Sondage auprès des exploitants

Côté français, les exploitants à interroger ont été sélectionnés à l'aide de la Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin et sur la base d'un fichier interne d'Arvalis. La sélection était suffisamment large pour représenter toutes les catégories d'exploitations d'Alsace, à l'exception des exploitations viticoles et de montagne, non représentées. Le questionnaire a préalablement été envoyé à cinq « agriculteurs-test » afin de recenser les éventuels problèmes de compréhension, imprécisions ou questions inadéquates du questionnaire. Après prise en compte des remarques de ces testeurs, un total de 389 questionnaires a été envoyé, dont 190 dans le Bas-Rhin et 139 dans le Haut-Rhin. Les envois ont eu lieu fin janvier 2005, et incluaient une enveloppe pré-timbrée adressée à Madame Juncker d'Arvalis, afin d'augmenter le taux de réponses.

Les retours ont eu lieu principalement courant février, mais quelques courriers sont arrivés jusqu'en avril 2005. Le taux de retour pour les exploitations alsaciennes s'élève à 44,4 % (147 réponses sur 329 questionnaires expédiés), ce qui est très satisfaisant.

Le questionnaire a simultanément été soumis à une classe du Lycée Agricole d'Obernai (22 réponses). La moitié de ces réponses se rapporte à l'exploitation des parents (réponse du chef d'exploitation et non de l'élève). Si ces réponses sont ajoutées à celles des exploitants, on obtient un total de 158 réponses, ce qui augmente le taux de retour à 46 %, plus 11 réponses d'élèves, soit 169 réponses au total.

En raison du faible nombre de questionnaires issus des élèves, qui n'ont en outre souvent rempli le questionnaire que partiellement, ces résultats n'ont pu être analysés.

On peut noter que dans la catégorie « agriculteurs », les questionnaires n'ont pas non plus tous été remplis correctement ni en totalité.

Côté allemand, la sélection des agriculteurs à interroger a été effectuée par le biais des bureaux de l'Agriculture du Rhin Supérieur. Les bureaux de Fribourg, Lörrach, et du district d'Ortenau (Offenbourg) ont été contactés pour les prier de mettre à disposition une liste d'adresse de 10 à 20 agriculteurs.

Ainsi, le questionnaire a pu être adressé fin janvier 2005 à une liste de 41 exploitants et de 15 élèves d'établissement de l'enseignement agricole.

Le retour de 23 questionnaires anonymes (taux de 56,1 %) constitue une valeur élevée et a certainement été encouragé par l'enveloppe pré-timbrée et pré-adressée jointe au questionnaire. Toutefois, le faible nombre total d'adresses mises à disposition était tout à fait inattendu.

Il est surprenant de constater que, malgré l'enveloppe pré-timbrée et pré-adressée mise à disposition, seuls deux élèves de l'enseignement agricole ont (anonymement) renvoyé le questionnaire, ce qui représente un taux de retour de 8,7 % seulement.

Afin d'augmenter le nombre de réponses qui était insatisfaisant et d'élargir ainsi l'enquête, le questionnaire a pu être transmis à 24 étudiant et 15 élèves supplémentaires grâce à la collaboration du Professeur Dr. Mohn (FH Nürtingen).

Ceci a permis de totaliser 64 réponses dans le Bade-Wurtemberg, ce qui est resté inférieur aux espérances initiales.

En soi, ce nombre est suffisant pour procéder à des analyses statistiques. Cependant, les questionnaires émanent de groupes différents, ce qui oblige à considérer les résultats de chaque groupe avec prudence.

Comme en Alsace, le questionnaire a préalablement été testé sur deux agriculteurs, afin de vérifier la clarté des questions. Ceci a été réalisé dans le cadre d'échanges dynamiques et en bonne concertation avec le partenaire français.

Les réponses ont eu lieu à partir de fin février et surtout début mars. Quelques questionnaires sont encore parvenus jusqu'à début avril 2005.

Sondage auprès des conseillers

Un second questionnaire transfrontalier, comportant les points essentiels de celui envoyé aux agriculteurs mais quelque peu simplifié, a été adressé à 22 techniciens appartenant aux différents organismes de conseil agricole en Alsace : Chambres d'Agriculture, ARAA, coopératives, négoce et organismes de formation.

Le taux de réponses s'est malheureusement révélé relativement faible (10/22), ce qui n'a pas permis de l'exploiter sérieusement.

En Bade-Wurtemberg, seuls 5 questionnaires remplis étaient disponibles, ce qui n'a permis de les utiliser que sous la forme de simples opinions.

Les résultats du questionnaire ainsi que leur pertinence vis-à-vis de la mise en pratique de la modulation des intrants sont rassemblés dans le chapitre 3.2.

3 Résultats

Comme cela est expliqué dans le chapitre 2, des essais différents ont été conduits en Alsace et en Bade Wurtemberg en raison des conditions de départ différentes dans les acquis et les possibilités concernant l'application de l'agriculture de précision. C'est pour cette raison que les présentations et les analyses des résultats ont été conduits de manière autonome par chaque partie. Les résultats des essais en Alsace seront présentés en premier (3.1) puis ceux des essais en pays de Bade (3.2).

La présentation des résultats **en Alsace** commence par des descriptions des caractéristiques des deux parcelles d'essais (3.1.1). Interviennent donc la variabilité agronomique, les enseignements déduits des images satellites et des mesures de résistivité électrique ainsi qu'une analyse géostatistique. Viennent ensuite la présentation des résultats d'essais de modulation intraparcellaire d'intrants avec une variation de la densité de semis en 2003 (3.1.2) puis en 2004 de la fertilisation azotée (3.13)

La présentation des résultats pour les parcelles d'essais en **Bade Wurtemberg** (3.2) commence par les résultats relatifs à la variabilité (3.2.1) des parcelles d'essais. Les principaux points abordés sont la distribution des rendements, la variabilité des reliquats azotés N_{min} , la conductivité électrique et les capacités en réserve en eau du sol. Viennent ensuite les résultats relatifs à la faisabilité de la modulation (3.2.2) dont principalement l'aptitude à une application pratique de l'approche cartographique (3.2.2.1) ainsi que de l'approche on line avec des capteurs (3.2.2.2). Dans l'usage de cartographies, ont été étudiées : l'élargissement à l'exploitation d'îlots de parcelles, l'intégration de simulation de la croissance et l'acquisition de données par télédétection.

A chaque fois, il a été tenu compte des difficultés rencontrées ainsi que du potentiel des différentes techniques.

Suivent ensuite les résultats relatifs aux effets de la mise en œuvre de la modulation (3.2.3), dont les reliquats N_{min} , le rendement et les quantités de fertilisants apportés. A la fin, un bilan en azote est fait pour l'application de la modulation ainsi que des considérations économiques relatives à la modulation intrants .

Les **résultats de l'enquête** concernant le développement de l'agriculture de précision en Alsace et dans le Bade Wurtemberg sont décrits communément dans le chapitre (3.3) car les chefs de projet ont utilisé un questionnaire défini en commun.

3.1 Résultats des essais en Alsace

3.1.1 Etats des lieux des 2 parcelles étudiées en Alsace

3.1.1.1 Variabilité agronomique

Remarque : Dans un souci d'harmonisation des références entre les travaux menés outre-Rhin et ceux conduits en Alsace, les analyses chimiques de sol ont été confiées à un laboratoire du Bade-Wurtemberg. Les échantillons de sol ont été prélevés sur l'horizon 0-30 cm et analysés selon la méthode allemande CAL (Calcium-Ammonium-Lactate).

Witternheim

Les résultats de l'étude de la variabilité empirique de la parcelle de Witternheim sont repris dans le tableau 11.

Tab. 11 : résultats de l'analyse de la variabilité empirique de la parcelle (Witternheim)

variable	min	max	moyenne	écart-type	CV (%)	Q 95 – Q 5
Argile	18.3	28.9	24.9	2.1	8	6.5
Limon	28.3	37	32.2	2.1	6	7.3
Sable	37.7	50	42.8	2.4	6	8.1
Humus %	2.4	4.5	3.1	0.4	13	1.2
pH	6	7.3	6.8	0.3	5	1.1
P2O5	60	430	217	96.9	45	300
K2O	170	510	320	82.9	26	280
MgO	70	140	105	17.7	17	60
Profondeur (cm)	35	100	49	17.9	37	50
RU	61	189	88	30.6	35	87
Rendement 2000	88.9	161.4	130.3	15	11	
Rendement 2001	95	136.3	119.2	10.6	9	
Rendement 2002	81.5	147.5	121.9	13	11	

D'après le guide des sols d'Alsace édité par l'ARAA, le sol de la parcelle de Witternheim appartient à la Terrasse caillouteuse Rhénane résiduelle dans le domaine de l'III ; cette catégorie de sols étant une association de sols hydromorphes et de sols bruns calcaires caillouteux. La parcelle étudiée appartient plutôt à la deuxième catégorie. Il se caractérise par une faible réserve utile et le risque de lessivage des nitrates y est élevé. C'est une des principales motivations pour le choix de cette parcelle dans la perspective d'une modulation de la dose d'azote.

Le résultat de l'analyse de sol est rappelé en annexe.

La composition en argile, limon et sables est peu variable à l'intérieur de la parcelle. La texture est relativement équilibrée avec toutefois une dominante de sable.

Le pH présente une faible variabilité (CV = 5%). 82 % des points de la parcelle se situent à pH compris entre 6.3 et 7.1. Cette variable est en effet connue pour sa faible variabilité à l'échelle parcellaire.

Hormis quelques points à pH > 7 (un pH élevé peut entraîner un blocage d'éléments minéraux et les rendre indisponibles pour la culture), on se situe dans une gamme de pH tout à fait adéquate pour la croissance du maïs.

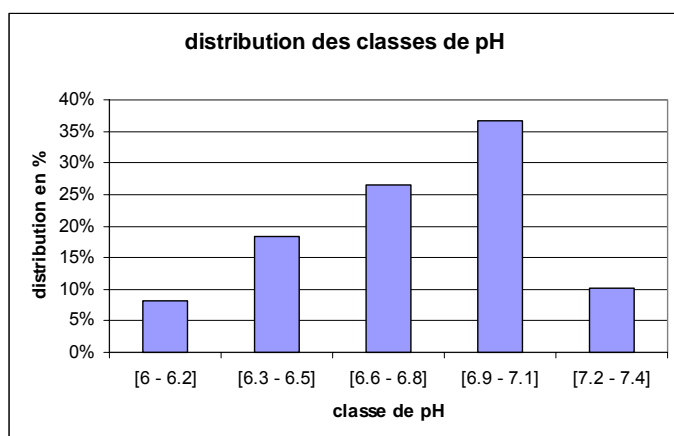


Fig. 104 : variabilité du pH

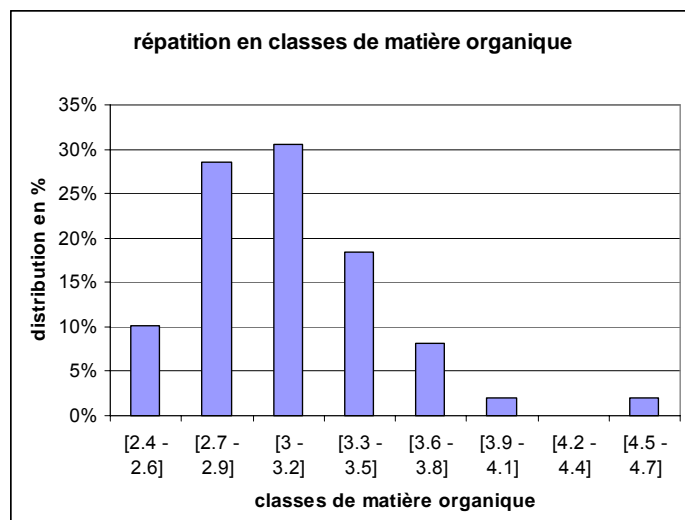


Fig.105 : variabilité de la matière organique

Les teneurs en matière organique sont assez stables et se situent autour de 3% en moyenne, témoignant d'un sol assez riche ; en effet, la parcelle reçoit parfois des déjections animales. 96% des valeurs se situent à des teneurs comprises entre 2.4 et 3.8%.

En revanche, le P2O5, la profondeur et la RU qui lui est étroitement corrélée, et dans une moindre mesure K2O et MgO, présentent une variabilité importante, mais dont l'ordre de grandeur est comparable à ce qu'on peut observer par ailleurs.

Une fois cette variabilité décrite pour ces éléments, la question se pose de savoir si l'on se situe dans une plage "agronomiquement sensible" qui justifierait une modulation ?

Comme on l'a dit ci-dessus, les analyses ont été effectuées par un laboratoire allemand qui n'utilise pas les mêmes techniques qu'en France et qui ne donne donc pas la même gamme de valeurs.

Un fascicule édité par le ministère de l'agriculture du land de Bade-Wurtemberg nous permet d'interpréter les valeurs mesurées et de se rapporter à des seuils (cf. annexes).

Ainsi, en regardant en détail les valeurs prises par les teneurs en Magnésium et en Potasse, on constate que la parcelle est bien pourvue, particulièrement en Potasse, et que les teneurs présentes dans le sol suffisent à compenser les exportations par la culture. Pour le phosphore, hormis quelques petits secteurs, la parcelle est également bien pourvue, même si la variabilité est plus importante.

En tout état de cause, le Magnésium et le Potassium ne constituent pas des facteurs limitants de croissance sur les plantes. En ce qui concerne le phosphore, les valeurs plus faibles sont gommées et compensées par une fertilisation relativement confortable apportée par l'agriculteur (cf. itinéraire technique en annexe - fertilisation en 2003 : 230 N – 60 P – 110 K). Pour ces éléments minéraux, les zones à valeurs plus élevées pourraient faire l'objet d'économies d'apport.

Quant à la variabilité de la profondeur et de la RU, l'irrigation pratiquée sur cette parcelle, permet de gommer ses effets sur les rendements.

En conséquence, il apparaît que pour ces différents éléments qui caractérisent le sol de la parcelle, et compte tenu des pratiques de l'agriculteur, on ne se situe pas vraiment dans une plage "agronomiquement sensible" pour le rendement.

En revanche, l'absence d'effet sur le rendement renvoie à des hypothèses d'économies avec des conduites plus restrictives.

Quant aux rendements, la variabilité est relativement constante d'une année sur l'autre (entre 10 et 15 q) et dans une plage tout à fait conforme à ce que l'on peut observer à l'échelle d'une parcelle agricole homogène en maïs.

Ebersheim

Les résultats de l'étude de la variabilité de la parcelle d'Ebersheim figurent dans le tableau 12.

Tab. 12 : résultats de l'analyse de la variabilité empirique de la parcelle (Ebersheim)

variable	min	max	moyenne	écart-type	CV (%)	Q 95 – Q 5
Argile	14.9	19.5	17.7	1.3	7	4.4
Limon	24.6	43.4	34.1	4.8	14	15.5
Sable	38.5	58.9	48.2	5.5	12	18.7
Humus %	1.7	2.1	1.9	0.1	6	0.4
pH	5.3	7.2	6.3	0.4	6	1
P2O5	100	340	161	53.1	33	190
K2O	100	240	182	35.1	19	120
MgO	50	100	76.2	12.7	17	40
Profondeur (cm)	50	120	104.5	24.8	24	70
RU	85	288	167	43.6	26	120
Rendement 2000	103.9	152.6	133.7	10	7	
Rendement 2001 (blé)	67.6	111.4	88.9	9.7	11	
Rendement 2002	107.8	134.6	122.2	7	6	

D'après le guide des sols d'Alsace édité par l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace), le sol de la parcelle d'Ebersheim appartient au cône alluvial du Giessen (rivière vosgienne) ; il est défini comme étant un sol brun acide sableux profond. Il est relativement sensible au lessivage des nitrates.

Le résultat de l'analyse de sol est rappelé en annexe.

Les teneurs en argile sont relativement stables à l'intérieur de la parcelle (CV = 7%), alors que les teneurs en limons et sables varient plus (respectivement CV = 14% et 12%) et sont inversement proportionnelles (cf. graphique).

Globalement, on a un sol relativement léger avec une fraction de sables dominante.

La représentation graphique ci-dessous indique une variation continue entre les teneurs en limons et en sables. Les valeurs de pH sont considérées comme stables. Hormis quelques

rare points à pH < 6, 93% des points de la parcelle se situent à pH compris entre 5.6 et 7, (ou 79% entre 5.9 et 6.7).

D'un point de vue agronomique cette gamme de pH convient tout à fait à la croissance du maïs puisqu'on estime que c'est entre 5.5 et 6.5, que la plupart des éléments minéraux sont les plus disponibles. Or c'est souvent la disponibilité des éléments fertilisants du sol qui limite la croissance du maïs. On est donc, sur cette parcelle, dans une situation où l'on n'a pas à craindre de blocage d'éléments minéraux.

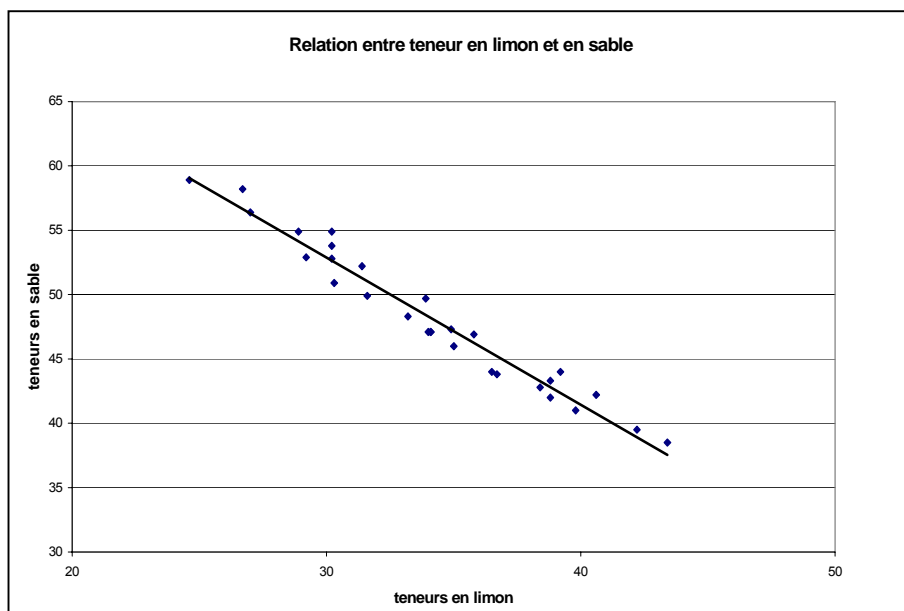


Fig. 106 : variation des teneur en limon et en argile

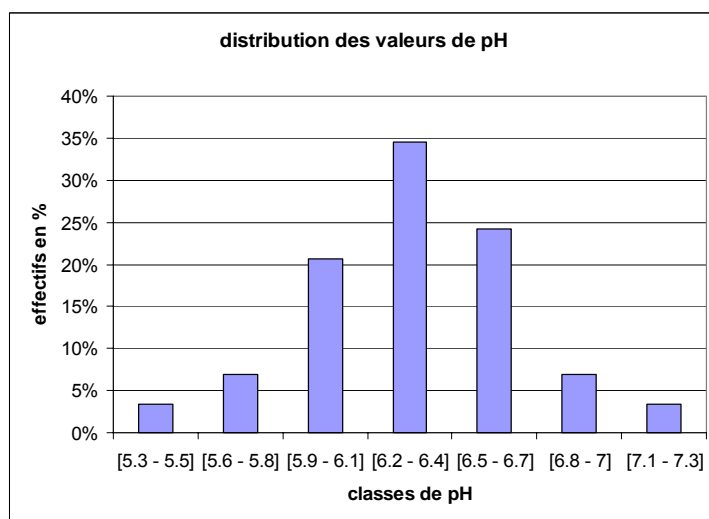


Fig. 107 : variation des valeurs de pH

Les teneurs en matière organique, sont également stables. Les teneurs mesurées sont tout à fait « classiques » et dans la moyenne de la plupart des sols cultivés.

En ce qui concerne l'analyse chimique, la variabilité des différents éléments est globalement plus faible qu'à Witternheim. De même pour la profondeur et la RU.

La référence aux seuils de la méthode allemande pour l'analyse chimique est indiquée en annexe. Pour le phosphore, la plupart des teneurs correspondent à la classe C, c'est à dire à une plage normale de valeurs, sans déficit marqué et qui, pour les conseils de fertilisation correspond aux exportations par la culture. Quelques rares points indiquent des teneurs un peu

faibles mais largement compensées par la fertilisation de l'agriculteur (cf. itinéraire technique en annexe – fertilisation en 2003 : 110 N – 90 P – 100 K).

En ce qui concerne la potasse on a un sol bien pourvu, qui répond aux exportations par le maïs, d'autant qu'il y a un apport complémentaire par la fertilisation. Quant au magnésium, sur la moitié des points, on relève des teneurs un peu faibles, mais les besoins du maïs sont faibles et aucun symptôme de carence n'a été observé sur la culture ou signalé par l'agriculteur.

La variabilité des rendements (si on compare 2 années en maïs) est moins importante qu'à Witternheim.

Dans cette parcelle, qui apparaît un peu plus homogène que la précédente, on ne se situe donc pas non plus dans un contexte où les variables agronomiques sont dans une plage "sensible" pour la culture. Là aussi, la conduite culturale satisfait les valeurs de RU et d'analyse chimique du sol les plus faibles.

3.1.1.2 Images satellite

Les images satellite de nos 2 parcelles expérimentales, prises en août 2003, sont présentées ci-dessous. Malheureusement, compte tenu de la surface des parcelles (trop faible) et de la résolution du satellite, il n'est pas possible de déceler nettement des zones différenciées à l'intérieur des parcelles (Figures 108, 109 et 110).

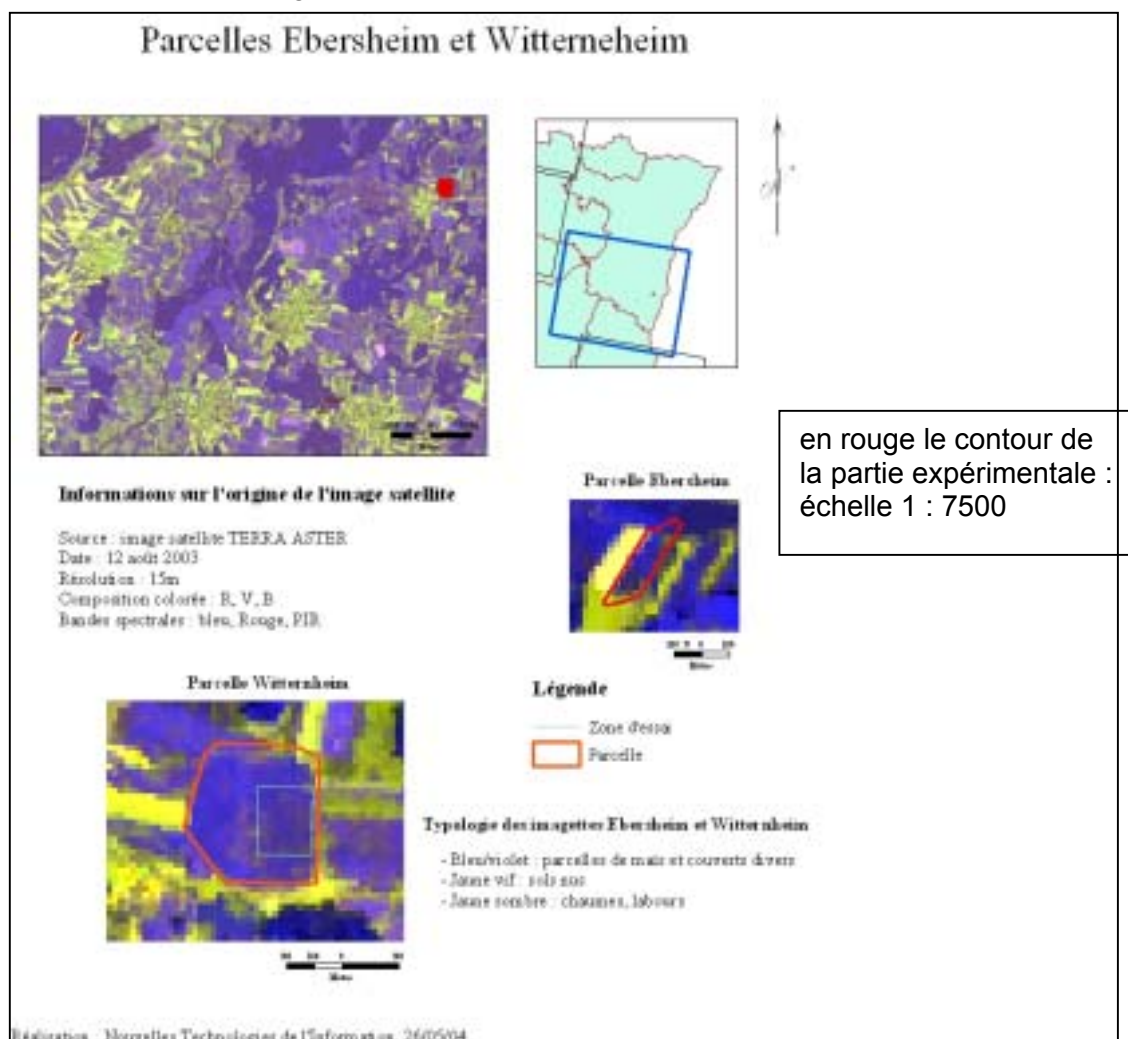


Fig. 108 : description des parcelles d'essais par les images satellitaires (12.08.2003)

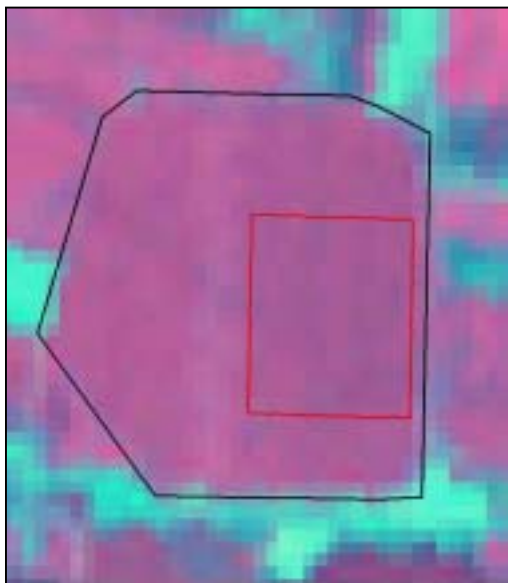


Fig. 109 : Image satellite de la parcelle de Witternheim prise le 12/08/2003

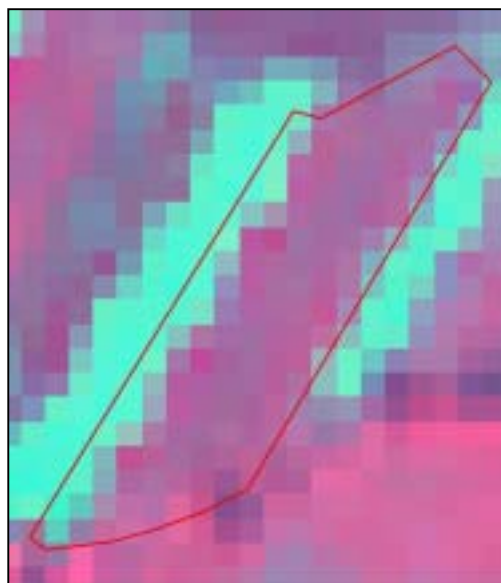


Fig. 110 : Image satellite de la parcelle d'Ebersheim prise en août 2003

3.1.1.3 Mesure de résistivité

A Witternheim, la parcelle non semée présentait une surface travaillée satisfaisante pour la prospection. Un tour de parcelle a été opéré et une surface de 6,8 ha explorée.

Carte de résistivité électrique de la parcelle de Witternheim (données Géocarta).

De façon générale, les zones de couleur « rouge », de plus grande résistance, correspondent à des zones plus superficielles et les zones en « bleu », de plus faible résistance à des zones où le sol est a priori plus profond.

Il est intéressant de remarquer que les zones de couleur rouge sur la fraction de sol (0-50cm), qui traduisent a priori des zones superficielles, se superposent assez bien avec les zones à cailloux cartographiées dans la première partie du projet et dont on peut rappeler ici la répartition :

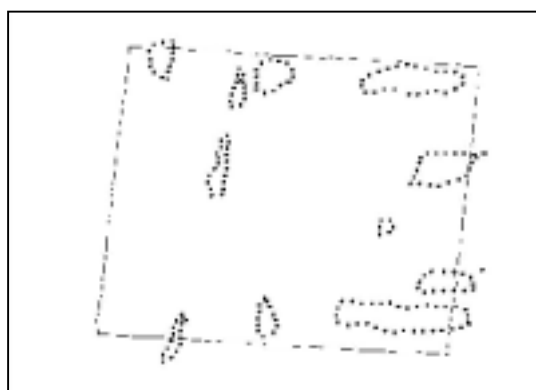


Fig. 111 : répartition des zones chargées en cailloux

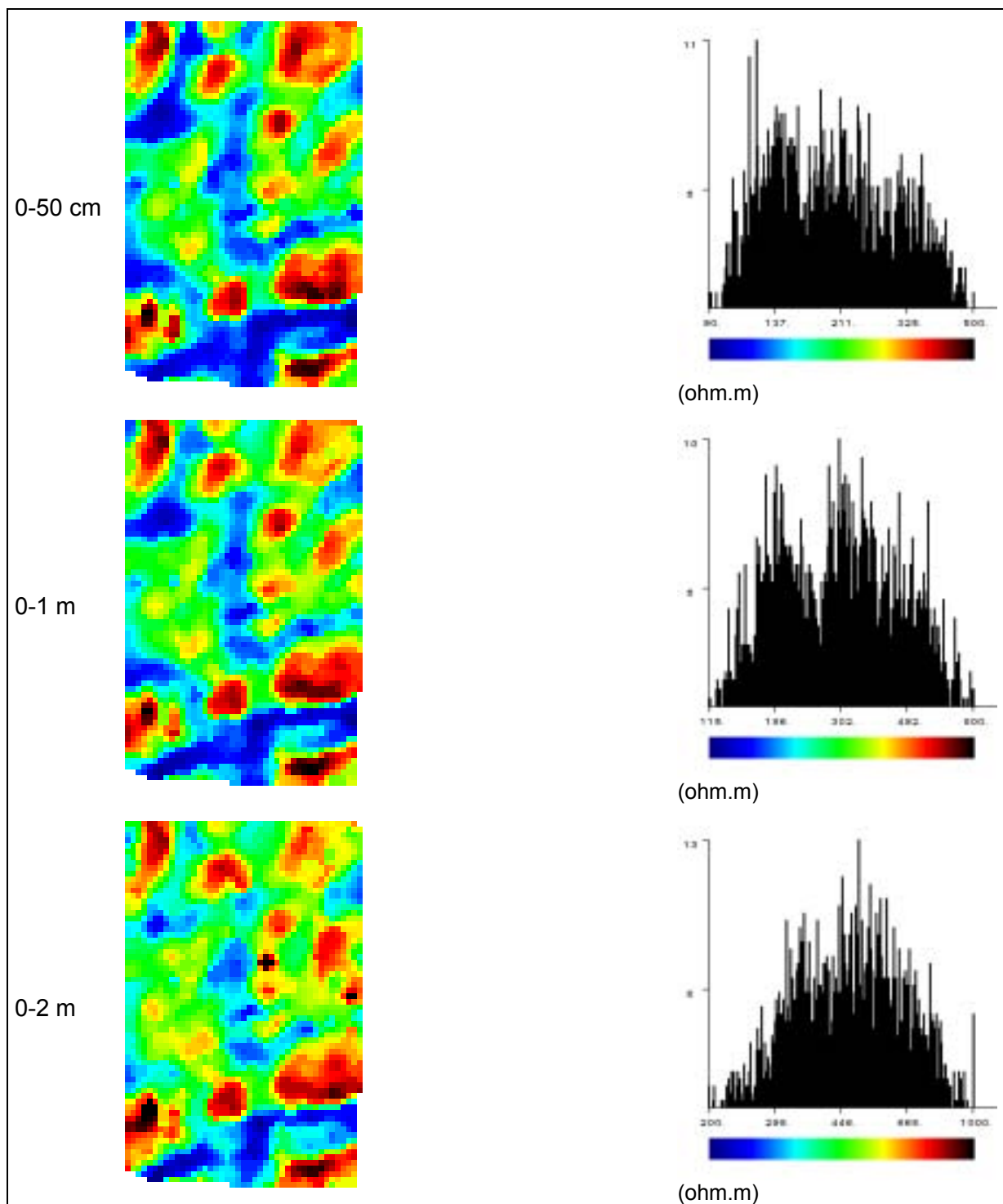


Fig. 112 : carte de la résistivité électrique

Quelle que soit la profondeur considérée, les zones de résistivité électrique homogènes sont de petites tailles et réparties dans l'ensemble de la parcelle. Il sera donc difficile lors du traitement des données, d'identifier les points de rendements appartenant à chacune des zones. Il existe un décalage de plusieurs secondes entre le moment où le grain monte dans la moissonneuse et le temps où il est enregistré par le capteur. Ce décalage dépend du trajet de la moissonneuse dans le champ. Il est variable et dépend de la vitesse d'avancement de la moissonneuse dans la parcelle, il n'est donc pas possible de recalculer l'emplacement exact de chaque point de rendement. Ce type de variabilité en petites taches décelé par des mesures en

continu est par ailleurs difficile à déceler et à zoner par des mesures géométriques. La probabilité qu'un point de prélèvement se situe dans ces zones aléatoires est faible. La conséquence sur l'interpolation des données de sol d'un point de mesure localisé dans ces taches très localisées crée des effets de bord de la variabilité.

A Ebersheim, la parcelle non semée présentait une surface non travaillée et très humide par endroits ce qui a rendu la prospection difficile. Un tour de parcelle a été opéré et une surface de 2,7 ha explorée.

Carte de résistivité électrique de la parcelle d'Ebersheim (données Géocarta).

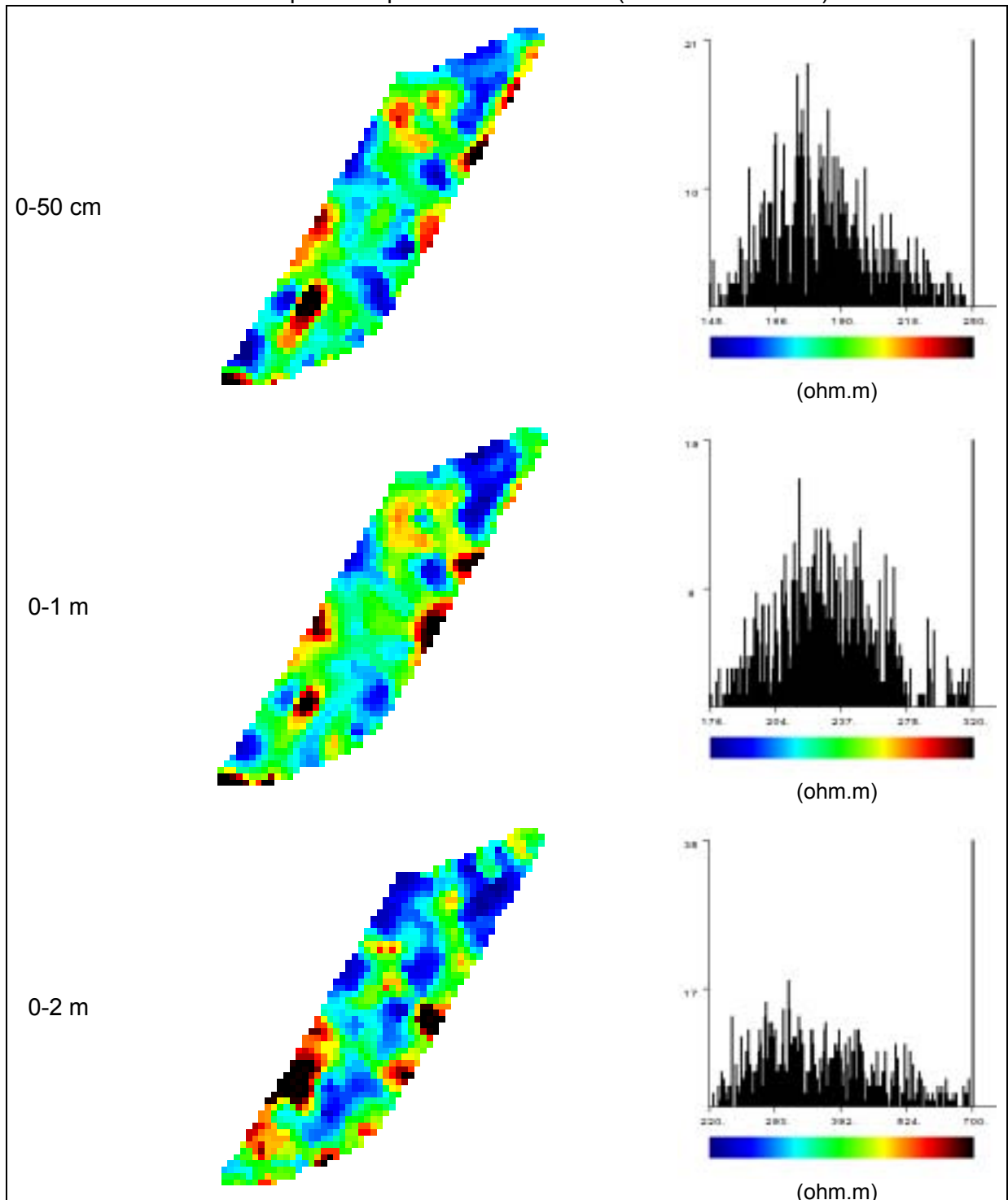


Fig. 113 : carte de la résistivité électrique de la parcelle d'Ebersheim

De même que pour la parcelle de Witternheim, les zones de résistivité électrique sont de petites tailles et réparties sur l'ensemble de la parcelle.

3.1.1.4 Etude géostatistique

Analyse de la structure spatiale à Witternheim

L'analyse variographique indique que pour les variables comme l'humus, la teneur en MgO, la profondeur et la RU il n'y a pas de structure spatiale. Le comportement de ces variables semble complètement erratique, comme si les valeurs observées lorsque l'on se déplace dans la parcelle étaient le fruit du hasard. La variabilité de ces variables s'exprime sur des distances inférieures au plus petit pas d'échantillonnage ; c'est pour cela que ces variables ont un comportement erratique à l'échelle étudiée. Il n'est donc pas possible d'obtenir une représentation cartographique pertinente de ces variables. Une prédiction fiable de la répartition intra parcellaire de ces variables est impossible à réaliser, même en disposant d'un maillage d'observations très serré tel que celui dont nous disposons.

En revanche, la structure spatiale de P2O5 et K2O est nette, mais l'analyse variographique indique des zones relativement homogènes, mais de faibles dimensions.

Le limon montre une structure spatiale nette mais moins prononcée que pour P2O5 et K2O. Cela se traduit par des zones de faibles dimensions et relativement hétérogènes.

Alors que pour le pH, cela se traduit par des zones de grandes dimensions, mais également relativement hétérogènes.

L'analyse variographique pour l'argile et le sable montre la présence de deux zones sur la parcelle. Cependant l'une des zones, de petite dimension dans le coin nord-est de la parcelle, rend ce zonage peu utile en pratique.

En conclusion, de manière générale, la parcelle de Witternheim ne présente pas, d'un point de vue modulation intra parcellaire, une structuration spatiale importante :

Certaines variables ne présentent aucune structure spatiale à l'échelle étudiée, comme l'humus, le MgO, la profondeur et la RU. Aucun zonage n'est possible pour ces variables.

D'autres montrent une structure spatiale nette, comme P2O5 et K2O, mais on ne peut pas délimiter des zones de grandes dimensions.

Pour les autres variables (limon, sable, pH), si une approche cartographique permettant le découpage de zones à l'intérieur de la parcelle est possible pour ces variables, ces zones seront de faibles dimensions et/ou relativement hétérogènes.

L'analyse de la résistivité va dans le sens des conclusions émises ci-dessus et semble confirmer l'absence de structure spatiale nette à une échelle permettant la mise en œuvre de l'agriculture de précision.

Analyse de la structure spatiale à Ebersheim

Les variables, P2O5, humus et argile ne montrent pas de structure spatiale et il n'est pas possible d'obtenir une représentation cartographique pertinente de ces variables. Une prédiction fiable de la répartition intra parcellaire de ces variables est impossible à réaliser.

En ce qui concerne la profondeur, la teneur en MgO, celle en K2O et le pH, la variabilité est importante à faible distance. Les zones susceptibles d'être délimitées seront de grandes tailles mais très hétérogènes.

Pour le limon, le sable et la RU, les zones susceptibles d'être délimitées seront également relativement hétérogènes.

Quant à la résistivité électrique, elle montre une structure spatiale nette qui se traduit par des zones relativement homogènes, mais de très faibles dimensions.

En conclusion, il apparaît à l'instar de sa voisine, que la parcelle d'Ebersheim ne présente pas non plus une structuration spatiale suffisamment importante pour la mise en œuvre de la modulation intra parcellaire ; soit la structure spatiale existe, mais sur des zones de trop faibles dimensions pour permettre l'intervention des matériels agricoles, soit les zones délimitées sont trop hétérogènes.

3.1.1.5 Conclusion

La pratique de l'agriculture de précision passe nécessairement par une prise de connaissance de la variabilité intra parcellaire. Si la précision des cartes obtenues dépend évidemment de la densité d'échantillonnage, une cartographie précise ne sera cependant possible que si la parcelle présente une structure spatiale suffisamment importante.

Or dans notre situation, autant l'analyse statistique classique, que l'approche géostatistique qui a permis de décrire et de quantifier la structure spatiale des variables d'intérêt, ont mis en évidence que les parcelles expérimentales d'Ebersheim et de Witternheim n'étaient pas les mieux adaptées à la mise en œuvre de la modulation intra parcellaire. On ne peut pas gérer la variabilité observée : soit que la variable explicative du rendement ne soit pas limitante, comme c'est le cas pour les principaux éléments minéraux du sol, soit que les variables ne soient pas structurées spatialement, ne permettant pas l'utilisation d'engins agricoles, soit que la variable en question ne puisse pas se moduler (irrigation). De plus, les itinéraires techniques non limitants gomment les éventuels effets des valeurs les plus faibles des variables agronomiques d'intérêt.

L'étude géostatistique des parcelles de Witternheim et d'Ebersheim s'inscrit dans une étude plus large menée par Arvalis-Institut du végétal sur 10 parcelles réparties sur le territoire français. Cette étude indique que la variabilité des caractéristiques pédologiques est très variable d'une parcelle à l'autre et que cette variabilité peut être différente selon le critère considéré. Sur les 10 parcelles étudiées, 3 d'entre elles, dont Ebersheim, sont globalement moins variables que les autres. Trois autres parcelles apparaissent en revanche plus variables que la moyenne, et le reste, dont la parcelle de Witternheim, présentent une variabilité intermédiaire.

Rappel d'une remarque importante : l'analyse géostatistique a été réalisée dans le courant de l'année 2004. Pour la mise en œuvre de l'expérimentation en 2003, nous n'avons donc pas connaissance de ces conclusions.

3.1.2 variation de la densité de semis (2003)

Witternheim

Un contrôle de densité effectué par comptage manuel du nombre de plantes sur 3 placettes de référence dans chaque répétition indique une différence entre la densité « théorique », sur laquelle est basée le réglage du semoir, et la densité de plantes effectivement présentes sur la parcelle.

- Pour la densité de 75 000, cette différence est de l'ordre de 9000 pieds/ha, c'est à dire que la densité réelle moyenne est de 66 000 plantes/ha,
- Pour la densité de 85 000, la différence est plus importante : environ 13 000 pieds/ha, ce qui fait une densité effective de 72 000 plantes/ha.
- Pour la densité de 95 000, la différence est encore plus importante puisqu'elle est d'environ 16 000 pieds/ha, ce qui fait une densité effective de l'ordre de 79 000 plantes/ha.

Il est habituel en maïs d'avoir une différence entre la densité semée et la densité réellement implantée, mais ici, la différence de 10 000 plantes par hectare recherchée dans la comparaison des 3 densités n'est pas respectée. Celle-ci s'établit plutôt à 6000 et 7000 pieds/ha. On peut penser qu'il y a eu, soit un problème de réglage du semoir, soit de fortes pertes à la levée.

Les résultats de rendement et d'humidité sont synthétisés dans le tableau 3.

Suite à un problème d'enregistrement par les capteurs de la moissonneuse lors de la récolte de la bande correspondant à la troisième répétition de la densité 3 (95 000) (problème d'enregistrement du signal dGPS ?), nous n'avons pas de données pour cette variante. De plus, dans la première répétition de la densité 1 (75 000), les données issues du capteur d'humidité n'ayant pas été enregistrées, seuls 2 passages de moissonneuse sur 4 ont été retenus.

NB : sur le dispositif expérimental mis en œuvre (BRUNT), une analyse de variance n'est pas valide car un tel dispositif n'est pas randomisé. Une analyse statistique simple basée sur les valeurs d'écart-type et de coefficient de variation est détaillée en annexe.

Traitement	rdt moyen à 15%	ecart-type rdt	humidite moy	rdt_min	rdt_max
Rep 1, D1	93.69	12.55	27.44	72.69	126.51
Rep 1, D2	95.33	13.17	26.67	75.70	137.30
Rep 1, D3	92.22	11.27	26.87	72.98	142.22
Rep 2, D1	94.47	14.10	29.11	71.51	149.61
Rep 2, D2	103.29	15.35	25.94	78.06	145.48
Rep 2, D3	106.93	17.71	25.46	77.38	147.75
Rep 3, D1	94.26	11.87	31.28	74.90	137.40
Rep 3, D2	100.36	14.85	27.43	73.76	141.30

Traitement	rdt moyen à 15%	ecart-type rdt	humidité moy	rdt_min	rdt_max
densite 1	94.23	12.90	29.65	71.51	149.61
densite 2	99.68	14.82	26.68	73.76	145.48
densite 3	97.25	15.44	26.39	72.98	147.75

R 1	93.76	12.36	26.91	72.69	142.22
R 2	100.41	16.15	27.13	71.51	149.61
R 3	97.24	13.73	29.40	73.76	141.30

essai	97.16	14.47	27.71		
-------	-------	-------	-------	--	--

Tab. 13 : données calculées

Ce tableau de résultats indique des différences de rendement faibles et non significatives entre les 3 densités (CV = 3%). On peut par ailleurs remarquer que l'amplitude de rendement est très grande et du même ordre de grandeur, et ce, quelle que soit la densité. De plus, le niveau de rendement moyen de l'ensemble de la parcelle (97.16 q/ha) est nettement en dessous des niveaux enregistrés en 2000, 2001 et 2002, de l'ordre de 120 à 130 q/ha. Dans le contexte climatique de l'année 2003, précoce, chaude et sèche, la satisfaction des besoins en eau n'a pas été couverte.

Pour les densités 2 et 3, la répétition 2, située dans le milieu de la parcelle donne des valeurs de rendement plus élevées. Ce résultat est visualisé dans la carte ci-dessous (Figure 114).

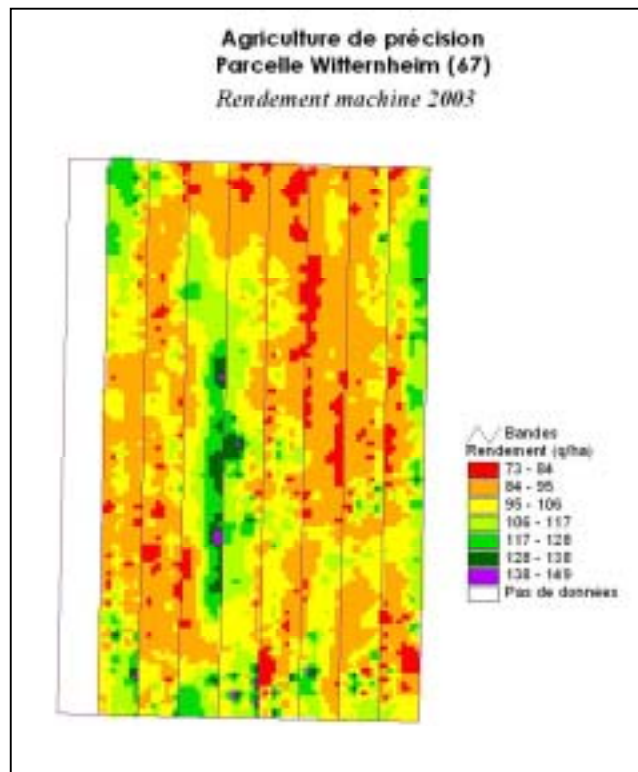


Fig. 114 : carte des rendements interpolés toutes densités confondues

Elle indique une assez grande plage de variabilité des rendements, avec quelques points forts dans les 4ème et 5ème bandes, mais une répartition relativement homogène pour la tranche 84-105 q/ha (dominance du jaune-orangé).

Cet écart, de l'ordre de 20 q, n'est pas exceptionnel car c'est un ordre de grandeur que l'on trouve classiquement dans une parcelle de maïs, sans faire varier la densité.

Cependant l'objet de cet essai était la comparaison de 3 densités de culture. Ainsi qu'on le voit dans le tableau 1 les différences de rendement ne sont pas significativement différentes pour les 3 densités.

Les cartes interpolées de ces différences, établies selon la méthodologie BRUNT décrite dans le paragraphe « matériel et méthode », permettent de déterminer quelles sont les zones de la parcelle dans lesquelles il aurait été préférable de semer une densité plutôt qu'une autre.

On peut signaler ici que la zone de la parcelle où les rendements sont les plus élevés correspond à une zone où la résistivité électrique indique un sol plus profond, ce qui confirme l'hypothèse d'un déficit hydrique en 2003.

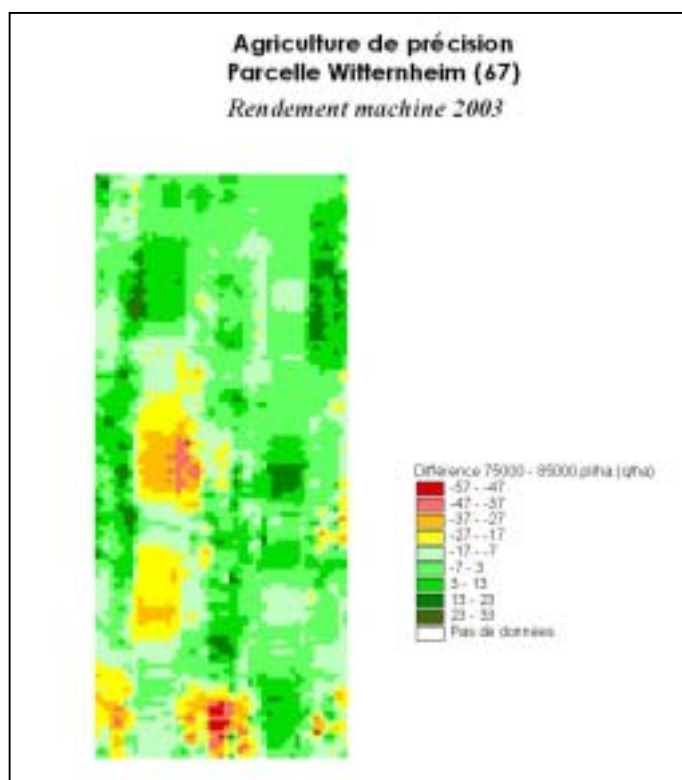


Fig. 115 : Carte interpolée des différences de rendement entre 75 000 et 85 000 plantes/ha

Sur la majorité de la surface parcellaire, on se situe dans la frange de différence faible de rendement entre ces 2 densités de culture : - 17q à + 13q (vert).

Tantôt c'est la d1 (75 000) qui procure des rendements un peu plus élevés, tantôt c'est la d2 (85 000).

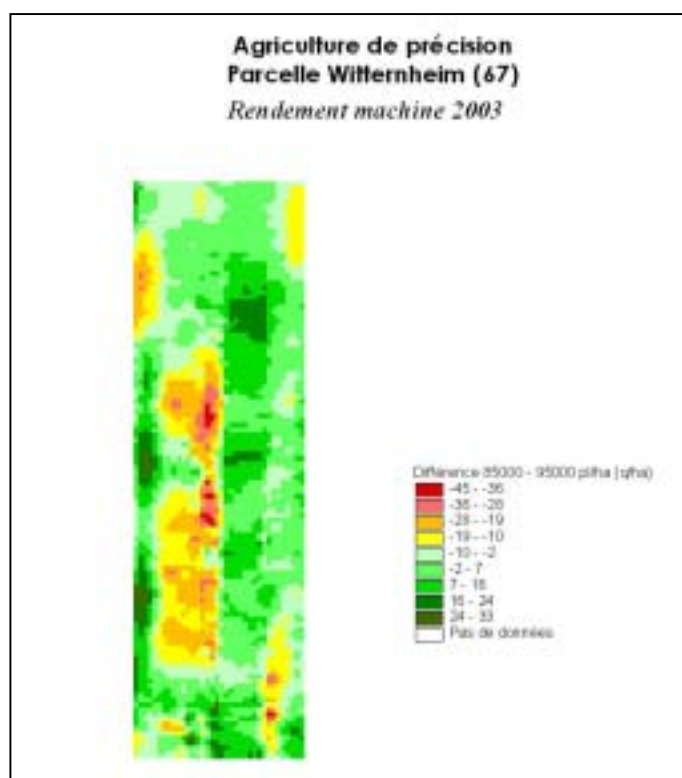


Fig. 116 : Carte interpolée des différences de rendement entre 85 000 et 95 000 plantes/ha

On remarque néanmoins quelques petites zones où la faible densité est pénalisée (rouge à jaune), et a contrario des secteurs où une plus grande densité de plantes à l'hectare n'est pas valorisée (vert foncé). Ce résultat peut s'expliquer par la faible différence effective de densité entre d1 et d2.

L'allure générale de cette carte est ressemblante à la précédente. Il semble que dans la moitié gauche de la parcelle, il y ait une zone à plus fort potentiel, où la plus forte densité de culture exprime un rendement plus élevé. Ailleurs, les différences de rendement entre les 2 densités sont faibles et l'avantage est parfois à la densité faible. Ceci est cohérent avec les connaissances de réponse du rendement à la densité de culture, à savoir que les plus fortes densités sont d'autant mieux valorisées que le rendement est plus élevé.

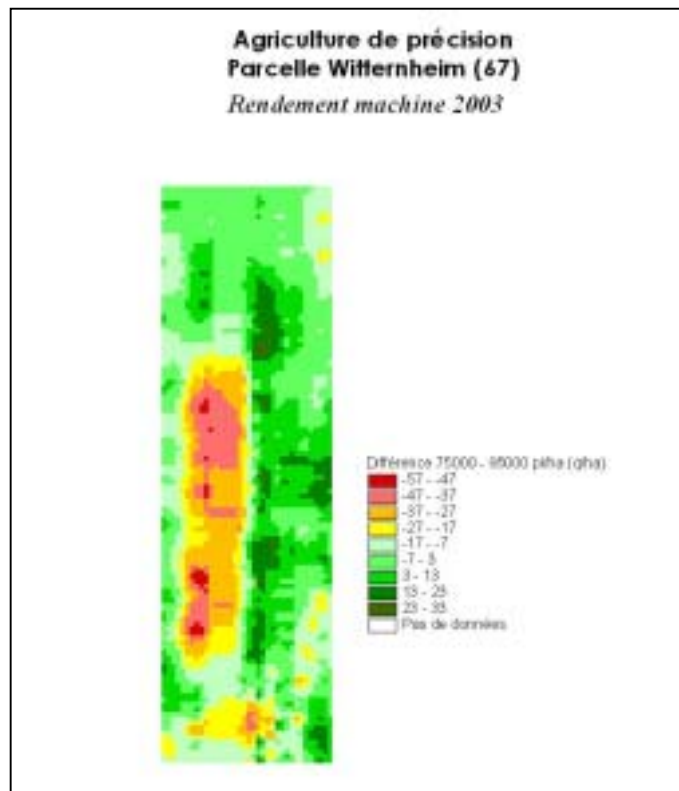


Fig. 117 : Carte interpolée des différences de rendement entre 75 000 et 95 000 plantes/ha. La différence de rendement observée précédemment dans la partie gauche de la parcelle s'exprime encore plus nettement puisque la différence de densité est encore accrue. Il est également intéressant de souligner, que, malgré une différence de 13 000 pieds/ha, dans la partie droite de la parcelle, il ne sert apparemment à rien d'augmenter le nombre de plantes à l'hectare puisque sur la majeure partie de cette zone, la densité de 66 000 permet des rendements plus élevés que la densité 78 500.

Or, dans les charges de production du maïs, le coût de la semence n'est pas négligeable. Dans le contexte particulier de 2003, sous irrigation limitante, il y aurait donc eu une source d'économie à réaliser.

En conclusion sur cette parcelle expérimentale, au vu des résultats de l'année 2003, on pourrait conseiller de faire varier la densité de culture sur la partie médiane de la moitié gauche : celle-ci, au potentiel plus important, valorise une densité forte.

Pour le reste de la parcelle, il ne sert à rien de semer plus de 75 000 graines/ha. La densité doit avant tout être adaptée à la ressource en eau.

Il y aurait donc un motif pour un meilleur raisonnement de la densité de culture dans cette parcelle. Cependant, nous n'avons qu'une année de référence et 2003 n'est pas forcément une année représentative.

Par ailleurs, il est difficile d'évaluer l'efficacité d'une modulation de densité de semis par une analyse du rendement, car d'autres effets peuvent intervenir sur la culture jusqu'à la récolte et provoquer une variabilité dans le rendement indépendamment de la densité de semis (présence de mauvaises herbes, attaque de pucerons,...).

Toutefois, aucun « accident » en culture n'a été identifié dans la parcelle en 2003.

Ebersheim

Un contrôle de densité effectué par comptage manuel du nombre de plantes sur 2 placettes de référence dans chaque répétition a également été réalisé sur la parcelle d'Ebersheim. Là aussi, il indique une différence entre la densité « théorique » et la densité réellement observée, mais moindre qu'à Witternheim.

- Pour la densité de 80 000, cette différence est de l'ordre de 6000 pieds/ha, c'est à dire que la densité réelle moyenne est proche de 74 000 plantes/ha,
- Pour la densité de 90 000, la différence est moins importante : environ 3000 pieds/ha, ce qui fait une densité effective voisine de 87 000 plantes/ha.
- Pour la densité de 100 000, la différence est d'environ 4000 pieds/ha, ce qui fait une densité effective de l'ordre de 96 000 plantes/ha.

A Ebersheim, la différence entre la densité prévue initialement, « théorique », et la densité réellement implantée est donc moins importante qu'à Witternheim. En absence de dégâts observés soit en début, soit en cours de végétation (ravageurs, phytotoxicité, grêle,...) et en supposant un bon réglage du semoir, cette différence peut s'expliquer par une plus grande homogénéité de sol à Ebersheim. On est donc plus proche des conditions recherchées dans la comparaison des 3 densités. On se situe d'ailleurs au-delà de 10 000 plantes/ha puisqu'il y a respectivement 13 000 et 11 000 plantes/ha d'écart entre d1 et d2 et entre d2 et d3.

On peut néanmoins signaler un déficit de plantes plus important dans la densité 1 pour les répétitions 3 et 4, qui correspondent aux bandes situées de part et d'autre du passage d'irrigation.

De même qu'à Witternheim, nous avons eu un problème au niveau de l'enregistrement des données issues du capteur d'humidité sur la première répétition. Les résultats ne tiennent donc pas compte de cette répétition.

	Traitement	rdt moyen à 15%	ecart-type rdt	humidité moy	rdt_min	rdt_max
Sans la répétition 1	densite 1	120.53	13.61	16.05	54.55	144.28
	densite 2	121.95	20.16	16.01	43.64	152.15
	densite 3	122.00	20.42	15.77	42.65	155.71
	R 2	127.65	9.67	16.73	107.28	152.15
	R 3	124.54	10.63	15.51	104.14	145.31
	R 4	124.28	12.68	15.83	97.19	151.20
	R 5	126.90	15.01	15.90	86.96	155.71
	R 6	103.25	26.31	15.70	42.65	143.81
	essai	121.48	18.24	15.94		

Tab. 14 : résultats de rendement et d'humidité

De façon encore plus nette qu'à Witternheim, il n'y a pas de différence significative de rendement entre les 3 densités de culture testées (CV = 1%). La répétition 6, située sur la bordure droite de la parcelle, se distingue des autres par un niveau de rendement significativement plus bas.

Sur cette partie de la parcelle le sol est en partie plus caillouteux par suite d'un remblais de cette zone de terrain consécutif à l'endiguement du Giessen. Cette présence plus importante de cailloux est également en partie visible sur la carte de résistivité.

Par ailleurs, selon l'agriculteur, ce niveau plus bas des rendements peut également s'expliquer par une hétérogénéité d'irrigation due au vent. L'été 2003 ayant été particulièrement chaud et sec, ce phénomène a pu affecter les plantes de façon plus importante qu'en année « normale », et ce d'autant plus qu'à cet endroit le sol est plus superficiel.

La figure 118 illustre assez bien les résultats mentionnés dans le tableau 14 : il y a une dominance du vert qui traduit une certaine homogénéité des rendements sur la parcelle. On retrouve la bordure dépressive sur le côté droit où le sol est plus caillouteux.

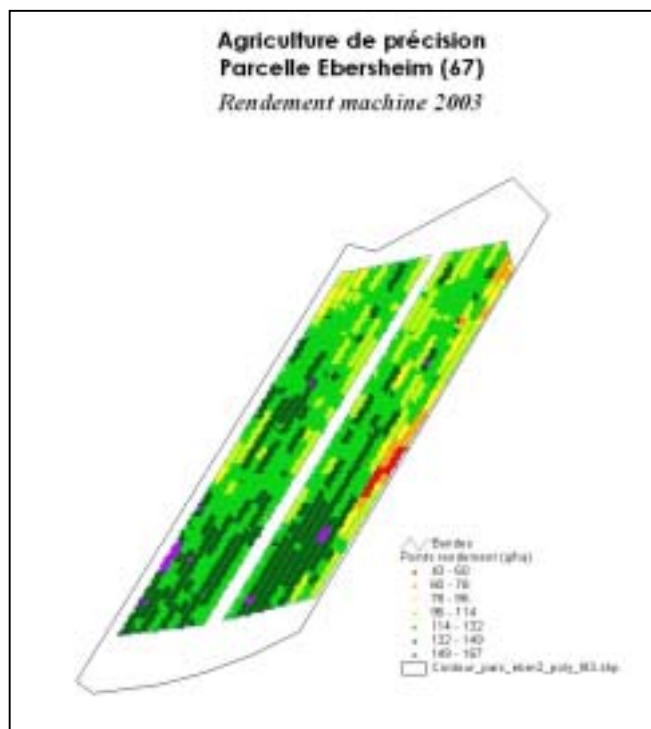


Fig. 118 : carte interpolée des rendements de la parcelle, toutes densités confondues

Comme précédemment, nous examinons de plus près les cartes interpolées des différences de rendement entre les 3 différentes densités.

Sur cette carte la classe des différences de rendement [-8 ; 6] domine largement, ce qui signifie que l'on se situe, une fois encore, dans la plage des différences faibles de rendement entre les 2 densités. Néanmoins d'une façon globale, c'est la densité de 90 000 plantes/ha qu'il fallait faire ici. On peut en outre signaler que sur la bordure droite qui se caractérise par un niveau de rendement plus faible, c'est plutôt la densité la plus faible qui procure les meilleurs rendements.

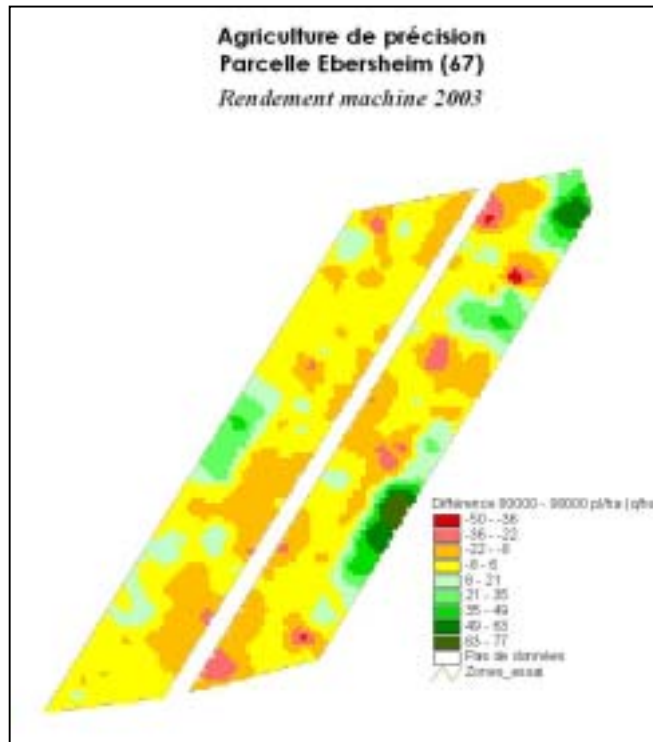


Fig. 119 : Carte interpolée des différences de rendement entre 80 000 et 90 000 plantes/ha

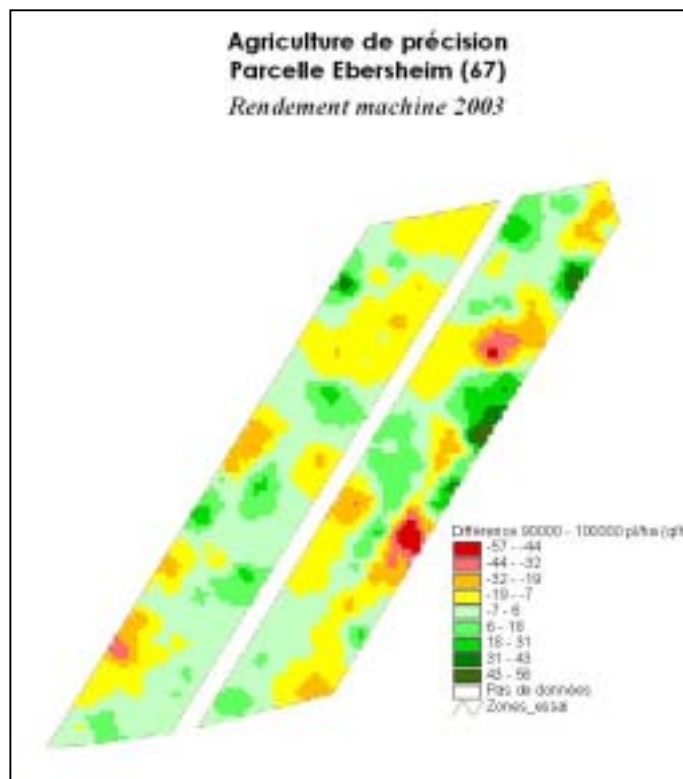


Fig. 120 : Carte interpolée des différences de rendement entre 90 000 et 100 000 plantes/ha

Dans cette comparaison on peut également noter de faibles différences de rendement entre les 2 densités. Contrairement à la carte précédente, la densité forte de 100 000 n'apparaît pas ici comme étant la mieux indiquée. C'est au contraire la densité de 90 000 qui semble encore une fois la mieux adaptée.

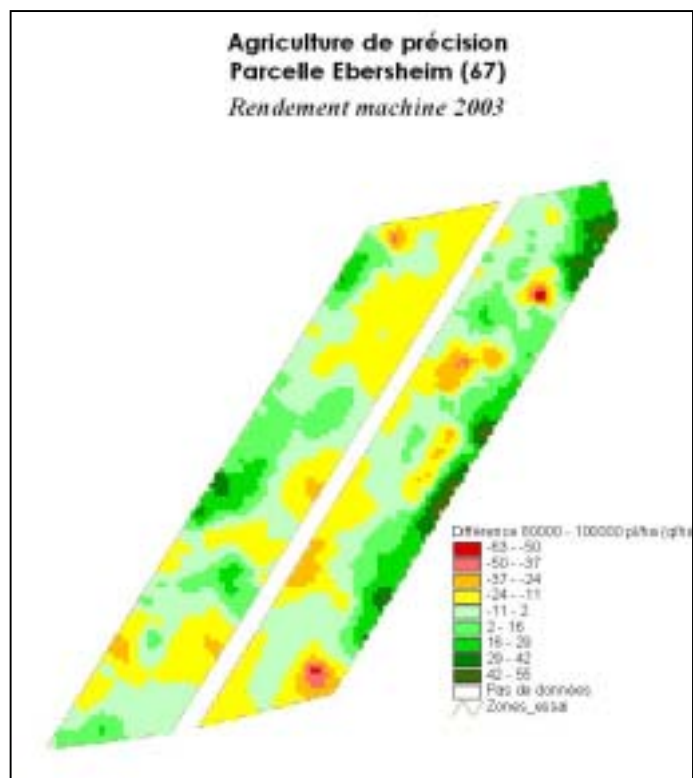


Fig. 121 : Carte interpolée des différences de rendement entre 80 000 et 100 000 plantes/ha

Encore une fois, c'est la classe des différences de rendement $[-11 ; 16]$ qui domine, témoignant de différences faibles de rendement entre 80 000 et 100 000 plantes/ha.

Dans la frange à droite de la parcelle, on remarque clairement que c'est la densité la plus faible qui procure les meilleurs rendements. Dans cette partie de la parcelle il ne sert à rien de semer une densité élevée. Par ailleurs, même sur le reste de la parcelle, les zones où la plus faible densité est pénalisée sont de faible taille (en rouge – orangé).

Cela plaide donc plutôt pour une réduction du nombre de semences à l'hectare. Toutefois, cette situation s'explique peut-être aussi en partie parce que l'année 2003 a été atypique sur le plan climatique.

Globalement, on peut dire que sur cette parcelle, relativement homogène, et comme nous l'avons constaté à Witternheim, dans les conditions de l'année 2003, la densité intermédiaire de 90 000 plantes/ha était un bon compromis pour cette précocité de variété (DK 312 – demi-précoce).

Conclusion

Les essais densités mis en place en 2003 n'ont pas vraiment été concluants :

- les différences de rendement entre les 3 densités sont faibles dans les 2 parcelles,
- hormis un petit secteur à Witternheim, il ne se dégage pas de zone nette où l'une des densités est clairement plus indiquée qu'une autre,
- toutefois, on a observé que les densités intermédiaires étaient un bon compromis en 2003.
- De plus il est difficile d'estimer l'intérêt de la modulation des densités de semis en fonction de la répartition de rendement dans la parcelle compte tenu de l'importance des conditions climatiques en 2003.

3.1.3 Variation de la dose d'azote (2004)

Witternheim

Les résultats de rendements sont synthétisés dans le tableau 15 :

Rappel : X = 190 U X – 50 = 140 U

NB : sur le dispositif expérimental mis en œuvre (BRUNT), une analyse de variance n'est pas valide car un tel dispositif n'est pas randomisé. Une analyse statistique simple basée sur les valeurs d'écart-type et de coefficient de variation est détaillée en annexe.

Tab. 15 : rendements obtenus

Traitement	rdt moyen à 15 %	Ecar-type rdt	Humidité moy.	rdt_mini	rdt_maxi
Rep1 - Modulé	137.5	10.9	27.4	113.9	159.6
Rep1 - X	115.7	6.0	28.9	98.9	128.1
Rep1 - X-50	102.4	9.4	30.7	81.8	121.1
Rep2 - Modulé	116.6	12.1	27.6	91.2	137.8
Rep2 - X	130.0	10.2	29.2	110.6	149.1
Rep2 - X-50	130.2	8.5	29.2	112.9	148.8
Rep3 - Modulé	127.0	12.2	28.0	103.8	154.7
Rep3 - X	120.1	9.0	28.5	99.0	141.7
Rep3 - X-50	115.6	10.0	28.3	94.1	135.5
Rep4 - Modulé	112.9	10.7	26.9	76.9	136.7
Rep4 - X	118.0	8.4	27.8	95.2	136.8
Rep4 - X-50	130.0	10.4	27.0	93.7	149.5
Rep5 - Modulé	128.8	13.8	27.5	95.5	158.3
Rep5 - X	115.7	11.4	26.9	85.9	138.7
Rep5 - X-50	110.7	10.9	27.7	84.0	130.7

Traitement	rdt moyen à 15 %	Ecar-type rdt	Humidité moy.	rdt_mini	rdt_maxi
Témoin	104.5	7.9	29.5	79.7	116.8
Modulé	124.6	15	27.5	76.9	159.6
X	119.4	10.3	28.2	85.9	149.1
X-50	117.5	14.6	28.6	81.8	149.5

Traitement	rdt moyen à 15 %	Ecar-type rdt	Humidité moy.	rdt_mini	rdt_maxi
Rep1	118.5	8.8	29.0	98.2	136.3
Rep2	125.6	10.3	28.7	104.9	145.2
Rep3	120.9	10.4	28.3	98.9	144.0
Rep4	120.3	9.8	27.2	88.6	141.0
Rep5	118.4	12.0	27.4	88.4	142.6

essai	120.7	10.3	28.1	95.8	141.8
-------	-------	------	------	------	-------

Globalement, avec un coefficient de variation de 3%, les différences de rendement entre nos 3 modalités (hormis témoin 50) ne sont pas significatives. En moyenne, la modalité « modulé » procure le même rendement que la modalité « X » : on peut donc penser que nous avons raison d'adapter la dose d'azote au potentiel variable de la parcelle (rendements plus faibles sur une portion au nord et au sud de la parcelle). En ayant pratiqué de la sorte, nous avons maintenu le niveau de rendement maximum (équivalent à celui de la dose X), tout en économisant de l'azote. Notre objectif de maintenir le rendement en ajustant mieux la dose d'azote au potentiel, en l'occurrence en la faisant diminuer, a donc été globalement atteint.

Néanmoins les résultats sont hétérogènes entre répétitions et cette tendance est bien nette dans 3 répétitions sur 5 seulement (R1, R3 et R5).

Il faut rappeler ici que la modalité « modulé » concerne une application d'azote différenciée entre les 2 extrémités de la parcelle expérimentale qui reçoivent une dose X – 50 et le milieu qui reçoit une dose X. Si l'on tient compte des surfaces respectives de l'une et de l'autre des zones concernées, soit 3/5ème pour la surface qui reçoit X et 2/5ème pour la surface qui reçoit X – 50 (sur la longueur totale d'une bande de 250 m, l'épandage différencié s'est fait sur 2 x 50 m aux extrémités et 150 m au milieu), la modalité « modulé » revient à avoir apporté sur la globalité de la surface : X – 20 kg d'azote par hectare, c'est à dire 170 U.

Le « témoin 50 U », avec un niveau de rendement moyen de 104.5 q/ha, (pas de répétition), nous indique que les fournitures en azote du sol ont été très élevées, (seulement 15 q de moins par rapport à la dose X en moyenne) s'établissant à $(104.5 \times 2.3) + 20 - 50 = 210$ U !.

On peut rappeler ici que la valeur de 100 U observée dans le type de sol de cette parcelle, reprise dans la grille de fournitures de l'ARAA, constitue la valeur du premier quintile. Il n'est donc pas anormal que l'on trouve plus. L'année 2004 apparaît ainsi comme ayant été très favorable à la minéralisation.

Sur la base du rendement obtenu dans ce témoin, on peut retrouver le niveau d'azote absorbé par le maïs en 2004, soit : $104.5 \times 2.1 = 219$ kg/ha.

Alors que le maïs fertilisé avec la dose X (190 U), a absorbé : $119 \times 2.1 = 250$ kg d'azote.

On peut alors en déduire que $(250 - 219)$, soit 31 kg d'azote, ont été absorbés à partir des 140 U supplémentaires d'azote apportées par l'engrais dans la dose X. Ce résultat met en évidence une très mauvaise utilisation de l'azote en provenance de l'engrais puisqu'elle n'est que de : $31 / 140 = 22$ %, alors que dans les équations on l'estime généralement à 80 %. Ce résultat est toutefois commun dans les sols bien pourvus en azote.

On peut également rappeler que, la bande témoin n'ayant pas été répétée, ce résultat doit être considéré avec précaution.

On peut remarquer en outre que le niveau de rendement moyen de la parcelle expérimentale en 2004, 120 q/ha, retrouve les niveaux enregistrés en 2001 et 2002, et ce malgré une baisse substantielle du niveau de fertilisation azotée : 190, 170 et 140 unités d'azote contre 230 les années précédentes.

Ce résultat laisse supposer que l'agriculteur apporte une dose trop importante d'engrais azoté et qu'il pourrait facilement réaliser des économies sur cet intrant.

Ce constat nous interpelle aussi quant au risque de pollution de la nappe par les reliquats post-récolte qui, comme l'ont montré plusieurs essais, augmentent beaucoup dès que l'on dépasse la dose X, c'est à dire la dose raisonnée et calculée selon la méthode du bilan (Figure 122).

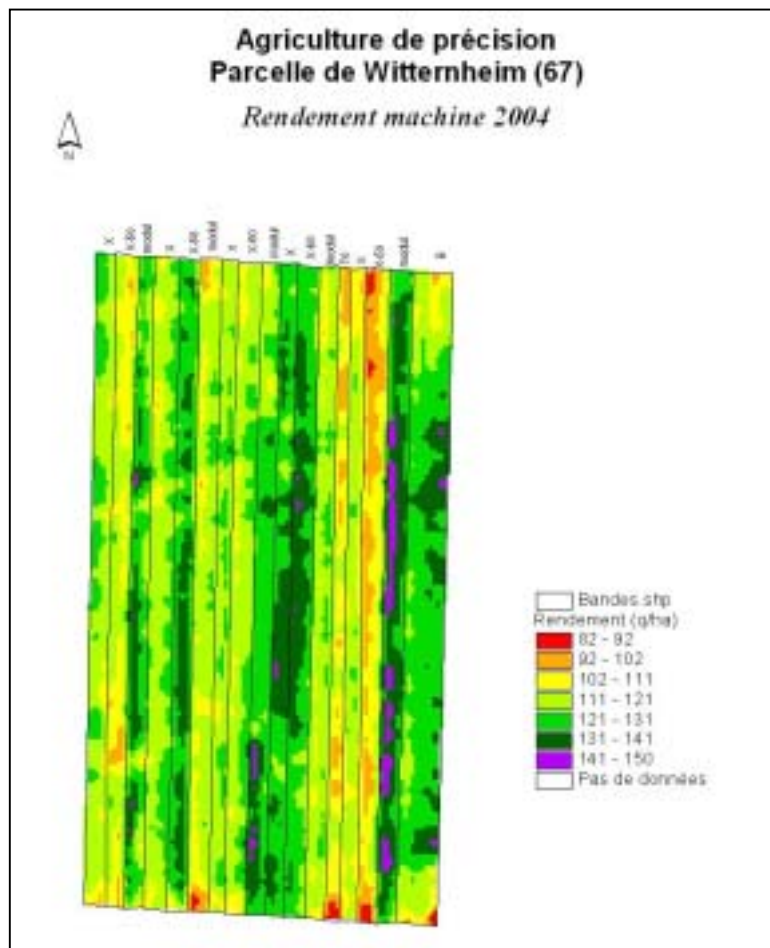


Fig. 122 : carte de rendement à Witternheim dans les différentes modalités

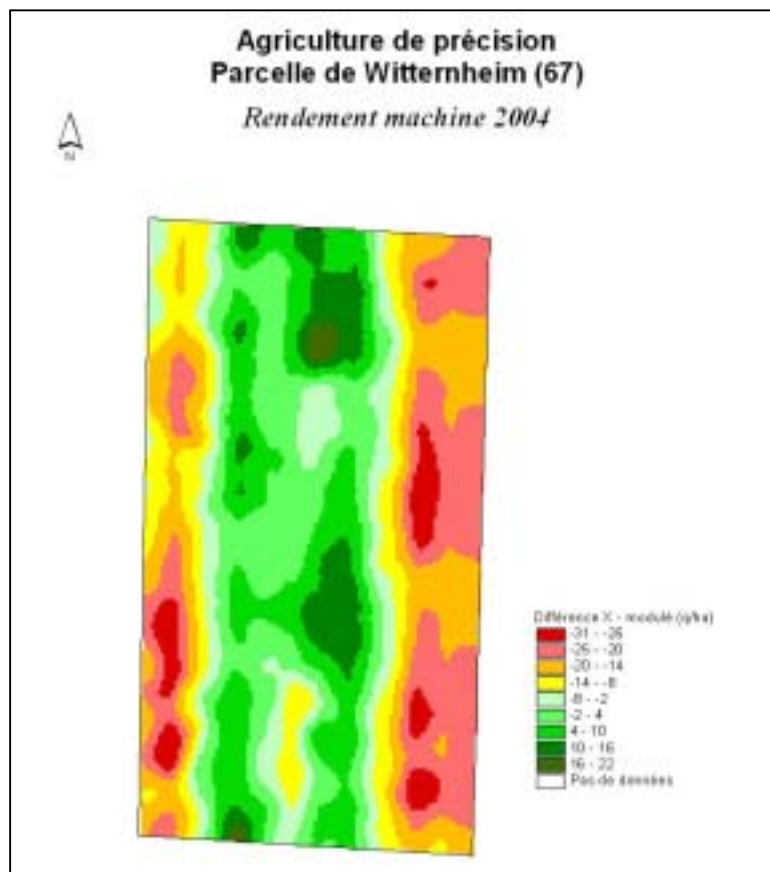


Fig. 123 : carte interpolée des différences de rendement entre « dose X » et « modulé »

Cette carte interpolée des différences de rendement entre la modalité « dose X » et la modalité « modulé », c'est à dire X – 20 (cf. ci-dessus), indique des écarts de rendement relativement faibles, mais une différence de comportement assez nette entre le milieu de la parcelle, où la dose X procure des rendements supérieurs ou égaux à ceux de la modalité « modulé », et les bords Est et Ouest de la parcelle où les rendements de la dose X sont en plus net retrait, c'est à dire que dans ces 2 zones, on a gagné à moduler.

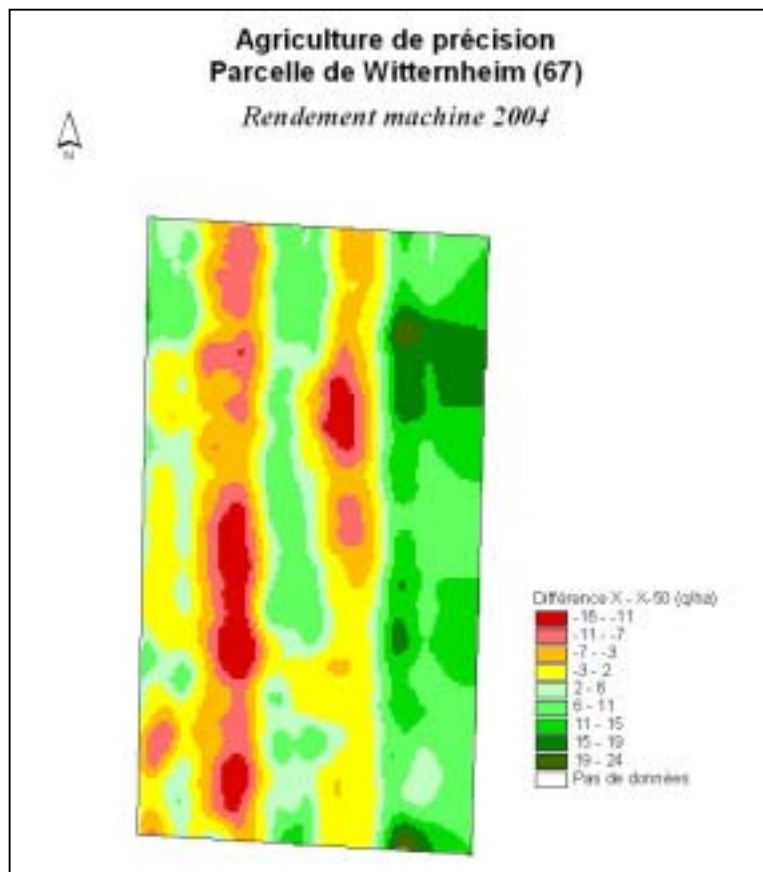


Fig. 124 : carte interpolée des différences de rendement entre « dose X » et « dose X – 50 »
 Cette carte met en évidence une zone à droite de la parcelle où il était clairement plus indiqué de mettre la dose X plutôt que la dose X – 50.
 En revanche sur les 2/3 restants, soit les différences de rendement entre ces 2 doses sont infimes, soit c'est la dose X – 50 qui permet des rendements supérieurs à la dose X.

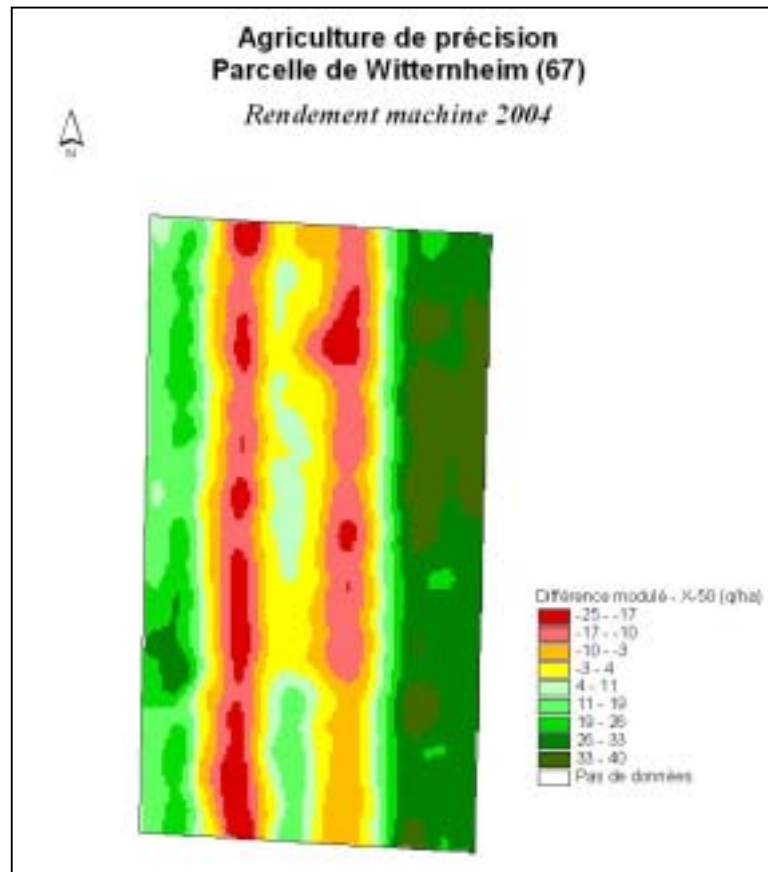


Fig. 125 : carte interpolée des différences de rendement entre « modulé » et « dose X - 50 »

Il se dessine à peu près la même tendance que sur la carte des différences entre « modulé » et « dose X », c'est à dire un avantage à la modulation sur les bords de la parcelle, avec une amplitude encore plus marquée, surtout du côté droit. Dans le milieu de la parcelle, en revanche, l'avantage est plutôt à la dose X - 50.

En conclusion sur cette parcelle, il s'avère que l'adaptation de la dose d'azote au potentiel de rendement différent entre le milieu de la parcelle et les extrémités Nord et Sud (plus faible) a été payant plutôt sur les bords droit et gauche mais pas au centre, où finalement une dose X - 50 aurait pratiquement été suffisante.

Ebersheim

Les résultats de rendement à Ebersheim sont synthétisés dans le tableau 16.

Tab. 16 : rendements Ebersheim 2004

Traitement	rdt moyen à 15 %	Ecar-type rdt	Humidité moy.	rdt_mini	rdt_maxi
Rep1 - X	133.5	12.4	32.0	102.4	154.9
Rep2 - X	146.0	17.9	31.9	102.4	188.1

Traitement	rdt moyen à 15 %	Ecar-type rdt	Humidité moy.	rdt_mini	rdt_maxi
Témoin	121.1	6.9	32.4	106.2	133.5
X	139.5	16.5	32	102.4	188.1
X+30	136.5	10.2	32.7	111.9	156.6
X-50	104.2	29.8	32.4	59.7	153.9

essai	125.3	15.9	32.4	95.1	158.0
-------	-------	------	------	------	-------

L'examen des données enregistrées lors de la récolte par les capteurs de rendement indique des données aberrantes pour les 2 bandes qui se situent aux extrémités de la parcelle. C'est pourquoi, pour les dose X – 50 et X + 30 nous n'avons qu'une seule répétition. Il faut donc interpréter ces résultats avec prudence.

Le niveau de rendement moyen de l'essai est tout à fait conforme à ce qu'on a relevé les années précédentes.

Avec la précaution qui s'impose compte tenu de ce résultat sans répétition, il apparaît que la dose X était bien calée au potentiel de rendement de la parcelle et qu'il n'était pas nécessaire d'apporter X + 30. En revanche, la dose X – 50 semble insuffisante puisqu'elle pénalise le rendement de façon significative. Le « témoin 30 », quant à lui fait un rendement tout à fait honorable avec un rendement de 109.5 q/ha, mais ce résultat pose question par rapport à celui de la dose X – 50, c'est à dire 100 U de plus que le témoin, qui affiche un rendement de 104.2 q/ha. Toutefois, on peut remarquer que l'écart-type de la bande « X – 50 » est très fort.

Dans cette parcelle, le sol aurait fourni : $(121 \times 2.3) + 20 - 30 = 268$ kg d'azote !

Sur la base du rendement obtenu dans ce témoin, on peut retrouver le niveau d'azote utilisé par le maïs en 2004, soit : $121 \times 2 = 242$ kg.

Alors que le maïs fertilisé avec la dose X (180 U), a absorbé : $139.5 \times 2 = 279$ kg d'azote.

On peut alors en déduire que $(279 - 242)$, soit 37 kg d'azote, ont été absorbés à partir des 150 U supplémentaires d'azote apportées par l'engrais dans la dose X. Comme à Witternheim, on constate ici une très mauvaise utilisation de l'azote en provenance de l'engrais puisqu'elle n'est que de : $37 / 150 = 25 \%$.

Les résultats de rendement sont illustrés sur la carte présentée ci-dessous, où l'on distingue nettement la bande X – 50 avec des niveaux de rendement les plus faibles, suivie par celle du témoin et enfin 2 bandes pour la dose X où il apparaît que dans celle de gauche les rendements sont plus élevés.

Dans ce contexte où il n'y a pas de répétition des résultats, il ne sera pas présenté de carte d'interpolation des différences de rendement entre doses d'azote différentes puisque celles-ci ne voudront rien dire.

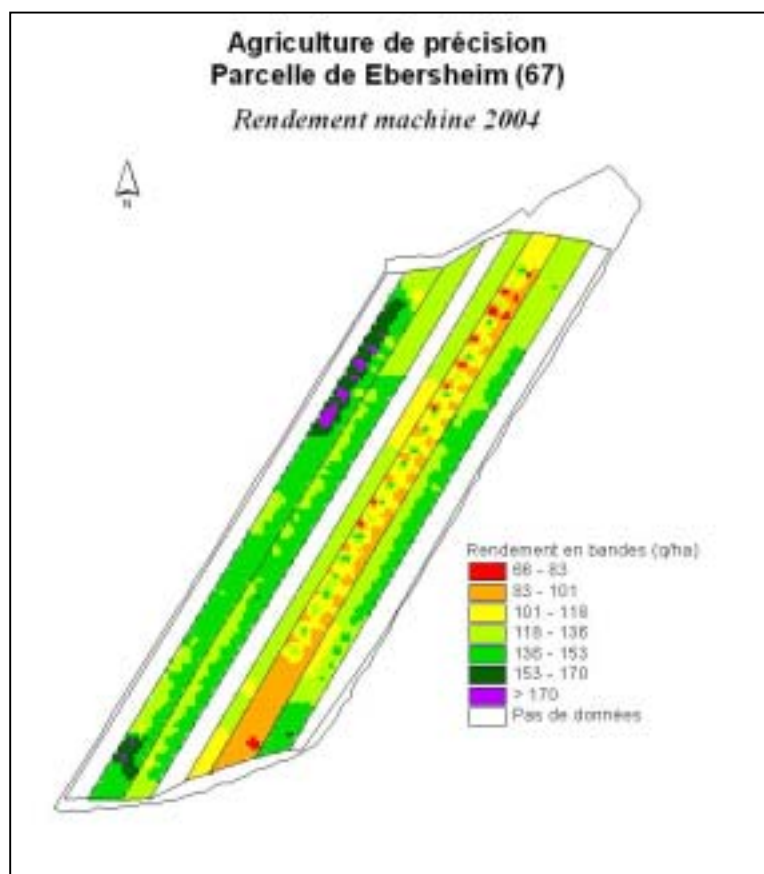


Fig. 126 : carte de rendement à Ebersheim dans les différentes modalités

Résultats des mesures de N-tester et de reliquats post-récolte

Comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré aux matériels et méthodes, nous avons effectué, dans les deux parcelles, des mesures du niveau d'alimentation des plantes en azote par la méthode H N Tester au moment de la floraison dans les différentes modalités testées.

Comme nous n'avons pas d'étalon « surfertilisé » nous avons calculé un indice « N tester » par rapport à la valeur maximum enregistrée.

Les résultats de ces mesures sont synthétisés sur le plan des parcelles joint en annexe.

Malheureusement, les résultats sont trop irréguliers et trop imprécis pour pouvoir les interpréter.

Quant à la mesure des reliquats post-récolte, ils n'ont été faits que sur la parcelle d'Ebersheim puisqu'à Witternheim, la récolte est intervenue très tardivement et après 176 mm de pluie.

Les résultats indiquent des niveaux de reliquats du même ordre de grandeur pour la dose X et la dose X – 50, respectivement 73 et 98 kg/ha. Alors que dans la modalité X + 30, cette quantité « explose » avec 172 kg/ha ! Quant au témoin 30, le niveau de reliquats plus modéré s'établit à 44 kg/ha, ce qui n'est pas négligeable et traduit un taux de minéralisation du sol relativement fort.

Ces résultats doivent être pris avec précaution compte tenu de la très faible précision de l'essai. Cependant ils semblent logiques et être conformes avec ce qui a été dit plus haut. En effet, le témoin, faiblement fertilisé (30 U) laisse peu de reliquats après la récolte. Mais avec un tel niveau de fertilisation, on peut penser que le rendement n'est pas à l'optimum.

Une fertilisation raisonnée selon la méthode du bilan laisse des reliquats supérieurs au témoin et relativement élevés ici, puisque la minéralisation du sol était très importante en 2004.

Une fertilisation réduite ($X - 50$), dont le rendement a été pénalisé laisse des reliquats plus importants qu'avec la dose X .

Dès que l'on dépasse la dose X , même de 30 U, on fait augmenter très rapidement le niveau de reliquats post-récolte, sans augmenter le rendement. Ce résultat vient confirmer de nombreuses observations de cette nature faites par ailleurs.

Conclusion

Au vu des résultats obtenus en 2004 sur la parcelle de Witternheim, puisque ceux d'Ebersheim, trop partiels ne peuvent être exploités, il apparaît que notre idée de voir si en limitant la fertilisation azotée, on induit une plus grande variabilité du rendement par rapport à une fertilisation confortable n'a pas pu être démontrée. La variabilité du rendement en 2004 y est du même ordre que sur la parcelle fertilisée par l'agriculteur en 2000, 2001 et 2002.

En revanche, cet essai nous permet de dire que, d'une façon globale sur la parcelle, le fait de moduler la dose d'azote et d'en apporter finalement $X - 20$ au lieu de X , n'a pas pénalisé le rendement alors que l'on a économisé 20 U d'azote. Dans les conditions de 2004 où la minéralisation du sol a été importante on aurait même pu se satisfaire de $X - 50$ puisque le rendement n'est pas significativement différent de celui procuré par la dose X , mais de telles conditions ne se reproduisent pas tous les ans et on risque alors de faire prendre un risque à l'agriculteur.

Cet essai indique par ailleurs que la fertilisation azotée pratiquée par l'agriculteur (230 U) est excédentaire.

3.2 Résultats des essais en Bade-Wurtemberg

Seuls sont présentés ci-dessous les résultats des sous-études réalisées dans le Bade-Wurtemberg ayant un rapport direct avec la mise en œuvre de la modulation des intrants. Ils sont organisés comme suit :

- Résultats relatifs à la variabilité
- Résultats relatifs à la faisabilité de la modulation et
- Résultats relatifs à l'impact de la modulation

Les résultats relatifs à la *faisabilité* (2^d point) s'organisent en fonction des deux méthodes principales :

- Approche cartographique et
- Approche online

Dans chaque cas sont présentés :

- Les complications
- Le potentiel de développement ultérieur et d'amélioration de la méthode, ainsi que
- Les solutions possibles d'évaluation pratique de la méthode.

3.2.1 Résultats relatifs à la variabilité

Les résultats relatifs à la variabilité jouant un rôle important dans la mise en œuvre de la modulation sont présentés ci-dessous. Ils sont issus des sous-études relatives à la variabilité (Chapitre 2.1.2.2) et sont donc dérivés :

- Des cartographies de rendement existantes et effectuées pendant l'étude
- Des analyses de reliquats d'azote
- Des études pédologiques
- Des récoltes manuelles
- Des inventaires des dégâts
- Des données collectées avec EM38
- Des études sur la capacité de rétention d'eau des sols

3.2.1.1 Distribution des rendements

La variabilité des rendements affecte la modulation des intrants à deux titres :

- *D'une part*, elle joue un rôle direct, dans la mesure où elle représente un paramètre d'entrée permettant de déduire l'application modulée. Ainsi, la distribution des rendements constitue avec « les bonnes pratiques agricoles » l'un des deux paramètres différenciés au niveau intraparcellaire qui jouent un rôle dans l'approche cartographie en vue du calcul des applications modulées d'azote. Le rendement d'une sous-surface donnée possède un impact sur le niveau de l'épandage d'azote sur cette même sous-surface, car il est à l'origine du calcul du rendement potentiel attendu.
- La régularité interannuelle de la distribution du rendement constitue également un résultat important des sous-études de variabilité. Déduire une distribution actuelle du rendement

potentiel attendu à partir des distributions de rendement sur différentes années n'a de sens que si des similitudes existent entre ces rendements.

- D'autre part, la distribution des rendements permet de vérifier l'effet de la modulation des intrants sur le résultat.

Pour cette étude, on s'est basé sur des cartes de rendement des années 2000 à 2004, présentées dans la figure 127.

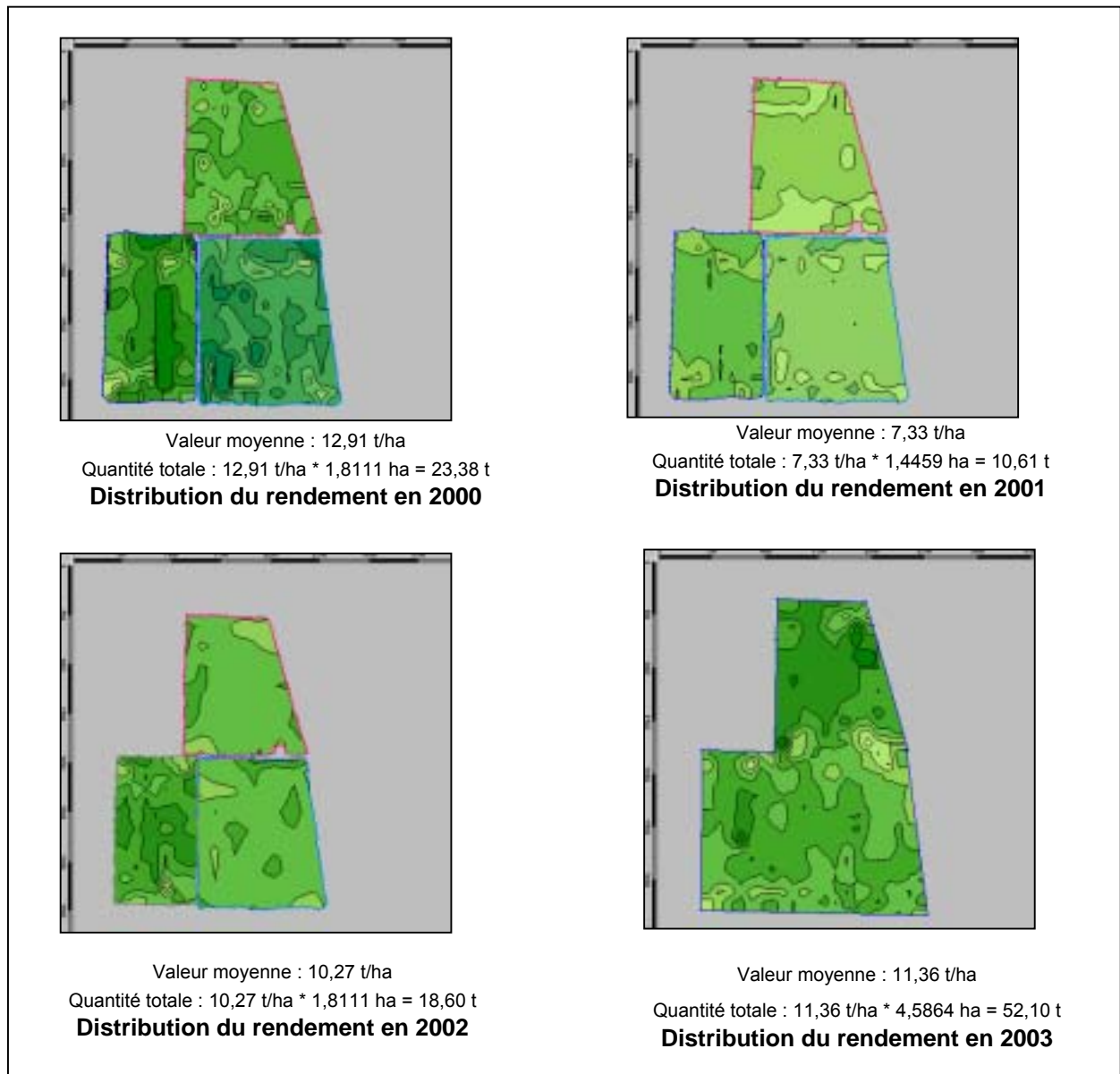


Fig. 127 : distribution du rendement de maïs sur différentes années

Une analyse visuelle ne permet pas de distinguer de similitudes entre les distributions du rendement sur les différentes années pour la *parcelle I-01* (parcelle située au sud-est). Le rendement est relativement homogène dans cette parcelle, sans présenter de « paquets » bien déterminés. Les zones de rendement plus élevé ou plus faible ne se retrouvent pas vraiment

d'une année à l'autre. Seule la zone jouxtant immédiatement le chemin est identique en 2000 et 2001.

Dans la *parcelle I-2* (située au sud-ouest), on peut distinguer chaque année une bande sur laquelle les rendements sont plus élevés, mais se manifestant de façon très différente d'une année à l'autre. Elle est très nette et intense en 2000 mais se réduit en 2001 à deux « lignes » raccourcies. En 2002, ses extrémités sont plus courtes, mais elle est plus large. Ce raccourcissement se retrouve également en 2003, mais sans élargissement cette fois. Ainsi, on peut percevoir visuellement une structure reconnaissable dans la parcelle I-02, bien qu'elle se manifeste différemment chaque année.

Dans la *parcelle I-03* (parcelle située au nord), la distribution des rendements semble relativement équilibrée. Les valeurs maximales et minimales ne paraissent pas très marquées. Cependant, les zones de rendement légèrement supérieur ne sont pas non plus toujours localisées au même endroit. Alors qu'en 2000 ces zones se situent plutôt à l'est de la parcelle, elles se situent plutôt à l'ouest et au centre en 2003. Aucune tendance ne peut être identifiée pour les deux autres années.

Sur la base d'impressions visuelles, c'est donc une forte absence d'homogénéité de distribution du rendement qui se dégage entre ces quatre années pour ces surfaces constamment plantées de maïs (Fig. 127). D'après l'aspect superficiel des cartes de distribution des rendements, on ne peut pas réellement parler de structure répétitive. Il semble plutôt que la distribution des rendements varie fortement d'une année à l'autre, et que les valeurs maximales ne se retrouvent qu'exceptionnellement dans des zones données, avec toutefois des caractéristiques très variables le cas échéant.

Cette impression visuelle est confirmée par les résultats des calculs de corrélation entre les différentes distributions (Tab. 17). Seule une très faible part des distributions fortement variables d'une année sur l'autre peut être reproduite à l'aide d'une régression.

Année	2000	2001	2002	2003
2000	1	0,2314	0,0001	0,0039
2001		1	0,0041	0,0026
2002			1	0,1931
2003				1

Tab. 17 : résultats des calculs de corrélation des distributions de rendement du maïs entre les différentes années étudiées

Au vu de ces résultats, il convient de se demander s'il est pertinent, lors du calcul de l'application modulée en intraparcellaire avec l'approche cartographique selon les « bonnes pratiques agricoles », de déterminer la distribution du rendement potentiel attendu à partir des distributions de rendement des années précédentes, comme cela est toujours suggéré, et comme cela a d'ailleurs été effectué en 2003 et 2004. On peut difficilement comprendre comment il est possible d'extrapoler la distribution du rendement potentiel attendu pour l'année en cours à partir de données de rendement de différentes années n'ayant aucune corrélation les unes avec les autres, si le rendement de cette année n'aura en fin de compte sans doute aucun lien avec celui observé les années précédentes.

3.2.1.2 Variabilité du reliquat d'azote

La variabilité du reliquat d'azote est importante dans la modulation des intrants dans la mesure où, comme le rendement, elle joue un rôle dans la déduction de l'application modulée. La distribution des reliquats constitue le second des deux paramètres d'entrée déterminés au niveau intraparcellaire servant de base au calcul de l'application modulée d'azote dans l'approche cartographique selon « les bonnes pratiques agricoles ». Le niveau des reliquats a ainsi un impact sur le niveau de la fertilisation azotée de cette sous-parcelle. Pour la modulation des intrants, il est ainsi important de connaître :

- la *charge de travail nécessaire à la détermination* des reliquats d'azote, ainsi que
- la *précision* des valeurs de mesure des reliquats d'azote.

Les résultats de cet aspect de l'étude relatif à l'importance de la variabilité des reliquats d'azote pour la modulation de la fertilisation azotée sont présentés ci-dessous :

Charge de travail liée à la collecte des données de reliquat d'azote

L'importance de la charge de travail nécessaire à la détermination de la variabilité du reliquat d'azote ressort de la sous-étude décrite dans le chapitre 2.1.2.4 sur l'optimisation des méthodes de réduction de la charge de travail liée à la collecte du reliquat d'azote.

Le reliquat d'azote étant déterminé par échantillonnage de sol, et les paramètres de mise en œuvre de la modulation de la fertilisation azotée selon les « bonnes pratiques agricoles » devant être disponibles au niveau intraparcellaire, il en résulte une charge élevée de détermination de ce paramètre d'entrée, tant en termes financiers qu'en termes de temps, car une forte densité d'échantillonnage est nécessaire.

Ainsi, la praticabilité de toutes les méthodes de modulation des intrants nécessitant des valeurs de reliquat d'azote au niveau intraparcellaire doit préalablement être revue à la baisse.

C'est pourquoi l'impact de la réduction de la collecte des reliquats d'azote a été simulée dans la sous-étude mentionnée. Les très larges différences entre le paramètre « reliquats d'azote selon les simulations sont clairement visibles dans la figure 128. La figure 1295 montre les écarts entre les valeurs réelles de reliquat d'azote obtenues à partir de nombreux échantillonnages de sol à l'échelle intraparcellaire et les différentes hypothèses simulées.

Il est aisé de se rendre compte qu'une réduction de la charge de collecte du paramètre diminue fortement le rendu de la variabilité réelle.

La baisse de précision est si importante qu'une réduction de la charge de collecte du paramètre devient injustifiable, la modulation des intrants étant le but prioritaire de la fertilisation adaptée. Aussi, la précision en tant que but premier ne doit pas être sacrifiée à la praticabilité de l'application.

Dans l'approche cartographique, la nécessité de déterminer la variabilité du reliquat d'azote selon les « bonnes pratiques agricoles » aboutit à la conclusion que cette méthode doit être considérée comme irréaliste du point de vue de la faisabilité, en raison des coûts importants qu'elle entraîne en termes financiers et de temps. Il est donc nécessaire de rechercher des améliorations ou d'autres solutions.

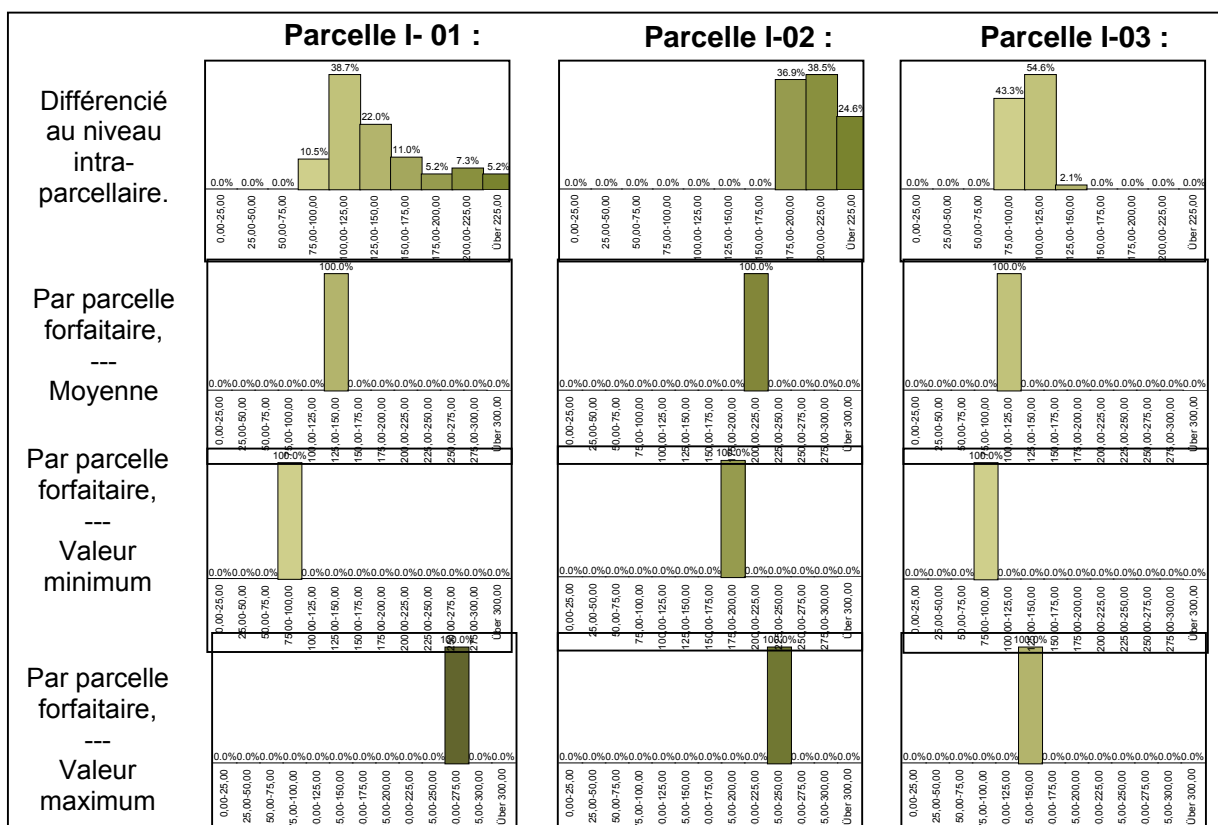


Fig. 128 : répartition des classes de reliquat N avec les différentes méthodes de détermination

Cartes de différences : Reliquats d'azote au niveau intraparcellaire, déduction faite de...

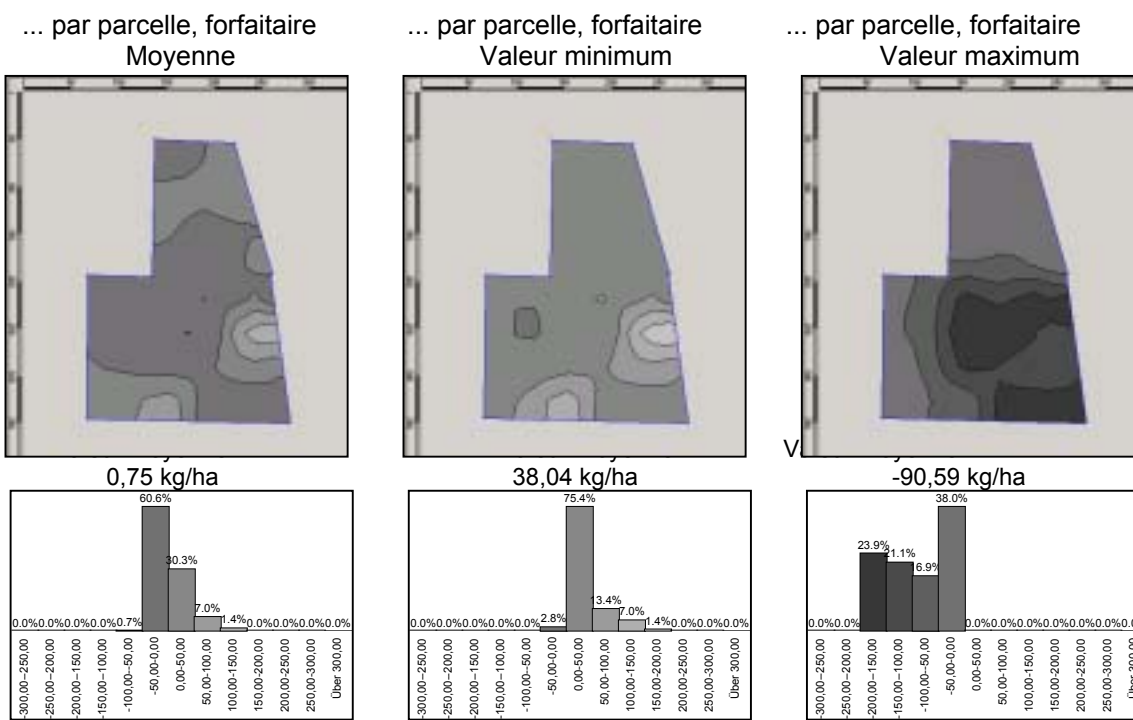


Fig. 129 : cartes de différences entre reliquats d'azote déterminés au niveau intraparcellaire et forfaitairement

Précision

Comme cela a été expliqué en introduction, il est également intéressant de connaître la variabilité du paramètre « reliquat d'azote » en vue de la mise en œuvre de la modulation des intrants sur les plans *de la stabilité et de la précision*. En tant que variable d'entrée de cette méthode, il est essentiel de connaître à quel niveau de précision la variable doit être connue, et quels sont les aspects essentiels à prendre en compte lors de sa collecte. Les résultats relatifs à ces questions ressortent de la sous-étude du chapitre 2.1.2.2.

Le tableau 18 liste les résultats des tests de corrélation entre des **échantillonnages effectués au printemps sur différentes années**. On constate distinctement une forte différence entre les distributions spatiales printanières des reliquats d'azote entre les différentes années. Même entre les deux échantillonnages effectués successivement au printemps 2003, le coefficient de corrélation n'atteint qu'une valeur de 0,4. Les variations entre deux observations au même point ne peuvent ainsi être reproduite qu'à 40 % par une régression. Sur un intervalle de deux semaines seulement et aux mêmes points d'échantillonnage, il existe donc une forte dispersion des valeurs entre deux échantillonnages indépendants réalisés par des opérateurs différents. La plus forte corrélation est trouvée entre 2002 et 2003, quel que soit l'échantillonnage de 2003 considéré. Les coefficients de corrélation s'élèvent tout de même respectivement à 0,52 et 0,40, ce qui est donc supérieur à la valeur trouvée entre les deux échantillonnages indépendants réalisés la même année. Le plus faible coefficient de corrélation (0,11) est trouvé entre les échantillonnages les plus éloignés temporellement (05.06.01 et 10-17.05.03).

R ²	05.06.01 Opérateur A	24.05.02 Opérateur A	07.05.03 Opérateur B	10.-17.05.03 Opérateur Ar
05.06.01 (A)	1,00	0,17	0,06	0,11
24.05.02 (A)		1,00	0,52	0,44
07.05.03 (B)			1,00	0,40
10.-17.05.03 (A)				1,00

Tab. 18 : résultats des tests de corrélation entre les différents échantillonnages de printemps

Le tableau 19 compare les échantillonnage des reliquats d'azote **réalisés au printemps et en automne** en 2002 et 2003. Sont considérées la similitude entre distributions (résultats de corrélation) et la baisse des reliquats d'azote (en pour cent). L'échantillonnage de printemps de 2003 ayant été réalisé par deux opérateurs différents à des périodes similaires, les deux valeurs ont pu être comparées au résultat peu après la récolte. On constate clairement des dissimilitudes entre les distributions de printemps et d'automne ainsi qu'une forte différence entre les baisses.

	Corrélation (R ²)	Pourcentage / printemps
Année 2002 (Opérateur A)	0,0229	36,28 %
Année 2003 (Opérateur A)	0,008	26,30 %
Année 2003 (Opérateur B)	0,106	42,03 %

Tab.19 : résultats des comparaisons printemps/automne des reliquats d'azote

Une comparaison des résultats des **échantillonnages d'automne de différentes années** (2002 et 2003) met en évidence une augmentation d'environ 138 % par rapport aux valeurs trouvées l'année précédente. Toutefois, cette augmentation va de pair avec une hausse respective des valeurs du printemps précédent de 190 % (opérateur B) et de 119 % (opérateur A), et ne doit donc pas être considérée comme un impact négatif des mesures réalisées en 2003.

En comparaison, le coefficient de détermination s'élève tout de même à 0,31, de telle sorte que quasiment un tiers de la variance peut être reproduit par une régression (Tab. 20). Les distributions ne sont donc pas statistiquement significatives mais présentent tout de même des similitudes visuelles.

Comparaison échant. d'automne	Corrélation (R^2)	Pourcentage / 2002
Année 2002 à 2003	0,306	137,6 %

Tab. 20 a : résultats des tests de corrélation entre les deux échantillonnages automnaux

Le Tableau 21 montre que dans cet essai, le résultat d'un **échantillonnage réalisé par deux opérateurs indépendants** peut présenter de fortes variations. Cependant, avec $R^2 = 0,52$, cette distribution est celle qui présente la corrélation la plus élevée parmi toutes les études relatives aux reliquats d'azote réalisées. Ceci signifie qu'à peine un peu plus de la moitié de la variance peut être expliquée par une régression. Parmi les répartitions non comparées jusqu'à présent, ces deux échantillonnages sont les plus similaires en termes de distribution spatiale.

	Corrélation (R^2)	Pourcentage / Uni Hohenheim
Printemps 2003 :	0,52	62,57 %

Tab. 20 b : résultats des tests de corrélation entre les deux opérateurs

Sur la base des différentes sous-études, on peut conclure que la distribution des reliquats d'azote peut varier dans une large mesure, même sur un court laps de temps. Ces variations sont telles qu'une régression ne peut rendre compte avec clarté de la variabilité de la distribution des reliquats. Il demeure toutefois une impression visuelle de similitude, qui suggère une certaine régularité.

La forte variabilité à court terme du paramètre contraint de s'interroger sur la mesure dans laquelle la distribution des reliquats est adaptée en tant que paramètre différencié au niveau intraparcellaire, en vue de la production d'une carte d'application pour la modulation des intrants. De même, on peut se demander si une densification du maillage ne générerait pas seulement une plus grande différenciation de la distribution spatiale, mais peut-être également des taux de corrélation plus stables après des échantillonnages répétés.

En raison de la forte dynamique du cycle de l'azote, on peut se demander si la détermination des reliquats d'azote juste avant l'application de N sera encore bien représentative au moment de la réalisation effective de la mesure. Toutefois, si la distribution des reliquats est tout de même utilisée, il est indispensable que l'échantillonnage soit effectué avec grand soin et dans un délai très bref avant l'application d'azote.

Globalement, ces résultats signifient que les reliquats réagissent de manière très sensible, et que pour être utilisés dans la méthode cartographique en tant que paramètre d'entrée pour la

modulation de la fertilisation azotée selon les « bonnes pratiques agricoles », ils doivent donc être déterminés très soigneusement et dans un laps de temps court avant l'application, ce qui a des conséquences négatives sur la praticabilité de la méthode.

3.2.1.3 Détermination de la variabilité à l'aide de EM 38

Dans le cadre d'une sous-étude, on a tenté de reproduire la variabilité de la parcelle à l'aide de la conductivité électromagnétique (chapitre 2.1.2.2). Il s'agit d'une méthode bon marché, couvrant des surfaces importantes, ce qui réduit la durée nécessaire à sa réalisation et lui confère un potentiel d'intégration dans la mise en œuvre d'une modulation concrète des intrants. C'est pourquoi les résultats peuvent avoir une importance vis-à-vis de la modulation des intrants si l'intégration de la méthode est possible dans le cadre de la modulation de la fertilisation azotée.

Les coefficients de détermination des comparaisons entre les distributions des paramètres différenciés au niveau intraparcellaire montrent qu'il n'existe aucune corrélation entre les paramètres pertinents pour la mise en œuvre de la modulation, bien que certaines similitudes existent entre le dernier relevé du stade de maturité, la teneur en carbone et les valeurs de réflexion issues des photographies aériennes « lowcost ». Ces similitudes devraient être gardées à l'esprit, mais ne jouent actuellement aucun rôle important dans la mise en œuvre de la modulation des intrants.

Ainsi, SCHMIDHALTER et ZINTEL (1999) n'ont pu mettre en évidence aucune relation entre les mesures effectuées à l'aide de l'EM 38 et la teneur en chlorures. Il existe par contre une relation avec la réserve utile, ce qui n'a cependant pas pu être confirmé par le présent projet. Les résultats des études avec l'EM 38 laissent supposer qu'il existe un rapport indirect entre la distribution intraparcellaire de l'alimentation des végétaux et la conductivité électromagnétique, qui rendrait pertinente une combinaison de paramètres. L'alimentation en eau ne devrait pas y représenter une fraction insignifiante au niveau spatial.

3.2.1.4 Etudes relatives à la capacité de rétention d'eau des sols

Ci-dessous sont présentés les résultats issus des études portant sur la capacité de rétention d'eau des sols (chapitre 2.1.2.2 (7)), dans la mesure où ils sont pertinents vis-à-vis de la mise en œuvre de la modulation des intrants.

Il existe théoriquement une corrélation claire entre la **maturation** et l'humidité du sol. Toutefois, aucun des coefficients de détermination des comparaisons effectuées n'atteint le niveau d'une corrélation bien définie. On constate cependant que R^2 augmente avec le degré de maturation (jusqu'à 0,32). Ceci constitue un indice direct du fait que la relation entre la distribution de l'humidité du sol s'améliore au fur et à mesure de la maturation. Si toutefois il n'est toujours pas possible à ce stade d'atteindre un coefficient de détermination suffisamment élevé pour pouvoir en tirer des conclusions, ceci peut être dû d'une part au fait que dans le cas d'un inventaire terrestre de maturation, on se base sur des valeurs estimées, c'est-à-dire sur une interprétation et non pas des valeurs mesurées. D'autre part, l'écart d'environ une année entre les paramètres à corrélérer peut également ici jouer un rôle.

Au cours des études concernant l'année 2004, on a pu montrer que les valeurs de réflexion étaient clairement corrélées avec la fraction granulométrique. Bien que la fraction granulométrique influence fortement la capacité de rétention d'eau d'un sol, cette étude n'a pas permis d'identifier de corrélation avec **les paramètres de réflexion issus des images aériennes**. Bien qu'on trouve un coefficient de détermination de 0,3, qui permet de suggérer une répartition sur la base de quelques similitudes visuelles, aucune des corrélations ne s'avère significative.

La situation est différente en ce qui concerne la **distribution des reliquats d'azote**. Alors que les valeurs de reliquats d'azote du 2 juin 2004 et du 23 juillet 2004, qui remontent à plus d'une année, ne présentent globalement aucune corrélation claire, le coefficient de détermination de la distribution des reliquats d'azote du 19 novembre 2004 atteint des valeurs nettement plus élevées. Bien que cet échantillonnage des reliquats d'azote ait été réalisé plus de 8 mois avant les mesures d'humidité du sol, le seuil de 0,5 est même dépassé pour le coefficient de détermination. On obtient même une corrélation élevée ($R^2 = 0,79$ et $0,73$) avec les valeurs du 29 mars 2005, qui sont les plus proches temporellement, pour la profondeur intermédiaire (30 – 60 cm), alors que plus de quatre mois séparent les deux relevés.

Si l'on répartit l'azote mesuré en ammoniacque (NH_4) et nitrates (NO_3), on peut en conclure que l'ammoniacque se comporte de façon largement indépendante de la teneur en eau dans le sol. Cependant, pour l'échantillonnage effectué le 26 juillet 2005, la corrélation est très forte dans l'horizon inférieur du sol. Au contraire, les nitrates (NO_3) représentent la fraction de l'azote effectivement corrélée. Ceci est particulièrement net dans la zone de profondeur 30-60 cm ($R^2 = 0,74$ et $0,8$).

Ceci est possible car les nitrates (NO_3) sont extrêmement mobiles dans le sol et peuvent ainsi être influencés par la capacité de rétention d'eau du sol. C'est pourquoi ils sont sensibles au lessivage. Au contraire, l'ammoniacque (NH_4) n'est que très faiblement déplacé et ne peut donc quasiment pas être lessivé. Par conséquent, le manque de corrélation avec la capacité de rétention d'eau est plausible (Fig. 130)

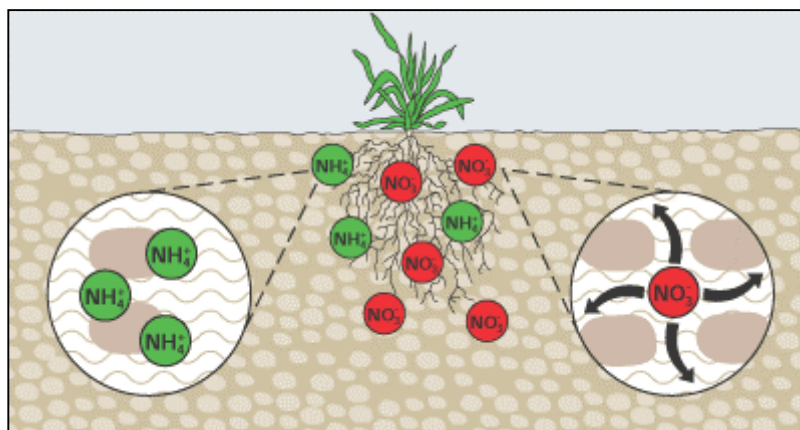


Fig. 130 : Propriétés de l'ammoniacque et des nitrates dans le sol

En principe, les plantes peuvent utiliser l'ammoniacque (NH_4) tout autant que les nitrates (NO_3). Les racines doivent cependant d'abord se développer jusqu'à l'ammoniacque (NH_4) non mobile avant qu'il ne puisse être assimilé aux abords immédiats de la zone racinaire. Au contraire, l'azote sous forme nitrates est facilement mobile dans le sol et peut atteindre la zone racinaire dans la solution du sol. En raison de cette propriété favorable aux

végétaux, c'est l'absorption des nitrates qui est dominante chez la plupart des espèces végétales. Toutefois, le danger de lessivage pour cette forme d'azote par les eaux de percolation est particulièrement élevé, en raison de la forte mobilité des nitrates. La disponibilité en nitrates dépend ainsi également de la disponibilité en eau, ce que les analyses de corrélation ont aussi établi.

On peut donc résumer qu'une relation entre la distribution de l'azote et la distribution de l'eau disponible existe en particulier pour les horizons intermédiaires du sol, lorsque les collectes sont relativement rapprochées, ce qui signifie qu'avec un intervalle d'un an seulement les relations sont reconnaissables par similitude. Dans le cas d'un intervalle d'environ 4 mois, des corrélations peuvent être établies dans le présent exemple.

Ainsi, la dynamique de la distribution entre l'azote et l'eau est en fait assez lente. S'il était possible d'établir par une amélioration de la méthode une corrélation claire entre la maturation établie à partir des images aériennes et l'humidité du sol, on pourrait imaginer de tirer des conclusions sur la distribution des reliquats d'azote. Par ce biais, on pourrait imaginer de réduire l'énorme charge de travail nécessaire à la détermination intraparcellaire des reliquats d'azote grâce à l'utilisation d'images aériennes. Cette approche doit être étudiée plus avant.

Par ailleurs, **la teneur en carbone** de la plante dépend de l'alimentation en eau du sol (Tab. 21).

R ²		Mesures d'humidité du 26.07.05			Mesures d'humidité du 27.07.05		
		0-30cm	30-60cm	60-90cm	0-30cm	30-60cm	60-90cm
Rendement 2004		0,002	0,006	0,001	0,007	0,005	0,050
Grain	Teneur en N	0,001	0,007	0,008	0,000	0,000	0,116
	Teneur en C	0,077	0,093	0,251	0,137	0,204	0,019
Plante	Teneur en N	0,028	0,074	0,049	0,043	0,052	0,038
	Teneur en C	0,694	0,703	0,327	0,561	0,646	0,680

Tab. 21 : coefficient de détermination de la répartition du rendement 2004 et des teneurs en N et en C de la plante et du grain (2004) à partir de la corrélation avec les mesures d'humidité

Enfin, aucun des résultats des nombreuses autres sous-études portant sur la variabilité n'a de pertinence du point de vue de la mise en œuvre de la modulation des intrants. C'est pourquoi ces résultats ne sont pas présentés ici.

3.2.2 Résultats relatifs à la faisabilité de la modulation

Les résultats relatifs à la faisabilité de la modulation vont de pair avec l'examen de l'impact de la modulation. Ils s'organisent comme suit :

- un examen de l'aptitude à **un usage pratique de l'approche cartographique**
- un examen de l'aptitude à **un usage pratique de l'approche online**

pour la mise en œuvre de la modulation dans les conditions particulières dans la plaine du Rhin Supérieur.

Les résultats relatifs à l'**aptitude à un usage pratique de l'approche cartographique** s'organisent selon la description :

- des complications intervenues
- du potentiel d'extension de la méthode vers une exploitation en îlots de parcelles
- du potentiel lié à l'intégration d'une simulation de la croissance et
- d'une synthèse des solutions possibles d'évaluation de l'approche cartographique dans la pratique.

Les résultats relatifs à l'**aptitude à un usage pratique de l'approche online** s'organisent selon la description :

- des complications intervenues
- du potentiel d'amélioration de la méthode
- du potentiel d'intégration d'autres méthodes online
- d'une synthèse des solutions possibles d'évaluation de l'approche online dans la pratique.

3.2.2.1 Aptitude à un usage pratique de l'approche cartographique

3.2.2.1.1 Complications

Complications lors de la collecte de données de rendement à la récolte en tant que paramètre d'entrée

La détermination de la variabilité du rendement à la récolte est nécessaire dans le cadre de la mise en œuvre de la modulation de la fertilisation azotée par l'approche cartographique selon les bonnes pratiques agricoles.

Des complications de collecte de ces données se sont produites lors des présents essais. En particulier, la nécessité de configurer préalablement un support informatique provoque des doutes sur une manipulation opérationnelle de la technique.

En premier lieu, il est incompréhensible qu'il soit nécessaire avec le système utilisé de préparer les instructions de commande du battage sur un PC externe. D'une part, ceci engendre dans une structure agricole réduite un énorme temps de préparation supplémentaire. Deuxièmement, dans notre situation comportant des parcelles de petite taille, les travaux de récolte sont constamment interrompus par la nécessité de mettre en mémoire des instructions préparées à l'avance différentes pour chaque parcelle. D'autre part, le système de la moissonneuse-batteuse comprend les coordonnées de localisation et le débit récolté indépendamment des autres paramètres nécessaires.

On pourrait donc imaginer que ces données seraient collectées puis stockées dans un fichier généré par le système pour chaque lieu, sans qu'il soit nécessaire de disposer pour cela d'un fichier (vide) préparé à l'avance. Cette méthode permettrait de réduire au maximum le travail préparatoire. Les erreurs liées à la conversion des données seraient évitées.

De plus, l'utilisateur a du mal à comprendre pourquoi deux systèmes différents d'ordinateurs de bord se trouvant sur la même moissonneuse-batteuse ne peuvent pas fonctionner avec des fichiers d'entrée identiques ou compatibles, si ceux-ci doivent impérativement être préparés à l'avance. Il serait appréciable qu'un fichier préparé à l'avance ne définisse le choix du système d'ordinateur de bord que lors de la lecture sur place.

Sur ce point, on peut se demander ce que ceci implique pour le déroulement des tâches dans une exploitation équipée comme dans le cas présent de deux systèmes d'ordinateur de bord différents, lorsque les machines doivent pouvoir être utilisées souplement selon les besoins et que pour chaque parcelle à travailler, toutes les tâches informatiques doivent être exécutées en double.

Il serait souhaitable d'améliorer le système de sorte que, en particulier lors de la phase de *collecte* des données comme c'est le cas lors de la moisson, les fichiers de données de mesures soient générés automatiquement, sans que l'utilisateur ait besoin de se préoccuper des problèmes d'initialisation, de configuration et de conversion.

Toutes ces informations étant connues sur la moissonneuse-batteuse, une telle solution ne devrait pas poser de problème technique.

En outre, du point de vue du présent projet, le fait que la mise en mémoire des données brutes collectées ne soit en fin de compte possible que sur le PC ayant servi à créer le fichier d'entrée constitue un obstacle. Dans notre cas, le support des données (carte PCMCIA) devait d'abord être lu par le PC de bureau de l'entrepreneur avant que les données ne puissent être transmises à un autre ordinateur pour être retravaillées dans le cadre du projet.

L'utilisateur souhaiterait disposer d'un système un peu plus souple. Il existe sinon des risques de complications, en particulier lorsque des utilisations non prévues par le programmeur s'avèrent nécessaires.

Par ailleurs, dans le cadre des complications pouvant intervenir lors de la collecte des données de rendement à la récolte afin de servir de paramètre d'entrée, on ne peut jusqu'à présent pas exclure des erreurs lors de la collecte dans la zone de retournement de la moissonneuse. Au cours du projet, un décalage temporel de la collecte des données s'est révélée lorsqu'on a relevé au sein d'un set de données brutes des valeurs de mesures pour des zones situées à l'extérieur de la parcelle, là où il n'y avait pas de maïs. Ce retard de mesure est dû au fait que le vidage de la vis de l'élévateur de la MB nécessite un certain délai en bout de parcelle.

Complications lors de la collecte des reliquats d'azote en tant que paramètre d'entrée

Comme cela est expliqué dans le chapitre 3.2.1, la collecte au niveau intraparcellaire des reliquats d'azote représente une charge de travail importante. La nécessité de collecter ce paramètre dans des délais aussi brefs que possible avant l'application ne se révèle pas vraiment adaptée à des objectifs pratiques. Ceci peut poser des problèmes de mise à disposition dans les temps des cartes d'application. Tout comme l'analyse des données, la

collecte des données même par le biais du prélèvement d'échantillons constitue un processus de routine, réalisable sans problèmes.

Ainsi, le problème de la collecte des données de reliquats d'azote n'est pas d'ordre technique mais repose sur un manque d'adaptation à la pratique lié à une charge de travail élevée.

Complications lors de la mise en œuvre technique de 2003

La réalisation réussie de la modulation de la fertilisation azote par l'approche cartographique (méthode offline) pour l'année 2003 a été décrite dans le chapitre 2.1.2.3 (1). Les différentes complications survenues au cours de cette étude sont résumées ci-dessous.

Dans ce cadre, on peut dire que le succès de la fertilisation azotée intraparcellaire réalisée concerne en premier lieu la mise en œuvre elle-même. Les nombreux problèmes intervenus au cours de la réalisation ont constitué une source d'insatisfaction dans le sens où ils s'opposent à l'obtention de solutions réalisables et opérationnelles, qui représentent le but final du projet.

Ci-dessous sont décrites les insuffisances rencontrées, afin d'en tirer des propositions d'amélioration. Les problèmes intervenus concernent avant tout :

- la standardisation des connecteurs
- la capacité de compensation d'erreurs des systèmes utilisés
- la convivialité et la prévention des erreurs
- la facilité d'utilisation intuitive

Afin de bien comprendre le sens des complications, des détails sur leur survenue sont présentés ci-dessous.

La première complication concerne la **standardisation des connecteurs**. Pour préparer l'essai, le matériel informatique et les logiciels ont été installés sur le tracteur. D'abord, il a fallu fixer l'ordinateur de bord ACT au support prévu sur le tracteur, auquel se trouvait attaché l'épandeur d'engrais Bogballe MR 3. De plus, l'ordinateur de bord a dû être démonté d'une moissonneuse CLAAS Lexion, sur lequel il se trouvait encore depuis la saison précédente. Sur cette machine, il avait été utilisé en dernier lieu pour la cartographie des rendements.

Après la fixation de l'ordinateur ont été connectés l'alimentation électrique et la connexion de l'antenne. Lorsqu'en fin de compte il s'est agi de connecter le câble d'interface au nouvel épandeur d'engrais, il s'est avéré que le type de connecteur avec le nouvel appareil (par rapport à celui utilisé au cours de la saison précédente) avait été modifié. La prise auparavant standard ne pouvait pas être utilisée pour la connexion avec le nouvel épandeur Bogballe MR3.

Les magasins d'informatique étant relativement rares à proximité des vastes étendues agricoles, l'obtention d'un câble adapté a représenté une perte de temps non négligeable. Dans le contexte d'une profession agricole largement surchargée de travail, un tel détail apparemment insignifiant ne contribue pas vraiment à soulever l'enthousiasme envers des innovations si pertinentes, ce qui dans le cas présent n'a pas été seulement visible, mais également audible.

On aurait pu espérer que, dans le cadre de la transition vers un nouveau modèle de la même marque de l'épandeur d'engrais précédent, des problèmes de connexion ne soient pas rencontrés. Lorsqu'une modification du connecteur est nécessaire, sans doute pour de bonnes raisons, il devrait tout de même aller de soi que le nouveau connecteur soit directement livré avec le nouveau modèle d'appareil correspondant, ou que la question soit au moins posée à l'acheteur.

Le manque de **capacité de compensation d'erreurs du système** a représenté une autre source de complication. Au terme de la connexion de tous les composants « hardware », l'ordinateur de bord « ACT » devait être booté. Ceci s'est avéré impossible, même après de nombreux essais et de nombreuses vérifications. Le processus de boot était à chaque fois interrompu par une « erreur fatale », ce qui interdisait de l'éteindre à l'aide du logiciel.

Après avoir de cette manière momentanément consommé non seulement du temps, mais également mis à l'épreuve les nerfs et les dispositions envers l'innovation de l'entrepreneur, l'agriculteur concerné a finalement vérifié le fonctionnement de l'appareil sur la moissonneuse-batteuse CLAAS Lexion, sur laquelle l'ACT était utilisé précédemment. Ce détail apparemment négligeable a toutefois demandé du temps, car tous les connecteurs ont dû être déconnectés puis réinstallés sur la moissonneuse-batteuse. En outre, en dépit des fixations rapides, le montage et le démontage de l'appareil sont difficiles, car les mouvements sont très limités à l'intérieur d'une petite cabine d'engin agricole.

Après que l'ACT ait finalement pu être démarré dans le Lexion, le processus de boot s'est déroulé de manière totalement normale.

Il s'est alors avéré que l'appareil avait été auparavant éteint avec un processus (job) correspondant à l'environnement de la moissonneuse-batteuse. Après avoir terminé ce processus resté inachevé, arrêté l'ordinateur de bord puis l'avoir remonté péniblement dans l'engin prévu, il a finalement pu être démarré sur le tracteur couplé à l'épandeur d'engrais.

Imaginons qu'il ne serait plus possible de remettre en marche un PC de bureau seulement parce qu'on aurait par exemple commencé une impression qui ne serait pas complètement achevée au moment où l'on éteindrait l'ordinateur, et qu'on se serait entre-temps permis de débrancher le câble de l'imprimante.

Un tel processus ne causerait de problème aussi contraignant sur aucun PC de bureau normal.

On ne peut pas considérer comme drôle le fait qu'un ordinateur de bord réagisse par une interruption insurmontable de la procédure de boot sur un lieu de travail complexe, simplement parce qu'auparavant un processus a été effectué de travers, alors que la même procédure sur un ordinateur de bureau et dans des conditions de travail détendues n'aurait eu aucune conséquence à l'exception d'une demande de confirmation.

Si l'on prend conscience de la pression en termes de temps sous laquelle travaille un entrepreneur, lorsqu'il se trouve au sein d'une phase de travail intensive comme par exemple la fertilisation azotée, on se rend compte que de telles carences peuvent conduire non seulement à une aversion envers un système qui peut par ailleurs être de bonne qualité, mais aussi à des pertes de temps difficiles à compenser. Une erreur d'utilisation insignifiante de ce type ne doit jamais aboutir à des conséquences aussi importantes dans un système se voulant opérationnel.

De plus, certaines complications sont issues du **manque de convivialité et de prévention des erreurs** : immédiatement après qu'on soit enfin parvenu à effectuer la procédure de boot sur l'ordinateur de bord « ACT » est apparu un nouveau problème, dans la mesure où c'est alors la communication avec l'ordinateur de bord de l'épandeur d'engrais Bogballe qui ne fonctionnait pas.

Après des tests empiriques sur de nombreux paramètres, il s'est avéré qu'une interface était erronée dans l'instruction de fertilisation de la carte d'application. Le paramètre a dû être modifié de « LBS » en « RS323 ». La correction de cette méprise aurait été relativement aisée si, - comme on pourrait s'y attendre -, elle avait pu être effectuée directement sur l'ordinateur de

bord ACT. Cependant, il s'avère que l'instruction de fertilisation est définie dans le logiciel « Agromap-Basic » sur un PC de bureau puis qu'elle est irrévocablement transmise à l'ordinateur de bord via une carte PCMCIA.

Une modification ultérieure, si petite soit elle, est donc impossible à effectuer sur l'ordinateur de bord du tracteur. Dans le cas présent, il a également fallu réécrire complètement l'instruction de fertilisation de la carte d'application existante. Toutes les données étaient heureusement disponibles sur un ordinateur portable, ce qui a permis la réécriture sur site.

Il est proposé de modifier le logiciel de telle sorte que les paramètres importants puissent être entrés directement dans l'ordinateur de bord. Ceci devrait concerner au minimum les paramètres qui sont indispensables à une mise en œuvre sur site, indépendamment du contenu de la carte d'application. De plus, une reconnaissance automatique du « matériel » serait un avantage, car elle permettrait à l'interface de l'ordinateur de bord de s'adapter à l'engin agricole correspondant par le biais d'une courte interrogation des paramètres.

Dans le même ordre d'idées, on peut imaginer qu'un entrepreneur soit en route vers ses parcelles et qu'un des paramètres de l'interface destinée à l'instruction de fertilisation soit par mégarde incorrect. On peut qualifier d'excessif le fait qu'il doive pour cela retourner à l'exploitation, éteindre l'ordinateur de bord, mettre en marche son ordinateur de bureau, éditer à nouveau la commande de fertilisation pour l'application prévue, pour finalement pouvoir l'utiliser par le biais de la carte PCMCIA.

La faible **facilité d'utilisation intuitive du système** a également constitué une complication.

Lorsque tout le matériel informatique nécessaire fut enfin installé et mis en état de communiquer par le biais du logiciel disponible, il a été possible de voir sur l'écran que l'instruction de fertilisation était prête pour la première parcelle à travailler. Puis il fut décidé de réaliser un passage d'essai à vide afin de vérifier si les valeurs prédéfinies dans la carte d'application étaient également mises en œuvre par l'épandeur d'engrais.

Sur place cependant, l'entrepreneur n'a dans un premier temps pas été en mesure d'activer la fonction de fertilisation choisie de telle sorte que l'épandeur d'engrais conserve les informations nécessaires, ce qui peut être identifié grâce au fait que la carte d'application soit également lue par le système, et qu'elle est alors également visible sur l'écran de l'ordinateur de bord ACT.

Sans analyser plus avant l'origine de ce problème, il faut retenir ici que l'exploitant, ouvert à l'innovation et habitué à l'outil à la suite de la cartographie des rendements, n'a pas été en mesure d'effectuer cette procédure.

Peu avant l'interruption de l'essai, un « essai à tâtons » incontrôlé, chargé d'émotion et plutôt fortuit a finalement permis d'aboutir. Il serait au-delà des limites de l'acceptable de qualifier ceci d'utilisation intuitive.

Lors du second essai à vide, le système a finalement parfaitement fonctionné.

Le test a ensuite été interrompu et le réservoir de l'épandeur rempli. Lors de l'arrivée suivante sur la parcelle, le même problème s'est finalement présenté à nouveau, car l'activation n'était pas reproductible suite à l'expérience issue de la procédure précédente.

Comme précédemment, ce sont les manœuvres plus ou moins improvisées de l'exploitant, devenu entre-temps relativement impatient, qui ont permis d'aboutir.

Le problème suivant s'est présenté immédiatement à la suite du travail de la parcelle : les instructions de fertilisation pour chaque parcelle d'essai figuraient bien dans la liste des instructions disponibles, mais aucune des nombreuses tentatives n'a permis de sélectionner l'instruction destinée à la seconde ou à la troisième parcelle.

Quoi qu'il en soit, la robustesse de l'ordinateur de bord ACT a été clairement démontrée à ce moment. Le boîtier est capable de supporter n'importe quelle secousse, quelle que soit son origine. Le problème n'a pas pu être résolu directement.

C'est pourquoi le portable qu'on avait heureusement emmené a été démarré et les instructions de fertilisation à nouveau lues sur la carte PCMCIA. Seule l'instruction correspondant à la prochaine parcelle à travailler était transmise à l'ordinateur de bord par le biais de la carte.

De cette manière, cette instruction se trouvait à la première place de cette liste qui ne comprenait alors plus que cette instruction, pour que, par ce moyen, seules les données pour la parcelle à travailler immédiatement après puissent être lues et activées.

De même, dans la précipitation, la carte a été vidée après chaque parcelle sans contrôler si la fertilisation effectuée était enregistrée par le système à des fins de vérification. Dans ce cas, les données correspondantes étaient irrémédiablement perdues.

Dans les conditions décrites ci-dessus, la fertilisation intraparcellaire des trois parcelles d'essai, d'une surface totale de 4,5 ha environ, a pris environ cinq heures. Cette durée est à confronter avec les déclarations de l'entrepreneur qui au cours d'une journée de travail habituelle vient à bout de 50 à 75 ha selon les circonstances.

En résumé, on peut affirmer que dans le cas présent, la mise à disposition des données par le biais du portable a été d'une importance décisive en raison des nombreux impondérables.

Lors de la fertilisation intraparcellaire, un nouveau problème a été rencontré à chaque étape de la procédure à suivre. Aucune des étapes n'a pu être effectuée sans rencontrer de complication.

Le résultat des essais de la fertilisation modulée au cours de l'année 2003 pourrait être exprimé de la manière suivante : une mise en pratique technique de l'approche cartographique est en principe possible, mais la méthode réalisée est tout sauf adaptée à la pratique dans un contexte de structure agricole de taille réduite tel qu'on le rencontre dans la plaine du Rhin.

Complications lors de la mise en pratique technique 2004

En 2004, la modulation des intrants a été réalisée sur la base de cartes d'application d'azote interparcellaires selon les méthodes offline (bonnes pratiques agricoles).

Parmi les complications rencontrées au cours de cette étude figure la fertilisation forfaitaire imprévue de deux des trois parcelles décrites dans la section 2.1.2.3 (2), qui a donné lieu à des complications d'ordre organisationnel, ainsi qu'entre exploitants et entre personnes. Ceci montre qu'un cadre de travail clair est indispensable pour la réalisation de mesures interparcellaires telles que la fertilisation azotée basée sur l'exploitation d'îlots de parcelles, de telle sorte que la coordination et la coopération puissent fonctionner. Un manque d'identification avec les méthodes d'exploitation des « autres » pouvant aller jusqu'à un scepticisme méfiant, une indépendance souveraine, une liberté relative aux décisions et aux dates de réalisation des mesures allant jusqu'à l'entêtement peuvent générer des problèmes concernant des arrangements communs, des compétences, des responsabilités et tous les ajustements en rapport avec une collaboration inter-exploitations. En particulier, les difficultés de communication semblent constituer un frein important à la mise en œuvre inter-exploitations de la modulation des intrants. On peut mentionner à titre d'exemple qu'il semble quasiment impossible pour les exploitants impliqués de respecter un rendez-vous.

Il est déjà difficile d'éviter la complication décrite, si quelqu'un s'instaure responsable pour la réalisation d'interventions, alors qu'il n'a pas été désigné pour cela par les propriétaires. Les infrastructures nécessaires doivent également être créées, incluant des modes d'information bien définis, des responsabilités durablement établies avec des compétences et des instruments adaptés.

Par bonheur, la liste des complications intervenues lors de la **mise en œuvre concrète** a pu être fortement réduite par rapport à l'année précédente :

Contrairement à la fertilisation intraparcellaire de l'année passée, l'ordinateur de bord « ACT » était déjà installé sur le tracteur de l'entrepreneur et connecté à l'épandeur d'engrais Bogballe. On a utilisé le même tracteur (JBC - Fasttrac à pneus étroits) et le même épandeur (Bogballe MR3) que lors de l'étude 2003. Grâce à l'expérience acquise en 2003, les problèmes survenus alors ont pu être largement évités. Il a aussi été possible de paramétrer correctement à l'avance tous les paramètres du logiciel.

Ainsi, lors de la réalisation de l'essai, la carte d'application s'est tout de suite affichée sur l'écran de l'ACT après lecture de l'instruction de fertilisation, ce qui signifie que l'information d'application est disponible. Le symbole de contrôle de la réception satellitaire était également visible dans la ligne d'état. Toutes les conditions étant remplies pour le déroulement de l'application intraparcellaire d'azote, l'essai de fertilisation put commencer.

Lorsque l'entrepreneur eût achevé l'épandage aux limites de la parcelle (une fois le tour de la parcelle), on remarqua sur l'écran du calculateur de l'épandeur que la dose forfaitaire préalable de 300 kg/ha était restée inchangée depuis le début.

L'entrepreneur se souvint alors que lors de l'essai de l'année précédente, la position de l'épandeur était indiquée par une petite croix sur la carte d'application, ce qui n'était pas le cas cette fois-ci.

Un technico-commercial de la société Agrocom se trouvait heureusement sur les lieux lors de l'essai, car le capteur pendulaire était testé le même jour. Grâce à la présence de ce

collaborateur compétent et du recours supplémentaire à une aide en ligne de la société Agrocom, le problème put enfin être résolu après 20 mn d'analyse intensive.

Il était inattendu que la recherche de la cause du problème se révèle compliquée, car toutes les conditions pour la réalisation de l'essai de fertilisation avaient été testées à l'avance et que tout était en ordre. Il apparut finalement qu'un faux-contact au niveau d'un connecteur était responsable de l'absence de réaction de la carte d'application. On peut se demander si la cause aurait pu être identifiée sans l'aide compétente du technico-commercial et du soutien en ligne fourni par son intermédiaire par la société Agrocom. Après réparation de l'erreur, le système fonctionna enfin parfaitement (Fig. 131).



Fig. 131 : application d'engrais au niveau intraparcellaire du 7 juin 2004 ; on distingue le capteur pendulaire (non utilisé ici) à l'avant du tracteur

La modulation de la fertilisation azote en 2004 montre ainsi que, malgré l'expérience et le soin, des complications inattendues ne sont pas à exclure. La **sensibilité du système** mise en évidence à cette occasion, en particulier lors de l'installation et de la première mise en service, a des répercussions d'autant plus grandes que l'analyse d'une panne possible s'avère complexe et difficile pour l'utilisateur. Sur la base de l'essai actuel, l'approche technique à mettre en œuvre doit être qualifiée de complexe. Les erreurs ne sont pas à exclure, en dépit de procédures suivies avec soin. Toutefois, l'analyse de ces erreurs peut se révéler extrêmement lourde et coûteuse en temps.

Si de telles erreurs se reproduisaient plusieurs fois au cours de l'exploitation d'un îlot de parcelles à petite échelle, il est certain qu'elles signifieraient l'arrêt de la mise en œuvre d'une telle technique, surtout pour des raisons de pertes de temps et de démotivation.

Une fois en service, le système a fonctionné de façon stable en 2004, sachant que l'on n'a toutefois procédé à aucun changement de carte d'application.

On peut tout de même confirmer que la carte d'application peut être établie pour plusieurs parcelles à la fois en vue d'une exploitation en îlots, ce qui a pour conséquence de diminuer fortement la durée de préparation. On peut également imaginer une prise en charge interparcellaire. Elle devrait cependant être retestée avec succès en 2005.

Complications lors de la mise en pratique technique 2005

Comme il a été décrit précédemment, la mise en œuvre de l'intervention de fertilisation intégrant le modèle de croissance (Apollo) était possible en 2005. Pour cela, une zone plus importante de la parcelle I-01 devait être exclue de la fertilisation, parce qu'elle avait été fertilisée préalablement par le propriétaire avec un engrais à effet retard (Entec), à l'encontre des recommandations faites.

Comme l'année précédente, ceci constitue à nouveau un exemple d'une problématique primordiale en rapport avec la capacité de mise en œuvre de la modulation des intrants, car certains exploitants qui ont d'un côté un comportement coopératif montrent de l'autre côté des difficultés à se tenir à une stratégie commune, si cela limite trop fortement la préférence de leurs propres choix.

Toutefois, il était surprenant de constater que dans environ un tiers de cette parcelle traitée hors du calendrier prévu, le fertilisant présent (Entec) était déjà lessivé au moment de la fertilisation, et n'était plus disponible. Cette zone a pu être prise en compte lors de la fertilisation, et refertilisée grâce à une navigation GPS précise. Dans le reste de la zone, la minéralisation était au contraire plus avancée que prévu, ou bien alimentée par les zones lessivées.

Sur les parcelles qui ont pu être fertilisées selon le protocole de l'étude, la mise en œuvre de la mesure s'est déroulée sans véritable complication, contrairement à l'année précédente.

Après le montage de l'ordinateur de bord « ACT » et la lecture de la carte d'application préparée, il a bien été nécessaire de rechercher un petit peu dans les menus pour parvenir à activer la carte d'application.

Lorsqu'on ne travaille pas régulièrement avec l'ACT, l'**utilisation intuitive** cause quelques soucis, comme cela avait déjà été constaté en 2003. L'interface utilisateur du logiciel n'est de toute évidence pas très claire pour l'utilisateur. Cependant, la mise en marche de la carte d'application s'est déroulée sans grande perte de temps, contrairement aux deux années précédentes. Le signal GPS ainsi que la communication avec l'épandeur d'engrais ont fonctionné immédiatement.

Il était intéressant de voir que l'entrepreneur a semblé pour ainsi dire enthousiaste lorsque, sur la parcelle I-01 fertilisée hors du calendrier prévu, il a pu grâce au système de navigation GPS revenir exactement sur les zones à refertiliser suite au lessivage de l'engrais Entec. De même, sa satisfaction était visible lorsque le passage dans les différents rangs a pu être identifié par une croix parfaitement positionnée sur la carte d'application.

Comme cela avait été encouragé par les résultats des essais de l'année précédente, l'adaptation de la méthode à une utilisation pour l'exploitation d'îlots de parcelles a pu être confirmée. En effet, les applications sur les trois parcelles ont également été intégrées au sein d'une instruction d'application interparcelle unique, avec laquelle la mesure a pu être mise en œuvre sur les trois parcelles.

D'autres résultats relatifs au succès de la fertilisation effectuée dans le cadre de l'essai n'ont été mis en évidence qu'à l'automne 2005, une fois la récolte effectuée. La poursuite du suivi des parcelles relève de l'Université de Hohenheim, car à ce moment, le rapport final devait déjà être achevé et qu'il n'était plus possible de prendre en compte les dernières analyses de cet essai intéressant.

Globalement, il est clair que les complications se réduisent fortement au cours de l'année d'étude, et donc avec une expérience grandissante. Il demeure toutefois un « risque résiduel »

dû à des complications imprévisibles, contre lesquelles une expérience plus importante est insuffisante.

Complications liées à la pratique de préconisation d'une dose minimale lors de l'application

Comme cela est décrit dans la section 2.1.2.4 (2), il a été montré que les préconisations de doses minimales ont un impact important sur la carte d'application résultante.

La comparaison de toutes les variantes examinées de dose minimale préconisée pour les reliquats d'azote et des rendements potentiels attendus permet d'estimer l'ordre de grandeur de l'impact correspondant sur la carte d'application (tableau 22).

Moyenne kg urée/ha	Au moins 0	Au moins 100
Rendement potentiel attendu entré de façon différentielle	151,48	174,24 (115,1 %)
Rendement potentiel attendu entré forfaitairement à 120q	71,03 (46,9 %)	172,02 (242,2 %) (98,73)

Tab. 22 : influence des conditions sur les doses de fertilisant

Si le rendement potentiel attendu est entré de façon différentielle, la définition d'un seuil minimal de 100 kg d'urée/ha entraîne dans ce cas une augmentation de la fertilisation de 15,1 %. Lorsqu'il est simplement entré sous forme d'un rendement forfaitaire, la fertilisation est quasiment multipliée par 2,5.

Si aucun seuil d'application n'est défini, la dose d'engrais calculée est réduite à 46,9 % si l'on renonce à la distribution différenciée en intraparcellaire du rendement potentiel attendu. L'application calculée reste quasi-inchangée pour une valeur seuil de fertilisation d'au moins 100 kg d'urée/ha.

On peut ainsi constater, que, malgré une utilisation correcte des bonnes pratiques agricoles et des calculs précis intraparcellaires à l'échelle du pixel, les doses d'application varient très fortement ou peuvent être largement influencées par la mise en place de conditions-cadres ! Ces conditions, qui peuvent être fixées spontanément sur le site, peuvent selon les circonstances influencer dans un rapport multiplicatif les résultats des calculs au niveau intraparcellaire, dont l'obtention requiert du temps et de la précision. Ceci ressort également de l'examen des figures 100 – 103 (page) (chapitre 2.1.2.4 (2)).

C'est pourquoi il est nécessaire de poser la question fondamentale, à savoir si une méthode intraparcellaire de modulation des intrants doit uniquement entraîner une différenciation intraparcellaire de la dose d'engrais prédéterminée au sein de la parcelle, ou bien si dans un cadre qui serait à discuter, le niveau de la dose d'application doit également être fixée.

Un résultat similaire se dégage de l'examen de l'influence de conditions-cadres sur la gamme de dose de fertilisation (Tab. 23). On constate là aussi une réduction considérable (44,5 %) en cas de distribution non différenciée du rendement sans valeur-seuil, mais une réduction très faible (95,08 %) pour un seuil de 100 kg d'urée/ha. Lorsque le rendement potentiel attendu est entré directement de façon différentielle, la gamme se réduit fortement (66,03 %) en raison de la mise en place de la valeur-seuil, alors qu'elle augmente jusqu'à 141,06 % en cas de rendement potentiel attendu défini forfaitairement.

L'influence des conditions-cadres sur la gamme n'est pas non plus négligeable, ce qui est clairement mis en évidence par les figures 100 –103 (chapitre 2.1.2.4 (2)).

Gamme kg urée/ha	Au moins 0	Au moins 100
Rendement attendu entré de façon différentielle	294,36	194,36 (66,03 %)
Rendement attendu entré forfaitairement à 120g	131,00 (44,5 %)	184,79 (141,06 %) (95,08 %)

Tab. 23 : influence des conditions-cadres sur la gamme des doses de fertilisant

En raison du niveau des reliquats d'azote dans le sol, il peut arriver qu'on obtienne pour certains pixels des valeurs négatives d'application d'azote à la suite du calcul selon les « bonnes pratiques agricoles ». Comme il est impossible d'extraire de l'azote du sol au cours de la fertilisation, il est nécessaire d'adapter un seuil minimal à ces valeurs, en principe la valeur d'application « 0 ». Le tableau 24 montre le pourcentage des valeurs à adapter pour des rendements potentiels attendus et des seuils minimaux entrés de différentes manières.

% des valeurs devant être adaptées	Au moins 0 kg urée/ha	Au moins 100 kg urée/ha
rendement potentiel attendu entré de façon différentielle	13,95 %	25,58 %
Rendement potentiel attendu entré forfaitairement à 120g	13,95 %	23,25 %

Tab. 24 : pourcentage de la surface ayant reçu des doses trop importantes par rapport au calcul basé sur les bonnes pratiques agricoles

Dans le cas présent, les valeurs à adapter représentent de 13,95 à 25,58 % de la surface, ce qui est assez élevé. Ceci signifie que dans la fraction de parcelle correspondante, la fertilisation n'est pas adaptée aux besoins (trop importante) par rapport au calcul intraparcellaire.

Malgré une méthode d'exploitation intraparcellaire, l'application est trop élevée sur environ 14 % de la surface, à cause des trop fortes valeurs antérieures de reliquats d'azote dans le sol. En raison du seuil prédéfini, 12 % supplémentaires de la surface reçoivent une application trop élevée vis-à-vis du calcul intraparcellaire selon les bonnes pratiques agricoles.

Il est donc démontré que les doses minimales préconisées peuvent avoir un impact considérable sur l'application qui en résulte. Il est nécessaire de déterminer dans quelle mesure il est pertinent de collecter tous les paramètres possibles de manière soignée et fortement différenciée, alors que des doses minimales préconisées forfaitairement et seulement grossièrement estimées définies par l'entrepreneur peuvent massivement influencer l'application.

Cette pratique constitue une entrave sérieuse à la modulation des intrants adaptée aux besoins.

3.2.2.1.2 Potentiel lié à l'extension de la méthode en direction d'une exploitation en îlots de parcelles.

La carte d'application pour la modulation des intrants a été préparée à l'échelle *parcellaire* en 2003 et à l'échelle *interparcellaire* en 2004 et 2005.

Cette modification a été causée par l'énorme surcroît de travail nécessaire à l'établissement de cartes de rendement pour chaque parcelle. Comme cela a été décrit, on n'a pas uniquement établi qu'il était possible de réaliser la préparation au niveau interparcellaire, mais on a également montré qu'elle permettait un gain de travail extrêmement important lors de la mise en œuvre de l'intervention.

En 2004, le calcul de la carte d'application selon les « bonnes pratiques agricoles » a pu être effectué dans une *unique* feuille de calcul du tableur. Il n'a été nécessaire de fournir à l'ordinateur de bord du tracteur qu'une carte d'application, ce qui a permis de supprimer l'étape de modification de la carte, toujours source de conflit potentiel. L'élaboration de tous les résultats et de tous les paramètres de contrôle collectés en même temps a également pu être effectuée de manière commune pour toutes les parcelles, permettant un gain de temps considérable.

Si l'on souhaitait intégrer un îlot de parcelles complet dans la modulation des intrants, il serait très avantageux, en raison de la taille réduite des parcelles, d'organiser en commun l'échantillonnage des reliquats d'azote qui est de toute manière indispensable, pour ainsi calculer par interpolation la répartition intraparcellaire des reliquats d'azote.

Bien que l'étude sur la réduction de la durée de collecte des reliquats d'azote ait montré que la précision *pouvait* varier fortement selon le maillage de l'échantillonnage, il ne doit pas être perdu de vue que la précision de la représentation de la variabilité des reliquats d'azote serait très largement améliorée par rapport à la pratique actuelle, grâce à l'intégration par interpolation de toutes les données disponibles d'un îlot de parcelles. Chaque valeur étant reliée aux valeurs voisines, les valeurs extrêmes déterminées fortuitement (valeurs minimales ou maximales des valeurs réelles au sein d'une parcelle) ne sont plus transposées forfaitairement sur la surface, mais en fonction de leur distribution spatiale mesurée. Du fait de l'interpolation, on obtient finalement davantage de valeurs simulées que de valeurs mesurées. Lors de la mise à jour d'une carte d'application interparcellaire, ces différences ne sont pas seulement considérées. Elles sont aussi réellement appliquées de façon adaptée par le biais de la technique d'application, ce qui paraît bien plus important, car on peut se demander si les recommandations de fertilisation sont toujours suivies dans la pratique, ce que font également craindre les résultats de l'enquête réalisée. Ce dernier point vaut encore davantage pour l'Alsace que pour le Bade.

En fin de compte, si les îlots sont suffisamment grands, il devrait aussi être possible de minimiser le surcoût de réalisation de la carte d'application de telle sorte que le prix/ha obtenu soit supportable et adapté à la pratique. On ne discutera pas ici plus avant des complications possibles pouvant intervenir en aval, qui ne pourraient être résolues que de manière coopérative et coordonnée par des exploitants isolés et autonomes. Dans l'optique d'une poursuite réussie de la mise en œuvre de la modulation des intrants dans les conditions données, les résultats de l'étude constituent le contenu d'un futur projet de recherche de poursuite adéquate du travail hautement intéressant.

A ces effets positifs de la mise en pratique technique de la modulation des intrants s'ajouteraient les effets positifs connus d'une exploitation en îlots. Ce sont :

- une forte réduction de la durée et du coût de déplacement jusqu'aux parcelles
- une forte réduction des manœuvres de virage sur les parcelles
- une forte réduction des zones de fourrière soumises à d'intensives pressions
- une forte économie de carburant

De nombreuses économies en termes de temps et de coûts en résultent, liées à des effets environnementaux positifs tels que :

- empreinte écologique réduite (gaz d'échappement, intrants), et par conséquent moins de pollution de l'air et une meilleure protection des eaux souterraines
- compaction des sols réduite

Une exploitation commune entraînerait enfin des effets positifs évidents sur le plan social, comme :

- une meilleure cohésion sociale et communautaire
- plus de loisirs avec un potentiel de renforcement de la structure sociale familiale
- possibilité de remplacement en cas de vacances ou de maladie

3.2.2.1.3 Potentiel lié à l'intégration d'une simulation de croissance

Comme cela a été décrit précédemment, la mise en pratique de la mesure de fertilisation selon Apollo a été possible en 2005. Une partie de la parcelle I-01 a dû être exclue de la fertilisation, car elle avait été fertilisée auparavant par le propriétaire avec un engrais à libération prolongée, à l'encontre des recommandations de l'étude. Sur ce point, il a toutefois été surprenant de constater que dans environ un tiers de cette parcelle, ce fertilisant était déjà lessivé et indisponible au moment de la réalisation de la mesure. Cette partie a pu être refertilisée au cours de l'intervention de fertilisation. Dans le reste de la zone, la minéralisation était cependant plus avancée que prévu.

Ceci n'a pas été mis en évidence par les mesures préparatoires à l'application intégrant la simulation de croissance, mais par l'échantillonnage des reliquats d'azote conduit en parallèle, tel qu'il aurait dû être réalisé en comparaison avec la modulation des intrants selon les « bonnes pratiques agricoles ».

Ceci montre qu'il n'est pas possible de prêter attention à des particularités à court terme par le biais de l'intégration d'une simulation de croissance à long terme.

Un résultat intéressant ressort de la comparaison entre l'application effectuée à l'aide de la simulation de croissance et celle calculée d'après les « bonnes pratiques agricoles » : la figure 132 présente une carte des différences entre les deux cartes d'application résultantes. Le calcul a été effectué en soustrayant la carte d'application d'après les « bonnes pratiques agricoles » de celle selon « Apollo ». Elle montre dans quelle mesure la fertilisation selon « Apollo » aurait dépassé celle selon « les bonnes pratiques agricoles ».

La parcelle I-02 présente des écarts avec les plus petites sous-parcelles atteignant ± 15 kg N/ha, ce qui est justifiable, et exceptionnellement jusqu'à -30 Kg N/ha. Dans ce cas, la fertilisation selon Apollo aurait été moins importante. La cause réside dans une bosse de la dernière répartition des reliquats d'azote située au milieu de la limite ouest de la parcelle (Fig.

132), qui ne peut pas être prise en compte dans les modèles de simulation travaillant à moyen ou à long terme.

Dans la parcelle I-03, la différence varie entre +10 et -15 kg N/ha, sur une surface relative plus importante. Exceptionnellement, deux zones présentent des différences allant jusqu'à -45 kg N/ha et +60 kg N/ha, ce qui est considérable. Ces valeurs ne proviennent pas d'irrégularités particulières dans le calcul intégrant le modèle de croissance « Apollo », mais plutôt de petites zones présentant des écarts de reliquats d'azote plus importants que le reste de la zone. Selon les dires de l'opérateur, il existe en effet dans la parcelle 2 des zones non représentatives, car le point d'échantillonnage se situe au croisement de deux rangées de plantes.

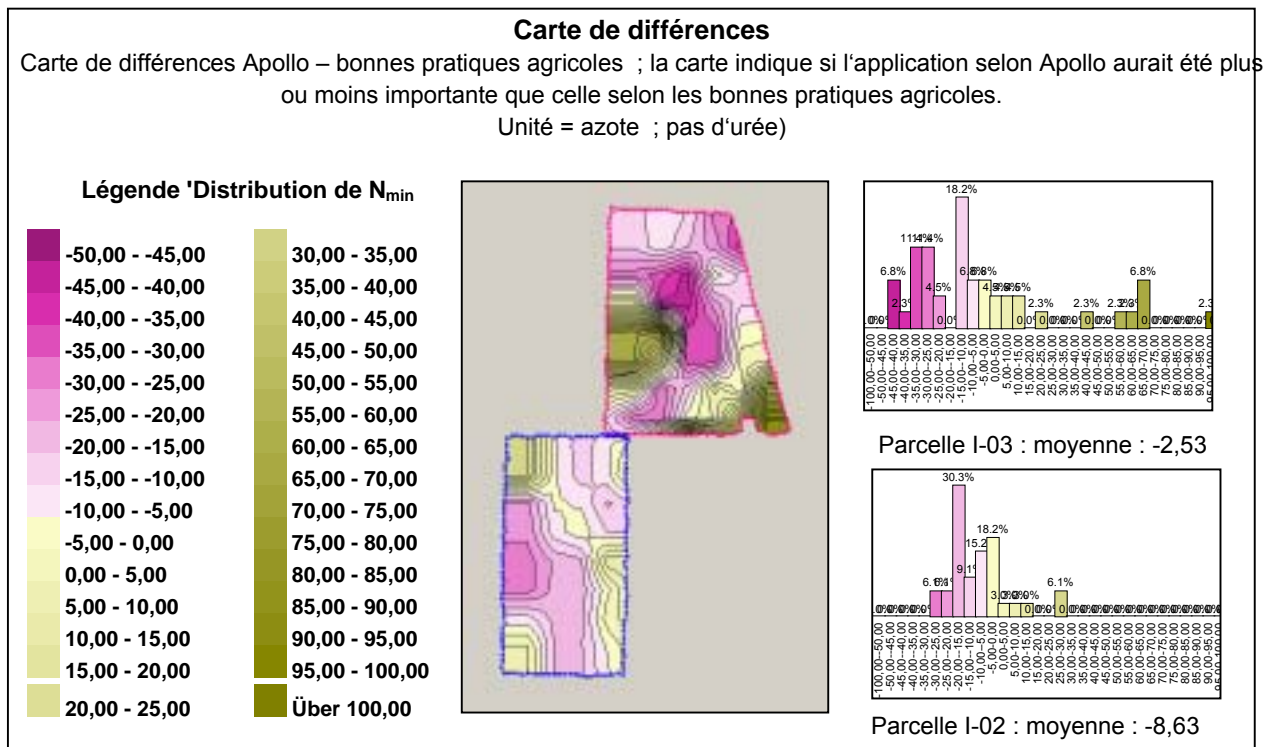


Fig. 132 : carte de différences (application « Apollo » – application « bonnes pratiques agricoles ») de la totalité des parcelles I-02 et I-03 ; résolution plus fine

L'origine des écarts au niveau des plus petites sous-parcelles réside dans des différences entre le mode de définition de ces sous-parcelles.

En effet, alors que selon « Apollo », de plus petites sous-parcelles de taille régulière sont créées au préalable, elles sont déterminées par interpolation selon les « bonnes pratiques agricoles » et sont donc très irrégulières.

Il faut ici préciser que la fertilisation d'une structure à une si petite échelle est impossible à l'aide d'un épandeur d'engrais. La comparaison se base sur la carte calculée à partir des valeurs mesurées en tant que différence potentielle maximale. La carte de consigne lisible par la machine et définie à partir d'une largeur d'épandage de 18 m serait bien plus grossière. Dans les valeurs d'application de la carte de différences correspondante, les différences à petite échelle ne seraient pas aussi marquées.

Il devient évident que le calcul selon les bonnes pratiques agricoles réagit aussi à court terme à une augmentation des reliquats d'azote dans le sol. Au contraire, Apollo travaille sur des valeurs moyennes à long terme, ce qui empêche d'identifier des mesures hors norme.

On peut évaluer comme suit le potentiel lié à l'intégration d'une simulation de croissance.

Tout d'abord, on peut confirmer que l'approche cartographique intégrant la simulation de croissance est adaptée à une utilisation dans le cadre de l'exploitation en îlots de parcelles.

Le calcul de la dose d'engrais au niveau intraparcélaire par le biais d'« Apollo » permet de réduire le surcroît de travail lié à la collecte du paramètre d'entrée. La réalisation de la carte d'application n'est pas liée à un échantillonnage des reliquats d'azote à effectuer juste avant la fertilisation, et se trouve ainsi temporellement découplée de l'application elle-même.

Cet aspect doit être considéré comme un avantage marquant de cette approche cartographique intégrant une simulation de croissance, car il prend en compte pour la première fois le fait de réussir à maîtriser la préparation lourde de cartes d'application d'exploitations agricoles entières grâce à des mesures organisationnelles.

Le modèle prenant en compte de nombreux paramètres des années précédentes, les inconvénients liés à la collecte de données récentes sont évités. Ceci a constitué un réel allègement de travail dans ce projet, dans la mesure où la carte d'application a pu être achevée deux mois avant l'application sans engendrer de surcharge de travail.

Ceci signifie toutefois qu'il est indispensable de rassembler pour les parcelles à traiter suffisamment de données sur de nombreux paramètres, et sur des périodes plus importantes.

C'est pourquoi on peut recommander de rassembler tous les paramètres possibles relatifs aux parcelles d'exploitation au sein d'un SIG.

En outre, l'intégration du modèle de croissance « Apollo » a permis de prendre en compte des aspects non seulement écologiques mais aussi économiques. Ceci constitue une condition supplémentaire de taille pour qu'une approche cartographique de ce type se développe à l'avenir.

C'est pourquoi il est recommandé de garder à l'esprit cette méthode cartographique intégrant une telle simulation de croissance dans l'optique d'une mise en pratique de la modulation des intrants dans les conditions particulières de la plaine du Rhin Supérieur.

La poursuite des mesures concrètement effectuées au cours du projet est garantie par un projet réalisé par l'Université de Hohenheim (www.uni-hohenheim.de).

3.2.2.1.4 Potentiel lié à l'intégration de données de télédétection

Sur la base des images aériennes « lowcost » obtenues, on a également pu dériver des valeurs de réflexion en plus de nombreuses données géométriques (comme par exemple la détermination de la topologie). La corrélation entre les distributions intraparcélaires des valeurs de réflexion pour les couleurs fondamentales du spectre à large bande, « rouge », « vert » et « bleu », identifiables dans les images en couleurs vraies et les distributions des autres paramètres disponibles au niveau intraparcélaire a été vérifiée par le biais d'une régression. En outre, d'autres paramètres ont été comparés les uns aux autres.

Sur la base de ces vérifications, les résultats pertinents pour la modulation des intrants sont synthétisés ci-dessous.

On peut en premier lieu affirmer qu'avec un coefficient de détermination ne dépassant pas $R^2 = 0,146$, il n'existe pas de corrélation significative entre les deux cartes de distribution de la maturation obtenue par images aériennes (des 6 et 13 octobre 2004) et les inventaires de maturation réalisés par voie terrestre (les 13 et 24 septembre et le 6 octobre 2004). Une comparaison visuelle permet toutefois de percevoir des similitudes entre distributions. Dans l'optique de la mise en œuvre de la modulation des intrants, ceci signifie qu'il n'est pas possible de délimiter d'emblée une distribution fine de maturation à n'importe quel moment à partir d'images aériennes. Ceci peut en premier lieu être dû à des différences d'appréciation provenant de méthodes d'examen et de critères de différenciation différents. Toutefois, la corrélation entre les différents inventaires terrestres de maturation est déjà très faible. Elle augmente cependant nettement avec le degré de maturation, car ce critère ne se manifeste clairement qu'avec le temps (Tab. 25). C'est pourquoi les inventaires terrestres de maturité et aériens à la période idéale de différenciation maximale des caractéristiques devraient cependant être en rapport. On peut toutefois identifier des relations claires lorsqu'il s'agit par exemple de délimiter des cas extrêmes, comme des zones graveleuses sèches, etc. Des zones extrêmes aussi caractéristiques peuvent être clairement identifiées et localisées à l'aide d'images aériennes (REIDELSTÜRZ, 2000).

Inventaire terrestre de maturité Coeff. de détermination	13.09.2004	24.09.2004	06.10.2004
13.09.2004	1,0000	0,0807	0,0001
24.09.2004		1,0000	0,4200
06.10.2004			1,0000

Tab. 25 : coefficient de détermination entre les différents inventaires terrestres de maturité

Le 7 mai 2003, des données de **granulométrie** ont été collectées sur les points du maillage par l'Université de Hohenheim. On a pris en compte la distribution des fractions de sable, de limon et d'argile dans trois horizons (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm). Les données ont été aimablement mises à disposition de ce projet pour la réalisation des analyses.

La figure 133 présente les cartes de distribution pour les trois fractions granulométriques dans l'horizon supérieur (0-30 cm).

Une comparaison visuelle des distributions calculées permet d'identifier des similitudes, mais celles-ci ne sont pas statistiquement significatives. Le coefficient de détermination entre les différentes fractions granulométriques ne dépasse pas $R^2=0,568$. Il atteint par contre $R^2=0,83$ entre les différents horizons pour une même texture (Tab. 26).

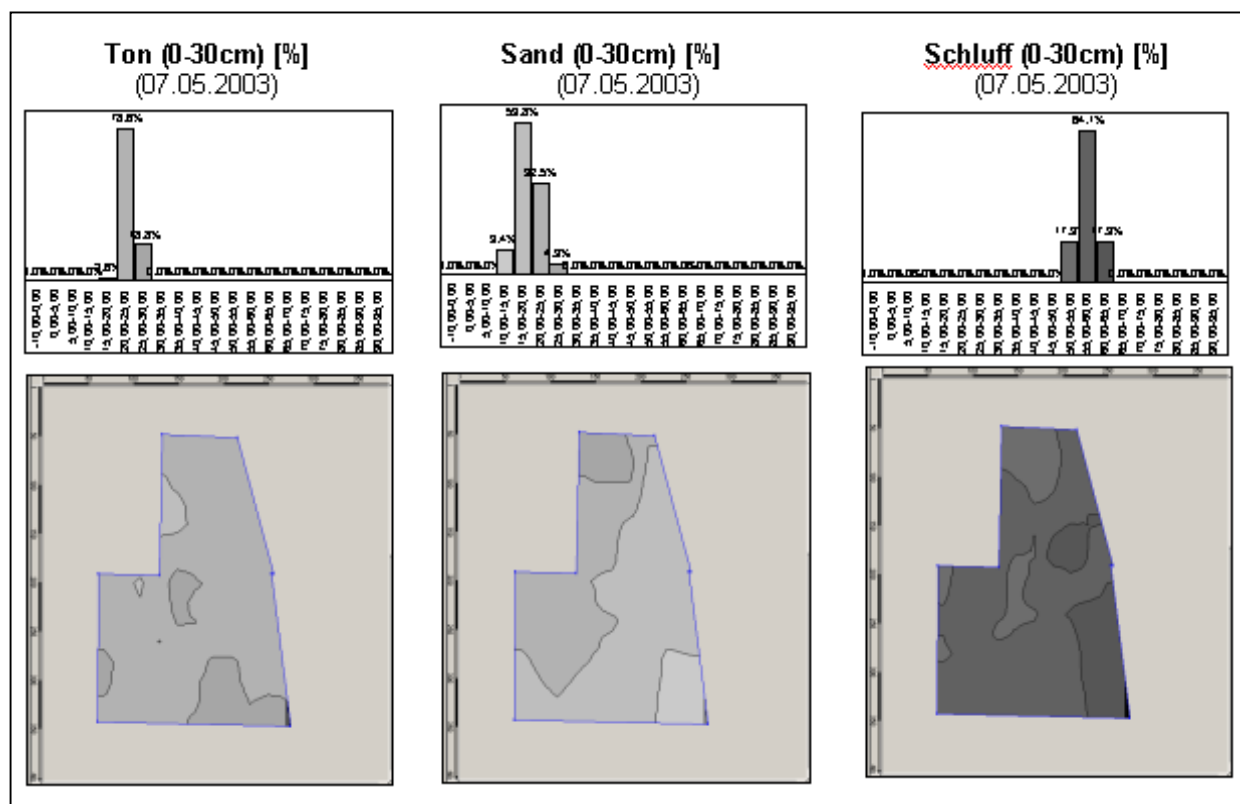


Fig. 133 : distribution des fractions granulométriques argile (Ton), sable (Sand) et limon (Schluff) en pour cents

		Argile (%)			Sable (%)			Limon (%)		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Argile (%)	0-30 cm	1,000	0,528	0,313	0,240	0,270	0,002	0,035	0,003	0,120
	30-60 cm		1,000	0,560	0,096	0,267	0,009	0,038	0,110	0,335
	60-90 cm			1,000	0,003	0,069	0,039	0,121	0,132	0,690
Sable (%)	0-30 cm				1,000	0,830	0,289	0,569	0,546	0,084
	30-60 cm					1,000	0,252	0,389	0,391	0,011
	60-90 cm						1,000	0,323	0,066	0,194
Limon (%)	0-30 cm						1,000	0,759	0,329	
	30-60 cm							1,000	0,763	
	60-90 cm								1,000	

Tab. 26 : coefficient de détermination entre les distributions des fractions granulométriques

Il est possible d'établir des corrélations entre ces distributions et celles de différentes valeurs de réflexion issues des images aériennes à la condition d'éliminer les erreurs pouvant se produire entre les parcelles et entre les images.

Le tableau 27 présente les corrélations issues de l'étude basée sur une *unique* image (image 06 du 7 juillet 2004) en utilisant les valeurs de réflexion provenant d'une *unique* parcelle (I-03).

IMG_06	Analyse granulométrique						Rende ment
	7.5.2003			7.5.2003			
	Sable			Limon			
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	
R	0,774	0,756	0,610	0,560	0,500	0,130	0,036
V	0,148	0,085	0,433	0,075	0,061	0,186	0,381
B	0,141	0,198	0,009	0,165	0,153	0,005	0,213
R/V	0,820	0,890	0,430	0,630	0,530	0,050	0,037
R/B	0,697	0,751	0,365	0,580	0,514	0,041	0,030
V/B	0,366	0,409	0,174	0,339	0,290	0,012	0,023
R-V	0,833	0,890	0,422	0,640	0,592	0,050	0,174
R-B	0,726	0,782	0,386	0,600	0,545	0,048	0,022
V-B	0,403	0,433	0,231	0,365	0,327	0,029	0,004
(R-V)/(R-B)	0,055	0,021	0,065	0,246	0,310	0,192	0,028
(R-V)/(V-B)	0,665	0,814	0,221	0,482	0,493	0,013	0,094
(R-B)/(V-B)	0,665	0,814	0,221	0,482	0,493	0,013	0,094

Tab. 27 : corrélations restantes ayant un intérêt

Le sable et le limon des deux horizons supérieurs présentent une corrélation significative avec le « rouge », comme tous les paramètres dérivés pour lesquels le canal « rouge » possède une importance. Le résultat est encore plus significatif lorsqu'on établit un rapport avec le « vert » (R/V et R-V). Dans ce cas, le coefficient de détermination est encore bien plus marqué dans la fraction « sable » que dans la fraction « limon ». C'est pourquoi on peut imaginer utiliser le canal du rouge, ou mieux encore les paramètres R/V ou R-V à des fins de détection des fractions granulométriques du sol. Les images de ces paramètres reproduisent la distribution granulométrique « sable dans les horizons supérieur et moyen » avec une probabilité comprise entre 70 et plus de 80 %. Dans l'optique de la modulation des intrants, ceci signifie que des méthodes de télédétection utilisant les valeurs de réflexion du canal « rouge » permettent de déduire la distribution granulométrique au niveau intraparcellaire. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour en préciser les détails.

Les possibilités d'intégration de la distribution de la fraction granulométrique au sein des cartes d'application destinées à la modulation des intrants doivent être discutées.

Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre la distribution des valeurs de réflexion issues des images aériennes et celle de l'**étude pédologique** du 19 novembre 2004 (pH, P₂O₅, K₂O₅, et MgO). Même une limitation des tests à des images individuelles, excluant les erreurs entre images et entre parcelles, ne permet d'obtenir que des coefficients de détermination ne dépassant pas R² = 0,302 pour P₂O₅ (réflexion dans le vert, vol du 13 septembre 2004), R² = 0,5 pour K₂O₅ (réflexion (R-V)/(R-B), vol du 05 octobre 2004) et R² = 0,211 pour MgO (réflexion dans le vert, vol du 05 octobre 2004).

Une augmentation de la résolution spectrale pourrait permettre d'augmenter considérablement le degré de significativité. Dans l'optique de la modulation des intrants, ceci signifie qu'un large potentiel réside encore dans le développement des capteurs « AVIS » et « GVIS » (à haute résolution spectrale » présentés par ailleurs. L'évolution de ces méthodes devrait être suivie avec attention.

La comparaison des différentes valeurs de réflexion issues tant d'images aériennes individuelles que de la mosaïque d'images de 2004 ne montre aucune corrélation significative avec les **rendements à la récolte** de 2004.

Il n'est donc pas possible de déterminer la distribution des rendements à l'aide d'images aériennes, ce qui ne constitue pas réellement un problème. La détermination intraparcélaire des rendements en tant que l'un des deux paramètres d'entrée de l'approche cartographique constitue une méthode tout à fait réalisable dans la pratique avec l'aide d'une moissonneuse-batteuse équipée d'un GPS.

En ce qui concerne les **analyses d'éléments nutritifs** réalisées, la comparaison entre la distribution des valeurs de réflexion et la distribution de la teneur en azote dans la plante entière fournit un coefficient de détermination de $R^2 = 0,53$ pour le vol du 13 septembre 2004 (Fig. 134, Tableau 28). Il existe donc de réelles similitudes entre la distribution de l'alimentation azotée de la plante et la réflexion, même si aucune relation strictement significative n'a pu être établie au sein de cette étude. Dans l'optique de la mise en pratique de la modulation des intrants, ceci signifie que l'usage de la télédétection apporte également un potentiel de détermination de la répartition spatiale de la teneur en azote (du grain). Il serait ainsi nécessaire de travailler à l'obtention de relations claires par le biais d'améliorations méthodologiques ou grâce à l'utilisation d'un capteur plus sensible. Il reste à déterminer si une telle approche permettrait réellement de déduire une carte d'application. Ceci nécessite des recherches supplémentaires.

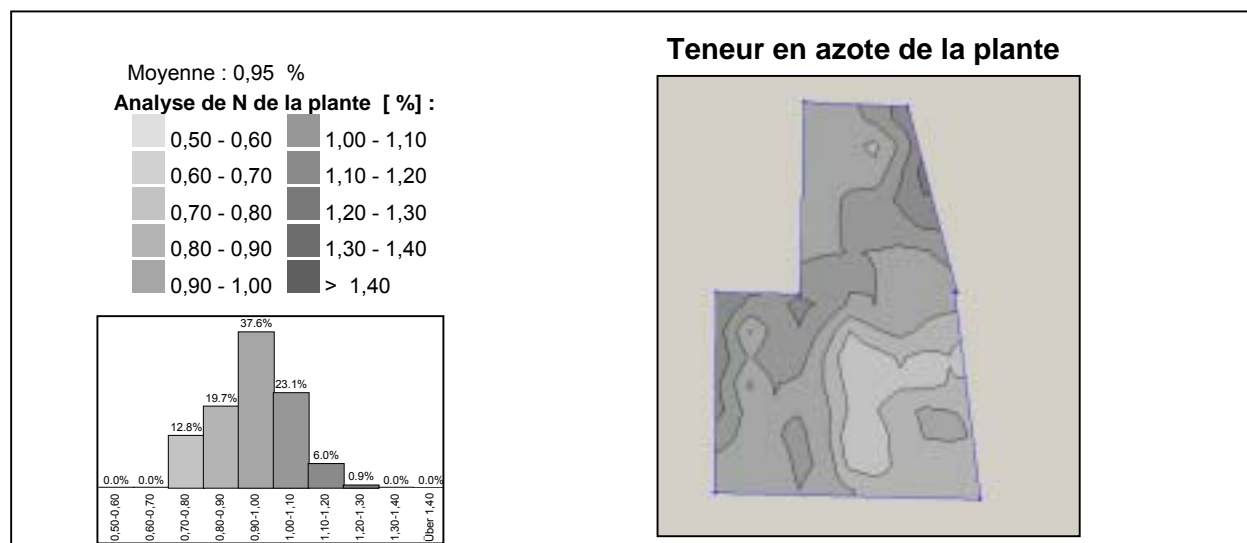


Fig. 134 : distribution de l'alimentation azotée de la plante

Les nombreuses études effectuées à partir des valeurs de réflexion obtenues par les images aériennes permettent de synthétiser les résultats suivants :

- il existe une **corrélation significative** entre les distributions de paramètres de réflexion individuels et
- la distribution des sables et des limons
- il existe **certaines similitudes** (visuelles) entre certaines distributions :
 - maturation et
 - reliquats d'azote
 - distribution du phosphore dans la plante (faible corrélation)

- distribution de l'azote dans la plante (faible corrélation)

En outre, il apparaît que les conditions de prise de vue d'images analysées en commun (mosaïque) devraient être aussi homogènes que possible afin de constituer un matériel exploitable. Ceci signifie que les dates de prise de vue et les altitudes devraient être relativement proches. Les changements d'angle non indispensables de la position de prise de vue doivent être évités, surtout si les images sont destinées à la constitution d'une mosaïque. Les différences de qualité entre images devraient être homogénéisées par des ajustements de couleur, de contraste et de luminosité. Ceci est possible avec les moyens de correction modernes des images numériques. Ces conditions sont aisées à mettre en œuvre à l'aide de systèmes de prise de vue professionnels (Fig. 135).

				Ensemble des parcelles			
		Grain		Plante		Exploitation	
		Teneur en N	Teneur en C	Teneur en N	Teneur en C		
Grain	Teneur en N	1					
	Teneur en C	0,002	1				
Plante	Teneur en N	0,338	0,093	1			
	Teneur en C	0,133	0,009	0,125	1		
Exploitation		0,032	0,01	0,135	0,091	1	
Maturation A	terrestr. 13.09.04	0,01	0,02	0,03	0,03	0,08	
Maturation B	terrestr. 24.09.04	0,13	0,32	0,11	0,00	0,08	
Maturation C	terrestr. 06.10.04	0,14	0,43	0,18	0,00	0,01	
	(B-A)	0,02	0,23	0,00	0,02	0,01	
	(C-B)	0,04	0,14	0,06	0,00	0,02	
Maturation	Im. aérienne 06.10.04	0,12	0,03	0,04	0,01	0,02	
Maturation	Im. aérienne 13.10.04	0,04	0,01	0,06	0,13	0,04	
Réflexion	IMG 06 13.09.04 R	0,15	0,10	0,53	0,00	0,21	
Réflexion	IMG 06 13.09.04 V	0,21	0,35	0,32	0,14	0,25	
Réflexion	IMG 06 13.09.04 B	0,19	0,29	0,05	0,12	0,10	
Argile		0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	
Sable		0,04	0,06	0,04	0,02	0,03	
Limon		0,06	0,01	0,02	0,03	0,01	
PH		0,19	0,00	0,02	0,00	0,01	
P2O5		0,334	0,031	0,184	0,146	0,031	
K2O		0,134	0,017	0,01	0,05	0	
MgO		0,04	0,005	0,01	0,038	0,009	
Rendement		0,149	0,034	0,106	0,192	0,016	
Nmin		0,081	0,0081	0,137	0,191	0,0013	

Tab. 28 : coefficients de détermination des éléments nutritifs de la plante

Aerial Film
12,5 µm Pixel
15 cm GSD

UltraCam Digital Image
18 cm GSD

Sensoreinheit SU
 Persepektives Bildformat
 Objektivkonstruktion und Apertur
 Gesichtsfeld in / open per Flugrichtung
 Multi-Spektral (Red, NIR)
 Verdistortions
 Bewegungskompensation
 Bildstabilisierung
 Radiometrische Auflösung
 Dimensionen
 Gewicht

11400 x 7800 Pixel
 100 mm, F11,8
 55° / 33°
 4000 x 2672 Pixel @ 9µm
 1:500 - 1:600 Sek.
 TDA Steuerung
 bis 1:3 Bilder pro Sekunde
 12 - 14 bit (mit 16 bit registriert)
 45 mm x 45 mm x 60 mm
 ca. 30 kg

Speicher- und Recheneinheit (Storage & Computing Unit, SCU)
 Speicherkapazität
 Bildkapazität (mit Karte)
 Dimensionen
 Gewicht

~ 1 TB
 > 2775 Bilder
 55 mm x 40 mm x 65 mm
 ca. 35 kg

Hohe geometrische Auflösung
Multispektral (auch NIR)
Bildfehlerreduzierung
Bessere Belichtung im Schattenbereich

Fig. 135 : système de prise de vue potentiel plus moderne, « Vexel Ultracam » par exemple

Des solutions possibles d'intégration pratique des données importantes de télédétection dans la méthode cartographique (approche offline) pour modulation des intrants sont présentées ci-dessous. Deux méthodes prêtes à un usage commercial sont d'abord présentées puis évaluées de façon critique. Enfin est montrée la mise en œuvre pratique de l'intégration des distributions calculées à l'aide des valeurs de réflexion pertinentes issues des images aériennes lowcost.

C'est pourquoi suit une présentation des systèmes de télédétection les plus connus présents sur le marché et destinés à la modulation des intrants

- « **Agro-Sat** » d'Agro-Sat Consulting et
- « **Loris[®] Maps** » de Kemira.

Elle est suivie d'une présentation de l'intégration des **données de télédétection « lowcost »** recueillies dans l'approche cartographique. Y sont discutés des détails importants dans le cadre de la mise en pratique :

- *des méthodes simples de classification et*
 - *une normalisation des canaux de couleurs, ainsi que*
 - *les rapports importants pour un usage pratique intégrés dans la méthode cartographique*
- Il s'agit des rapports entre les réflexions des canaux « vert » et « rouge/vert ».

»Agro-Sat « d'Agro-Sat Consulting :

Le système « **Agro-Sat** » est conçu pour effectuer une analyse ciblée des points faibles sur les parcelles agricoles. Selon les informations du site Internet, « avec cette méthode de mesure à distance (télédétection) [...] les parcelles concernées sont survolées à environ 3300 m d'altitude lors des stades EC importants et des enregistrements sont effectués par une caméra vidéo digitale à haute résolution calibrée sur la gamme spectrale du vert. Lors du survol, la distribution spatiale de la couleur verte est d'abord collectée sous forme d'image au sein de la parcelle, avant d'être analysée spectralement par ordinateur à l'aide d'un logiciel spécial. Les résultats se présentent sous forme de cartes thématiques qui montrent la distribution du vert en trois classes de couleur, et par conséquent la « distribution relative de la teneur en chlorophylle » au sein des parcelles. A partir de la « distribution spatiale des teneurs en chlorophylle/surface, il est possible en prenant en compte la densité du peuplement de tirer des conclusions sur la productivité photosynthétique des différentes sous-parcelles de ce peuplement. Généralement, la méthode est applicable à toutes les cultures. Les cartes thématiques sont consultables via Internet 48 heures après le survol (www.agro-sat.com).

Contrairement à la description publiée sur le site Internet d'Agro-sat, la chlorophylle absorbe largement les parties bleues et jaunes jusqu'au rouge, de la partie visible du spectre électromagnétique. Au contraire, les longueurs d'onde de bleu (autour de 0,55 µm) ne sont pas absorbées et peuvent être réfléchies ou transmises par la feuille. Le spectre de réflexion d'une feuille contenant de la chlorophylle présente ainsi un maximum dans le vert, aussi dans le domaine du visible (Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft, HUSS (Ed.), 1984).

Ainsi, une mesure de l'activité chlorophyllienne est ainsi représentée par l'intensité de la réflexion dans les bandes d'absorption de la chlorophylle figurant dans le tableau 29. Elle enregistre l'énergie solaire utilisée pour la photosynthèse.

Pigment	Bande d'absorption en µm	
Chlorophylle a	0,36 – 0,44	0,60 – 0,70
Chlorophylle b	0,40 – 0,46	0,60 – 0,68
Protochlorophylle	0,40 – 0,46	
A- carotène	0,38 - 0,51	
Xanthophylle	0,40 – 0,51	

Tab. 29 : Bandes d'absorption des pigments (d'après Huss, 1984)

C'est pourquoi la réflexion de la partie verte du spectre n'augmente pas directement avec une activité chlorophyllienne plus élevée. Au contraire, elle n'est que relativement plus élevée, car les maxima d'absorption dans le bleu et le rouge sont liés à des réflexions relativement plus faibles. L'absorption liée à la chlorophylle dans cette gamme spectrale est si élevée que la réflexion dans le vert recouvre les réflexions restantes.

C'est pour cette raison que les feuilles photosynthétiquement actives paraissent vertes. Cependant, l'activité photosynthétique elle-même ne se révèle pas par le biais d'une réflexion directe du vert, comme cela est présenté sur le site Internet. C'est certainement ce qu'on a voulu exprimer sur le site (note de l'auteur)

Un examen plus attentif de la méthode montre que la déduction des relations sous-jacentes repose sur plusieurs hypothèses.

En premier lieu, la variabilité relative de la réflexion dans le vert doit être en rapport direct avec la variabilité de l'absorption dans le bleu et le rouge. Il ne doit pas y avoir superposition de ce rapport indirect dû à la réflexion directe dans le vert.

En second lieu, on suppose que l'activité chlorophyllienne détectée indirectement reflète l'alimentation en azote. Les activités chlorophylliennes réduites, causées par des facteurs autres que le manque d'azote, ne sont pas prises en compte.

C'est pourquoi la description assurée, bien définie et évidente de la relation entre la détection d'azote par la mesure de la réflexion relative dans le vert a de quoi surprendre. A l'opposé, la déclaration sur le site Internet selon laquelle ce principe est utilisé exactement de cette manière par l' « Hydro N-Sensor » est totalement inexacte. Au contraire du système Agrosat, ce sont dans ce cas les réflexions dans le rouge et le proche infrarouge qui sont déterminantes, et non dans le vert.

Un avantage de la méthode « Agro-Sat » sur l' « Hydro N-Sensor » réside dans le fait que ce dernier ne peut prendre en compte qu'un quart à un tiers de la parcelle, alors que la couverture de la totalité de la parcelle est garantie par le système « Agro-Sat ». « Plusieurs milliers de pixels avec une résolution au sol d'environ 3 * 3 m par pixel aboutissent à une estimation du peuplement proche de la réalité. » (www.agro-sat.com)

L'avantage d'une prise en compte spatialisée du peuplement est naturellement évident. Pour les quelques zones de l'alimentation azotée déduites dans la méthode présentée, on a cependant remarqué qu'une diminution de la coloration verte ne peut être attribuée à un manque d'azote que lorsque « les autres facteurs peuvent être éliminés avec certitude ». Effectivement, d'autres facteurs tels que le stress hydrique, une carence en soufre, en magnésium ou en potassium se manifestent aussi par une diminution de la coloration verte. A l'heure actuelle, il n'existe toutefois aucun capteur optoélectronique basé sur une méthode scientifique reconnue et accessible à des coûts raisonnables qui permette d'identifier les différentes carences selon la diminution de la coloration verte des feuilles. Au final, des réponses définitives ne peuvent être apportées que par une comparaison avec des résultats préalables d'échantillonnage de sol ou par des analyses simultanées de feuilles. » (www.agro-sat.com)

La méthode convertit les données de télédétection en une carte comportant trois zones, à partir de laquelle il est possible de déduire une carte d'application intraparcellaire à l'aide du testeur de N ou sur la base de calculs d'addition ou de soustraction (Fig. 136).



Fig. 136 : déduction d'une carte à 3 zones à partir d'une image aérienne (www.agrosat.com)

Le prix de la méthode présentée directement comme un « suivi – chlorophylle » est qualifié de très attractif avec 0,99 €/ha, mais ne donne aucune indication sur la taille de la totalité de la parcelle considérée. A ce prix s'ajoute le coût du survol. La publicité avance ainsi que cette méthode ne comporte aucun risque financier, contrairement à d'autres méthodes basées sur des capteurs. Des améliorations de rendement atteignant 2,5 q/ha sont indiquées pour les zones carencées de la culture.

L'intégration de la méthode dans notre projet, afin de comparer la carte d'application résultante avec d'autres méthodes, s'est heurtée au coût relativement élevé du vol pour une zone d'étude aussi réduite. Un test d'intégration des enregistrements lowcost disponibles a été suggérée par Agro-Sat Consulting. Cependant, après envoi des enregistrements correspondants, le test d'intégration des données n'a pas été poursuivi par l'entreprise.

« Loris[®] Maps » de Kemira Grow how

La méthode de télédétection « LORIS Maps » de la société »Kemira Grow how" réside dans des prises de vues à une altitude de 1 à 7 km à l'aide de films *infrarouges*.

Selon les relations de télédétection connues, les zones de forte réflexion dans l'infrarouge sont liées à une forte biomasse. A l'opposé, la couleur verte (c'est-à-dire un manque de réflexion dans l'infrarouge, note de l'auteur) est à mettre en relation avec une faible biomasse. Ces hypothèses de base coïncident avec les relations de télédétection connues depuis longtemps.

Sur la base des photos infrarouge est calculée une carte de distribution de la biomasse. Cette carte de distribution constitue la base des mesures de fertilisation intraparcellaire et de traitement des cultures et sert à l'identification des différences intraparcellaires. La figure 137 montre le logiciel avec l'image originale, un masque classé et la carte d'application qui en dérive.

L'utilisation de Loris Maps a généré une augmentation des rendements et une plus grande régularité des peuplements. Contrairement à la cartographie des rendements, il est possible d'établir des prévisions pour l'année en cours.

Après de nombreuses utilisations réussies en Scandinavie, des enregistrements ont été effectués en avril 2003 dans le Schleswig-Holstein. Les cartes de biomasse des différentes parcelles ont présenté partiellement des écarts à la moyenne dépassant 50 %. La récolte a été réalisée avec un système de cartographie des rendements. La carte des rendements et la carte de biomasse élaborée au printemps ont montré un rapport étroit. Le rendement d'une parcelle peut donc être prédit par une carte de biomasse, c'est pourquoi ces cartes

sont utilisées comme base pour l'épandage au niveau intraparcellaire, qui permet ainsi d'optimiser les intrants» (www.kemira-growhow.com).

En raison d'hypothèses de départ simples et de son expérience assurée, Loris[®] Maps semble être un système adapté à la détermination de la distribution de la biomasse, qui peut être prise en compte pour la déduction de la carte d'application correspondante.

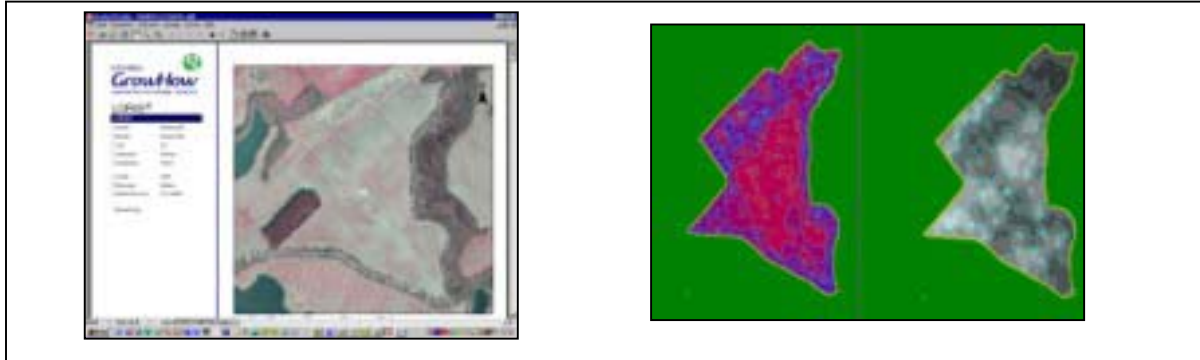


Fig. 137 : Logiciel avec l'image aérienne infrarouge originale, un masque classé et la carte d'application dérivée

Comme pour la méthode concurrente, l'intégration de cette méthode dans le projet à des fins de comparaisons entre méthodes s'est heurtée aux coûts de survol relativement élevés à l'échelle d'une zone d'étude si réduite. Un test d'intégration des enregistrements lowcost existants a également été suggéré par « Kemira-growhow ». Cependant, et de la même manière qu'avec Agro-Sat, le test d'intégration des données n'a pas été poursuivi par l'entreprise après envoi des enregistrements correspondants. Ceci est aussi dû au fait que le canal du proche infrarouge manque dans les images aériennes lowcost. Il aurait été scientifiquement incorrect de remplacer ces longueurs d'onde par le canal du rouge.

Intégration des données de télédétection simples collectées par l'avion de modélisme télécommandé

Les données obtenues par les méthodes lowcost peuvent être utilisées pour la réalisation des données d'application tout comme les données professionnelles de télédétection. Comme cela a été annoncé plus haut, y sont discutés des détails importants dans le cadre de la mise en pratique :

- des méthodes simples de classification et
- une normalisation des canaux de couleurs, ainsi que
- les rapports importants pour un usage pratique intégrés dans la méthode cartographique

Il s'agit des rapports entre les réflexions des canaux « vert » et « rouge/vert ».

Afin d'intégrer les données issues des images de télédétection dans la méthode cartographique, il est nécessaire de reproduire toutes les valeurs de réflexion par bandes spectrales. Si toutes les informations présentes sur les images doivent être utilisées, il est nécessaire d'effectuer une classification unique de tous les pixels pour chaque unité de résolution de la carte d'application. Pour cela, les images doivent être **corrigées et géoréférencées**. Afin de ne pas digresser du thème du rapport, on ne décrira pas ici les différentes méthodes possibles. Au final, tous les pixels doivent correspondre par bande spectrale aux valeurs de référence correspondantes des autres paramètres utilisés.

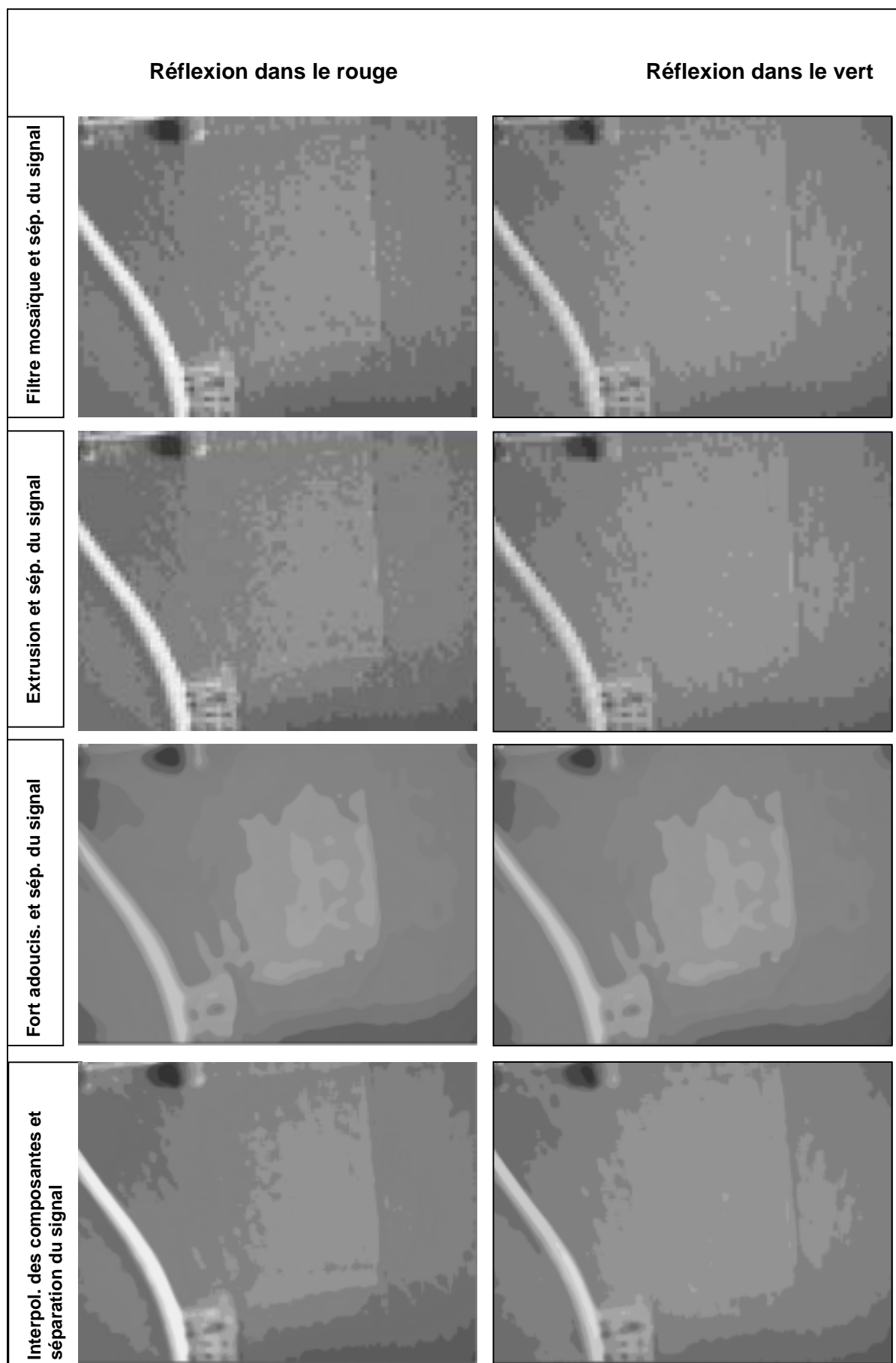


Fig. 138 : possibilités simples de classification d'images pour les canaux du rouge et du vert

On peut aisément intégrer les données issues des images dans le système de réalisation des cartes d'application, grâce au fait que des valeurs de réflexions sont obtenues sur le maximum de points de coordonnées connues (points du maillage et points intermédiaires). Sur la base de ces valeurs, une carte en isolignes peut alors être interpolée par le système de réalisation des cartes d'application sur la totalité de la surface, puis convertie sur la grille de référence actuelle du système d'épandage. Cette procédure très simple a été choisie pour intégrer à titre d'exemple les données de base issues de l'avion de modélisme télécommandé dans le système de réalisation des cartes d'application.

Il serait toutefois souhaitable de procéder à une transformation par le biais d'un logiciel pour intégrer par couche toutes les données provenant des images originales directement dans le logiciel de réalisation des cartes d'application (Agromap-Basic). Un logiciel de réalisation des cartes d'application comprenant des modules d'intégration de données issues d'images constituerait un progrès important. Un module d'intégration d'images de ce type devrait être en mesure d'effectuer des rotations d'images, des calages d'images ainsi que des corrections, puis de géoréférencer les images sur cette base. Ce système aurait l'avantage de pouvoir intégrer des images aériennes professionnelles ou amateur. L'utilisation de données issues d'images aériennes pourrait constituer une option courante dans le domaine de l'agriculture de précision.

A partir des images corrigées et géoréférencées, il faut dans un second temps isoler les différents canaux de couleur et **classifier** les modèles de réflexion à l'aide d'un programme simple de traitement d'images. La figure 138 présente des possibilités simples de classification d'images pour les canaux du rouge et du vert réalisées à l'aide d'un programme simple de traitement d'images.

Dans cette procédure de traitement, les valeurs absolues du rayonnement réfléchi n'ont que peu d'intérêt pour d'autres utilisations. Ce sont les valeurs relatives des différentes valeurs qui sont intéressantes. C'est le fait que le rayonnement réfléchi soit plus élevé ou plus faible que les sous-surfaces environnantes qui joue un rôle.

Pour ces motifs, il est proposé d'utiliser non pas les valeurs absolues des différents rayonnements réfléchis mais des « **valeurs de rayonnement réfléchies standardisées** » dans un but d'intégration au sein du système de réalisation des cartes d'application. Pour cela, toutes les valeurs sont divisées par la valeur maximum du set de données, qui reçoit alors la valeur 1. Les valeurs sont ainsi comprises entre 0 et 1, où 0 représente l'absence de rayonnement réfléchi et 1 le maximum. De cette manière, il n'est pas uniquement possible de comparer tous les sets de données les uns aux autres, mais aussi d'effectuer des calculs pertinents entre eux.

Sur la base de la procédure proposée, il est possible d'intégrer dans la méthode les canaux standardisés **de l'infrarouge et du rouge**. En la combinant à la méthode « Loris[®] Maps » et aux relations connues issues de la télédétection classique, il serait possible d'utiliser la réflexion dans l'infrarouge comme facteur de correction de la répartition de la biomasse. Il est connu que la réflexion dans le proche infrarouge est liée à la masse de cellules végétales

bien développées. Le rayonnement infrarouge se traduit par le canal « rouge » des images infrarouge.

Aucune image infrarouge n'étant cependant disponibles pour les surfaces d'essai, la standardisation a été effectuée sur le canal du « rouge » à titre d'exemple.

Contrairement à l'infrarouge, pour lequel le rayonnement réfléchi dépend étroitement de la répartition de la biomasse, la réflexion dans le rouge est influencée par l'absorption d'une fraction importante de l'activité chlorophyllienne. Plus celle-ci est élevée, plus l'absorption d'énergie dans cette gamme de longueurs d'ondes est importante. Une absorption d'énergie relativement élevée par la chlorophylle diminue ainsi d'autant le rayonnement réfléchi.

Toutefois, cette relation directe peut être dissimulée par la part de la biomasse, car c'est finalement la quantité de biomasse qui conditionne la quantité de réflexion.

Malgré une absorption plus élevée, une grande quantité de biomasse due à de grandes feuilles bien développées au cours d'une phase d'activité chlorophyllienne élevée peut réfléchir davantage de rouge que quelques petites feuilles lors d'une phase d'activité réduite. Il est évident que l'activité chlorophyllienne dans un peuplement moyennement fertilisé ne varie pas dans le même rapport que la masse foliaire. On peut voir à l'œil nu que la réflexion dans le rouge d'un peuplement ne varie que faiblement pendant la *phase de croissance*. La diminution de l'absorption chlorophyllienne par augmentation de la réflexion dans le rouge n'est apparente que dans les peuplements abîmés ou en phase de maturation.

Au cours de la *phase de croissance* (période de fertilisation), le développement de la masse foliaire va cependant s'adapter dans la plupart des cas à l'alimentation azotée, de façon à éviter le développement immédiat d'une masse foliaire photosynthétiquement peu ou pas active. Au contraire, la plante favorise plutôt le développement d'une masse foliaire plus faible mais photosynthétiquement active qu'une masse foliaire importante mais de faible activité.

Au cours de la *phase de croissance*, le rayonnement réfléchi dans le rouge constitue ainsi tout comme le proche infrarouge un indicateur d'une biomasse photosynthétiquement active, bien que la photosynthèse elle-même absorbe le rayonnement. Une faible activité chlorophyllienne ne devient ainsi apparente qu'en cas d'augmentation du rayonnement réfléchi, lorsque l'activité chlorophyllienne diminue après le développement d'une biomasse initialement photosynthétiquement active. Dans ce cas, un ajustement peut être effectué par le biais du rayonnement réfléchi dans l'infrarouge. Des exemples typiques sont une modification de la coloration due à la maturation, à des zones abîmées telles que des nécroses ou à un manque d'eau tardif. Dans ces cas, le rouge constitue la gamme spectrale la mieux adaptée.

Lorsqu'aucune condition limitante exceptionnelle telle qu'une maladie ne cause des différences d'activité chlorophyllienne trop importantes, le rayonnement réfléchi est déterminé par la biomasse photosynthétiquement active au cours de la phase de croissance. Comme dans la méthode « Agro-Sat », l'intensité du rayonnement réfléchi reflète l'intensité de la masse végétale à considérer, et peut être utilisée au cours de la phase de croissance en tant que distribution pour la détermination de la quantité d'engrais.

La figure 139 montre la distribution du rayonnement réfléchi standardisé pour le rouge pour l'exemple précis d'une image issue du vol du 7 juillet 2004 (avion de modélisme télécommandé) sur la parcelle I-03.

Contrairement à l'aspect de l'image originale, les valeurs les plus sombres représentent dans cette illustration standardisée un rayonnement réfléchi relativement élevé et reflètent une fraction élevée de biomasse photosynthétiquement apparentée à une masse foliaire plus active au cours de la phase de croissance du peuplement.

La carte de distribution peut ainsi être utilisée en tant que carte de correction lors d'une application intraparcellaire, la fraction de la biomasse photosynthétiquement active étant prise en compte. Par le biais d'échantillonnages ciblés des valeurs minimale et maximale, le besoin en azote peut être calculé pour les valeurs extrêmes et l'épandage peut être modulé sur la base de la carte.

Le principe est le même pour la cartographie basée sur l'infrarouge avec toutefois comme différence qu'on ne considère pas la réflexion de la biomasse photosynthétiquement active, mais directement la réflexion de la biomasse ayant une structure cellulaire bien développée.

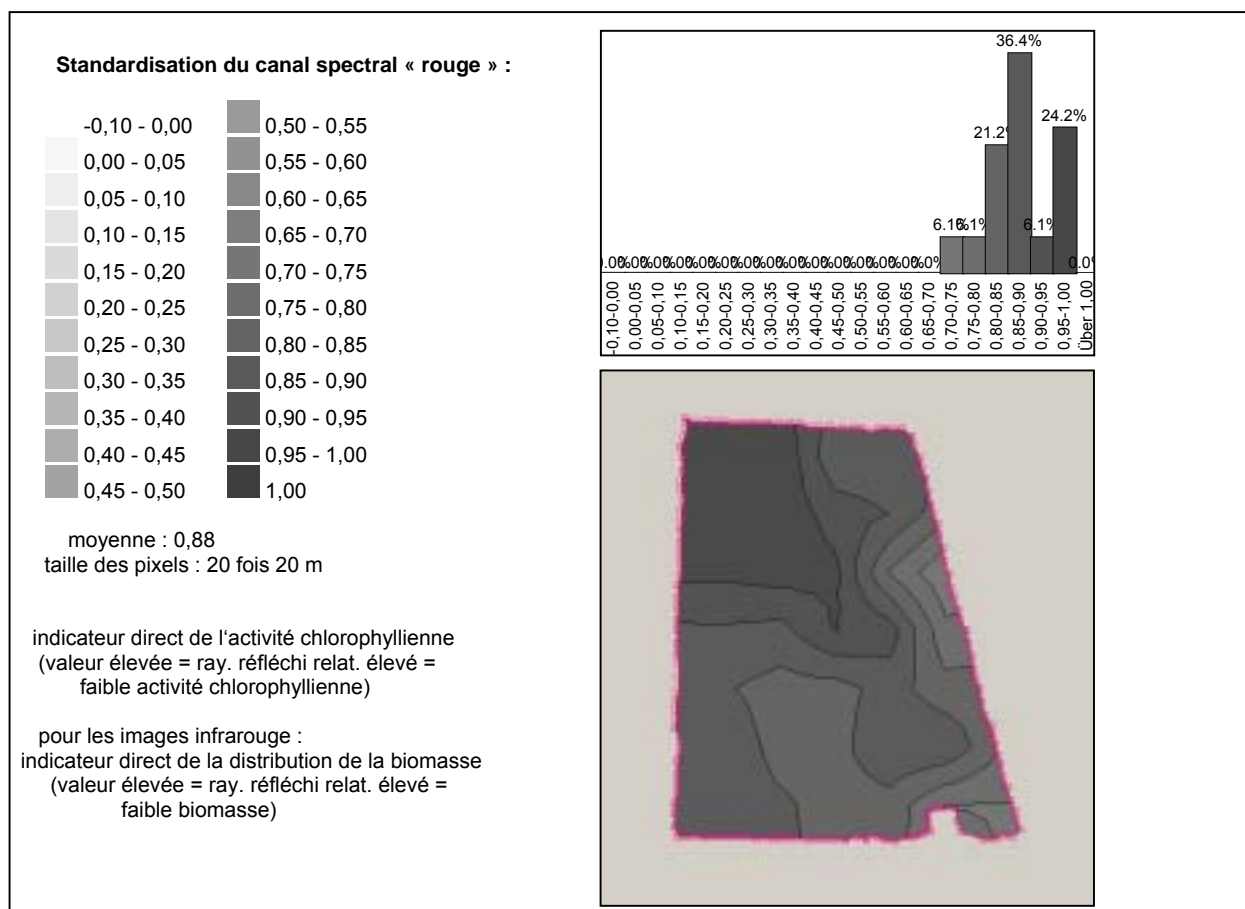


Fig. 139 : distribution du rayonnement réfléchi standardisé pour le rouge en tant que paramètre d'entrée pour la modulation de la fertilisation azotée (zones sombres = beaucoup, zones claires = peu)

De la même manière, il serait aussi possible d'intégrer une **standardisation du vert** dans le cadre de la réalisation des cartes d'application. Selon les dires de la méthode « Agro-Sat » d'Agro-Sat Consulting, la réflexion du canal « vert » pourrait être utilisée comme indicateur de l'activité photosynthétique, ce qui doit toutefois être regardé d'un point de vue critique, car, comme cela a été décrit, il n'existe dans ce cas qu'un rapport indirect entre l'intensité de la réflexion et les déclarations mises en avant. A la condition que les hypothèses sous-

jaçentes s'appliquent dans le cas présent, il serait possible de tirer des conclusions sur la répartition intraparcellaire de l'azote à partir de la distribution de la réflexion du vert. Comme cela a été décrit plus haut, il est nécessaire dans ce cadre que :

- La variabilité relative de la réflexion dans le vert soit en rapport direct avec la variabilité de l'absorption dans le bleu et dans le rouge (activité chlorophyllienne). Il ne doit pas y avoir superposition de ces rapports indirects due à la réflexion directe dans le vert.
- L'activité chlorophyllienne détectée indirectement reflète effectivement l'alimentation azotée. Il ne doit pas y avoir d'autres causes de réduction de cette activité, ce qui doit être vérifié.

La figure 140 montre la distribution du rayonnement réfléchi standardisé pour le vert pour l'exemple précis d'une image issue du vol du 7 juillet 2004 (avion de modélisme télécommandé) sur la parcelle I-03.

Les valeurs claires traduisent un faible rayonnement réfléchi et les valeurs sombres un fort rayonnement réfléchi. La distribution du rayonnement réfléchi standardisé dans le vert est ainsi très similaire à celle du rouge standardisé. Lorsque les hypothèses préalables sont vérifiées, la carte de distribution peut être utilisée comme carte de correction pour une application d'engrais en intraparcellaire. Comme pour le rouge, les besoins en azote peuvent être calculés par le biais d'échantillonnages ciblés des valeurs minimale et maximale, pour les valeurs extrêmes et l'épandage peut être modulé sur la base de la carte.

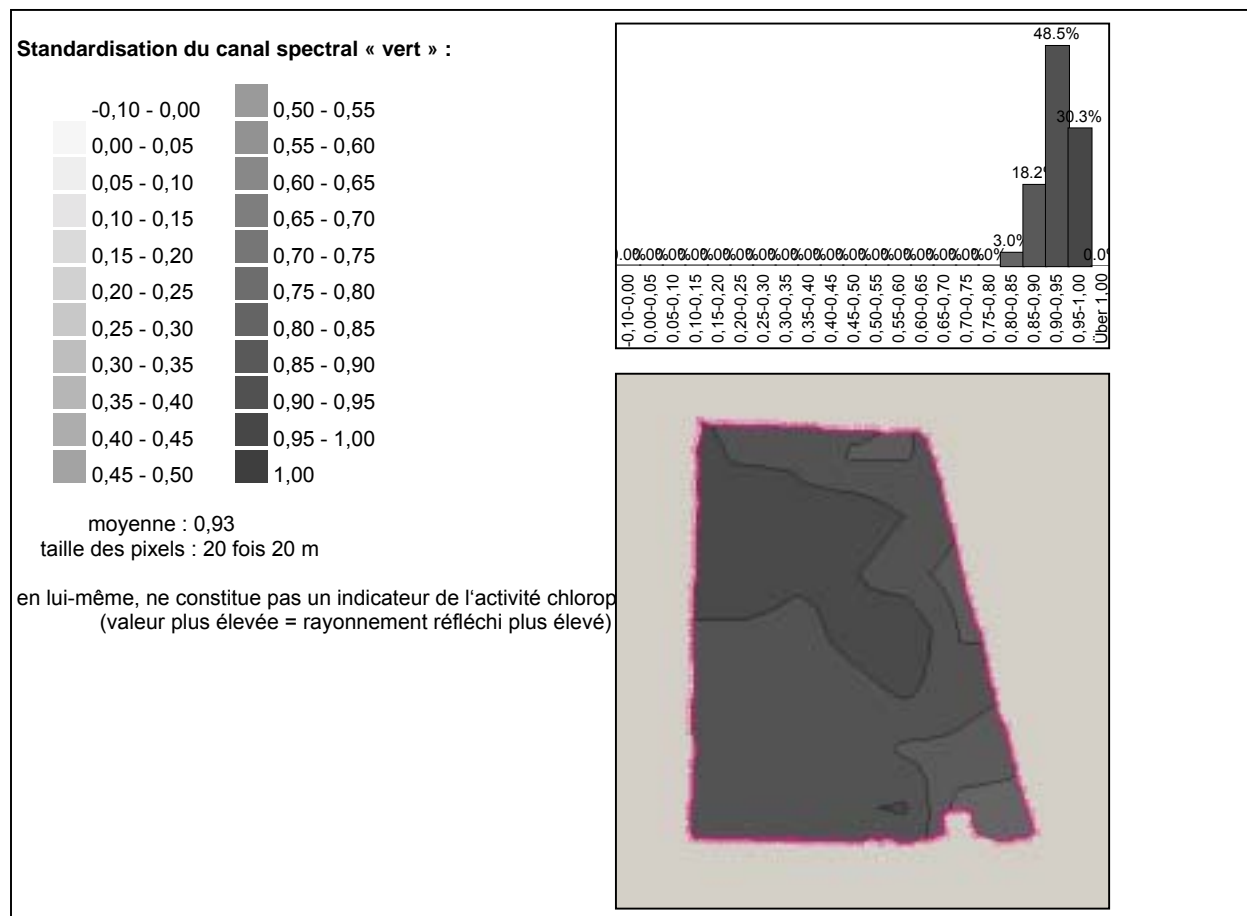


Fig. 140 : distribution du rayonnement réfléchi standardisé pour le vert

La même approche permet de considérer également le **paramètre standardisé R/V** dans le cadre de la réalisation des cartes d'application.

Le rapport entre les réflexions dans le rouge et le vert possède une signification particulière, car l'absorption de l'activité chlorophyllienne est particulièrement importante dans le rouge, ce qui est visible chez les plantes qui paraissent particulièrement vertes.

Le paramètre R/V prend donc en compte des suites directes et indirectes de l'activité chlorophyllienne. C'est pourquoi ce paramètre fournit aussi de bonnes conditions de détection de l'activité chlorophyllienne. La figure 141 montre la distribution du paramètre standardisé de l'indice R/V.

En outre, on a pu établir pour l'exemple donné qu'il existait une corrélation significative entre la distribution du paramètre R/V et celle de la fraction granulométrique « sable ». Une standardisation du paramètre peut ainsi être utilisée en tant que facteur de correction, afin de prendre en compte la fraction sableuse du sol lors d'une mesure. Ceci peut par exemple s'appliquer aux mesures d'amendement. Une fraction de sable élevée est ainsi reliée à une valeur élevée de R/V et donc à une plus faible activité chlorophyllienne. Par contre, une forte activité chlorophyllienne devrait être liée à une faible valeur de R/V. Dans ce cas, la fraction du rayonnement réfléchi dans le rouge est en effet plus faible que dans le vert. L'absorption est donc plus importante dans le rouge, car l'activité chlorophyllienne est plus élevée.

Ceci paraît plausible, car une fraction élevée de sable signifie à l'opposé une mauvaise alimentation en eau, ce qui a à son tour un impact négatif sur l'alimentation des végétaux.

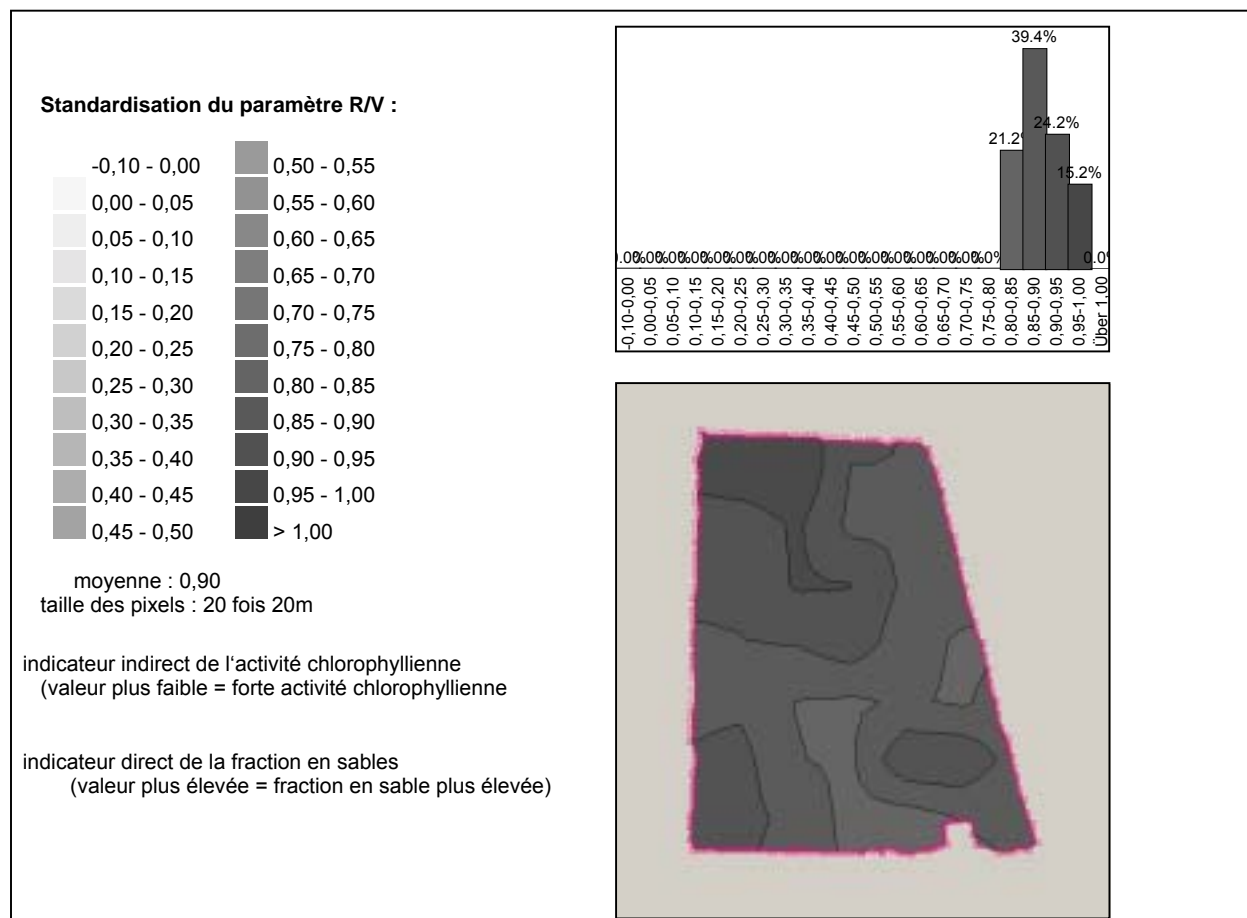


Fig. 141 : distribution du paramètre standardisé R/V

Dans le cadre de la **mise en œuvre concrète de la modulation des intrants**, les différentes « cartes de distribution standardisées » des paramètres importants peuvent finalement être intégrées en tant que cartes de correction dans le processus de réalisation des cartes d'application.

Cette carte en isolignes définit plusieurs sous-parcelles identiques recevant le même traitement. Pour chaque carte de distribution interpolée, il est possible de superposer n'importe quelle grille de pixels, pour laquelle les valeurs interpolées peuvent être extraites. La taille de cette grille peut être choisie librement. Une valeur du facteur de correction calculé est ainsi appliquée à chaque pixel, ce qui peut être pris en compte lors de la réalisation de la carte d'application, car l'application est là aussi calculée par pixel, dans la mesure où elle s'applique à la même grille. La figure 142 montre le comportement du facteur de correction dérivé dans un tableau avec à chaque fois les points de la grille (pixels) géoréférencés correspondants. Les valeurs standardisées de rayonnement réfléchi détaillées ici par pixel peuvent ainsi être prises en compte à tout moment dans le calcul d'application au niveau intraparcellaire.

A		B		C		D		E		F	
						normierte Reflexion					
						Rot		Grün		Blau	
						Korrekturfaktor für					
				direkt		Rückstrahlung chlorophyll-aktiver Biomasse		Rückstrahlung von nicht chlorophyllaktiver Biomasse		Sandanteil im Boden	
				indirekt		Chlorophyllaktivität N - Versorgung		Chlorophyllaktivität N - Versorgung		z.B. bei Melonien, Maße, zur Wasserversorgung (Ertrag, im gegebenen Fall)	
X-Koordinate		Y-Koordinate		Rasterweite							
13	ND48 1907298	E007 6778522	10	0,85	0,90	0,89					
14	ND48 1906399	E007 6778546	10	0,85	0,90	0,89					
15	ND48 1905500	E007 6778569	10	0,85	0,90	0,89					
16	ND48 1904601	E007 6778592	10	0,85	0,90	0,89					
17	ND48 1903701	E007 6778615	10	0,89	0,92	0,92					
18	ND48 1902802	E007 6778638	10	0,89	0,92	0,92					
19	ND48 1901903	E007 6778661	10	0,89	0,92	0,92					
20	ND48 1912708	E007 6779028	10	1,00	0,94	1,00					
21	ND48 1911809	E007 6779051	10	0,96	0,97	0,96					
22	ND48 1910909	E007 6779074	10	0,96	1,00	0,91					
23	ND48 1910010	E007 6779098	10	0,96	1,00	0,91					
24	ND48 1909111	E007 6779121	10	0,96	1,00	0,91					

Fig. 142 : comportement des facteurs de correction dérivés à des fins d'intégration dans le calcul des applications en intraparcellaire

En résumé, on peut dire que les méthodes de télédétection sont adaptées à la déduction de la distribution spatiale de paramètres fondamentaux de croissance par l'intermédiaire du comportement des peuplements végétaux en termes de réflexion. Les possibilités d'intégration des données dérivées dans les cartes d'application dans un objectif de modulation des intrants résident en particulier dans l'approche cartographique par la méthode offline.

L'utilisation de telles données de télédétection peut en particulier jouer un rôle important dans les cas où les données spatiales sont importantes et où leur collecte par voie terrestre est très coûteuse. Sur ce point, la télédétection est parfaitement indiquée dans le domaine de l'agriculture de précision, car de nombreuses informations différenciées au niveau intraparcellaire sont nécessaires pour de grandes surfaces.

L'utilisation de la télédétection pour la déduction des cartes d'application effectives en agriculture de précision semble très prometteuse du point de vue actuel. Il est toutefois important que la méthodologie de mise en œuvre repose sur des rapports intensivement explorés, dans lesquels les origines multicausales de la réflexion doivent être considérées séparément et éliminées par des mesures adaptées le cas échéant. En particulier, la prise en compte de l'absorption de la chlorophylle A dans le rouge ainsi que la réflexion dans le proche infrarouge liée à l'état des cellules semblent receler un grand potentiel.

Le potentiel lié à l'utilisation de données de télédétection est progressivement transféré dans des systèmes applicables dans la pratique. Pour les systèmes introduits sur le marché, on devrait toutefois déterminer clairement quels sont les paramètres effectivement pris en compte et quelles relations multicausales sont exclues ou bien simplement ignorées. Les méthodes n'envisageant par les relations multicausales et les solutions simples et bon marché, qui ne se présentent pas de manière différenciée et autocritique, sont particulièrement délicates à remettre en question par l'utilisateur.

3.2.2.1.5 Résumé des approches de transfert de l'approche cartographique dans la pratique

Ci-dessous sont résumées les approches issues des résultats de l'essai de modulation de la fertilisation azotée par l'*approche cartographique*, et permettant de transférer les méthodes testées dans la pratique.

Pour atteindre ce but,

- la surcharge de travail nécessaire à la collecte des données de rendement à la récolte devrait être réduite de telle sorte que le fichier de données de mesures soit généré automatiquement sans qu'un fichier vide ne doive être créé préalablement.
- le système devrait être plus convivial, au moins du point de vue des échanges de données.
- les solutions techniques devraient être développées plus avant, afin d'augmenter la précision des données dans les zones de fourrière, ou bien
- Il devrait être procédé à des améliorations structurelles permettant de réduire effectivement l'étendue des zones de fourrière (exploitation en îlots de parcelles) ;
- les connecteurs (prises) entre les composants techniques devraient être standardisés
- la capacité de compensation d'erreurs, la convivialité d'utilisation et le potentiel de prévention d'erreurs du système devraient être considérablement améliorés (guide de l'utilisateur clair, utilisation intuitive).
- il serait nécessaire de fixer des objectifs argumentés relatifs aux possibilités et aux limites des doses minimales préconisées (dans quelles circonstances, jusqu'à quel seuil ?).
- on devrait tendre à une exploitation en îlots de parcelles, et dans ce but,

- il serait nécessaire de mettre en place un endroit où s'adresser pour des demandes d'accompagnement et de conseil permettant de surmonter les difficultés de coopération et de coordination.
- la tentative d'intégration d'une simulation de croissance devrait être poursuivie, afin de parvenir à maîtriser les problèmes pratiques liés à la forte charge de travail de collecte de données sur une brève période et aux coûts élevés qu'elle engendre, et aussi afin d'intégrer des aspects de rentabilité, dans ce but, toutes les données intraparcellaire importantes devraient être rassemblées dans un SIG et élaborées, de même qu'il serait nécessaire de mettre en place un endroit où s'adresser pour des demandes d'accompagnement et de conseil à titre de soutien lors des mises en œuvre techniques.
- des solutions simples permettant de corriger et de constituer des mosaïques d'images à partir d'images aériennes devraient être intégrées dans les SIG destinés à un usage agronomique, et que la possibilité d'une saisie géocodée des paramètres de réflexion soit ainsi ouverte, afin d'intégrer des valeurs de rayonnement réfléchi standardisées dans la méthode en tant que facteurs de correction. Dans ce cadre, les points importants sont :
 - la variabilité de la fraction granulométrique du sol (et donc indirectement l'alimentation en eau) issue de la combinaison des canaux rouge/vert,
 - la variabilité de la masse végétale (et donc indirectement les besoins en éléments nutritifs) par la prise en compte du canal infrarouge
 - l'activité chlorophyllienne (canal du rouge), ainsi que le canal du vert dans la mesure où les effets de superpositions peuvent être exclus.
- de telles valeurs de rayonnement réfléchi standardisées et géoréférencées pourraient suffire pour servir de facteurs de correction au sein d'une banque de données SIG à des fins de mise en œuvre de la modulation des intrants.

Synthétiquement, on peut dire que la mise en place d'un service chargé de rassembler les données importantes, de les traiter, les retravailler puis de les intégrer au sein de la méthode cartographique en vue de la modulation des intrants permettrait de surmonter les obstacles structurels, ceci afin de pouvoir également mettre en œuvre la modulation des intrants dans les conditions régionales particulières.

3.2.2.2 Aptitude à un usage pratique de l'approche online

Dans l'optique de la mise en pratique de la modulation des intrants sont présentés ci-dessous les principaux résultats issus des études de mise en œuvre de cette modulation à l'aide d'un capteur online (Cropmeter, chapitre 2.1.2.3 (4)). Cette présentation sera complétée par l'esquisse d'améliorations possibles à l'aide d'autres capteurs online. Enfin, les solutions possibles d'évaluation de l'approche online dans la pratique seront synthétisées.

3.2.2.2.1 Complications

Au cours de la réalisation de l'essai, il s'est avéré que le pendule était trop lourd pour réagir sur la biomasse avec un mouvement suffisant, malgré les modifications effectuées et décrites (Fig. 143).



Fig. 143 : capteur pendulaire modifié dans le maïs à hauteur de genou (stade 7 feuilles)

Les oscillations du pendule étaient trop réduites pour tirer des conclusions sur le peuplement, ce qui a obligé à interrompre l'essai. L'enregistrement prévu d'une carte d'application s'est révélé impossible en raison des trop faibles différences de mouvement du pendule. Ainsi, il n'a pas été possible d'effectuer de comparaison entre la carte d'application issue de ce capteur avec celle de l'approche cartographique (méthode offline), contrairement à ce qui était prévu dans le projet.

En outre, il a été reproché que les réactions du pendule n'étaient pas utilisables avec des tracteurs possédant une suspension de l'essieu avant. Dans le cas du tracteur JGB – Fasttrack, il était impossible de bloquer cette suspension. Ce problème n'était évoqué dans aucun prospectus de vente (BINDER, 2004).

3.2.2.2 Potentiel de l'approche online testée

Le capteur pendulaire ayant été testé lors d'une manifestation d'information sur le thème de l'agriculture de précision organisée dans le cadre du projet, il a été possible de discuter de la problématique décrite avec de nombreux participants compétents et intéressés (Fig. 144). Les réflexions et propositions d'amélioration suivantes ont ainsi été évoquées :

En principe, la problématique des mouvements trop faibles et par là même trop peu différenciés du pendule pourrait être résolue par une **modification supplémentaire du pendule** : par l'utilisation d'un pendule plus large, ou bien d'une largeur identique mais d'une masse bien inférieure. Dans le premier cas, la manipulation de l'outil deviendrait toutefois extrêmement délicate, car une extrémité risquerait de toucher le sol en cas d'irrégularité de celui-ci ou dans les pentes.



Fig. 144 : discussion sur l'utilisation du capteur pendulaire sur maïs

En outre, le fait que les entrepreneurs de la région aient besoin d'un temps relativement long pour procéder à l'application d'azote en raison de la surface importante des parcelles à fertiliser constitue un problème. Concrètement, cela signifie que le capteur devrait déjà fonctionner avec certitude au stade 3 feuilles, mais également au stade 7 feuilles (BINDER, 2004). En raison de la faible hauteur des plantes, le stade 3 feuilles constitue le problème principal.

Il ne serait ainsi possible d'effectuer un scan de la masse végétale à l'aide d'un pendule modifié que pour un stade tardif. Il en résulterait un intervalle de temps très bref pour l'application d'azote, ce qui serait insuffisant en pratique.

C'est pourquoi, du point de vue actuel, le capteur serait adapté sur maïs soit en cas de surface réduite à un stade tardif, ou bien la fertilisation devrait intervenir très tard, voire même trop tard.

Pendant l'essai, l'objection de **l'altération des résultats de mesure suite à l'influence des mouvements du pendule par la suspension avant du tracteur** ne s'est pas avérée sans fondements. On pouvait voir clairement que l'équilibrage des profondeurs de passage de roues par le capteur ne réagissait pas suffisamment à l'amortissement du train avant du

tracteur. L'amortissement du tracteur génère ainsi des oscillations du capteur qui sont considérées comme des modifications de biomasse. C'est pourquoi il faudrait trouver pour l'équilibrage des profondeurs de passages de roues une solution mathématique à moyen terme basée sur un capteur à distance, de telle sorte que les données soient corrigées mathématiquement. Ceci simplifierait également le traitement en marche arrière (VÖLKER, 2004).

L'avantage de l'utilisation du Cropmeter réside dans le fait que les différentes valeurs d'oscillations du pendule peuvent être converties en n'importe quelles valeurs maximales et minimales pour l'application. L'exploitant conserve le choix de la quantité d'engrais et des valeurs-limites, alors que le capteur ne procède qu'à la distribution intraparcellaire de ces valeurs sur la parcelle (VÖLKER, 2004).

La méthode doit finalement être compréhensible pour chaque exploitant. Par le passé, des agriculteurs ont déjà évalué l'état des plantes sur la base de leur résistance. Un agriculteur a par exemple utilisé dans ce but une canne de marche qu'il déplaçait devant lui en demi-cercle à travers la parcelle de céréales (HUGGER, 2004).

Bien que l'essai ait dû être interrompu en raison de problèmes techniques, on peut tout de même conclure que le capteur pourrait avoir un intérêt pour l'application intraparcellaire d'azote si un pendule plus léger, mais pas plus large, était utilisé et si l'équilibrage des profondeurs de roues était résolu mathématiquement. La méthode est toutefois conditionnée par une hauteur minimale des plants de maïs, ce qui limite fortement la possibilité d'une fertilisation intraparcellaire précoce.

A l'heure actuelle, l'utilisation du Cropmeter non modifié en tant que solution online n'est pas adaptée à la modulation des intrants sur *maïs*. Hormis ce point, le planning des essais de 2004, qui incluait une modulation des intrants à l'aide de la méthode cartographique, compliquée et coûteuse en temps mais fonctionnelle, a été considéré après coup comme bon.

3.2.2.3 Potentiel lié à l'intégration d'autres méthodes online

Parallèlement aux modifications décrites du capteur online « Cropmeter », il existe un autre potentiel d'amélioration en vue de la mise en œuvre de la modulation des intrants résidant dans l'intégration de capteurs online alternatifs.

Quelques-uns des capteurs online les plus connus en matière de modulation des applications azotées ont été présentés dans le chapitre 1.3 (1). Afin de ne pas déborder du cadre du projet, la discussion ci-dessous est limitée à leur potentiel. Il s'agissait de :

- de l'Hydro N-sensor
- de capteurs radar et
- de GVIS/AVIS

Les trois capteurs ont en commun une absence de contact avec la culture. La restriction majeure de l'utilisation du capteur pendulaire sur maïs résidant dans ce contact (contact du pendule), les trois capteurs cités permettent de prime abord de remédier à ce problème.

Un autre point commun de ces trois capteurs est qu'ils sont difficilement disponibles. Alors que l'**Hydro N-sensor** est déjà utilisé dans la pratique, mais qu'au moment de l'étude il était à peine disponible en raison d'utilisation en continu, les **capteurs radar** et **GVIS/AVIS** n'en sont actuellement qu'au stade expérimental.

Une série de résultats d'étude prometteurs a entre-temps été obtenue pour l'Hydro N-Sensor. Ce capteur évite les problèmes de manipulation intervenus avec le capteur pendulaire. Toutefois, il existe des restrictions dans le sens où la réflexion mesurée par le capteur dépend de la lumière du jour. Il faut ainsi prêter une attention particulière à l'impact de différentes situations d'éclairage. Cette méthode, qui repose sur une combinaison entre des informations spectrales pour la détection de la biomasse (proche infrarouge) et l'activité chlorophyllienne (rouge), repose sur une base théorique très solide et est donc très prometteuse.

Alors qu'une expérience intéressante a déjà été rassemblée pour d'autres utilisations, l'intégration des capteurs radar pour la modulation des intrants dans le domaine de l'agriculture de précision n'en est encore qu'au stade expérimental. S'agissant de capteurs actifs, le problème principal réside dans les fortes différences d'intensité du rayonnement réfléchi selon l'angle de vue. Ainsi, le caractère et l'intensité du signal peuvent varier fortement pour un même objet selon l'angle d'enregistrement. Cependant, son indépendance vis-à-vis de l'éclairage – et par là même de la situation météorologique – constitue le plus grand avantage de ce capteur actif.

Par rapport aux autres capteurs de télédétection multispectraux, optiques et produisant des images, GVIS et AVIS permettent d'obtenir des informations meilleures et plus détaillées. Leur force principale réside dans leur résolution spectrale extrêmement élevée. Cette grande différenciation du rayonnement réfléchi permet d'établir dans les peuplements végétaux des comportements caractéristiques en termes de réflexion liés à différentes origines importantes. Ainsi, on a pu démontrer que pour certaines espèces et variétés végétales bien déterminées, certaines bandes étroites du spectre électromagnétique réagissaient de

manière spécifique à des situations de carences en éléments nutritifs bien précises (GRAEFF, 2003).

Toutefois, cette voie nécessite encore de gros efforts de recherche. C'est pourquoi la méthode peut être considérée comme particulièrement bien adaptée à la mise en œuvre de la modulation des intrants. En vue d'une utilisation pratique immédiate, il est cependant nécessaire de rechercher des relations supplémentaires.

Ainsi, on peut dire de tous les capteurs présentés que leur développement et leur aptitude actuelle à une utilisation pratique doivent être suivis avec attention.

Lorsque ces capteurs seront plus facilement disponibles et que davantage d'expérience pratique aura été acquise, leur potentiel devrait également être testé à nouveau dans les conditions particulières des petites structures de la plaine du Rhin Supérieur, car ces méthodes recèlent des possibilités intéressantes.

L'Hydro N-Sensor, dont l'utilisation dans la pratique est bien plus avancée, semble indiqué pour un prochain test en vue de la mise en œuvre de la modulation des intrants.

Alors que les solutions techniques des capteurs online sont manifestement de plus en plus aptes à une utilisation pratique, il demeure toutefois un problème d'un tout autre ordre.:

En effet, la **stratégie agricole** de modulation des applications azotées n'est jusqu'à présent pas clairement définie. Il n'a pas été définitivement décidé quelles mesures d'application devaient être entreprises selon l'état des végétaux, ni dans quelles circonstances les plantes en mauvais état sanitaire devaient par exemple être traitées, ou bien s'il était préférable d'éviter une application car les conditions globales ne permettraient de toute façon aucune amélioration.

D'une part, la décision revient à l'exploitant, sur qui repose finalement la responsabilité de l'application. D'autre part, c'est justement dans ce type de questionnement difficile à résoudre qu'il est toujours abandonné à lui-même. Dans ce contexte demeurent donc encore des problématiques agricoles à résoudre (GERHARDS, 2005).

3.2.2.2.4 Résumé des solutions possibles de transfert de l'approche online dans la pratique

Les approches de transfert de l'approche online dans la pratique pourraient être résumées comme suit :

- une modification du pendule du Cropmeter pourrait aussi permettre une utilisation sur maïs, ce qui reste à vérifier.
 - ceci pourrait rendre plus difficile la manipulation en cas de hauteur irrégulière du peuplement ou sur pente,
 - la nécessité d'une hauteur minimale assez élevée des plantes à mesurer réduirait la période d'application azotée à tel point que l'application pratique en serait très limitée
- un capteur pendulaire modifié ne serait donc adapté que sur des parcelles relativement petites et à des périodes de développement assez tardives.
- l'équilibrage de la profondeur des passages de roues devrait être résolu mathématiquement, afin de réduire le potentiel d'erreur et de faciliter la manipulation
 - il est exemplaire que le capteur procède à une répartition intraparcellaire des intrants par rapport la biomasse et que la décision de la quantité absolue d'engrais soit abandonnée à l'exploitant.
 - la facilité de compréhension du système est également exemplaire
 - à l'heure actuelle, le Cropmeter non modifié en tant que solution online n'est pas adapté à une modulation des intrants sur *maïs*.
- Pour les autres capteurs présentés (Hydro-N, radar et GVIS/AVIS), on peut dire synthétiquement que leur développement et leur aptitude à un usage pratique devraient être suivis avec attention.
 - étant sans contact physique avec la culture, ces outils n'ont pas l'inconvénient du Cropmeter, mais possèdent tous des désavantages.
De même, tous leurs avantages respectifs sont cependant évidents et recèlent un vaste potentiel de développement de la mise en œuvre de la modulation par le biais de l'approche online.
- lorsque ces capteurs seront plus facilement disponibles et que davantage d'expérience pratique aura été acquise, leur potentiel devrait également être testé à nouveau dans les conditions particulières des petites structures de la plaine du Rhin Supérieur, car ces méthodes recèlent des possibilités intéressantes. L'Hydro N-Sensor, dont l'utilisation dans la pratique est bien plus avancée, semble indiqué pour un prochain test en vue de la mise en pratique de la modulation des intrants.
- l'absence de définition claire de stratégies agricoles pour la modulation concrète des intrants constitue toutefois un problème non résolu dans des conditions-cadres problématiques.

3.2.3 Résultats relatifs à l'impact de la modulation

A la suite de la présentation des résultats importants en vue de la modulation des intrants issus des essais effectués en termes de *variabilité* (section 3.2.1) et de *faisabilité de la modulation* (chapitre 3.2.2), sont abordés ci-dessous les impacts de la modulation. Dans ce cadre seront distingués :

- l'impact de la modulation sur le reliquat d'azote
- l'impact de la modulation sur le rendement
- l'impact de la modulation sur le niveau de fertilisation
- le bilan d'azote (respect de l'environnement) et
- la rentabilité de la modulation

3.2.3.1 Impact sur les reliquats d'azote

L'impact de la modulation de la fertilisation azotée sur la distribution des reliquats d'azote constitue l'un des aspects les plus intéressants à court terme, car la distribution des reliquats d'azote est l'un des paramètres d'entrée du calcul du niveau d'application. C'est pourquoi une application modulée devrait également avoir un impact sur la distribution des reliquats d'azote qui en résulte. Ci-dessous sont présentés les résultats ayant permis d'évaluer le succès de la mesure. Dans ce cadre, il est souhaitable de réduire nettement les très fortes valeurs trouvées dans la parcelle I-02, ainsi que d'obtenir une distribution équilibrée.

Pour l'année 2005, ni les données de rendement ni la distribution des reliquats d'azote n'étaient disponibles au moment de la rédaction du rapport, ce qui a empêché les comparaisons pour cette année. L'examen plus avant des recherches relève de l'Université de Hohenheim, qui était également responsable des aspects techniques de la mise en œuvre de la modulation à l'aide de la simulation de croissance scientifique.

En 2004, les parcelles I-01 et I-02 ont été fertilisées en dehors du calendrier prévu. D'autres complications intervenues sur la parcelle I-03 ont eu pour résultat le fait que seule une faible partie de la parcelle a pu être fertilisée selon le calendrier. En outre, on s'est concentré au cours de cette année d'étude sur les alternatives à la modulation de la fertilisation azotée. Etant donné qu'en 2003 au contraire, le protocole d'étude a pu être réalisé selon le calendrier prévu et sans coupure, malgré de nombreuses difficultés initiales, les données issues de cette année d'étude sont prédestinées pour ce test.

On examinera donc l'évolution des valeurs des reliquats d'azote entre mai et septembre, réparties selon les deux traitements modulés et non modulés (conventionnel) sur la base des données de 2003.

Cet **examen comparatif des distributions des reliquats d'azote** entre le printemps et l'automne de cette année met en évidence les éléments suivants :

Lors de l'échantillonnage de mai, les valeurs de reliquat d'azote les plus élevées se trouvent dans la parcelle I-02 (sud-ouest) (Fig. 145). Ceci provient du fait que le propriétaire de la

parcelle possède du bétail, et que du lisier est ainsi régulièrement épandu dans cette parcelle depuis des années.

Dans la parcelle I-01 (sud-est), on observe localement une forte hausse des reliquats d'azote. L'analyse de ces échantillons a donc été renouvelée, pour confirmer le résultat initial anormalement élevé. L'origine de cette forte hausse localisée est inconnue. Dans la parcelle I-03 (nord), les reliquats d'azote sont équilibrés et à un niveau faible (Fig. 45).

Lors de l'échantillonnage de septembre (après la récolte), les valeurs des reliquats d'azote étaient comme prévu fortement réduits et homogènes sur l'ensemble des parcelles, à l'exception de la limite est de la parcelle I-03 où des valeurs nettement plus élevées ont été trouvées. Par contre, les distributions irrégulières dans la parcelle I-02 ainsi que les valeurs plus élevées de la parcelle I-02 du printemps se sont aplanies (Fig. 46).

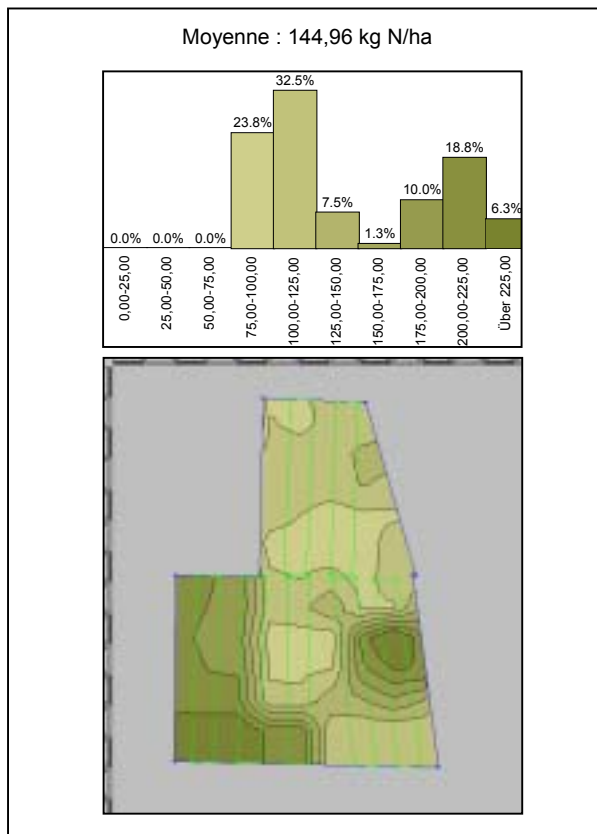


Fig 145: distribution des reliquats d'azote les 10 et 17 mai 2003

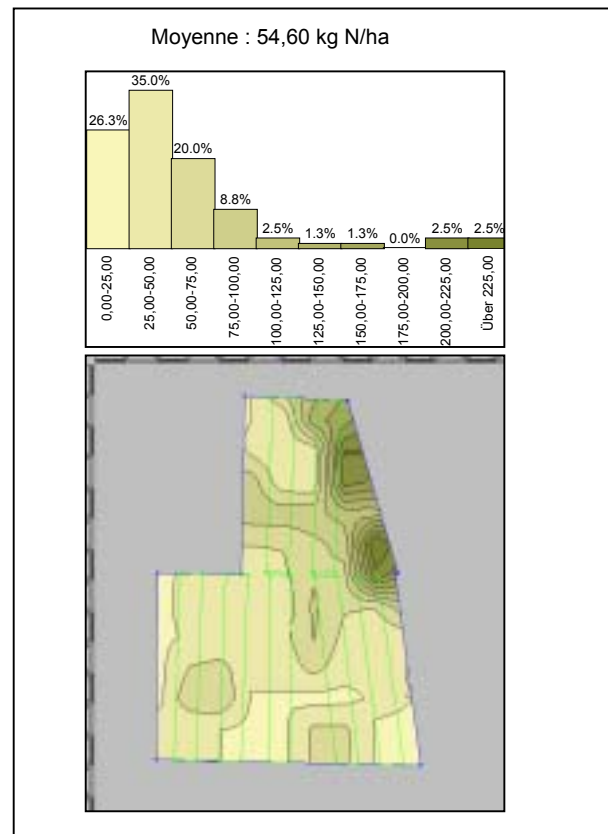


Fig. 146 : distribution des reliquats d'azote le 20 septembre 2003

On distingue clairement la répartition bimodale des classes pour les échantillonnage de mai (Fig. x). Elle constitue un indice du mélange potentiel de deux ensembles différents, ce qui peut également être considéré de la sorte en raison du traitement différent appliqué à la parcelle I-02 pendant une longue période (épandage de lisier).

Au contraire, la distribution de la figure y est unimodale, si l'on excepte les valeurs hors-norme en limite nord-est. Le niveau nettement plus faible des reliquats d'azote y est distinctement reconnaissable, comme on pouvait s'y attendre après la récolte. En conséquence, la moyenne ne dépasse plus 54,60 kg N/ha contre 144,96 kg N/ha initialement. Ceci représente une baisse moyenne de 84,67 kg N/ha (58 %) (Tab. 30).

Valeurs moyennes absolues des reliquats d'azote	
Moyenne mai :	146,07 kg N/ha (100 %)
Moyenne septembre :	61,40 kg N/ha (41,6 %)
Baisse moyenne : -	84,67 kg N/ha (58,4 %)

Tab. 30 : valeurs moyennes des reliquats d'azote

La figure 147 illustre les modifications entre les valeurs d'automne et de printemps sous forme d'une carte d'isolignes spatialisée (en pour cent). Les parties claires représentent une forte baisse et les parties sombres une augmentation.

Dans les parcelles I-01 et I-02, la réduction régulière et homogène se reflète à un faible niveau, alors que dans l'est de la parcelle I-03, la localisation des zones de hausse des reliquats d'azote est aisée.

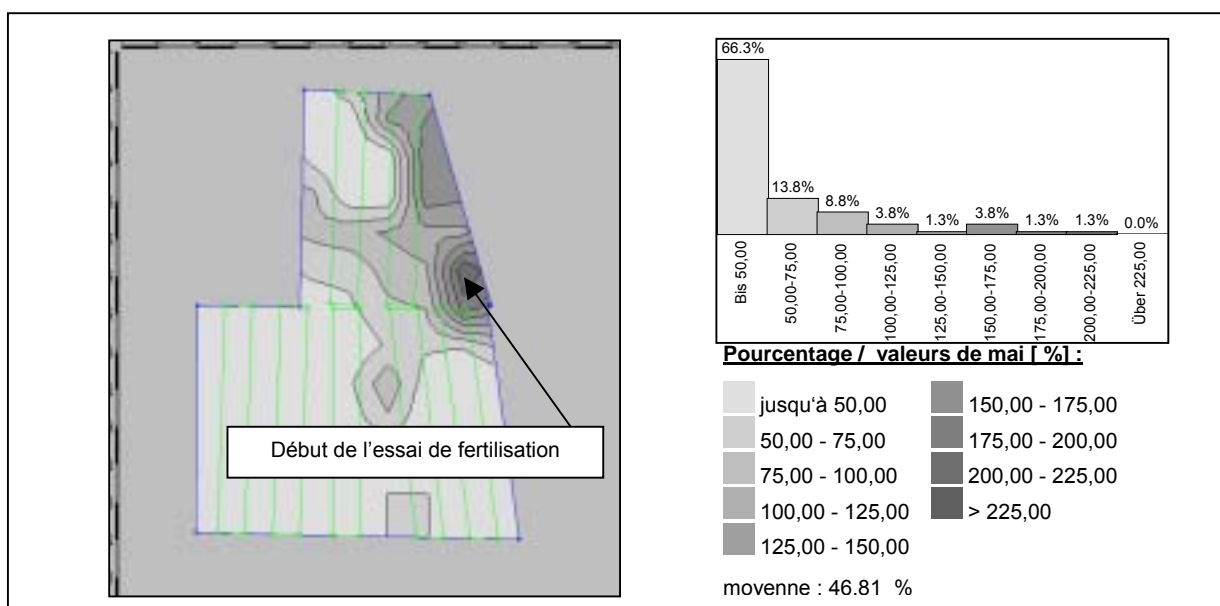


Fig. 147 : valeurs des reliquats d'azote en automne par rapport au printemps

Cette augmentation inattendue des reliquats d'azote au cours de l'échantillonnage d'automne par rapport au printemps peut être expliquée partiellement :

Lors de l'essai de fertilisation réalisé au printemps, l'entrepreneur a commencé l'application dans le coin sud-est de la parcelle I-03. Après quelques mètres, on a constaté que l'épandeur d'engrais ne réagissait pas à la carte d'application, bien qu'un test ait été effectué auparavant avec succès sous forme d'un passage d'entraînement. Après correction de l'erreur, l'application a dû être redémarrée, de telle sorte que la zone décrite a été fertilisée en double. Cependant, le

fait que cette zone de valeurs plus élevées se trouve en fin de compte sur la totalité de la limite est au nord du chemin incite à poser la question d'une éventuelle influence du terrain voisin, d'autant plus qu'en automne, la distribution était relativement homogène dans le reste de la parcelle I-03.

On peut ainsi affirmer que les valeurs d'automne reflètent une réduction notable des reliquats d'azote à un niveau correct et que sa distribution spatiale est globalement homogène, ce qui explique l'exception à la limite est de la parcelle I-03.

Par rapport au niveau printanier des reliquats d'azote, l'importance de la réduction spatialisée varie fortement.

Synthétiquement, on peut donc dire que la mesure d'application a eu l'effet attendu du point de vue des reliquats d'azote, hormis l'exception décrite. Au niveau parcellaire, on constate la nette réduction recherchée des valeurs élevées de reliquats d'azote, ainsi qu'une distribution plus homogène au niveau intraparcellaire.

Si l'on considère ensemble les deux modes de traitement (modulé et conventionnel) à l'échelle de la parcelle, le succès du résultat peut cependant encore être attribué à la mise en œuvre technique de la modulation de la fertilisation azotée par l'approche cartographique. En fin de compte, grâce à l'intégration de la technique, on a pu également garantir que les résultats des calculs selon les bonnes pratiques agricoles ont aussi été mis en œuvre dans les bandes de traitement non modulées. Ceci n'est pas basé sur un unique sondage fortuit du reliquat d'azote mais sur plusieurs sondages, ce qui a permis de prendre en compte pour la quantité à appliquer calculée forfaitairement au niveau parcellaire une valeur moyenne représentative au lieu d'une valeur fortuite issue d'un seul sondage.

Dans la parcelle I-02 en particulier, la forte baisse a pu être atteinte grâce à l'absence de dose minimale et à une réduction importante de l'apport azoté par la mise en œuvre techniquement assistée (dose inférieure à 20 kg/ha dans certaines zones).

La figure 148 présente la baisse des valeurs de reliquats d'azote **selon le traitement appliqué**. Le diagramme en barres reproduit le niveau des valeurs d'automne par rapport au printemps (en pour cent).

Les barres situées à gauche représentent ainsi la baisse globale, les trois parcelles étant considérées en commun. La barre bleue (à gauche) montre le recul relatif moyen des valeurs automnales par rapport à celles du printemps, et les barres rouges et jaune la baisse selon le mode de traitement.

Pour les trois parcelles prises en commun, la moyenne des reliquats d'azote s'élève à 146,07 kg N/ha en mai et à 61,40 kg N/ha en septembre, (42 %, barre bleue), ce qui équivaut à une baisse de 84,67 kg N/ha (58 %).

Pour l'ensemble des trois parcelles, la barre rouge (au centre) illustre la réduction pour les sous-parcelles traitées de manière modulée alors que la barre jaune (à droite) représente la baisse intervenue sur les surfaces traitées conventionnellement.

Il en ressort que la baisse plus faible sur les sous-parcelles traitées de façon modulée est négligeable par rapport à celle des sous-parcelles traitées conventionnellement.

L'examen individuel des parcelles aboutit à une conclusion différente. Dans ce cas, la *diminution d'automne des valeurs des reliquats d'azote est toujours nettement plus faible en cas de traitement modulé qu'en cas de traitement conventionnel !*

On constate également que dans le cas présent, des augmentations de valeurs se produisent dans certaines zones traitées conventionnellement mais dans aucune des sous-parcelles traitées de manière modulée. Ce dernier aspect ne devrait toutefois pas être surévalué, car les causes de ces différences pourraient provenir d'événements extrêmes liés à une parcelle voisine. Il est aussi intéressant de mentionner sur ce point qu'à la différence des deux autres, la parcelle I-03 a reçu une fertilisation par injection lors du semis.

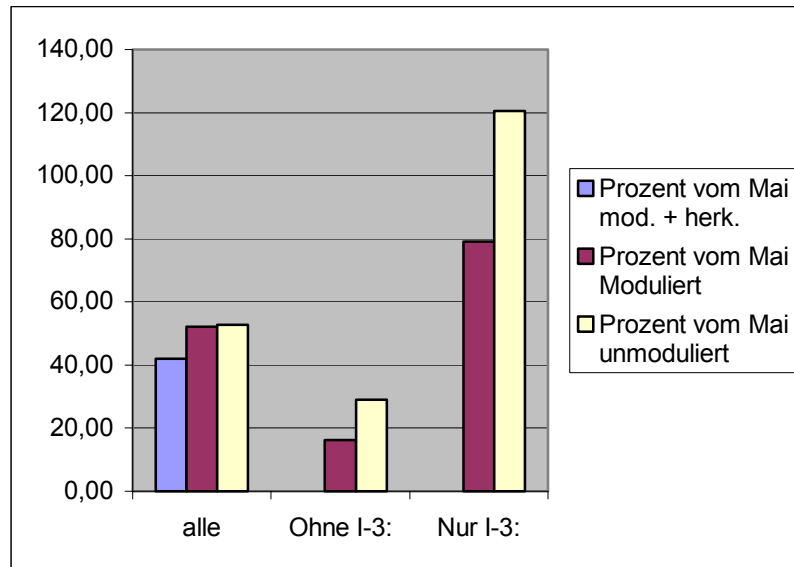


Fig. 148 : pourcentage de reliquat d'azote en automne par rapport au printemps selon différents traitements et selon les parcelles

Pour synthétiser, on peut dire que la baisse relative des reliquats d'azote sur l'ensemble des surfaces paraît d'abord relativement similaire (légèrement supérieure à 50 %) et indépendante du mode d'application de la fertilisation azotée. Un examen plus approfondi permet de montrer que cet effet est dû à une compensation fortuite des valeurs de toutes les parcelles.

Si l'on distingue les surfaces ayant reçu un traitement similaire en matière de fertilisation par injection, on constate un effet plus net.

La baisse des reliquats d'azote recherchée est bien plus importante sur les surfaces modulées.

La figure 149 illustre l'absence de corrélation entre la distribution des valeurs issues des deux échantillonnages. Ainsi, les reliquats d'azote au printemps et en automne ne sont pas identiques.

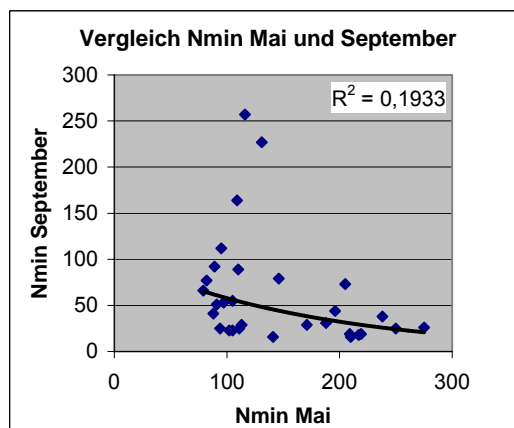


Fig. 149 : test de corrélation entre les reliquats d'azote du printemps et de l'automne

Par exemple, les valeurs élevées trouvées au printemps ne se retrouvent pas nécessairement en automne et inversement. Ceci est un effet recherché, car les reliquats d'azote ne doivent pas seulement être plus faibles après la récolte mais également homogènes, ce qui est globalement le cas.

En résumé, on peut affirmer,

- que les valeurs des reliquats d'azote après la récolte sont nettement réduites, ce qui était recherché,
- que les valeurs des reliquats d'azote après la récolte sont aussi nettement plus homogènes, ce qui était recherché,
- que la baisse souhaitée des reliquats d'azote après la récolte est nettement plus importante dans les sous-parcelles modulées que dans celles traitées conventionnellement.

Ceci montre que dans le cas présent, un mode de traitement modulé est bien plus avantageux sur le plan écologique.

De toute évidence, les reliquats d'azote demeurant sur la parcelle sont plus faibles grâce à l'application adaptée aux besoins. Comme on ne constate par ailleurs aucune différence notable de rendement, un épandage forfaitaire conventionnel aurait sans doute dépassé les besoins dans les zones dans lesquelles le reliquat était important. Il est clair que les sous-parcelles dans lesquelles les valeurs étaient plus faibles auraient par contre reçu une fertilisation encore largement suffisante.

La modulation permet de réduire fortement cet effet. L'application était adaptée et conforme aux besoins, ce qui réduit la pollution de l'environnement due à la présence d'azote libre.

D'autres aspects intéressants relatifs à l'impact de la mesure de modulation peuvent être tirés des **essais 2004** de préparation d'une carte d'application intraparcellaire :

L'application forfaitaire effectuée hors du calendrier prévu par le propriétaire et décrite dans le chapitre 2.1.2.3 (2) peut être vue comme une opportunité d'évaluation de cette pratique du point de vue intraparcellaire.

Comme cela a été expliqué, des imprécisions et des malentendus entre personnes impliquées ont eu pour résultat un épandage forfaitaire imprévu des parcelles I-01 et I-02 qui a empêché la réalisation de la modulation prévue. Cette fertilisation s'est révélée lors de l'échantillonnage des reliquats d'azote, qui a été par hasard effectué immédiatement après l'épandage.

Selon le calcul de la carte d'application, il aurait fallu retirer de l'azote dans certaines zones, car la dose présente dans le sol était déjà largement suffisante (valeurs d'application négatives). La collecte à une échelle fine des reliquats d'azote peu après cette mesure de fertilisation permet de déterminer clairement par le biais de la carte d'application intraparcellaire si l'application était correcte dans les conditions des bonnes pratiques agricoles et au niveau intraparcellaire ou non.

Idéalement, la carte d'application d'azote dérivée devait afficher des valeurs de 0 kg d'urée/ha dans l'ensemble des parcelles I-01 et I-02 (Fig. 150, sous-parcelles en blanc), car une fertilisation adaptée avait déjà été effectuée, au moins au niveau parcellaire.

Si par contre la carte d'application présente des valeurs supérieures à 0, l'exploitant aurait pu fertiliser en plus la quantité correspondante sur la base d'un calcul intraparcellaire selon les bonnes pratiques agricoles. Si au contraire la carte présente des valeurs d'application négatives, ceci signifie du point de vue des bonnes pratiques agricoles qu'une dose d'azote trop importante a été épanchée. Cette situation involontaire permet de déterminer si la mesure de fertilisation effectivement réalisée aurait été conforme aux règles techniques ou non d'un point de vue intraparcellaire.

Dans les **parcelles I-01 et I-02** concernées, les différentes sous-parcelles sont clairement reconnaissables. Dans les zones en blanc, l'azote est réparti de façon homogène après la fertilisation d'un point de vue intraparcellaire (Fig. 150).

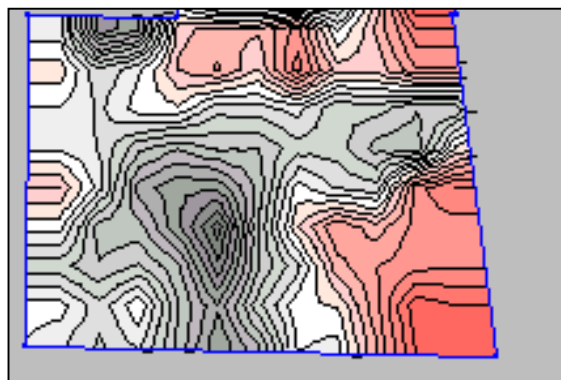


Fig. 150 : carte d'urée des parcelles I-01 et I-02

Pour la **parcelle I-02** (ouest), on constate clairement que la fertilisation non modulée a été conduite de façon très prudente par le propriétaire. D'après le calcul intraparcellaire selon les bonnes pratiques agricoles, il aurait été possible d'épandre davantage d'azote pour répondre aux besoins dans la plus grande partie de la parcelle. Seule une fraction négligeable de la parcelle est « surfertilisée », avec des valeurs atteignant 75 kg d'urée/ha (Fig. 151).

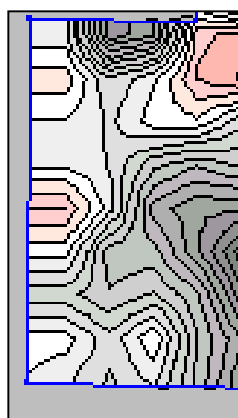


Fig. 151 : carte d'urée de la parcelle I-02

Il apparaît clairement qu'il est impossible de tenir compte des particularités intraparcellaires avec les pratiques de fertilisation forfaitaires conventionnelles. On peut toutefois préciser que malgré une fertilisation forfaitaire sur l'ensemble de la parcelle, l'application réalisée est très proche de l'optimum calculé au niveau intraparcellaire pour une partie relativement importante de la parcelle. Dans la parcelle I-02, la conduite relativement prudente de l'exploitant s'explique

par les valeurs excessives de reliquats d'azote relevées dans cette parcelle pendant des années.

La situation est légèrement différente dans la **parcelle I-01** (est) : dans les zones nord et ouest en particulier, la carte d'urée calculée présente des valeurs négatives (en rouge) atteignant – 200 kg d'urée/ha, alors qu'à l'ouest se trouvent des valeurs positives (gris) allant jusqu'à 300 kg d'urée/ha. Ainsi, si on effectuait le calcul intraparcellaire selon les bonnes pratiques agricoles, l'épandage serait trop important dans les zones en rouge et trop faible dans celles en gris.

Il est cependant aisé de voir que la fertilisation azotée au niveau parcellaire paraît relativement équilibrée (Fig. 152).

Dans le cas présent, l'épandage adapté aux besoins au niveau intraparcellaire souffre toutefois des fortes différences entre les parcelles, qu'on ne peut considérer en cas d'approche non modulée. Dans cette situation, les pratiques conformes aux règles de la profession doivent également être indiquées au propriétaire. Une application adaptée aux besoins se heurte cependant aux différences intraparcellaires des différentes parcelles et aboutit à un résultat globalement très insatisfaisant.

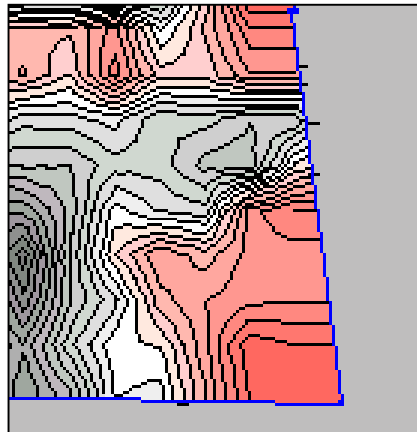


Fig. 152 : carte d'urée de la parcelle I-01

Sur la base de ces deux exemples, on constate que bien que le travail à l'échelle de la parcelle ait été effectué consciencieusement, aucune application adaptée aux besoins n'est possible au niveau intraparcellaire si les intrants ne sont pas modulés par la mise en œuvre de techniques plus modernes.

Grâce à l'expérience acquise au cours de l'année d'étude 2004, on peut dire en résumé que les épandages d'azote intraparcellaires adaptés aux besoins ne peuvent être mis en œuvre qu'à l'aide d'une modulation des intrants. Une application seulement adaptée au niveau parcellaire ne peut pas être adaptée aux besoins sur la base de la variabilité observée au sein de la parcelle.

Seule une modulation des intrants peut entraîner des effets positifs et homogénéisant sur la distribution des reliquats d'azote qui en résulte.

3.2.3.2 Impact sur le rendement

Conformément aux explications du chapitre (1) « impact sur les reliquats d'azote », on a également recouru aux résultats des essais de 2003 pour étudier les impacts de la modulation. Ceci est possible grâce à la possibilité de séparation des données décrite dans la section 2.1.2.2 (1) en rapport avec le paramètre de variabilité.

Sur ce point, un résultat très similaire est obtenu pour les 2 modes de traitement différents : Avec une moyenne de 11,39 t/ha (données brutes non corrigées), l'amélioration du rendement en cas de fertilisation modulée est insignifiante. L'amélioration de rendement se manifeste surtout par une légère augmentation de la classe de rendement 11-13 t/ha. Cette hausse de 0,8 % peut tout à fait entrer dans le cadre d'une dispersion standard et est négligeable. Quoi qu'il en soit, on peut en déduire qu'un épandage d'azote modulé n'a en aucun cas causé une baisse de rendement par rapport à une fertilisation conventionnelle (Tab. 31).

	Rendement [t/ha]	en % /total
Fertilisation forfaitaire	11,31	+0,0885 %
Fertilisation modulée	11,39	+0,7960 %
Total	11,30	100 %

Tab. 31 : rendement sur les sous-parcelles traitées différemment

On constate clairement que l'amélioration insignifiante du rendement trouve son origine dans un léger décalage des classes de faible rendement vers les rendements moyens (Tab. 32, Fig. 153) :

Distribution	Rendement de la surface totale Distribution en %	Pour une fertilisation forfaitaire par rapport à la surface totale	Pour une fertilisation modulée par rapport à la surface totale
<6 t/ha	0,6	-0,2	0
6-7 t/ha	2,5	-0,2	-0,4
7-9 t/ha	7,7	+1,1	-1,9
9-11 t/ha	30,9	+0,3	-0,7
11-13 t/ha	39,6	-1,4	+4,2
13-15 t/ha	16,6	+0,4	+0,2
>15 t/ha	2,0	0	+0,1

Tab. 32 : décalage de la distribution des classes de rendement par rapport à la distribution sur la surface totale

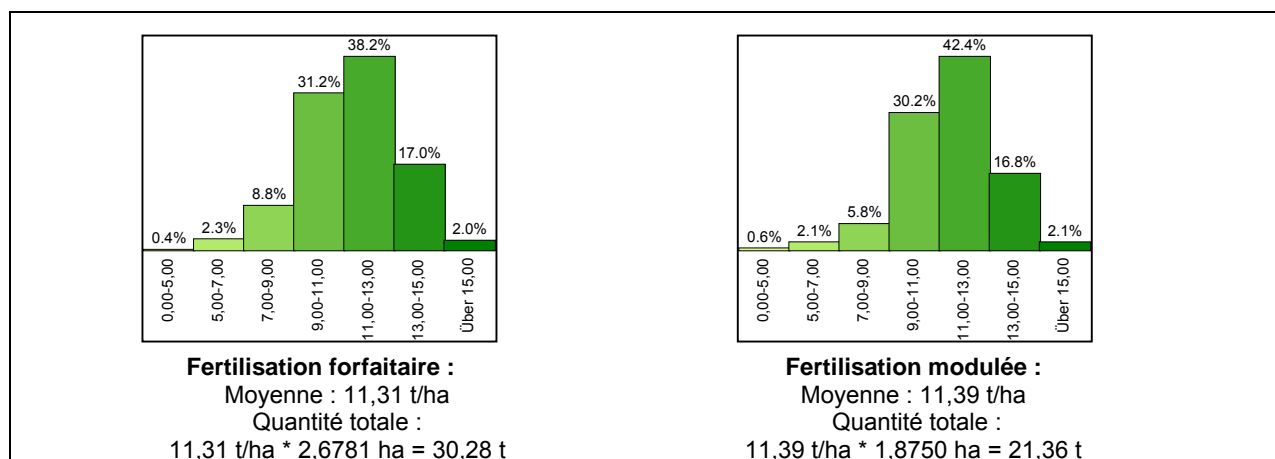


Fig. 153 : distribution des classes [rendement] séparées selon les deux traitements

La **comparaison de la distribution du rendement avec le rendement potentiel attendu** pour 2003 décrite à titre d'exemple dans la section 2.1.2.2 (1) montre les résultats suivants :

Le rendement obtenu diffère d'environ 0,5 t/ha d'avec le rendement potentiel attendu. Par rapport à un rendement attendu de 11,88 t/ha en moyenne (données brutes non corrigées), le rendement réel s'est élevé à 11,3 t/ha. L'extrême sécheresse estivale de 2003 pourrait constituer la cause de cette baisse (limitée) de rendement.

La comparaison de la distribution du rendement obtenu avec celle du rendement potentiel attendu montre pour le rendement réel une réduction relative de la zone centrale des classes de rendement ainsi qu'une redistribution systématique dans des classes de rendement plus faibles. La courbe de distribution est ainsi plus plate et équilibrée (Tab. 33 et Fig. 154).

Distribution	Rendement de la surface totale Distribution en %	Rendement potentiel attendu sur la surface totale	Différence avec le rendement potentiel attendu
<6 t/ha	0,6	0,0	+0,6
6-7 t/ha	2,5	0,0	+2,5
7-9 t/ha	7,7	2,5	+5,2
9-11 t/ha	30,9	18,5	+12,4
11-13 t/ha	39,6	59,9	-20,3
13-15 t/ha	16,6	19,1	-2,5
>15 t/ha	2,0	0	+2

Tab. 33 : décalage de la distribution du rendement et du rendement potentiel attendu

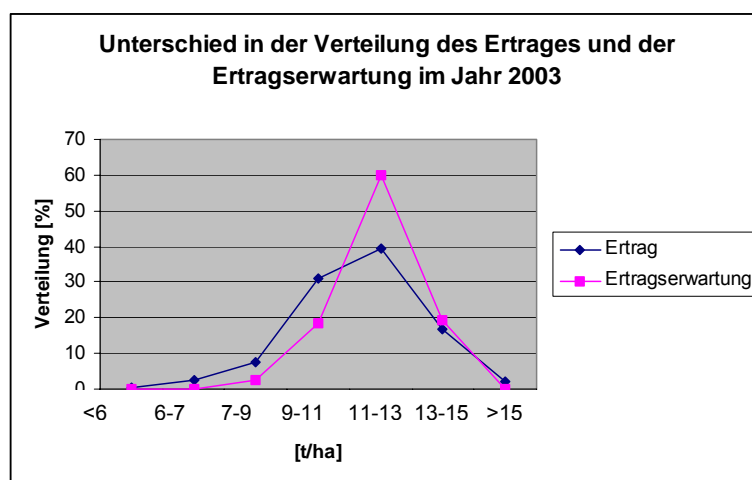


Fig. 154 : différences des courbes de distribution du rendement et du rendement potentiel attendu

Une tentative de corrélation des distributions du rendement potentiel attendu et du rendement réel n'aboutit à aucune concordance, avec $R^2 = 0,1755$. Seule une fraction des caractéristiques est reproductible par régression.

Le fait d'exclure des bandes de 25 m de large au début et à la fin des parcelles, afin d'éliminer les risques d'erreurs liées aux zones de fourrière, n'apporte aucune amélioration. La faible corrélation ne peut donc pas être attribuée à ce facteur. Ainsi, il n'y a pas de concordance entre les deux distributions (Fig. 155).

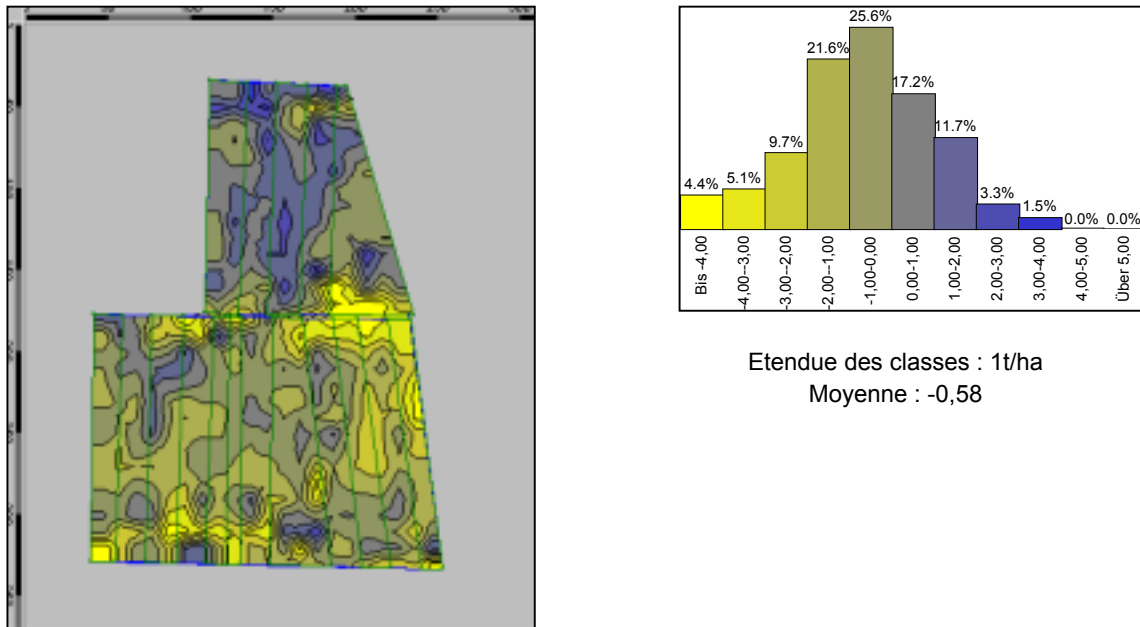


Fig. 155 : carte de différences (rendement et rendement potentiel attendu)

Une comparaison des **différences de rendement selon le traitement appliqué** aboutit au résultat suivant :

La baisse moyenne du rendement par rapport au rendement potentiel attendu s'élève à 0,69 t/ha sur l'ensemble des surfaces. Sur les surfaces modulées, la baisse de rendement n'a atteint que 0,58 t/ha, pour une diminution de 0,76 t/ha sur les surfaces traitées conventionnellement. *La baisse est ainsi plus faible sur les surfaces traitées de façon modulée.* Elle s'élève à 76,3 % des surfaces traitées conventionnellement (100 %). La baisse de rendement elle-même peut être attribuée à la sécheresse extrême de 2003. Le tableau 34 présente les différences de rendement par rapport au rendement potentiel attendu selon le mode de traitement.

	modulé	conventionnel	total	objectif
%				
Rend. 2003 / rend. potentiel attendu	95,17	93,67	94,25	100,00
Différence de rendement	-4,83	-6,33	-5,75	0,00
Nmin [%] / total	98,08	101,27	100,00	
N_total / total	99,53	100,32	100,00	

Tab. 34 : différence de rendement par rapport au rendement potentiel attendu

Par ailleurs, il est clair que la diminution de la quantité d'azote restant dans le sol en cas de traitement modulé est insignifiante (- 0,47 %), sachant que cette différence peut être comprise

dans la dispersion intrinsèque des données. Sur les surfaces modulées, les reliquats d'azote après la récolte représentaient 98,08 % de la valeur moyenne totale pour 101,27 % pour les surfaces traitées conventionnellement. Par conséquent, on peut en conclure que les surfaces modulées ne donnent en aucun cas des résultats moins bons, que ce soit sur le plan du rendement que sur celui des reliquats d'azote.

Au contraire de ces différences minimales entre modes de traitement, les résultats à l'échelle parcellaire présentent des distinctions plus notables (Tab. 35).

Dans les parcelles I-01 et I-02, le rendement est respectivement réduit de 11,08 % et de 8,08 % par rapport à l'objectif de rendement, alors que celui de la parcelle I-03 augmente de 4,67 %.

De ce fait, les résultats entre parcelles diffèrent davantage que les résultats entre traitements. La parcelle I-03 présente de ce point de vue un résultat significatif. Cette particularité est également confirmée par impression visuelle lors de la dernière sortie de terrain avant la récolte, pendant laquelle l'état des parcelles a été estimé selon le même ordre. Il est également frappant de constater que le rendement demeure largement en deçà du rendement potentiel attendu pour les parcelles I-01 et I-02, alors qu'il augmente même pour la parcelle I-03.

%	I-01	I-02	I-03	Objectif
Rendement / objectif de rendement	88,92	91,92	104,67	100
Différence de rendement	-11,08	-8,08	4,67	0

Tab. 35 : différence de rendement par rapport à l'objectif de rendement, par parcelle

Sur ce point, la seule différence importante pourrait résider dans le fait que la parcelle I-03 a reçu une fertilisation par injection. Selon une déclaration de l'entrepreneur, on constate sur les parcelles de l'ensemble de la région des différences nettes selon que la parcelle ait été fertilisée par injection ou non. Dans le premier cas, l'aspect visuel ainsi que le rendement étaient sensiblement améliorés (BINDER, 2003, com. orale).

Les impacts positifs de la fertilisation par injection ont déjà été largement décrits par ailleurs :

« Le maïs constitue dans notre zone climatique la plante pionnière de la fertilisation par injection, car la plantule ne dispose que d'une faible capacité d'absorption des nutriments » (www.kemira-growhow.com).

Une étude sur l'utilisation sur maïs du lisier issu de l'exploitation (effluents d'élevage) sous forme de fertilisation par injection et sur les tuyaux d'épandage a montré que les reliquats d'azote étaient bas sur l'ensemble de l'année, et ceci également en comparaison de surfaces de maïs de la même exploitation au cours des années passées. Des augmentations de rendement de 12 à 14 % ont été obtenues (www.leitbetriebe.uni-bonn.de).

« Les plants de maïs ne nécessitent des nutriments en quantité notable qu'à partir du stade 6 ou 8 feuilles. Leur période principale des besoins en nutriments se situe entre fin juin et mi-août. Le développement de la masse racinaire est très limité au cours de la phase juvénile. C'est pourquoi la capacité d'absorption des nutriments est faible au cours des premières semaines de développement. Une fertilisation trop intensive fait courir un risque de lessivage des nutriments dans les horizons profonds du sol. C'est pourquoi la fertilisation du maïs en particulier devrait être adaptée aux besoins.

La fertilisation par injection comportant du phosphate et de l'azote facilement disponible à proximité immédiate des plants constitue la solution la plus adaptée. L'engrais devrait être déposé à environ 5 cm des semences avec la méthode par injection. Une distance trop réduite pourrait causer des dommages aux graines » (www.dekalb.de/mais/mais_duengung.html).

En tant qu'aspect accessoire de l'impact de la modulation sur le rendement (2), on complétera finalement par une présentation de l'impact de la modulation sur la hauteur de croissance :

Les résultats des études effectuées sur ce point montrent que la **distribution de la hauteur** des plants est très similaire et équilibrée au moment de la récolte. Il n'existe pas de réelle corrélation entre la distribution de la hauteur des plants à cette période et

- la distribution de l'azote disponible dans le sol
- la distribution de l'azote disponible au printemps
- la distribution du rendement à la récolte, même en cas d'exclusion des zones de fourrière

de même, il n'y a pas de corrélation entre

- les distributions des **hauteurs de croissance** lors des mesures successives et
- les distributions de la croissance dans les différentes sous-parcelles selon le mode de traitement (modulé ou conventionnel)

De même, il n'y a aucune corrélation entre les distributions de taille des plants à différentes périodes. L'évolution de la croissance est ainsi totalement différente selon les endroits. On observe toutefois que les plantes traitées conventionnellement présentent généralement une croissance inférieure aux plantes traitées de manière modulée. Dans la parcelle I-02, les deux traitements se rejoignent finalement. Dans la parcelle I-01, la croissance est dans un premier temps plus rapide pour les plantes traitées conventionnellement, puis la situation s'inverse en fin de croissance (Fig. 156).

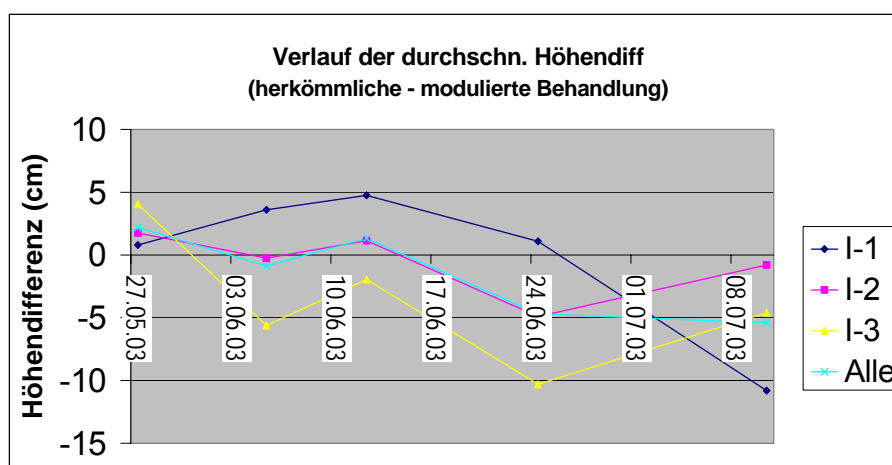


Fig. 156 : différences de hauteur entre traitement conventionnel et modulé aux différentes dates de mesure

On peut conclure que la croissance est globalement plus rapide dans les parcelles modulées (valeurs négatives dans la figure 156). Cette analyse a été rendue possible grâce à des mesures de hauteur sur différents points voisins dans les différentes bandes de traitement des parcelles. Les données ont été fournies par l'Université de Hohenheim.

La figure 157 présente les différences moyennes de hauteur en cm, calculées en soustrayant ici aussi la hauteur des plantes en traitement modulé de la hauteur des plantes traitées conventionnellement. Il en résulte une mesure de la différence de hauteur réelle selon le traitement, qui montre clairement que cette différence se réduit en cours de croissance.

En début de croissance, la différence la plus importante est constatée dans la parcelle I-01 et la plus faible dans la parcelle I-02. En fin de croissance, la plus grande différence concerne la parcelle I-03 et la plus faible la parcelle I-02.

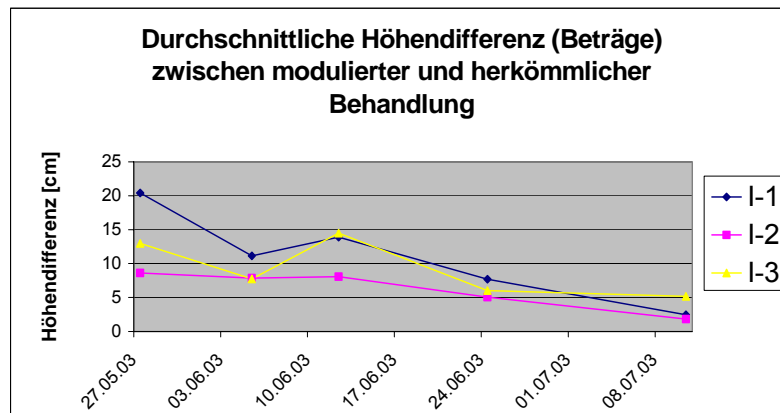


Fig. 157 : différences de hauteur (cm) entre traitement conventionnel et modulé aux différentes dates de mesure

On constate finalement qu'il n'existe pas non plus de relation entre la distribution de la taille des plantes entre les différentes dates de mesure, mais que cette distribution varie indépendamment de la parcelle et du traitement, à l'exception de la parcelle I-03 en cas de traitement conventionnel : entre le 12.06 et le 24.06, le coefficient de détermination R^2 atteint respectivement 0,75 (régression linéaire) et 0,83 (régression polynomiale). Ainsi, la variation de la distribution de la hauteur sur les bandes traitées conventionnellement est demeurée faible sur cette période.

La synthèse suivante peut être tirée des études relatives à l'impact de la modulation sur le rendement :

- sur l'ensemble des parcelles, l'amélioration du rendement en cas de traitement modulé est très réduite
la différence pouvant être comprise dans une dispersion standard des données, on peut affirmer que les surfaces modulées ne donnent en aucun cas des résultats inférieurs.
- la distribution du rendement n'est pas corrélée avec celle du rendement potentiel attendu, même si les zones de fourrière sont exclues en tant que source d'erreur potentielle
- le rendement réel n'atteint pas le rendement potentiel attendu déterminé (été extrêmement sec)
- la baisse de rendement par rapport au rendement potentiel attendu est plus faible sur les surfaces modulées (tout comme la persistance d'azote résiduel dans le sol)
- les différences de rendement sont nettement plus élevées entre les parcelles qu'entre les traitements. De ce point de vue, la fertilisation par injection effectuée dans l'une des trois parcelles joue sans doute un rôle prépondérant.
- accessoirement, on constate que les plantes traitées conventionnellement présentent généralement une croissance inférieure aux plantes traitées de manière modulée.

Ainsi, on peut en conclure que la modulation des intrants a un impact sur la croissance et sur le rendement légèrement meilleur que le traitement conventionnel.

Cette différence minime pourrait aussi être considérée comme une fluctuation normale en cas d'examen très critique.

Cependant, les résultats des traitements modulés ne sont jamais inférieurs à ceux des traitements conventionnels. C'est pourquoi on peut constater dans le cadre d'un consensus minimum que le traitement modulé n'a aucun impact négatif sur le rendement.

Pour les études décrites, il faut noter que le calcul est basé sur les bonnes pratiques agricoles pour les deux types de traitement et qu'aucune préconisation de dose minimale n'a été appliquée au cours de l'année d'étude 2003. C'est pourquoi la fertilisation azotée a été sensiblement plus faible dans la parcelle I-02, en particulier par rapport à ce qui aurait été effectué dans la pratique.

Ce fait ne doit pas être oublié dans le cadre d'une évaluation correcte de la mesure de modulation. Les résultats de rendement réjouissants en cas de modulation sont ainsi directement associés à une économie d'intrants (3).

On devrait également s'apercevoir que la réduction massive des intrants (azote) dans la parcelle I-02 n'a eu d'impact négatif sur le rendement ni en termes absolus ni par rapport aux deux autres parcelles.

3.2.3.3 Impact de la modulation sur le niveau de fertilisation

Tous les essais réalisés en vue de la modulation de la fertilisation azotée à l'aide de l'approche cartographique étaient basés sur une distribution adaptée aux besoins d'une quantité à appliquer prédéfinie selon les « bonnes pratiques agricoles ». C'est pourquoi les mesures de modulation avaient un impact sur l'adaptation intraparcellaire de la fertilisation mais pas sur le niveau de fertilisation au niveau parcellaire.

L'impact sur le niveau de fertilisation n'était ainsi connu qu'au point de vue intraparcellaire. Pourtant, il reste à déterminer si et dans quelle mesure la quantité d'engrais est influencée par la pratique de la modulation des intrants par rapport aux applications forfaitaires conventionnelles.

Bien que la méthode utilisée dans le cadre de l'approche cartographique ne renseigne pas sur l'impact sur le niveau de la fertilisation azotée, car, au contraire d'un traitement conventionnel, la quantité d'engrais calculée de la même manière par parcelle est seulement répartie selon les besoins du fait de la modulation, il en ressort toutefois des aspects secondaires intéressants :

Au cours de l'année d'étude 2003, la mesure d'application a été réalisée *sans tenir compte d'une quantité minimale*. En raison du niveau élevé des reliquats d'azote dans la parcelle I-02 au printemps, on a épandu, en particulier dans la parcelle I-02, une dose d'azote bien inférieure à celle qui aurait été appliquée dans des conditions réelles d'épandage conventionnel indifférencié, et ce même si le calcul avait été effectué selon les bonnes pratiques agricoles. Il faut donc rappeler que la réduction de la dose n'a entraîné aucune baisse de rendement (section 3.2.3(2)).

L'économie d'azote sur la parcelle I-02 s'est élevée à 49,73 % en 2003, uniquement parce que la préconisation habituelle d'une dose minimale n'avait pas été prise en compte. Le calcul selon les « bonnes pratiques agricoles » a fourni une dose moyenne de 50,27 kg d'urée/ha. Dans ce résultat de calcul, les valeurs d'application négatives des sous-parcelles dans lesquelles le reliquat d'azote était déjà trop élevé avant la fertilisation ont déjà été ramenées à zéro. Dans le cadre d'une mesure de modulation, l'entrepreneur aurait cependant épandu sur la base des conditions locales une dose minimale de 100 kg d'urée/ha, comme cela a en fin de compte été effectué l'année suivante.

A condition que les valeurs de reliquats d'azote aient été collectées de manière représentative, la quantité à appliquer calculée est identique en cas de modulation et en cas d'application forfaitaire moyenne conventionnelle. Seule la distribution sur la surface est adaptée selon les besoins en cas de modulation et ne génère d'un point de vue intraparcellaire aucune sur- ou sous-alimentation en azote.

Si l'on suppose qu'en raison d'un prélèvement unique par parcelle, le niveau du reliquat d'azote ne soit pas représentatif et qu'on parte du principe que c'est la valeur minimale du reliquat d'azote qui est utilisée dans le calcul (188 kg N/ha), on obtient selon les « bonnes pratiques agricoles » une dose à appliquer de 75,31 kg d'urée/ha. Ceci représente environ 150 % de la valeur à appliquer d'après un calcul prenant en compte une valeur représentative du reliquat d'azote ; cette dose, qui serait déjà supérieure aux besoins, constituerait toutefois une économie de 25 % par rapport à une quantité minimale de 100 kg d'urée/ha.

Si, sur la base d'un seul prélèvement dans la parcelle I-02, on utilisait par mégarde la valeur maximale du reliquat d'azote (250 kg N/ha), le calcul selon les « bonnes pratiques agricoles » fournirait une valeur à appliquer de -8 Kg d'urée/ha, ce qui représente un épandage de 0 kg d'urée/ha. Ceci constituerait 0 % de la variante calculée à l'aide de la moyenne représentative et une économie de 100 %, qui causerait cependant un déficit moyen de 50,27 kg d'urée/ha, à l'inverse d'une application intraparcellaire correcte (Tab. 36).

Grandeurs d'entrée	Application moyenne d'urée selon les « bonnes pratiques agricoles »				
	N _{min} Représentatif [kg d'urée/ha]	N _{min} Valeur minimale [kg d'urée/ha]	N _{min} minimum % de N _{min} représentatif	N _{min} valeur maximale [kg d'urée/ha]	N _{min} maximum % de N _{min} représentatif
Résultat du calcul	50,27	75,31	149,81 %	0	0 %
Dose minimale	100	100	100,00 %	100	100,00 %
Economie	49,73	24,69	49,6 %	0	0 %

Tab. 36 : potentiel d'économie lié à une collecte différenciée des paramètres d'entrée de la mesure de modulation et à l'absence de prise en compte des préconisations de dose minimale

Cet exemple, dans lequel de très fortes valeurs de reliquat d'azote sont présentes dans le sol (parcelle I-02) montre des ordres de grandeur possibles des variations de la quantité à appliquer. Le point décisif repose dans le fait qu'une collecte différenciée peut être effectuée par le biais d'une approche modulée, ce qui entraîne une application plus précise. Les estimations d'une dose minimale préconisée pouvant être supprimées, on obtient le potentiel d'économie réel dans les zones à besoins plus faibles (valeurs élevées du reliquat d'azote). Dans l'exemple donné comportant une très grande quantité d'azote disponible dans le sol, il a été possible d'économiser la moitié de la dose qui aurait été sinon appliquée par sécurité, sans aucune limitation du rendement.

Cette valeur ne peut toutefois être transposée librement à d'autres situations, en raison de ses liens avec les conditions initiales particulières. Cet exemple montre toutefois qu'on dispose d'un potentiel d'économie important lorsque les valeurs prédéfinies grossièrement estimées (quantité minimale) peuvent être remplacées par des données d'entrée précises, comme c'est le cas dans l'approche cartographique.

Si des dépenses supplémentaires se traduisent en gain de rendement, celles-ci sont fondées et nécessaires, et ne doivent pas être considérées comme des coûts liés à des erreurs de la pratique de modulation, mais comme une nécessité d'investissement mise en évidence.

Si, hors du contexte de l'approche modulée comportant une préconisation de dose minimale, l'entrepreneur procédait à la fertilisation avec une dose moyenne forfaitaire, le résultat serait encore bien plus extrême, car la valeur moyenne à appliquer serait supérieure à la dose minimale préconisée. Dans notre exemple, l'hypothèse d'une dose de 150 kg d'urée/ha serait tout à fait réaliste au vu des pratiques agricoles. Une collecte représentative des reliquats d'azote et une application en conséquence entraînerait dans ce cas un potentiel d'économie de 66,49 % (Tab. 37).

Si l'on utilise pour la modulation des intrants non pas une approche cartographique (offline) mais une méthode online, on aboutit à un potentiel d'économie différent. Dans ce cas, les quantités à appliquer ne sont pas calculées à l'aide de la même méthode. C'est pourquoi le

potentiel d'économie n'est pas uniquement issu de la prise en compte de la surestimation des quantités minimales, mais aussi du calcul même de la dose à appliquer.

Grandeurs d'entrée	Application moyenne d'urée selon les « bonnes pratiques agricoles »				
	N _{min} Représentatif [kg d'urée/ha]	N _{min} Valeur minimale [kg d'urée/ha]	N _{min} minimum % de N _{min} représentatif	N _{min} valeur maximale [kg d'urée/ha]	N _{min} maximum % de N _{min} représentatif
Résultat du calcul	50,27	75,31	149,81 %	0	0 %
Pratique	150	150	100,00 %	150	100,00 %
Economie	66,49 %	50,21 %	75,52 %	0	0 %

Tab. 37 : potentiel d'économie lié à une collecte différenciée des paramètres d'entrée de la mesure de modulation et à l'absence de prise en compte des préconisations de dose minimale

L'essai avec le capteur online « Cropmeter » ayant du être interrompu et aucune carte d'application n'ayant ainsi pu être calculée à l'aide d'une méthode online, il est impossible de déterminer à titre d'exemple l'importance de l'impact de la modulation à l'aide de cette méthode. Il est toutefois clair qu'en raison du mode de calcul de l'application lors du passage sur la culture, il est impossible d'estimer à l'avance la quantité à appliquer. Il n'est pas non plus possible de savoir quelle quantité d'intrants doit être emportée dans l'épandeur. Si l'on garde toutefois à l'esprit la taille de la surface totale à fertiliser d'un entrepreneur, cette problématique n'acquiert d'importance qu'au terme de la fertilisation. Jusqu'à ce moment, il est nécessaire d'estimer grossièrement les quantités nécessaires sur la base de l'expérience antérieure.

Par ailleurs, on retrouve aussi dans la **bibliographie** des approches du potentiel d'économie :

KERSCHBERGER E, KERSCHBERGER M et LEITHOLD P. (2004) rapportent des augmentations de rendement de 1,4 à 2,6 % en cas de fumure de fond modulée par rapport à une pratique de fertilisation constante. Ils décrivent également d'énormes augmentations de rendement de l'ordre de 6 à 12 % en cas de fertilisation variables pour certaines classes de qualité de sols.

KERSCHBERGER M. et LEITHOLD P. (2005) indiquent des réductions du bilan d'azote de 10 kg N/ha au minimum et pouvant atteindre 30-40 kg N/ha. Ils indiquent des augmentations de rendement de 3-4 % en cas de fertilisation variable. Dans une autre étude, l'augmentation atteint 6 % pour un épandage de N réduit de 11 % et une augmentation de la teneur en protéine brute de 0,6 %. En outre, ils mentionnent l'influence positive du battage dans un ordre de grandeur atteignant 15 à 20 %.

GANDORFER M. et HEIßENHUBER A. (2003), sur la base d'une étude sur la fertilisation azotée du blé d'hiver sur 11 bandes d'étude, arrivent au résultat suivant : l'approche online génère un gain de 13€/ha et l'approche cartographique une perte de 5€/ha. Ils concluent que les attentes économiques sont très élevées mais qu'elles ne peuvent pas être satisfaites à l'heure actuelle.

FEIFFER A. (2003) atteint dans différents essais une amélioration de la moisson de 12-18 % pour une variante de fertilisation azotée différenciée par rapport à une application constante. Dans le cadre d'une étude à grande échelle a été montré que chaque exploitant pourrait économiser jusqu'à 120€/ha à la récolte.

Selon TRUNK K. (2003), l'agriculture de précision ne permet pas uniquement de savoir où des économies ciblées peuvent être réalisées, mais aussi de déterminer où un investissement peut être effectué en termes de fertilisation azotée. Les excédents des dépenses de l'agriculture de précision, tant qu'ils concernent des investissements uniquement en termes de fertilisation, ne doivent ainsi pas seulement représenter une augmentation inefficace des coûts. Il peut également s'agir de coûts d'investissement nécessaires, que l'on aurait sinon négligé. C'est pourquoi l'évaluation des coûts ne doit pas seulement viser des économies mais aussi la mise en évidence d'investissements ciblés.

SCHWARZ J., KERSEBAUM Chr., WENDROTH O. et REUTER H. (2003) rapportent des économies de 40 kg/ha et de 41 kg/ha en cas de fertilisation azotée intraparcellaire.

Le BAUERNZEITUNG (2004) indique que des augmentations de rendement atteignant 4 quintaux seraient possibles en cas de fertilisation intraparcellaire.

RECKLEBEN Y. (2003) obtient des augmentations de rendement atteignant 10qt/ha et une hausse de la teneur en protéines de 0,4 % pour les meilleures variantes d'essais intraparcellaires.

KLOEPFER F. décrit dans une présentation DLG que les effets positifs de la fertilisation peuvent payer à court terme dans des cas isolés.

dlz (5/2004) constate que les peuplements homogènes augmentent les profits.

EHLERT D. (2004) décrit une économie de 13 kg de N/ha suite à une distribution intraparcellaire de la quantité d'engrais épandue à l'aide d'un capteur pendulaire.

TRAPHAN K. et RECKLEBEN Y. (2005) rapportent une augmentation de rendement de 5qt/ha et une hausse de 1 % de la teneur en protéines grâce à l'utilisation du YARA N-Sensor.

LANDPOST (2005) indique une augmentation de rendement de 3-4 % grâce à l'utilisation du YARA N-Sensor, avec une quantité d'azote inchangée. Dans une deuxième étude, l'augmentation du rendement est de 7 % pour un épandage d'azote réduit de 14 %.

Selon RADEMACHER J. (2004), une fertilisation azotée orientée sur les besoins aboutit à un rendement et des qualités inchangés pour une quantité d'engrais réduite par rapport à un épandage homogène.

Ainsi, la modulation de la fertilisation azotée possède un énorme potentiel d'économie dans des conditions favorables. Le rendement réel dépend toutefois de nombreux facteurs et ne peut être transposé librement sur n'importe quelle parcelle. L'utilité économique doit être considérée pour chaque exploitation au cas par cas.

Dans ce cadre, il importe de noter qu'un investissement supplémentaire sur le plan de l'azote peut être nécessaire.

La carte de différence destinée à la fertilisation selon les bonnes pratiques agricoles peut être considérée comme le premier résultat partiel relatif à l'**influence de la mesure de modulation selon le modèle de croissance « Apollo » sur le niveau de fertilisation**. Début novembre, au moment de la rédaction du rapport, la récolte 2005 n'avait pas encore eu lieu, ce qui a empêché une comparaison avec les données de rendement.

La carte de différences (Fig. 158) présente le résultat issu de la soustraction des valeurs d'application selon le calcul basé sur les « bonnes pratiques agricoles » de celles basées sur « Apollo » (soit application « Apollo » – application « bonnes pratiques agricoles »). La carte montre dans quelle mesure la fertilisation selon « Apollo » dépasserait celle selon les « bonnes pratiques agricoles ».

Dans les plus petites sous-parcelles, les variations dans la parcelle I-02 (sud-ouest) atteignent ± 15 kg N/ha, ce qui est justifiable. Elles vont exceptionnellement jusqu'à -30 kg N/ha. Dans ces zones, la fertilisation selon Apollo aurait été inférieure à la fertilisation selon les bonnes pratiques agricoles. Ceci provient d'une « bosse » de la distribution des reliquats d'azote au centre de la limite ouest de la parcelle (Fig. 158).

Dans la parcelle I-03, les différences sont plus importantes, entre $+ 10$ et $- 15$ kg N/ha. Dans deux zones, les différences atteignent -45 kg N/ha et $+60$ kg N/ha, ce qui est considérable (Fig. 158). Ceci ne provient pas d'irrégularités particulières du calcul Apollo, mais plutôt de petites zones dont les variations des valeurs de reliquat d'azote sont plus importantes. Selon l'opérateur ayant effectué les échantillonnages de sol, la parcelle 2 comporte des zones pouvant être non représentatives, car le point d'échantillonnage se situe au croisement de deux rangs de plantes.

Il faut cependant rappeler que les écarts entre modes de calcul sont bien inférieurs si l'on considère l'ensemble de la parcelle au lieu des plus petites sous-parcelles.

L'origine des écarts au niveau des plus petites sous-parcelles se situe dans les différences de mode de définition de ces parcelles.

Alors que de petites sous-parcelles régulières ont été définies selon « Apollo », leur création selon les « bonnes pratiques agricoles » a été réalisée par interpolation, et elles sont donc irrégulières.

Il faut mentionner que la mise en œuvre de la fertilisation d'une structure tellement fine n'est même pas envisageable à l'aide d'un épandeur d'engrais.

La comparaison est basée sur les cartes de valeurs de mesures calculées, en tant que différence potentielle maximale. La carte de valeurs de consigne lisible par la machine fondée sur une largeur d'épandage de 18 m serait cependant bien plus grossière. C'est pourquoi en cas de mise en œuvre réelle, les différences fines de la carte d'application ne seraient pas aussi marquées qu'elles le sont sur la carte d'application.

Finalement, il est intéressant de constater que les valeurs moyennes issues de la carte de différences sont réduites ($-2,53$ dans la parcelle I-01 et $-8,63$ dans la parcelle I-02). Ceci souligne que les deux approches indépendantes, avec leurs calculs indépendants, sont tout de même très proches l'une de l'autre, ce qui renforce la confiance pouvant être mise dans la méthode. Ceci a également constitué une confirmation du test de pertinence du calcul selon «

Apollo » et a conduit à la décision de la mise en œuvre de l'application selon cette méthode en 2005.

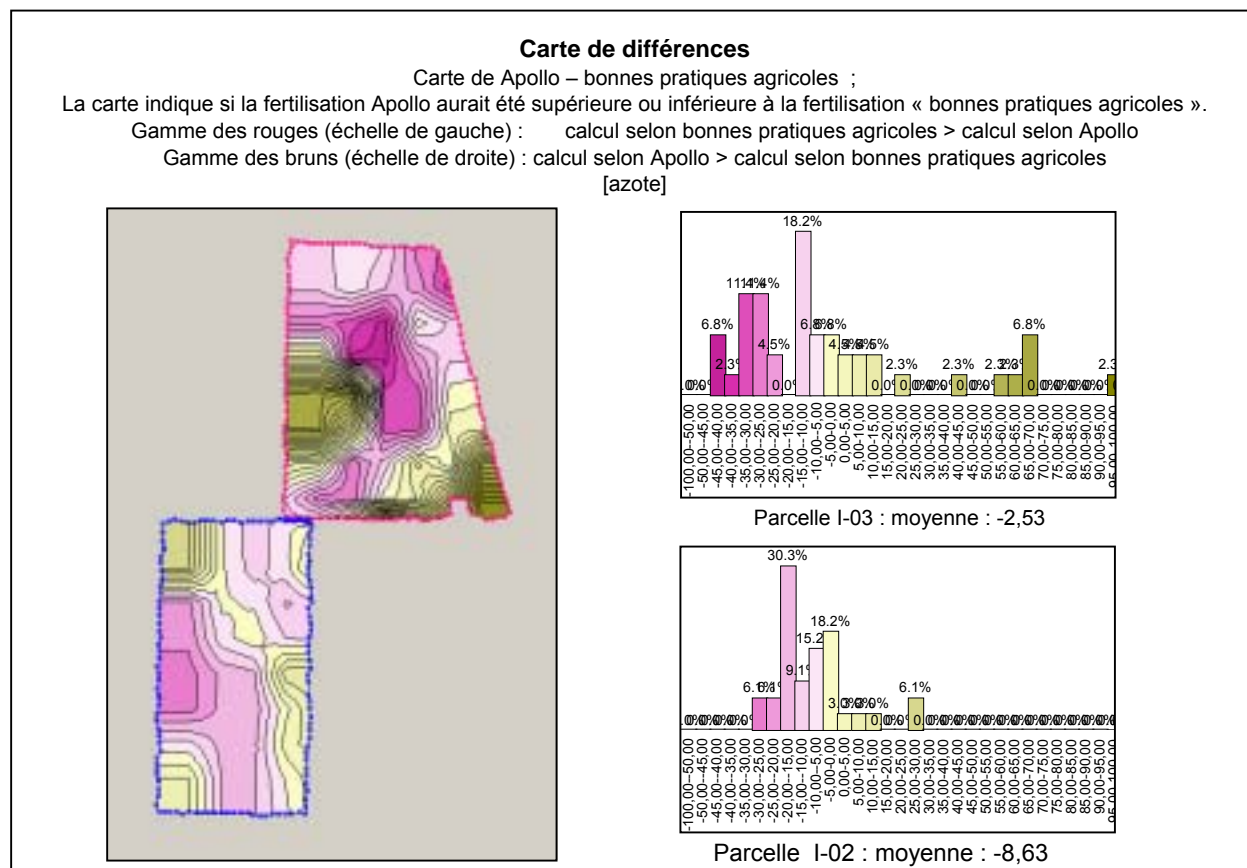


Fig. 158 : carte de différences (application « Apollo » – application « bonnes pratiques agricoles ») de la totalité des parcelles I-02 et I-03 ; résolution plus fine

En résumé, on peut dire que différentes méthodes de modulation des intrants entraînent des niveaux d'application différents. La comparaison des deux méthodes cartographiques, celle basée sur un calcul selon les bonnes pratiques agricoles et celle intégrant une simulation de croissance « Apollo » à l'aide d'une carte de différences montre des différences notables. Toutefois, ces différences se situent la plupart du temps dans des limites acceptables et sont inférieures à la sous-estimation d'un entrepreneur expérimenté concernant l'application d'une dose minimale. Les écarts sont supérieurs dans les irrégularités à petite échelle, qui ne sont pas considérées dans la simulation de croissance comportant de plus grandes « plus petites sous-parcelles ». Si l'on considère le fait qu'un épandeur d'engrais est incapable de tenir compte de ces plus petites sous-parcelles (largeur d'épandage) par le biais de la carte d'application, ces différences plus importantes entre méthodes seront finalement fortement aplanies et deviendront négligeables dans une large mesure.

3.2.3.4 Bilan d'azote en cas de modulation (respect de l'environnement)

L'année 2003 s'étant déroulée sans être perturbée par des mesures non planifiées, au contraire des autres années d'essais, c'est cette année qui a été choisie pour l'étude du bilan d'azote. Dans ce cadre, on peut examiner

- le niveau absolu de l'azote, ainsi que
- la distribution de l'azote

pour chaque mode de traitement effectué (application modulée et conventionnelle). Conformément au dispositif d'étude, il est possible d'effectuer dans ce cadre un bilan pour chaque point du maillage, et ainsi d'effectuer un bilan au niveau intraparcellaire.

Pour la réalisation des bilans, les données d'entrée suivantes ont été déterminées :

- le niveau des reliquats d'azote selon l'échantillonnage du 19.05.2003
- le niveau de l'apport de N de la fumure de fond dans la parcelle I-01
- le niveau de l'apport de N de la fertilisation azotée (modulée et conventionnelle) du 04.06.2003
- le niveau de l'exportation de N (grain) à la récolte le 09.09.2003
- le niveau de l'exportation de N (paille) à la récolte le 09.09.2003
- le niveau des reliquats d'azote selon l'échantillonnage du 20.09.2003 (après la récolte)

La figure 159 montre la variabilité du paramètre pour l'ensemble des trois parcelles :

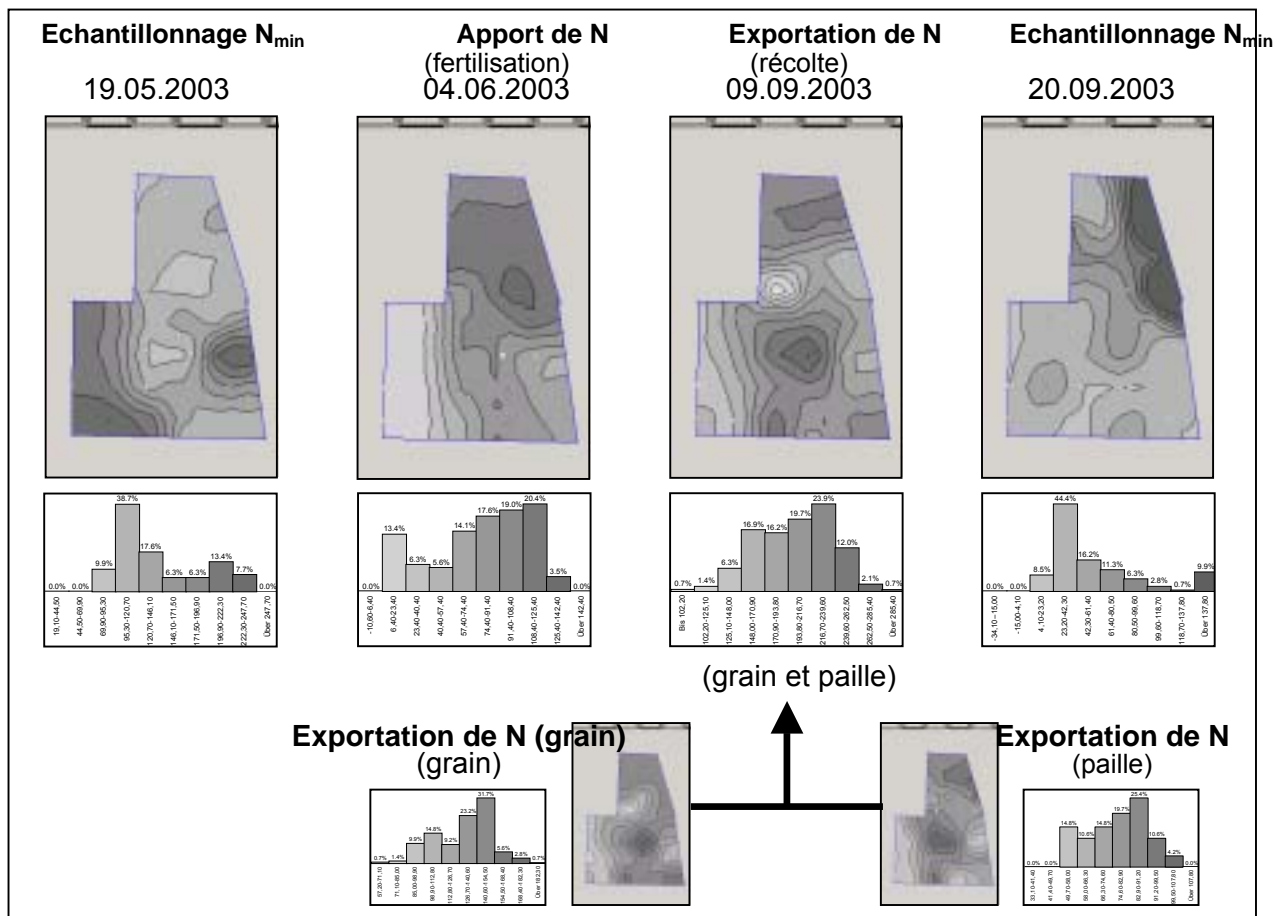


Fig. 159 : variabilité des paramètres d'entrée du bilan d'azote

Il faut rappeler que des influences en provenance de la parcelle voisine sont soupçonnées à la limite nord-est des parcelles lors de l'échantillonnage des reliquats d'azote de l'automne (20.09.2003).

Différents bilans d'azote peuvent être calculés sur la base de ces données.

Le bilan le plus simple et le plus facile à comprendre est celui **qui se base sur les apports et les exportations sans considérer ni la situation de départ, ni l'état final.**

Ce bilan se calcule à l'aide de la formule de la figure 160.

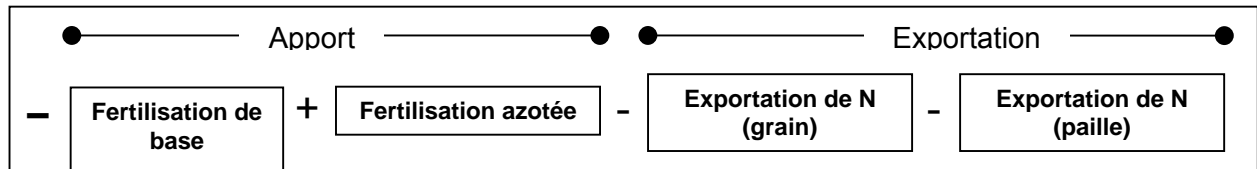


Fig. 160 : bilan prenant en compte les apports et l'exportation

La figure 161 montre la distribution intraparcellaire de ce bilan sur les parcelles d'essai.

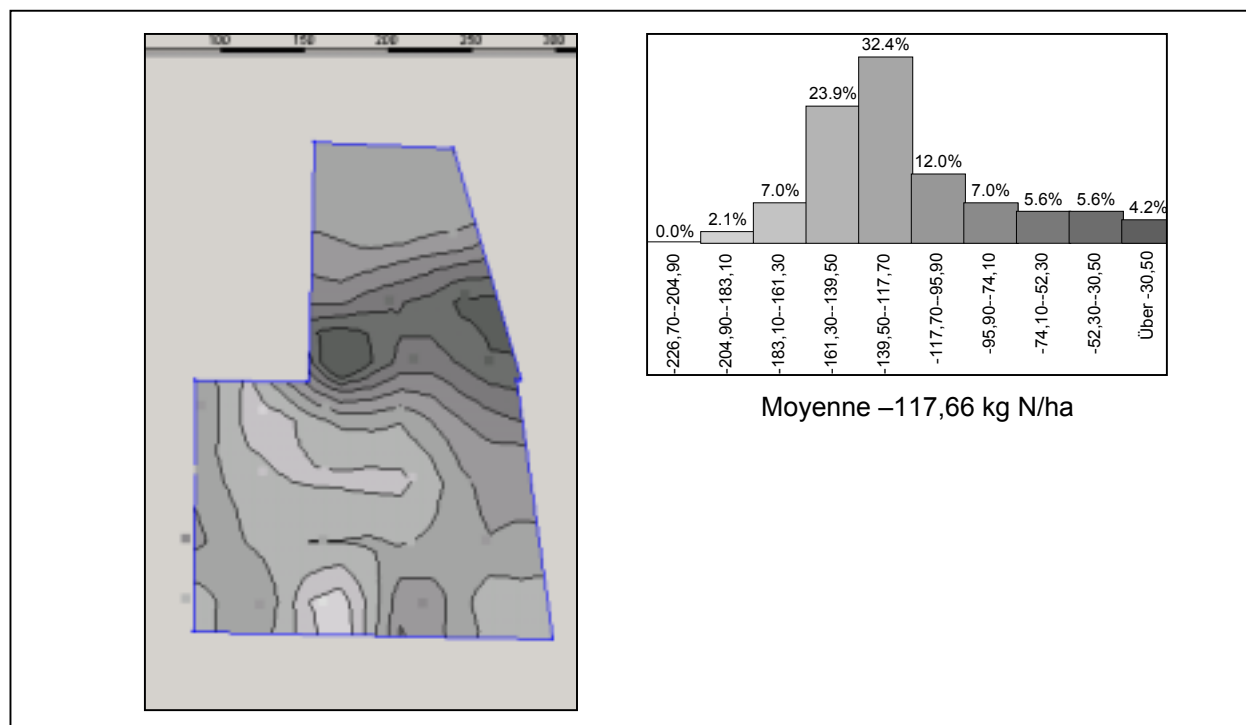


Fig. 161 : distribution intraparcellaire du bilan au moyen des apports et de l'exportation

On constate que la moyenne se situe à une valeur négative de l'ordre de - 118 kg N/ha. Donc, la pratique agricole a conduit à exporter bien plus d'azote qu'il n'en a été apporté. Ceci est correct, car cette méthode de bilan ne prend pas en compte l'azote déjà disponible.

La quantité d'azote préalablement disponible dans le sol devait alors se situer au niveau de cette valeur négative, afin « d'utiliser » dans le bilan la totalité de l'azote présent lors de la situation de départ. On doit dans ce cas accepter un supplément par sécurité. Celui-ci correspond à la situation. Globalement, la mesure peut être évaluée comme appropriée :

La valeur moyenne des reliquats d'azote s'élève à 146 kg N/ha au printemps 2003. Le bilan des apports et des exportations s'élève ainsi en moyenne à 81 % du montant maximal possible, qui

est déductible de l'azote préalablement disponible dans le sol. Ceci signifie qu'à peine 20 % de la quantité initiale d'azote demeure dans le sol au terme de la mesure agricole (Tab .38). La figure 163 montre la variabilité de ce bilan en prenant en compte les valeurs de départ (reliquats d'azote au printemps) sur les parcelles. Ce bilan est calculé d'après la formule de la figure 162.

Valeurs moyennes	Printemps 2003	Bilan Apports-Exportation	Reste calculé
[kg N/ha]	146	-118	28
Pour cent	100 %	81 %	19 %

Tab. 38 : Bilan des valeurs moyennes

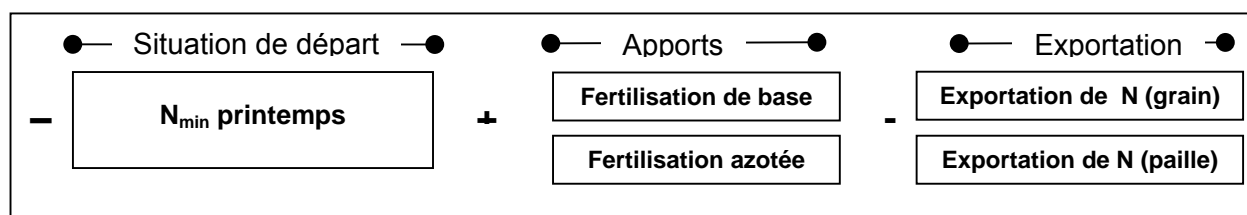


Fig. 162 : bilan prenant en compte les apports et l'exportation

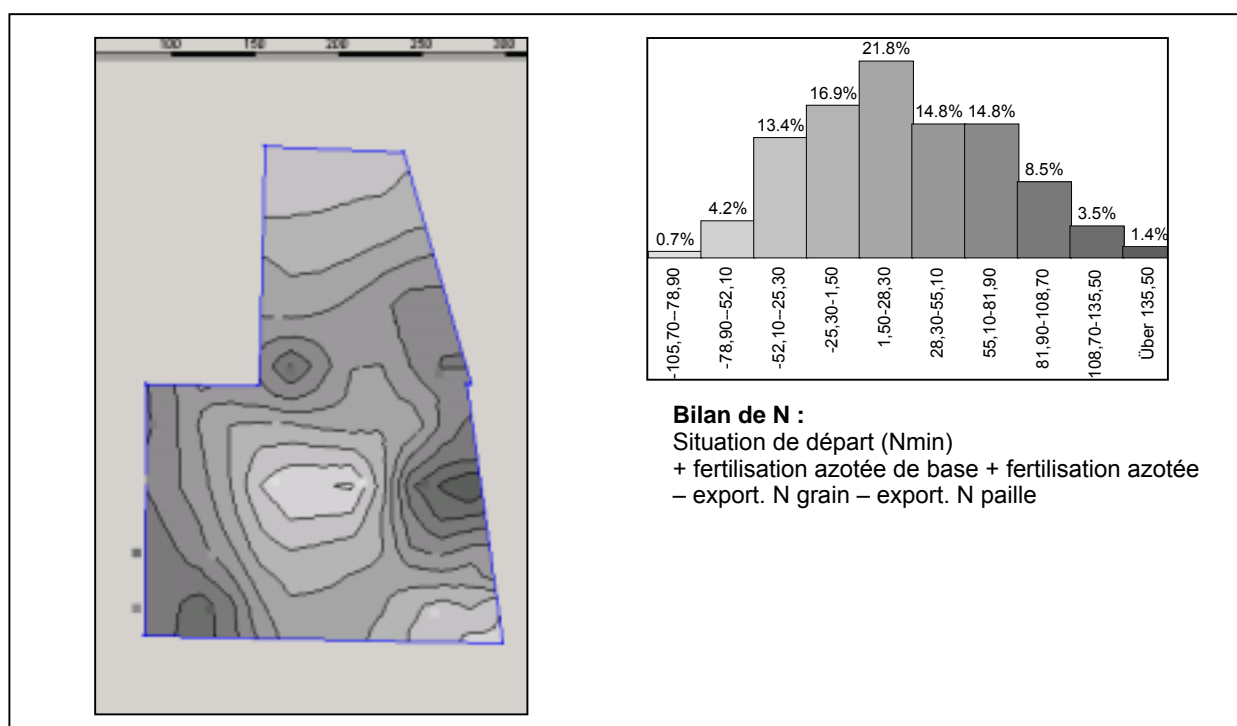


Fig. 163 : distribution intraparcellaire du bilan considérant la situation de départ ainsi que les apports et l'exportation

La minéralisation se poursuivant au cours de l'année, cette quantité restante est à nouveau augmentée jusqu'au printemps suivant avant la reprise de la végétation. La moyenne s'élevait à 203 kg N/ha lors de l'échantillonnage du 02.06.2004. Ceci signifie qu'entre l'automne 2003 (61 kg N/ha en moyenne) et le printemps 2004 (203 kg N/ha en moyenne) s'est produit un enrichissement moyen de 142 kg N/ha. Par rapport à la valeur de printemps de 2003, ceci représente un enrichissement moyen de 57 kg N/ha jusqu'au printemps 2004 (139 %). Le bilan

annuel moyen d'un printemps à l'autre présente ainsi une augmentation marquée de 39 % en moyenne. De toute évidence, la réduction drastique de la fertilisation dans certains cas n'a cependant pas été suffisamment extrême dans cette situation, car il restait à l'automne 2003 (y compris la minéralisation en cours) toujours encore 42 % de la valeur initiale du printemps. Cette valeur se compose de 19 % de restes calculés et de 23 % de recharge calculée à l'automne suite à la minéralisation en cours.

Il est intéressant de constater que ce reste d'automne représente approximativement la valeur excédentaire de l'azote disponible au printemps 2004 (valeurs absolues, Tab. 39). La quantité moyenne d'azote disponible début 2004 est ainsi augmentée d'une valeur identique à celle qui était restée à l'automne en tant que bilan positif.

moyenne	Printemps 2003	Bilan : Apports - Exportation	Reste calculé	Minéralisation calculée	Automne 2003	Minéralisation calculée	Printemps 2004
[kg N/ha]	146	-118	28	+33	61	+142	203
Pourcents par rapport au printemps 2003	100 %	-81 %	19 %	22,6 %	42 %	97,3 %	139 %

Tab. 39 : bilan des valeurs moyennes

On obtient un résultat très différent **lorsqu'on sépare les bilans selon le traitement**. Cet examen est rendu plus difficile par le fait que dans la parcelle I-02, qui se distingue des autres parcelles par des données d'entrée de reliquats d'azote exceptionnellement élevées, seules des données relatives au traitement modulé sont disponibles. En raison de son statut particulier, cette parcelle est à nouveau considérée séparément.

	Printemps 2003	Bilan : Apports - Exportation	Reste calculé	Minéralisation calculée	Automne 2003	Minéralisation calculée	Printemps 2004
Modulé - toutes les parcelles [kg N/ha]	162,29	-114,98	47,31	24,45	71,76	139,12	210,88
Pourcents	100 %	-71 %	29 %	15,07 %	44,22 %	85,72 %	129,94 %
modulé sans I-02 [kg N/ha]	116,22	-92,23	23,99	82,23	106,22	101,56	207,78
Prozent	100 %	-79 %	21 %	70,75 %	91,40 %	87,39 %	178,78 %
modulé seulement I-02 [kg N/ha]	214,13	-140,56	73,57	-40,57	33	181,38	214,38
Pourcents	100 %	-66 %	34 %	-18,95 %	15,41 %	84,71 %	100,12 %
Conventionnel [kg N/ha]	129,45	-116,39	13,06	37,49	50,55	134,18	184,73
Pourcents	100 %	-90 %	10 %	28,96 %	39,05 %	103,65 %	142,70 %
Total	146	-118	28	+33	61	142	203
Pourcents	100 %	81 %	19 %	22,60 %	42 %	97,26 %	139 %

Tab. 40 : bilan des valeurs moyennes selon différents traitements

Comme on peut le voir dans le tableau 40, les reliquats d'azote représentent au printemps 2004 pour l'ensemble des points du maillage 139 % de la valeur de départ du printemps 2003. Globalement, l'azote disponible a donc nettement augmenté au cours de cette période de référence. Cette augmentation se répartit entre une minéralisation calculée des valeurs de départ de 22,6 % à l'automne 2003 et de 97,26 % au printemps 2004.

Si l'on ne considère que les *surfaces traitées conventionnellement*, l'augmentation du printemps à 142,7 % est très similaire à la valeur moyenne de l'ensemble des parcelles. Les valeurs de la minéralisation calculée en cours (28,96 %) ainsi que celle comprise entre l'automne 2003 et le printemps 2004 (103,65 %) sont également élevées.

La situation est légèrement différente en ce qui concerne les sous-parcelles modulées. Si l'on considère l'ensemble des sous-parcelles modulées, on constate que l'augmentation moyenne de 129,94 % au printemps 2004 est heureusement plus faible de 8,9 % par rapport aux sous-parcelles traitées conventionnellement. Autant la minéralisation calculée en automne 2003 que celle calculée au printemps 2004 sont légèrement réduites par rapport aux surfaces conventionnelles. Celle-ci était même plus drastique en moyenne pour les traitements conventionnels. L'effet positif au printemps 2004 provient avant tout d'une réduction de la minéralisation après l'automne 2003.

Si l'on examine à part les surfaces modulées de la parcelle I-02, on observe le meilleur résultat du printemps 2004. Contrairement à toutes les autres variantes, le niveau initial a même pu être conservé ici (100,12 %). Dans ce cas également, la (faible) minéralisation calculée est décisive, et non pas seulement le bilan réel de la mesure agricole.

Dans les parcelles I-01 et I-03 (sans I-02), les sous-parcelles modulées présentent une énorme augmentation au printemps, de 178,78 % de la valeur de départ du printemps 2003. C'est là aussi la minéralisation calculée à l'automne 2003 qui constitue la part la plus importante de cette valeur alors que le bilan de la mesure agricole se situe dans des valeurs moyennes.

Dans l'ensemble, les sous-parcelles modulées se situent dans une meilleure position que les sous-parcelles traitées conventionnellement. La parcelle I-02, dans laquelle les conditions de départ sont les plus mauvaises, affiche dans ce cas le meilleur résultat, alors que les surfaces modulées restantes ont les pires résultats. Il existe donc dans ce cas des distinctions importantes entre sous-surfaces modulées.

De ce point de vue, il est frappant de constater que le résultat global du printemps 2004 ne dépend pas tant du bilan de la mesure agricole que de l'intensité de la minéralisation calculée.

Si l'on examine **le bilan simple des apports et de l'exportation**, l'exportation due à la mesure agricole et déterminée par bilan s'élève à 118 kg N/ha pour l'ensemble des parcelles (Tableau 40). Ceci signifie que 81 % de la valeur de départ du printemps ont été « utilisés » par des mesures agricoles. Cette valeur s'élève même à 90 % pour les surfaces traitées conventionnellement alors que le bilan se situe entre 66 % et 79 % en cas de traitement modulé. Les 66 % sont obtenus en cas d'examen isolé de la parcelle I-02, 79 % pour les surfaces modulées restantes dans les parcelles I-01 et I-03. Ceci représente dans l'ensemble un recul moyen de la valeur de départ dû aux mesures agricoles de 71 %. Il est intéressant de constater que la baisse *relative* la plus faible dans la parcelle I-02 (traitement modulé) est combinée avec la baisse *absolue* la plus élevée. Malgré des valeurs absolues plus élevées, la baisse relativement limitée est ici liée à de très fortes valeurs de départ et ne peut même pas être compensée par la mesure extrêmement drastique mise en œuvre dans cette parcelle.

En cas de bilan simple prenant en compte les apports et l'exportation, entre 10 % et 34 % des valeurs de départ (reliquats N printemps) demeurent sur la parcelle d'après les calculs.

Si l'on examine toutefois les valeurs de l'échantillonnage des reliquats d'azote effectué peu après la récolte, on observe que les valeurs réelles de l'azote restant sur la parcelle se situent entre 15,4 et 91,4 % de la valeur de départ du printemps 2003. La valeur inférieure provient du traitement modulé dans la parcelle I-02 et la valeur supérieure du même traitement sur le reste des surfaces. Le traitement conventionnel obtient de bons résultats. Ainsi, à l'automne 2003, la majeure partie des reliquats d'azote ne provient pas du bilan correspondant de la mesure agricole, mais bien davantage du comportement de la minéralisation calculée. Dans la parcelle modulée I-02, cette minéralisation est même négative dans les sous-parcelles affichant les meilleurs résultats. Les sous-parcelles ayant manifestement un bon bilan n'atteignent apparemment ces bonnes valeurs que grâce à l'inconvénient du lessivage des nitrates, ce qui fait voir l'analyse de la parcelle sous un autre jour.

En résumé, on constate que le bilan de l'azote est très variable : bien que les sous-parcelles modulées présentent en moyenne de meilleurs résultats que les surfaces traitées conventionnellement, cette conclusion ne peut pas être généralisée à toutes les surfaces, car des distinctions importantes existent selon la situation de départ.

Le reste calculé pour toutes les variantes selon le bilan des apports et de l'exportation est bien relativement limité. Cependant, il ne se retrouve pas dans les valeurs réelles de l'échantillonnage d'automne. En particulier, la variante modulée dans les parcelles I-01 et I-03 présente une réduction de 91,4 % de la valeur de départ du printemps, alors qu'elle devrait être de 21 % selon le calcul. Le *paramètre de fourniture en azote par le biais de la minéralisation* joue ici un rôle décisif. Même l'agréable réduction dans la parcelle I-02 suite à des mesures drastiques (pas de préconisation de dose minimale) provient avant tout de l'assez faible minéralisation calculée et non pas d'un bilan négatif relativement élevé des mesures agricoles. Le fait qu'une plus forte hausse se produise tant à l'automne 2003 qu'au printemps 2004 précisément sur les autres sous-parcelles traitées de manière modulée semble indiquer que le mode de traitement joue un rôle mineur.

Le tableau 41 montre l'augmentation des valeurs des reliquats d'azote entre les échantillonnages de l'automne 2003 et du printemps 2004.

	Automne 2003 kg N/ha	printemps 2004 kg N/ha	Pourcents %
Modulé – total [kg N/ha]	71,76	210,88	293,87
Modulé sans I-02 [kg N/ha]	106,22	207,78	195,61
Modulé I-02 [kg N/ha]	33	214,38	649,64
Conventionnel [kg N/ha]	50,55	184,73	365,44
Total	61	203	332,79

Tab. 41 : augmentation des reliquats d'azote entre l'automne 2003 et le printemps 2004

On observe clairement que l'augmentation au printemps (en pour cent) varie en fonction de la valeur absolue précédente du reliquat d'azote (automne 2003) (Fig. 164). Manifestement, l'importance de la migration potentielle de l'azote dans le sol au cours de la période végétative joue un rôle moins important. Le potentiel – probablement en fonction des conditions météorologiques – n'a apparemment pas été modifié jusqu'au printemps dans les conditions données, pour être ensuite (très) fortement enrichi sur la totalité des surfaces. Dans notre exemple, la valeur moyenne des reliquats d'azote au printemps atteint environ 204 kg N/ha. Ce

fait s'oppose à la situation de départ fortement différenciée du printemps 2003, où des valeurs extrêmement élevées n'avaient été trouvées que dans la parcelle I-02.

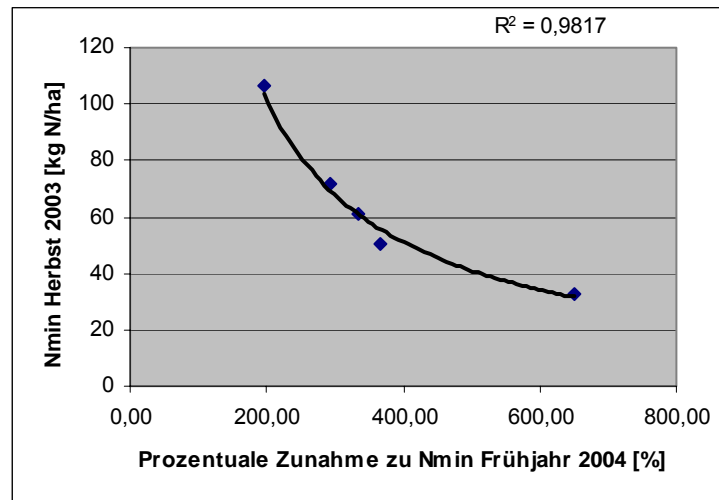


Fig. 164 : corrélation entre le niveau des valeurs de départ des reliquats d'azote en automne et de l'augmentation au printemps

Même s'il n'a pas été possible d'égaliser la teneur en azote dans le sol lors de l'échantillonnage d'automne, malgré le fait qu'elle ait pu être fortement réduite, l'échantillonnage du printemps 2004 montre toutefois une situation très équilibrée, bien qu'à un niveau élevé.

Ceci indique clairement la sensibilité et la variabilité importantes de la dynamique de l'azote. Sur la base des données disponibles, il est difficile de déduire des tendances et des relations réellement pertinentes et claires.

Le mode de réalisation du bilan, basé sur les valeurs d'exportation de N par le biais d'un découpage en m^2 doit être accepté comme une source d'erreur supplémentaire. Une collecte représentative par l'intermédiaire d'un découpage en m^2 est délicate sur maïs, en raison de la taille importante des plantes et des distances entre les plantes. Si au cours du prélèvement dans un m^2 on récolte toujours une plante de plus ou de moins, selon l'endroit où le quadrat est défini sur le site, ceci représenterait déjà de $1/8^e$ à $1/10^e$ de la valeur de mesure pour une densité de 8-10 plantes/ m^2 , ce qui correspond à une précision de mesure comprise entre ± 10 et $\pm 12,5$ %.

Ceci constitue également un motif pour lequel il semble difficile d'établir des conclusions différenciées réellement incontestables sur le bilan d'azote.

Les principales conclusions sont ainsi les suivantes :

- le bilan issu des apports et de l'exportation n'atteint manifestement pas le niveau des valeurs de départ. Il aurait fallu mettre en œuvre une réduction encore plus drastique de la fertilisation.
- malgré une réduction généralement nette de la teneur en azote du sol à l'automne, les valeurs de printemps atteignent des valeurs élevées inattendues, et ceci ne dépend manifestement pas de l'intensité de la réduction ou du mode de traitement, mais des événements intervenus entre les échantillonnages d'automne et de printemps (minéralisation calculée ; influence des conditions météorologiques sur la minéralisation ?).

- sur la totalité de la surface d'essai en moyenne, l'azote disponible début 2004 par rapport à l'année 2003 a augmenté dans le même rapport que ce qui est resté à l'automne sous forme de bilan positif. Cette conclusion ne peut cependant être transposée au niveau des sous-parcelles.
- ce n'est pas l'effet de la mesure agricole qui constitue la majeure partie du bilan, mais l'assez importante recharge (minéralisation) calculée.

Si l'on considère la distribution intraparcellaire du bilan, on constate clairement que l'apport en azote sur la base de la mesure de modulation calculée paraît raisonnable du point de vue de la situation azotée trouvée au départ. Par contre, d'après une estimation visuelle, les exportations d'azote paraissent totalement déconnectées des autres données. Au contraire, le comportement semble être opposé à celui qu'on peut attendre de la situation de départ (reliquats d'azote du printemps 2003) : on trouve une faible exportation d'azote en cas de situation de départ élevée et inversement. Cette impression optique n'aboutit toutefois à aucune corrélation statistique.

Il est également nécessaire d'établir que pour ces raisons, il n'a pas été possible d'équilibrer au niveau intraparcellaire le bilan basé sur l'état de départ incluant la dose de N et excluant les exportations de N (Fig. 165).

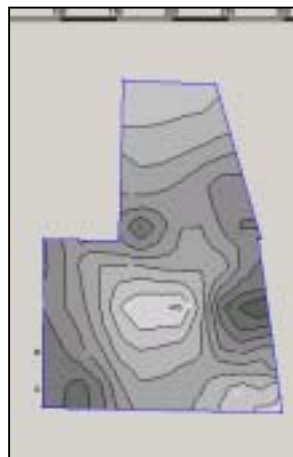


Fig. 165 : distribution intraparcellaire du bilan basé sur l'état de départ, les apports et l'exportation

En vue de la mise en œuvre de la modulation des intrants, ces résultats signifient que la dynamique de l'azote doit être prise en compte de manière bien plus approfondie dans le cadre d'une approche cartographique. Il serait ainsi capital de ne pas uniquement disposer de conclusions sur les valeurs de départ, mais également sur l'ordre de grandeur de la dynamique actuelle, car ces valeurs jouent un rôle prépondérant sur l'évolution de la parcelle.

La mise en œuvre pratique de cette exigence au sein d'une approche cartographique de la modulation de la fertilisation azote semble difficile, et ne contribuerait pas vraiment à améliorer la praticabilité de l'approche.

3.2.3.5 Rentabilité de la modulation

Les différentes méthodes doivent être examinées séparément pour évaluer la rentabilité de la modulation.

Sur la base de l'expérience acquise grâce aux essais effectués, il faut indiquer que dans les conditions globales rencontrées, aucune des méthodes expérimentées au cours du projet n'aurait pu être achevée avec succès d'un point de vue économique.

D'une part, l'intégration au sein d'un projet de recherche considérant tous les points de vue possibles interdit de prime abord la rentabilité sur des surfaces d'étude aussi petites.

D'autre part, la rentabilité ne peut constituer un objectif tant que les possibilités de principe de réalisation d'une méthode doivent d'abord être évaluées afin de déterminer si une mise en œuvre technique est faisable ou non. En conséquence, il est exclu de tirer des conclusions sur le niveau absolu des dépenses de la méthode correspondante à partir des dépenses réelles effectuées pour les mesures réalisées.

Il est cependant possible d'évaluer la rentabilité de la méthode à partir de l'expérience acquise.

Ceci fait l'objet des points ci-dessous, répartis en :

- Evaluations de l'approche cartographique
- Evaluations de l'approche cartographique intégrant les simulations de croissance
- Evaluations de l'approche cartographique intégrant la télédétection et
- Evaluations de l'approche online.

Tous les essais montrent que l'**approche cartographique** exige un travail de préparation important. Lorsqu'on parle de rentabilité, on part du principe que les surcoûts engendrés peuvent être couverts par une augmentation du bénéfice.

Les *surcoûts* proviennent du travail supplémentaire pour l'intégration des données dans un SIG agricole et la déduction des cartes d'application correspondantes. Les dépenses sont d'autant plus rentables qu'une grande quantité de données peut être collectée au cours d'une même phase. L'intégration isolée de chacune des petites parcelles dans la zone d'étude représente un coût considérable au regard d'une méthode rentable.

Il est financièrement plus intéressant de collecter les données pour plusieurs parcelles voisines à la fois, comme cela a été effectué en 2004. La manière la plus efficace d'aborder la question des coûts consisterait à intégrer des parcellaires entiers dans une seule phase en vue de l'élaboration de la carte d'application, même si celle-ci devait par la suite être à nouveau séparée pour chacune des parcelles.

Une *augmentation du bénéfice* pourrait provenir d'une hausse du résultat, par diminution des dépenses ou par une combinaison des deux. Les possibilités d'augmentation du rendement et de réduction des dépenses ont été démontrées dans de nombreux cas. Une possible augmentation du bénéfice ne peut cependant être établie qu'après coup et est difficile à évaluer à l'avance.

Pour ces motifs, il est impossible de fournir, au-delà de recommandations générales, des indications de rentabilisation de l'approche cartographique

La recommandation principale consiste à élaborer la carte d'application pour une surface aussi vaste que possible (îlots) au cours d'une phase unique.

En ce qui concerne l'évaluation de l'**approche cartographique intégrant les simulations de croissance**, il est clair que l'introduction d'une telle méthode est liée à des dépenses d'investissement relativement importantes. De nombreuses données d'entrée doivent être intégrées dans la méthode. Cependant, il est possible de simuler des recommandations pour plusieurs années à l'aide d'une quantité suffisante de données d'entrée. Seule une mise à jour des données devrait être effectuée. Ainsi, cette méthode recèle tout particulièrement un potentiel d'atteinte du seuil de rentabilité au terme de l'investissement de mise en place de la méthode. Ceci est d'autant plus vrai que la simulation elle-même intègre des aspects de rentabilité, dans la mesure où les dépenses et l'utilité monétaires de la mesure sont pris en compte.

Comme toutes les méthodes basées sur la cartographie, l'**approche cartographique intégrant la télédétection** nécessite également une charge de travail préparatoire relativement élevée. Cet aspect s'allie toutefois aux possibilités de la télédétection, à savoir la couverture d'une surface conséquente pour un coût relativement faible. Ce n'est pas pour rien qu'il existe déjà sur le marché au moment de la rédaction du rapport deux méthodes de télédétection extrêmement avantageuses sur le plan financier. La rentabilité ne peut cependant être atteinte que lorsque des surfaces réellement importantes sont prises en compte. Des mesures structurelles et organisationnelles sont nécessaires à leur mise en œuvre. Ainsi, l'exemple de « Farmstar » en France montre que grâce à l'intégration au sein d'une structure coopérative, de nombreux propriétaires peuvent être atteints avec une telle méthode, de telle sorte que la rentabilité devient effectivement possible.

La rentabilité en cas d'utilisation de l'**approche online** est quelque peu différente. Au contraire de l'approche cartographique, le travail préparatoire est largement minimisé. Les coûts sont principalement liés à l'investissement. Là aussi, des augmentations de rendement ou des réductions des coûts sont démontrés pour les différentes méthodes. Il est cependant difficile de les mesurer à l'avance.

Outre tous ces dépenses et potentiels d'économie liés aux méthodes, on devrait toutefois considérer le fait qu'une exploitation adaptée au niveau intraparcellaire amène d'autres avantages, qui devraient être pris en compte dans un examen précis de la rentabilité. Ils s'agit des effets secondaires de la prestation de service, qui vont de soi avec une intégration de la méthode et ne se chiffrent pas sur le plan monétaire pour l'exploitant, mais qui amènent cependant à la communauté un gain financier. Ceci comprend par exemple la réduction des intrants dans l'environnement, qui englobe tous les aspects de la protection des sols, des cours d'eau et des eaux souterraines. Si de tels effets étaient atteints grâce à la modulation des intrants, ils devraient être pris en compte dans le cadre d'une analyse globale de rentabilité. Elle inclurait par exemple le fait d'éviter un forage profond pour le prélèvement d'eau de nappe, si les valeurs-limites étaient à nouveau respectées dans les eaux souterraines proches de la surfaces.

A coté de ces évaluations générales issues de l'expérience acquise au cours des essais réalisés, la **littérature** scientifique aborde également des conclusions relatives à la rentabilité.

Il est frappant de constater que de nombreux auteurs traitent uniquement des résultats relatifs aux augmentations de rendement, et non pas des dépenses devenues indispensables pour atteindre ces augmentations.

Toutefois, FEIFFER A. (2003) par exemple traite de la rentabilité en incluant les dépenses. Dans le cadre d'une étude à grande échelle, il a pu montrer que chaque exploitant pouvait

économiser jusqu'à 120€/ha à la récolte grâce à une amélioration de la qualité liée à une exploitation intraparcellaire.

Par contre, KLOEPFER F. décrit dans une communication DLG (11/2003) de façon générale que les effets positifs de la fertilisation azotée peuvent être payants à court terme dans certains cas, et dlz (5/2004) constate brièvement que les peuplements homogènes augmentent les bénéfices.

Comme cela a déjà été mentionné, TRUNK K. (2003) rapporte que l'agriculture de précision ne permet pas seulement de diagnostiquer les points pour lesquels des économies ciblées peuvent être réalisées, mais aussi là où des investissements peuvent être réalisés du point de vue de la fertilisation azotée. Cet aspect semble des plus intéressants par rapport à la rentabilité. Même les dépenses supplémentaires liées à l'agriculture de précision ne doivent donc pas constituer des augmentations de coûts inefficaces. Il peut également s'agir de coûts d'investissement nécessaires, que l'on aurait sinon négligé. Ainsi, l'agriculture de précision ne permet pas seulement d'effectuer des économies, mais amène également une hausse de rentabilité de la mise en œuvre des intrants, la nécessité d'effectuer des investissements ciblés étant couverte.

L'estimation de la rentabilité dépend des conditions différenciées du site, et ne peut être simplement calculée sur une base forfaitaire. Il existe cependant des effets pour toutes les méthodes imaginables, dont l'impact peut conduire à la rentabilité. Dans ce cadre, il est nécessaire de minimiser les dépenses autant que possible.

Il en résulte logiquement la nécessité de tendre vers un **concept de prestation de service**. Celui-ci permettrait de rassembler toutes les données intraparcellaires importantes pour l'agriculture de précision à un échelon supérieur, de les élaborer ainsi que de coordonner leur acquisition.

Les informations intraparcellaires pourraient être déduites à l'échelle régionale au sein d'un SIG, et auraient une importance pour les échelles allant des exploitations entières aux finages, et jusqu'aux parcelles individuelles. Après traitement centralisé de toutes les données disponibles, des informations intraparcellaires d'application intraparcellaires pourraient finalement être appliquées aux différentes parcelles à l'aide d'une approche déductive.

Parallèlement à cette gestion des données, il serait possible de remédier aux problèmes de communication. Des attributions bien définies des compétences et des responsabilités seraient mises au clair par une institutionnalisation de la prestation de service sous une forme adaptée. Les malentendus et les gestions « en dialogue de sourds » seraient réduits au minimum, ce qui fournirait par la même les conditions nécessaires à une approche d'exploitation en îlots avec tous les avantages qu'elle comporte. En outre, un argument supplémentaire plaide en faveur de cette approche : en effet, il s'est avéré qu'en raison des conditions structurelles et d'un manque de connaissances, certains exploitants étaient actuellement bien trop dépassés pour être en mesure d'intégrer de manière autonome l'agriculture de précision avec succès et de façon pertinente dans les conditions données.

Cette approche est fondée sur le fait que la réunion de toutes les données entraînait des effets de rationalisation qui minimisent les dépenses. L'élaboration centralisée réduit ainsi également les trajets de communication et de transmission des données. L'expertise existante et le développement très rapide de l'expérience permettent également d'augmenter l'efficacité du travail.

3.3 Résultats de l'enquête sur l'application de l'agriculture de précision en Alsace et en Bade-Wurtemberg

3.3.1 Partie descriptive : les exploitations

Alsace

Un premier niveau d'exploitation des questionnaires rend possible la description des exploitations enquêtées. Au total, 169 exploitations ont répondu à l'enquête en Alsace (147 + 22 d'élèves du Lycée agricole d'Obernai). Parmi les réponses faites par les élèves, seuls 11 questionnaires ont été véritablement remplis par eux mêmes (cf. ci dessus.). Parmi les 158 autres ayant répondu, 25 se décrivent à la fois comme agriculteur et entrepreneur agricole, ce qui correspond à 16% de l'effectif.

Bade - Wurtemberg

Pour l'enquête en Bade-Wurtemberg, il faut faire la distinction dans l'ensemble des questionnaires retournés entre trois groupes d'enquêtés distincts. Les réponses des exploitants agricoles se composent exclusivement d'exploitations du Rhin supérieur (Bade). Celles des étudiants et des élèves concernent des exploitations principalement de Wurtemberg : ils ont probablement considéré le questionnement plutôt sur le plan général des perspectives futures et moins répondu vis à vis d'une orientation directe personnelle.

3.3.2 Les types d'exploitations

L'effectif d'agriculteurs en **Alsace** recouvre une large gamme d'âges puisqu'ils ont de 20 à 62 ans, avec une moyenne à 44,5 ans.

L'âge des chefs d'exploitations dans le **Bade-Wurtemberg** fluctue pour les exploitations interrogées en Bade entre 27 et 56 ans pour une moyenne de 41,7 ans.

L'âge des chefs d'exploitations en Wurtemberg, dont les jeunes achèvent leurs études actuellement (identifiées par la suite „exploitations d'étudiants“), est avec 50 ans de moyenne plus élevé de 10 ans avec un étalement entre 35 et 56 ans.

L'âge des chefs d'exploitations des enquêtes faites principalement en Wurtemberg chez des élèves (identifiées par la suite comme „exploitations d'élèves“) évolue entre 52 et 63 ans avec une moyenne de 57,5 ans qui est encore une fois plus élevée que celles des autres groupes d'enquêtés.

La plupart des chefs d'exploitations en Alsace ont une formation agricole (83%), du Bac Pro au BTS, en passant par le BEPA et le BTA. Pour les enquêtés du Bade-Wurtemberg, 88 % des chefs d'entreprises ont en moyenne une formation agricole, mais cela monte à 92,3 % pour ceux du groupe « exploitations d'étudiants » et à 100 % pour le groupe « exploitations d'élèves».

Pour 72% des agriculteurs ayant répondu en Alsace, l'exploitation agricole constitue leur activité à plein temps. Pour 19% des cas c'est une activité partielle principale (5 à 90 % du revenu) et pour seulement 8% des cas une activité secondaire (revenu < 50 %).

En Bade-Wurtemberg, la part des exploitants à plein temps est analogue avec 74%, toutefois l'activité agricole partielle est principale seulement pour 4% des enquêtés et pour 21% elle est secondaire. Alors que la part d'exploitants à plein temps ne varie guère entre les différents groupes enquêtés (exploitations en Bade : 74%, „exploitations d'étudiants“ en Wurtemberg: 73% et „exploitations d'élèves“ en Wurtemberg: 75%), les proportions d'actifs à activité agricole partielle principale et secondaire varient plus fortement entre les groupes (activité principale en Bade : 4%, „exploitations d'étudiants“ en Wurtemberg : 17% et „exploitations d'élèves“ en Wurtemberg : 25% ; activité secondaire respectivement: 22%, 11% et 0%).

En Alsace, pour la moitié des effectifs environ, la reprise de l'exploitation est assurée, mais pour une autre moitié elle n'est pas assurée ou du moins la situation n'est pas éclaircie. Un tel contexte n'encourage pas à des investissements coûteux dans l'agriculture de précision. Comme en Alsace, la succession de l'exploitation est assurée en Bade pour la moitié des entreprises. Mais pour les groupes « exploitations d'élèves » elle monte à 67 % et pour le groupe « exploitations d'étudiants » elle culmine à 77 %, ce qui est compréhensible puisque dans ce cas les successeurs en formation initiale ont été directement questionnés.

En Alsace, dans la moitié des situations, l'avenir économique des exploitations est jugé plutôt moyen. Il est jugé bon dans 15% des cas seulement, mais surtout incertain : 30% des cas. Les exploitations badoises ont une appréciation un peu plus optimiste de leur avenir..

En ce qui concerne la position de l'exploitation vis à vis de l'environnement, elle est globalement jugée bonne en Alsace (68%) tout comme en Bade-Wurtemberg (env. 55 % des situations). A noter qu'aucun agriculteur des deux régions ne considère son exploitation comme mauvaise sur le plan de l'environnement.

La Figure 166 présente les appréciations des exploitations concernant les perspectives économiques. La Figure 167 présente les auto-évaluations vis à vis de l'environnement. Il apparaît nettement que les appréciations des exploitations sont meilleures vis à vis de leur impact sur l'environnement que vis à vis de leur avenir économique. Pour les « exploitations d'étudiants », les appréciations sur les deux aspects sont plus convergentes.

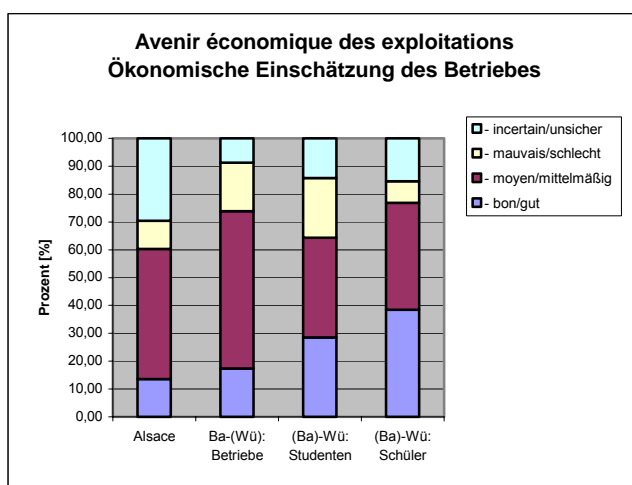


Fig . 166 : appréciation de la situation économique de l'exploitation

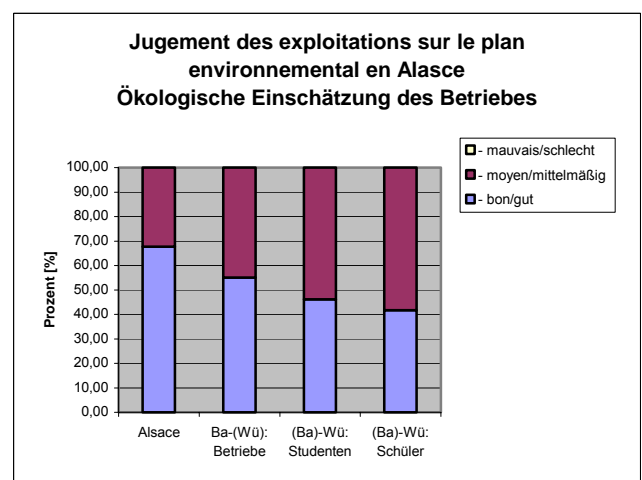


Fig. 167 : appréciation de la situation vis à vis de l'environnement

La main d'œuvre moyenne présente sur l'exploitation en Alsace est de 1,7. En Bade-Wurtemberg, elle est de 1,6 UTH ce qui est très semblable. Pour les « exploitations d'élèves » elle est de 1,9 et pour les « exploitations d'étudiants » elle atteint 2,3.

La différence entre main d'œuvre permanente et saisonnière était difficile à établir en Alsace car la plupart des questionnaires sont mal renseignés de ce point de vue. La part de la main d'œuvre permanente en Bade-Wurtemberg varie entre 75 % (« exploitations d'élèves » de Wurtemberg, 80 % pour les « exploitations d'étudiants » de Wurtemberg et 89 % pour les exploitations en Bade).

Hormis un seul cas qui se qualifie comme système d'exploitation biologique, le reste des exploitations enquêtées en Alsace est en système conventionnel. En Bade-Wurtemberg, toutes les exploitations sont en système conventionnel.

L'élevage est présent dans 28% des situations en Alsace, et concerne en majorité des bovins, avec production laitière dominante, mais la catégorie n'est pas toujours bien précisée.

L'élevage est plus développé dans les exploitations enquêtées en Bade (48 %) et encore bien plus fortement en Wurtemberg (« exploitations d'étudiants » 72%, « exploitations d'élèves » 85%). Comme en Alsace, (42% et 32%), la production bovine et surtout laitière représente une grande part des élevages du Wurtemberg (exploitations d'élèves et d'étudiants (respectivement 54 et 31% , 29 et 21%). En Bade, il existe au contraire une majorité d'élevages porcins (43%). Pour les exploitations d'étudiants du Wurtemberg, l'élevage porcin occupe également une place importante avec 29%. L'élevage de volailles occupe en Alsace avec 15% une signification plus forte qu'en Bade (0%).

3.3.3 Les surfaces

La taille des exploitations alsaciennes est relativement importante avec une surface SAU de 104 ha en moyenne. Il en est de même en Bade – Wurtemberg. Les exploitations enquêtées en Bade exploitent en moyenne 100 ha, les « exploitations d'élèves » 101 ha et les « exploitations d'étudiants » 93 ha.

En Alsace, ce chiffre moyen cache néanmoins des disparités puisque la plage de variation est grande : de 7 ha au minimum, jusqu'à 304 ha pour le maximum enregistré dans l'enquête.

Dans le Bade-Wurtemberg, la variabilité est également importante et la surface fluctue entre 16 et 300 ha (exploitations en Bade), 9-300ha (« exploitations d'étudiants » en Wurtemberg) et 32-170ha (« exploitations d'élèves »).

En Alsace, la répartition de cette SAU en différentes classes (cf. figure 168) indique que ce sont les exploitations de 61 à 100 ha qui sont les plus nombreuses. On peut remarquer que les petites exploitations (< 20 ha) ne représentent pratiquement rien, alors que les grandes, voire très grandes exploitations, (101 à 150 ha et > 150 ha), constituent une part importante des enquêtés avec environ 42%.

Ces chiffres sont en cohérence avec l'agrandissement des exploitations constaté ces dernières années. Si l'on se réfère au document « Typologie des exploitations alsaciennes » réalisé par la Chambre régionale d'Alsace en 2003, la famille « Cultures », à laquelle peut s'apparenter notre échantillonnage, a été distinguée par 3 classes de taille de SAU :

les grandes structures, de 60 à 120 ha, qui représentent 17% des exploitations de cette catégorie en Alsace, les petites structures, de 20 à 40 ha, qui en représentent 25%, et les très petites structures, inférieures à 16 ha de SAU, qui en représentent 58%. Ces effectifs ne correspondent absolument pas à ceux que nous avons pu établir à partir des exploitations enquêtées, où l'on constate que les grandes structures, > 60 ha, dominent largement avec près de 74% des exploitations !

Une des explications pourrait être la part des surfaces en herbe et des prairies puisque nous avons intégré toutes les exploitations d'élevage alors que la « Typologie des exploitations alsaciennes » ne tient compte que des exploitations à cheptel inférieur à 8 UGB. Cependant, nous voyons plus loin que cette part n'est pas si importante dans notre effectif puisque les prairies ne représentent que 9% de la SAU.

Une autre explication pourrait se trouver dans un agrandissement rapide et récent des exploitations. Mais avant tout, il faut signaler que les effectifs à partir desquels sont issus ces chiffres ne sont pas comparables (4 488 exploitations contre 158 !).

La figure 168 montre les faibles différences entre les différents groupes d'enquêtés en Bade Wurtemberg. Si l'on compare ces chiffres avec ceux des statistiques officielles du Land de Bade Wurtemberg („Landwirtschaftliche Betriebsergebnisse und Buchführungsergebnisse“), il apparaît nettement que les grosses exploitations sont surreprésentées dans l'enquête, même si à l'échelle du Land, lors des 20 dernières années, les petites exploitations ont fortement régressé alors que les classes d'exploitations de plus de 30 ha ont fortement augmenté. Elles représentent actuellement en Bade Wurtemberg tout juste 30 %.

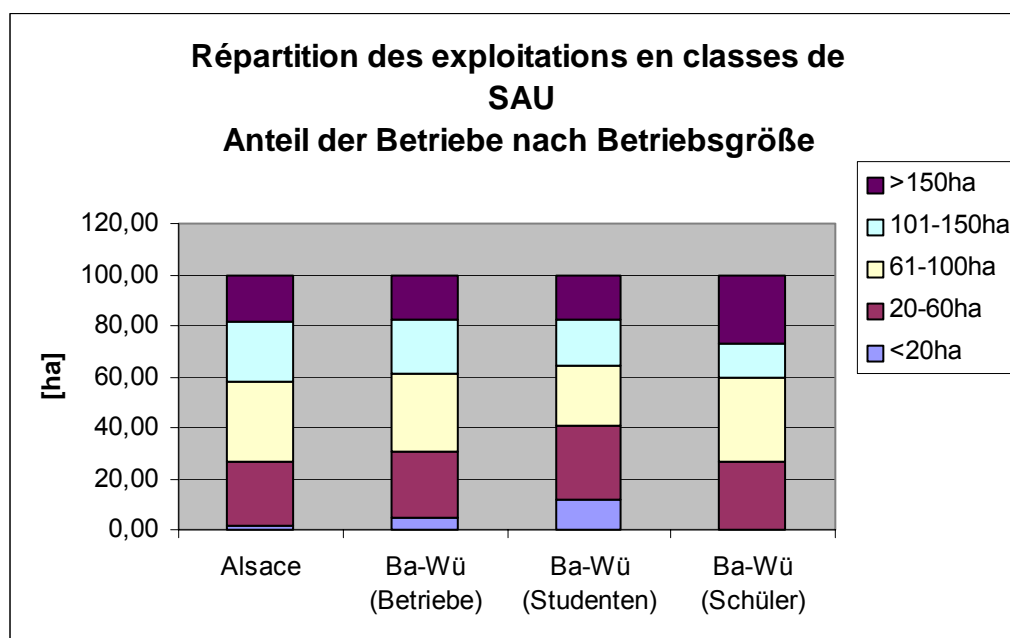


Fig. 168 : faibles différences dans la répartition des exploitations par classes de taille entre les différents groupes enquêtés

Les exploitations enquêtées en Bade Wurtemberg présentent en moyenne une taille 10 fois plus conséquente que la taille moyenne des exploitations du Land qui selon les statistiques de l'année 2003 était proche de 9,9 ha. L'enquête réalisée donne surtout une représentation de l'opinion d'exploitations largement au dessus de la moyenne du Land. Cependant, comme la

tendance est à l'agrandissement des structures, l'enquête reflète théoriquement l'appréciation d'exploitations dotées d'un avenir relativement plus certain.

Comme pour l'Alsace, le groupe enquêté en Bade Wurtemberg n'est donc pas représentatif de la population d'exploitations agricoles du Land. Le taux d'exploitations en fermage en **Alsace** est proche de 63 % et de 61 % en **pays de Bade** et chute à 54 % pour le groupe d'exploitations d'élèves et d'étudiants du **Wurtemberg**

La surface en céréales-oléoprotéagineux (SCOP) moyenne des exploitations enquêtées en **Alsace** est de 90 ha, mais avec de grandes disparités puisque elle varie de 7 à 275 ha !

Elle représente 86% de la SAU, les prairies, avec une surface moyenne de 20 ha y contribuent pour 9% et les cultures spéciales pour 5%, leur surface moyenne étant de 11,5 ha. Le taux moyen de surface en fermage est proche de 63%.

La surface en grandes cultures des exploitations enquêtées en Pays de Bade est analogue avec une moyenne de 91 ha. En revanche, en Wurtemberg, où les surfaces en herbe jouent un plus grand rôle, la surface moyenne n'est que de 61 ha pour les deux groupes. La variabilité est là aussi très importante : de 0,3ha (cultures spéciales pour les „Studentenbetrieben“) jusqu'à 290ha (valeur maxi des exploitations en Bade).

La surface en grandes cultures représente en Bade Wurtemberg pour les trois groupes (exploitations en Bade, exploitations d'étudiants et exploitations d'élèves en Wurtemberg) respectivement 91/62/61% de la SAU. Elle est complétée par la surface en herbe 8/34/35 % et les cultures spéciales 1/5/3 %. Les terres labourables sont plus répandues en bade qu'en Wurtemberg où l'exploitation des pâturages joue un rôle plus conséquent.

En **Alsace**, la principale caractéristique des parcelles est leur grand nombre (moyenne de 44 parcelles par exploitation avec une variabilité de 2 à 200).

En **Bade-Wurtemberg** on retrouve en moyenne par exploitation 80 parcelles (Baden), 73 („Studentenbetriebe“ en Wurtemberg) et 83 („Schülerbetriebe“ en Wurtemberg). En Bade – Wurtemberg, la dispersion pour ce critère est aussi considérable et varie de 17 à 260 (Baden), 6 à 400 („étudiants“) et 16 à 300 („élèves“).

En **Alsace**, 49% des parcelles ont moins d'1 ha et 32% se situent dans la catégorie de 1 à 3 ha, soit 81% des parcelles ont moins de 3 ha (**Bade** : 90%). Les proportions de parcelles plus grandes sont respectivement de 16% (de 3 à 10 ha) et de 3% seulement pour les parcelles de plus de 10 ha. (**Bade** : 0,4-0,8%); (Fig. 169).

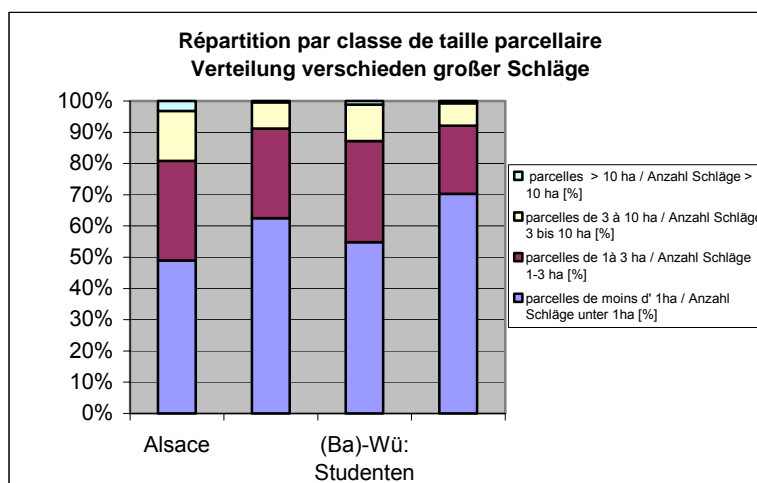


Fig. 169 : répartition par classe de la taille des parcelles

3.3.4 Type de sols et analyses

Même si 40% d'agriculteurs **alsaciens** signalent avoir 2 ou 3, voire 4 types de sol différents sur leur exploitation (question posée seulement en Alsace), le type de sol le plus représenté est le sol limono-argilo-sableux. Ce type de sol, que l'on ne peut pas facilement ranger dans une catégorie bien définie comme les loess ou la hardt, sont généralement des sols d'alluvions et correspondent à ce que l'on trouve dans la plaine du Rhin et de l'Ill, mais parfois aussi en zone de piémont. Les sols de limons (loess et lehm) et ried arrivent en 2ème position, puis ceux de hardt et plaine de l'Ill. Dans la catégorie "autres", les types signalés sont les sols sableux, les sols argileux et les sols argilo-limoneux (tab. 42).

Type de sol	Nombre de cas où le sol est cité en %
Hardt	12.3%
Limons	19.9%
Sols limono-argilo-sableux	29.7%
Rieds	18.6%
Plaine de l'Ill	12.7%
Autres	6.8%

Tab. 42 : Types de sols cités par les agriculteurs alsaciens enquêtés

Les analyses complètes de sol sont réalisées en **Alsace** comme pour les trois groupes interrogés en **Bade Wurtemberg** en moyenne tous les 5 ans, quelle que soit la culture. Quant aux mesures d'azote minéral (N_{min}), elles sont réalisées en **Alsace** plus fréquemment sur les cultures spéciales (tous les 1,7 an en moyenne) ou les céréales (tous les 2 ans en moyenne) que sur maïs (tous les 3 ans environ en moyenne). Ce critère n'a pas pu être exploité en Bade Wurtemberg à cause de réponses irrégulières.

Les réponses données pour la valeur agronomique des sols (seulement en Bade Wurtemberg car système de notation non développé en France) semblent indiquer que les exploitations du pays de Bade disposent de sols quelque peu plus fertiles qu'en Wurtemberg (Fig. 170).

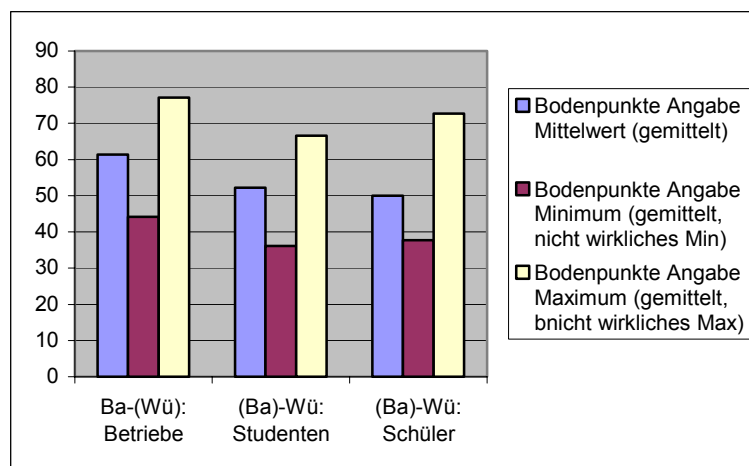


Fig. 170 : valeurs moyennes pour les valeurs des sols (mini, maxi, moyenne)

3.3.5 Répartition des cultures

Comme le montre la figure 171, la culture de loin la plus développée dans les exploitations enquêtées situées dans le Rhin supérieur est le maïs grain. Les céréales suivent à distance.

Parmi les exploitations enquêtées en **Alsace**, 64% des surfaces de grandes cultures sont consacrées au maïs, qui représente par ailleurs 62.5% de la SAU, 13% le sont aux céréales à paille. La jachère arrive en 3^{ème} position avec 9% des surfaces, suivie par les cultures spéciales, 7%, essentiellement représentées par la betterave, puis dans une deuxième mesure le tabac, le chou, la vigne, les légumes. Cultures fourragères et oléagineux sont anecdotiques, avec respectivement 4% et 1% des surfaces. Quant aux protéagineux, ils sont quasiment absents de la sole "grandes cultures". Nous avons donc un échantillon d'agriculteurs très "céréaliers", plutôt maïsiculteurs, ce qui est assez conforme à l'agriculture de la plaine alsacienne.

79 agriculteurs disent pratiquer une culture intermédiaire, ce qui représente la moitié de notre effectif. La succession de cultures concernées n'est pas toujours précisée, mais dans une grande majorité des cas, elle intervient après blé ou entre blé et maïs.

Enfin, la proportion de surfaces irriguées est nettement plus importante que celle de surfaces drainées, 82% de l'ensemble des surfaces déclarées irriguées ou drainées, contre 18% de surfaces drainées. La part des surfaces irriguées dans la SAU est de 42.3%, ce qui est important et bien supérieur à la part de l'irrigation en Alsace (environ 16% de la SAU).

La figure 171 donne également la répartition des cultures ausein des trois groupes d'exploitations enquêtées en **Bade Wurtemberg**.

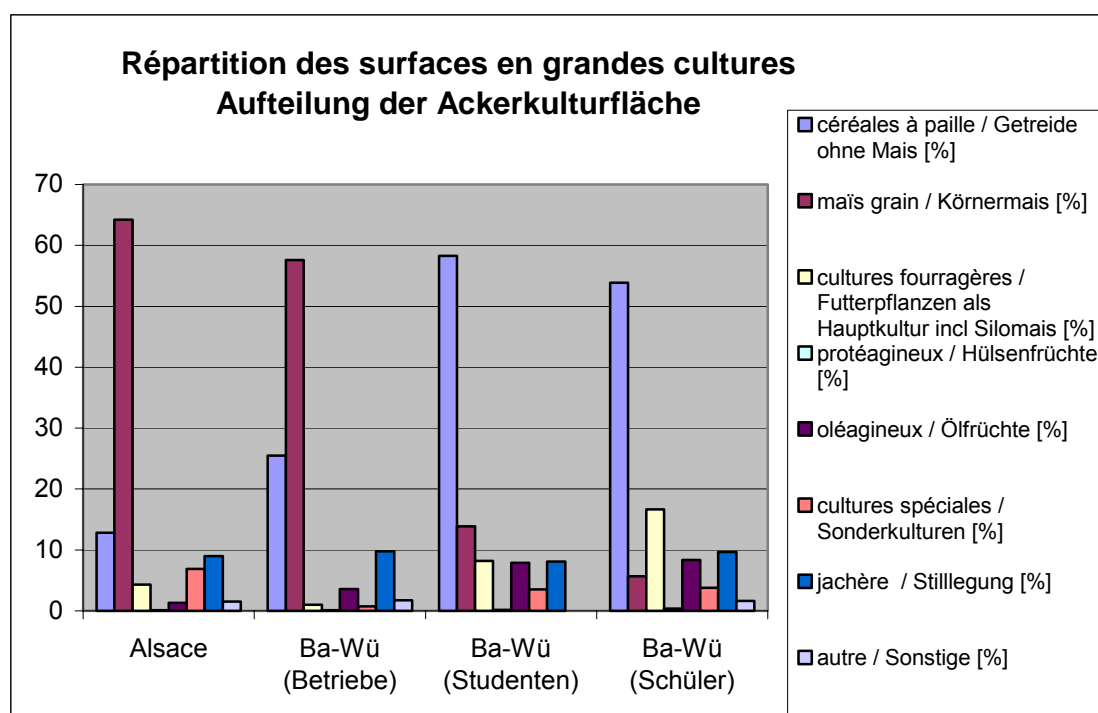


Fig. 171 : répartition des surfaces en grandes cultures

3.3.6 Homogénéité des parcelles

47% des exploitants **alsaciens** estiment que leurs parcelles ne sont pas homogènes (55 % en Bade) , 42% qu'elles le sont en partie seulement, alors que 12% les trouvent homogènes. Par ailleurs, les agriculteurs connaissent bien leurs parcelles et les différences qui s'y trouvent, 78%, et tiennent assez bien compte de ces différences dans la conduite (44% oui et 43% en partie). Le besoin d'informations complémentaires sur cette variabilité parcellaire s'en trouve par conséquent relativement partagé.

En **Bade**, la majorité des exploitants que leurs parcelles sont hétérogènes. En **Wurtemberg** („étudiants- et „élèves“) moins de la moitié le pense. On remarque que presque 30 % des étudiants sont d'avis que les parcelles de leur exploitation sont homogènes (Fig. 172).

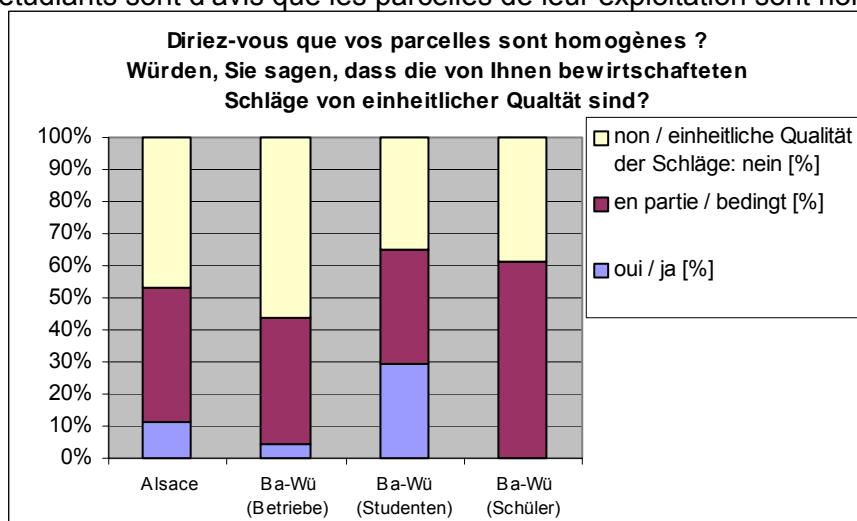


Fig 172 : estimation des enquêtés vis à vis de l'homogénéité de leurs parcelles

Au global, les agriculteurs jugent qu'ils connaissent bien leurs parcelles. Seuls les élèves semblent moins bien connaître les parcelles (Fig .173).

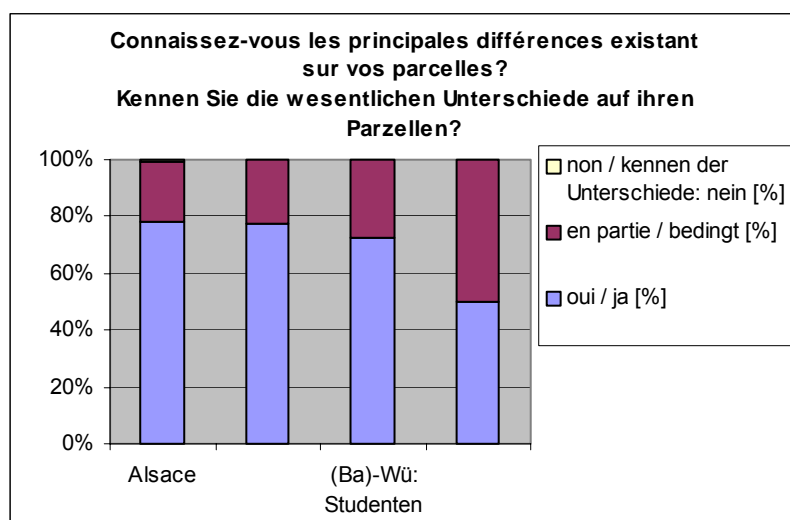


Fig. 173 : estimation des enquêtés sur leur connaissance des différences au niveau des parcelles.

En conséquence, ce sont les élèves qui voient la plus forte nécessité de disposer d'informations complémentaires sur les parcelles, mais en même temps ce groupe présente aussi le plus fort taux de personnes n'en voyant pas l'utilité. Les appréciations livrées sont donc ambivalentes (Fig. 174) ce qui est aussi vrai pour les autres groupes .

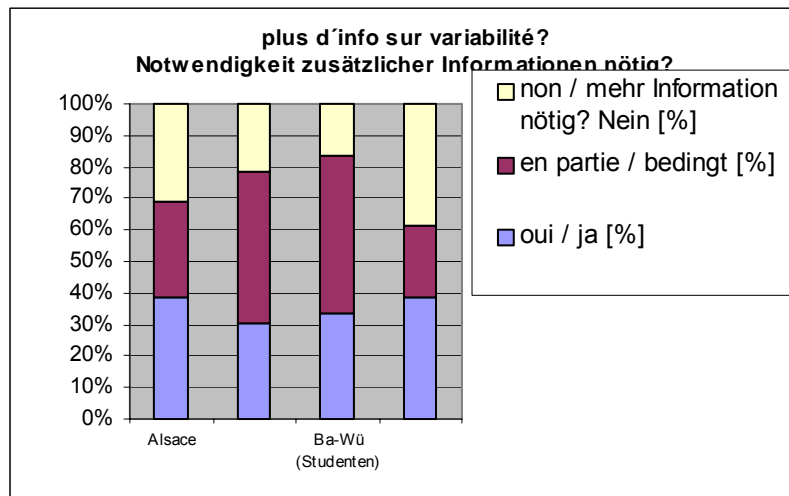


Fig. 174 : estimations au sujet de la nécessité de disposer de plus d'informations sur les parcelles pour leur exploitation

3.3.7 Exploitation et travaux agricoles

La plupart des travaux réalisés sur les exploitations **alsaciennes** le sont avec le matériel de l'agriculteur, ce qui reflète un bon équipement général des exploitation et la faiblesse des structures de mise en commun de matériel de type CUMA. Travail du sol et protection des cultures sont les domaines "réservés" des agriculteurs, alors que le semis, la fertilisation, mais plus souvent le chaulage, peuvent être réalisés par entreprise. Mais plus encore, ce sont surtout les chantiers de récolte qui sont concernés par l'entreprise, avec 52% des effectifs pour la moisson ou la fauche et 68% pour l'ensilage.

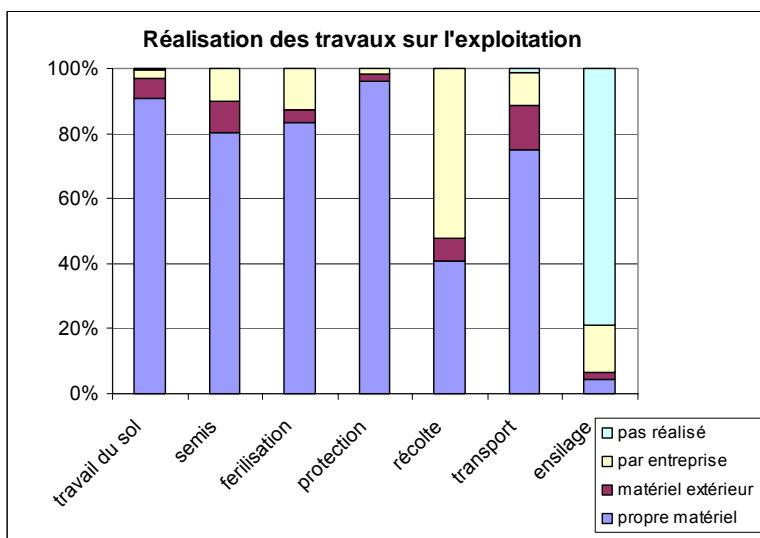


Fig. 175 a : réalisation des travaux sur l'exploitation (Alsace)

Comme en Alsace, la plupart des travaux en **Bade-Wurtemberg** sont aussi réalisés avec des machines et outils en propriété. Toutefois en moindre proportion. Seules les récoltes sont principalement réalisées par les entrepreneurs agricoles. Une part d'environ 20% des travaux de fertilisation, chaulage ou de transport de la récolte se font aussi par le biais d'entreprises.

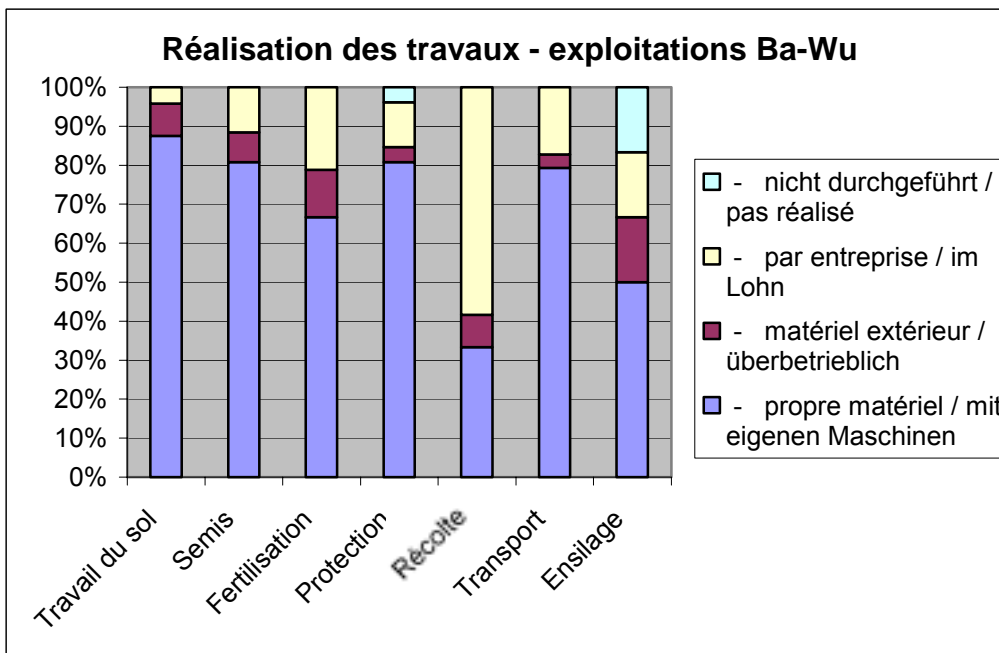


Fig. 175 b : Réalisation des travaux de l'exploitation (Pays de Bade)

3.3.8 Le conseil agricole

En **Alsace**, les chambres d'agriculture et les organismes économiques, coopératives et négoce, se partagent le conseil auprès des agriculteurs, avec respectivement un tiers des réponses. Les instituts techniques arrivent ensuite avec 21%, alors que les industries ou les autres sources de conseil, principalement des revues spécialisées, représentent chacune 7%. La figure 176 donne la répartition du conseil dans les trois groupes d'enquêtés côté D.

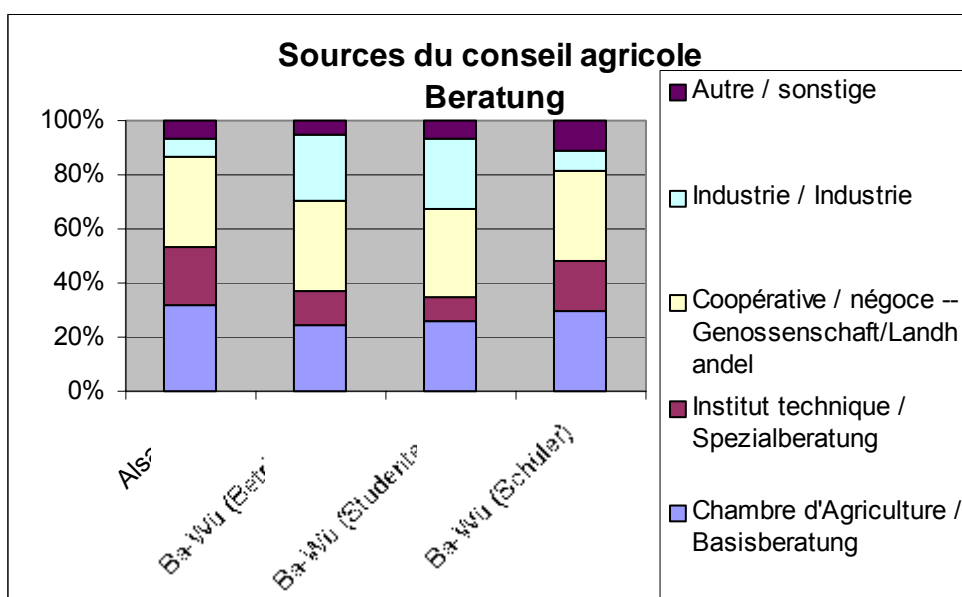


Fig. 176 : répartition des sources du conseil

3.3.9 Fertilisation

Une majorité d'agriculteurs **alsaciens** affirme pouvoir bien apprécier les quantités d'engrais à apporter sur leurs parcelles (58% pour "oui" et 38%, "en partie", soit 96%). Cela rejoint aussi le fait qu'ils les connaissent bien (cf. ci-avant). En corollaire, les $\frac{3}{4}$ estiment fertiliser de manière adéquate et ne craignent pas de sur- ou de sous- fertiliser.

La plupart d'entre eux font appel à du conseil pour la fertilisation (61%) ; les conseils divulgués dans le cadre des opérations Ferti-mieux sont le plus souvent cités, mais les exploitants tiennent également compte des analyses de terre, des reliquats ou des mesures de type Jubil. Ils sont satisfaits de ces conseils car les jugent fiables et ils les appliquent régulièrement.

Côté des enquêtés en **Bade Wurtemberg**, comme pour les la connaissance des parcelles, les groupes des étudiants et élèves sont moins certains de bien fertiliser (Fig. 177).

Sans bien connaître les parcelles, il est logique de se demander si l'on ajuste bien la fertilisation. On remarque que les exploitants badois pensent pouvoir bien ajuster leur fertilisation pour 25 % de plus que les alsaciens. Seulement 4-6% craignent sous fertiliser, exception chez les élèves ou ce pourcentage montre à 14%. Tandis qu'en Alsace environ 10% des enquêtés admettent qu'ils pourraient parfois surfertiliser, cette opinion n'apparaît pas en Pays de Bade. On remarque aussi que 95% des exploitations en Bade déclarent faire appel à du conseil pour la fertilisation contre seulement 61% des enquêtés en Alsace. Les conseil prodigués sont considérés comme fiables par 77% des interrogés en Bade, contre seulement 56% en Alsace. Les conseils de fertilisation sont encore jugés moins fiables par les étudiants et élèves du Wurtemberg avec seulement 42% de confiance.

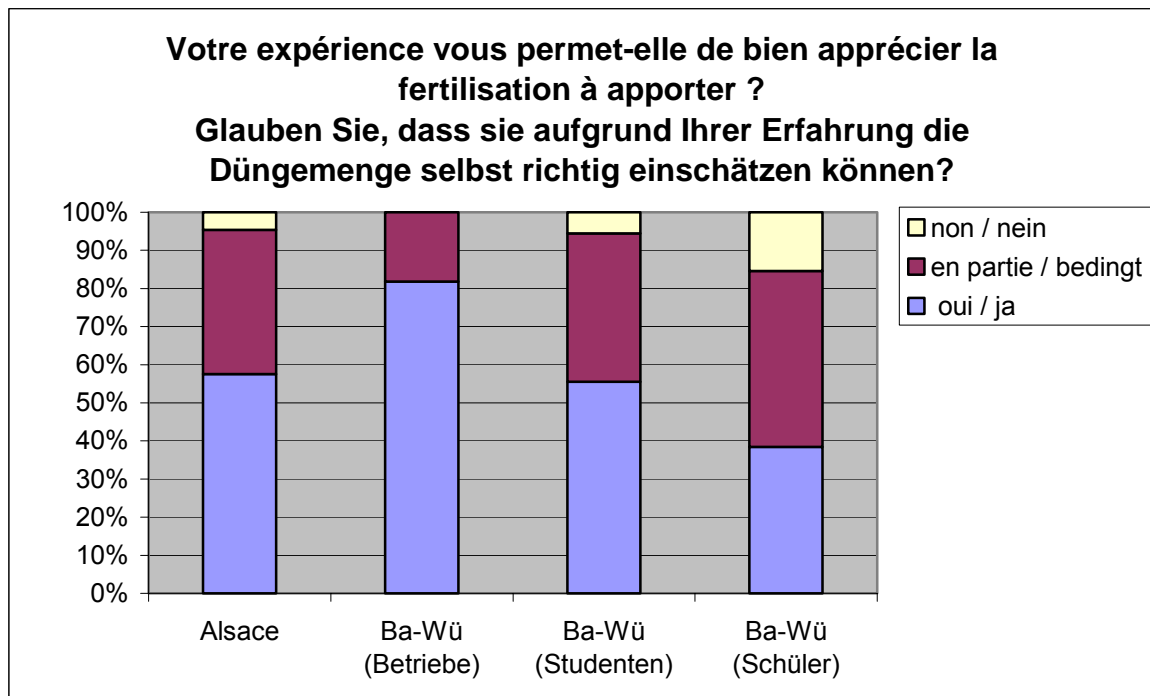


Fig. 177 : votre expérience vous permet-elle de bien apprécier la fertilisation à apporter ?

3.3.10 L'informatique

88% des agriculteurs alsaciens et 96 % des badois de l'enquête disposent d'un ordinateur. Les exploitations des étudiants sont équipées à 100 %. Les alsaciens en disposent depuis 7 ans en moyenne et les badois depuis 12 ans déjà. Chez les enquêtés, 95 % des PC en Bade disposent d'une connexion à Internet contre 87% en Alsace,.

Globalement ils estiment que c'est une aide pour eux mais les réponses sont plus partagées. En Bade Wurtemberg, la majorité (87 % des chefs d'entreprises) considèrent que le PC leur facilite la vie.

Plus de la moitié des répondants **alsaciens** dit avoir suivi une formation en informatique (56%) et se sentir à l'aise (53%) et apprécier le travail sur ordinateur (62%). Il subsiste cependant une part non négligeable d'agriculteurs n'ayant pas suivi de formation en informatique (environ 30%) et ne maîtrisant pas très bien certains programmes, ce qui peut expliquer une certaine réticence à investir du temps sur ordinateur ou à se lancer dans l'agriculture de précision.

En **Bade Wurtemberg**, seuls 50% des agriculteurs questionnés en Baden se sentent totalement à l'aise avec leur PC. Chez les étudiants, le taux monte à 61% et chez les élèves à 79%. 80% des agriculteurs se sentent à l'aise dans la pratique avec des logiciels agricoles, 70% avec les tableurs et 65% avec un traitement de texte. Chez les étudiants, 84%, sont sûrs dans le maniement de traitement de texte, 60% avec un tableur et seulement 35% avec des logiciels agricoles spécifiques. Chez les élèves, pour les mêmes outils et le même ordre les pourcentages sont respectivement de 93%, 71% et 50%.

Bien que beaucoup des enquêtés se sentent à l'aise avec leur ordinateur, dans le Bade-Wurtemberg seulement 60% des agriculteurs enquêtés, 52% des étudiants et 57% des élèves, déclarent apprécier et bien aimer l'utilisation de leur PC. De manière étonnante, ce sont les agriculteurs qui se déclarent les moins sûrs d'eux qui en même temps disent avoir le plus de plaisir à utiliser cet outil informatique. .

3.3.11 Connaissance et utilisation d'un GPS

Une grande majorité des agriculteurs **alsaciens** n'a pas de matériel agricole équipé de GPS ou d'ordinateur (94%).

Côté **badois**, 14 % des enquêtés déclarent avoir une de leur machine équipée d'un GPS. Ce chiffre n'est certainement pas représentatif de la majorité mais il reste évident que la plus grande majorité des exploitants agricoles ne disposent pas encore d'engins équipés.

Pratiquement tous les enquêtés ont déjà entendu parler du GPS et la plupart peuvent en décrire le principe ou en partie les grandes lignes de fonctionnement. Le lien pratique avec cette technologie est avant tout cité pour l'avancement téléguidés des tracteurs, mais aussi pour la mesure des surfaces des parcelles et la localisation des prélèvements de sols. L'utilisation du GPS pour la réalisation de cartes de rendement est largement moins connue. La production de cartes d'application d'engrais n'est quasi jamais mentionnée.

3.3.12 Niveau d'information relative à l'agriculture de précision

On remarque que tous les groupes interrogés se sentent insuffisamment informés sur l'agriculture de précision.

En **Alsace**, 90% ne connaissent que peu de chose voire rien du tout. Si l'on rentre dans le détail, les éléments de cette technologie sont pourtant connus, en particulier les termes d'agriculture de précision, de modulation intraparcellaire des intrants, et de capteurs de rendement. Moins connus sont les termes „SIG“ et télédétection .

Seuls 9% des étudiants enquêtés en **Bade Wurtemberg** estiment posséder un haut niveau de connaissance. La majorité ressent un niveau de connaissance plutôt moyen, à savoir 58% des exploitants en Bade, 44% des étudiants et 87% des élèves agricoles en Wurtemberg. 37% de exploitants questionnés en Bade, 47% des étudiants et 14% des élèves agricoles du Wurtemberg jugent ne disposer que d'une faible connaissance en la matière. Environ 5% des agriculteurs enquêtés en Bade n'ont encore jamais entendu parlé de l'agriculture de précision.

En Bade-Wurtemberg, les notions d'agriculture de précision les plus connues sont « modulation intraparcellaire », « capteur de rendement ».

Par contre, la notion de « modulation intraparcellaire des intrants » est moins connue qu'en Alsace. Ceci peut être dû au fait que la racine du mot « modulation » n'a que peu de signification dans la langue allemande.

3.3.13 Intérêts vis à vis de l'agriculture de précision

En **Alsace**, la mise en œuvre de l'agriculture de précision mentionnée en premier concerne la fertilisation azotée et la cartographie des rendements. Ceci n'est pas étonnant car les deux sujets sont très liés. En connaissant le rendement, les agriculteurs peuvent mieux se figurer le potentiel de rendement de leurs parcelles. De plus, le rendement est une composante importante de leurs revenus. En ce qui concerne la fertilisation azotée, les exploitants sont, déjà depuis un certain temps, sensibilisés à l'ajustement des doses (opérations Ferti-Mieux), ce qui est relativement facile à mettre en œuvre. Par ailleurs, des outils existent déjà dans ce domaine. Deuxièmement, il existe un intérêt pour la modulation intraparcellaire de la fertilisation de fond. Par contre, l'intérêt pour l'application de l'agriculture de précision dans les domaines de la protection des cultures ou de la conduite guidée par GPS des machines est faible.

Au contraire, les agriculteurs enquêtés en pays de Bade voient comme domaine d'application potentiel de l'agriculture de précision en premier la cartographie de rendement (86%), puis les dispositifs de guidage par satellite pour conserver sa trajectoire (68%) et après la modulation intraparcellaire (61%). Chez les étudiants rencontrés, le classement est identique, avec des pourcentages qui sont quelque peu plus faibles que pour les agriculteurs : carte de rendement (62%), aide au guidage (53%) et modulation intraparcellaire (41%).

Chez les élèves d'écoles d'agriculture, 67% voient une application potentielle pour la fertilisation de fond, 60% pour la cartographie de rendement et 54% pour la fertilisation azotée et l'aide au guidage automatique.

Le plus faible potentiel d'application est mentionné pour le désherbage chez les exploitants et les élèves agricoles. De manière étonnante, les étudiants voient eux le plus faible potentiel dans la fertilisation de fond et en premier dans le désherbage de précision. Ceci tient sans

doute à la bonne connaissance des possibilités de lutte modulée contre les mauvaises herbes transmises dans la chaire de l'université (cf. bibliographie sous le chapitre 1.3 (1)), alors que les autres catégories enquêtées en ignorent encore tout.

3.3.14 Motivations pour la mise en oeuvre de l'agriculture de précision

Même si les agriculteurs en **Alsace** formulent des réserves considérables (par exemple par rapport aux frais d'investissement et au morcellement du parcellaire), ils ne rejettent pas l'agriculture de précision en bloc. La plupart d'entre eux peut s'imaginer l'appliquer sous condition de rentabilité et d'une formation adaptée. Ils se montrent plus réservés quand il s'agit d'admettre l'utilité économique et écologique de cette technologie pour leur exploitation. Ils n'y voient pas beaucoup de marge d'amélioration dans leur cas et ont alors du mal à se représenter son utilisation dans leur exploitation (cf. les réserves mentionnées ci-dessus).

Curieusement, les exploitants **badois** sont beaucoup moins ouverts par rapport à l'application de l'agriculture de précision que leurs collègues alsaciens, bien qu'ils soient deux fois plus nombreux à être convaincus que l'agriculture de précision peut constituer une aide sur le plan économique (61 % contre 33 % en Alsace) et aussi bien plus nombreux à être convaincus de son utilité écologique (60 % contre 42 % en Alsace). Seuls 57 % des exploitants enquêtés en Bade sont ouverts à l'utilisation de l'agriculture de précision si elle est subventionnée et sans impact sur les coûts, contre 71 % en Alsace. Les élèves et les étudiants sont beaucoup plus ouverts avec 80 % d'opinions favorables à cette proposition. La part des avis très négatifs vis-à-vis de l'agriculture de précision est très faible (9 % en Alsace, exploitants badois 0 %, étudiants et élèves dans le Wurtemberg, respectivement 3 % et 0 %). Les avantages mentionnés par tous comprennent les économies et la protection de l'environnement. Les désavantages comprennent les coûts d'investissement élevés et les problèmes liés au morcellement du parcellaire.

La notion de modulation de la fertilisation regroupée de parcelles avoisinantes rencontre en **Alsace** quelques échos positifs (65% 'oui' ou 'en partie'). Malgré la petite taille des parcelles et la dispersion du parcellaire, 30% ne sont pas prêts à un « remembrement virtuel », ce qui exprime l'importance de l'individualisme qui règne encore.

3.3.15 Acceptation à investir dans l'agriculture de précision

Si les agriculteurs se lançaient dans l'agriculture de précision, environ 32 % des enquêtés en **Alsace** seraient prêts à investir dans les machines et les équipements nécessaires, soit seul soit dans le cadre d'une CUMA. Treize pour cent ne veulent pas participer ou s'investir du tout. D'autre part, les enquêtés n'ont aucune idée des prix courants à payer pour des prestations telles que l'élaboration d'une carte de rendement (exemple A, 36 % des réponses) ou pour la modulation de la fertilisation (exemple B, 40 % des réponses). Une grande partie des agriculteurs enquêtés (31 % et 27 % pour les exemples A et B) ne veut rien payer du tout, même s'ils trouvent la prestation intéressante.

Ceux qui sont prêts à payer quelque chose, ne veulent pas payer beaucoup, c'est-à-dire 10 €/ha au maximum.

Pour les groupes enquêtés en **Bade-Wuttemberg**, environ 15% (12 et 18%) des questionnés n' envisagent aucunement des investissements individuels. On remarque qu'en Alsace, les exploitants sont un peu plus prêts à des investissements dans du matériel (32% contre 21% des exploitants badois). Les élèves d'écoles agricoles sont aussi plus ouverts à des investissements en la matière (40%), tandis que les étudiants préféreraient avoir recours à des CUMA ou des entrepreneurs (38%). Chez les exploitants de Bade, l'idée d'un recours à une CUMA ou à l'entrepreneur sont à égalité (29% et 32%) (cf. Fig. 178).

La plupart des exploitations serait prête à supporter des coûts supplémentaires pour la cartographie du rendement. Les exploitations alsaciennes sont les plus ouvertes à une telle éventualité (Alsace 87%, Baden 76%, „Studentenbetriebe“ en Wurtemberg 79% et „Schülerbetriebe“ en Wuttemberg 73%).

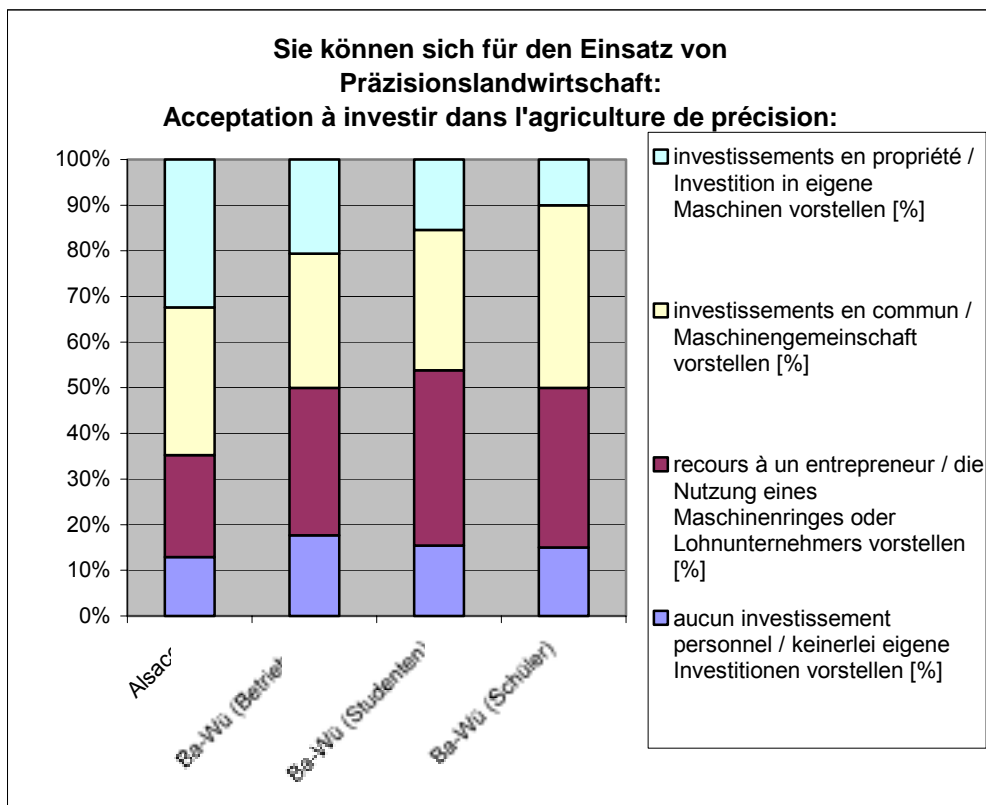


Fig. 178 : taux d'acceptation à l'investissement en agriculture de précision

De même, les enquêtés imaginent également de prendre en charge des dépenses liées à l'établissement d'une carte d'application intraparcellaire. Toutefois, les exploitations badoises sont beaucoup plus réservées à ce sujet que les autres groupes enquêtés (Alsace 87 %, exploitations badoises 43 %, « exploitations relevant d'étudiants » et « exploitations relevant d'élèves » dans le Wurtemberg, respectivement 92 % et 73 %).

On remarque que les pourcentages de cette réponse pour l'Alsace et pour les « exploitations relevant d'élèves » sont similaires aux pourcentages de la réponse à la question concernant la carte de rendement. Ceci est logique car la carte de rendement ne devient pleinement utile que lorsqu'elle est traduite en exploitation intraparcellaire.

Curieusement, on observe chez les exploitants badois une acceptation nettement plus élevée à payer la cartographie des rendements que la prise en charge d'une exploitation intraparcellaire (76 % contre 43 % des exploitants enquêtés).

Quatre-vingt-treize pour cent des étudiants accepteraient même des dépenses liées à une exploitation intraparcellaire (79 % pour la carte de rendement).

Cette acceptation de base à payer est toutefois en lien avec le fait que un tiers des exploitants n'ont aucune idée de ce que peut représenter ce surcroît de travail.

A partir des réponses des exploitants enquêtés ayant estimé les surcoûts qu'ils seraient prêts à supporter, il ressort une acceptation de payer la réalisation d'une cartographie des rendements en moyenne de 6,91 €/ha. Pour une fertilisation azotée modulée en intraparcellaire, le montant moyen serait de 8,89 €/ha, c'est à dire en dessous de 10 €/ha comme pour en Alsace.

On remarque que la différence vis à vis d'une simple cartographie de rendement n'est que de 1,97 €/ha en Bade ce qui est très faible et ne représente qu'une part des coûts supplémentaires attribués à la réalisation d'une carte de rendement.

Les frais de transformation d'une carte de rendement en carte d'application azotée ne sont que faiblement supérieurs aux frais de la seule élaboration d'une carte de rendement.

Une explication pour ce jugement décalé pourrait être que les agriculteurs estiment possible à l'aide d'une carte du rendement d'adapter grossièrement et manuellement le besoin en engrais dans le sens d'une modulation intraparcellaire sur la parcelle. Une autre explication est que l'on suppose qu'avec la cartographie du rendement, tous les paramètres importants pour la réalisation d'une carte d'application sont déjà réunis.

Les deux explications possibles montrent dans tous les cas qu'il existe un grand besoin d'information auprès des agriculteurs sur les modes d'application de l'agriculture de précision.

En accord avec la plus grande ouverture apparente envers l'agriculture de précision rencontrée **en Alsace**, l'acceptation d'une gestion des cartographies de rendement et de nutriments au sein d'une base de données centralisée y est aussi deux fois plus élevée qu'en **Bade** (24 % contre 10 %). Seul les élèves de Bade-Wurtemberg se montrent légèrement plus ouverts à cela (27 %). Cependant, la part de ceux qui refusent formellement cette possibilité est plus élevée (27 %) que dans les exploitations d'Alsace (19 %) ou de Bade (20 %). En outre, une très grande partie des réponses souhaite formuler des conditions pour cette administration centralisée des données (Alsace 56 %, exploitations badoises 70 %, exploitations « exploitants relevant d'étudiants » 67 %, « exploitations relevant d'élèves » 46 %) (Fig. 179). L'enquête n'aborde malheureusement pas la question du type de conditions auxquelles pensent les enquêtés.

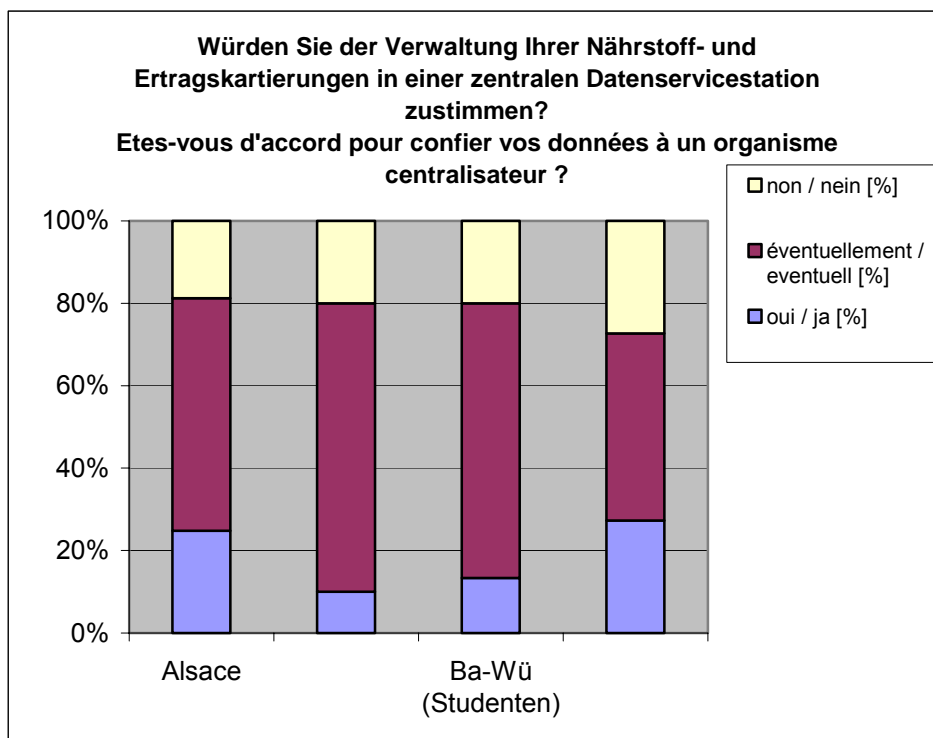


Fig. 179 : accord pour une administration des cartes de rendement et de fertilisants par un prestataire centralisateur des données

Dans l'enquête, les réponses libres à la question sur les changements nécessaires pour une mise en œuvre de l'agriculture de précision (Fig. 180) indiquent qu'une réduction des frais est nécessaire pour rendre possible l'application de ces techniques chez les exploitants enquêtés. Cette réponse est la plus fréquente dans tous les groupes enquêtés (30 à 50 % des réponses). La taille réduite de la structure agricole est également considérée comme une gêne. Les élèves trouvent le système difficile à manier. Ils mentionnent notamment le manque de fiabilité du système.

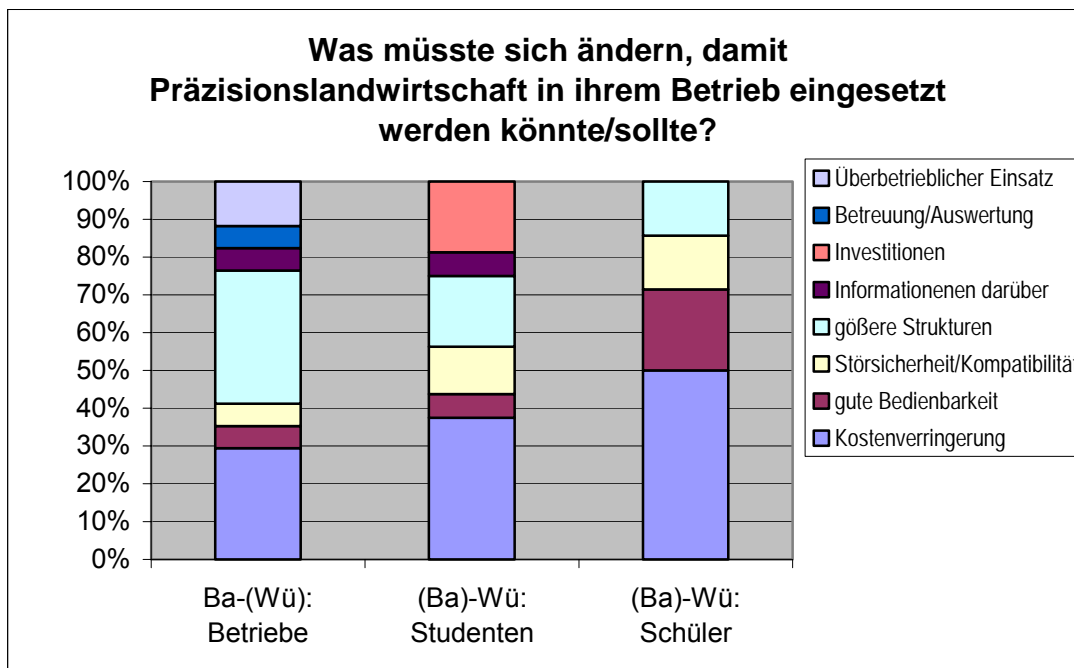


Fig. 180 : analyse des problèmes chez les différents groupes enquêtés

Les étudiants distinguent au contraire les coûts de réalisation et les investissements. Si on regroupe les deux, les aspects financiers recouvrent alors en général une importance prépondérante. Les agriculteurs, forts de leurs expériences personnelles, jugent problématique la mise en œuvre inter-entreprises. L'acceptation vis à vis d'une mise en œuvre de l'agriculture de précision augmenterait si les problèmes cités par les enquêtés pouvaient être pris en considération.

3.3.16 Expériences acquises en agriculture de précision

En **Alsace**, la grande majorité des enquêtés (97 %) n'a aucune expérience avec l'agriculture de précision (sauf les participants au présent projet). Par conséquent, les questions concernant les problèmes éventuellement rencontrés ne peuvent pas être analysées pour l'Alsace. ceci vaut également pour l'utilité économique de l'agriculture de précision : la plupart des agriculteurs n'ayant jamais utilisé ce système de conduite, ils ne peuvent pas se prononcer sur cette utilité.

En **Bade-Wurtemberg** aussi, les enquêtés n'avaient en général quasiment pas d'expérience avec l'agriculture de précision : seuls 11% des exploitants de Bade et 10% des élèves agricoles déclarent avoir une expérience personnelle. Les étudiants se distinguent avec 31% en la matière, qui se rapportent à des expériences à l'université (cours).

3.3.17 Avantages et inconvénients

Peu d'agriculteurs se sont exprimés dans les questions ouvertes du questionnaire au sujet des avantages et inconvénients.

En cas d'hésitation, les commentaires **alsaciens** penchent plutôt en direction des freins et des inconvénients (58 %) que des avantages (21 %). Chez les exploitants badois, on retrouve

également plus de remarques sur les inconvénients (43% de remarques sur les avantages et 52% sur les inconvénients), tandis que les choses sont plus équilibrées chez les étudiants (26% / 26%). Chez les élèves agricoles, l'ordre des réponses est inversé (avantages 27% / inconvénients 20%). On peut interpréter cela comme la traduction d'une approche plus critique des générations plus âgées vis à vis des nouveautés alors que les jeunes générations sont plus enthousiastes.

L'avantage de l'agriculture de précision ou de la modulation intraparcellaire mentionné le plus souvent en **Alsace** concerne l'ajustement de la fertilisation. Ceci est effectivement l'un des objectifs principaux de l'agriculture de précision. En deuxième lieu est mentionnée la possibilité de mieux connaître le potentiel de rendement des parcelles, suivi par les avantages environnementaux. L'utilité économique ne ressort pas clairement ; elle n'est mentionnée que 6 fois. En outre, certains sont d'avis que cette technologie peut apporter un gain de temps, une meilleure organisation du travail, ainsi qu'une aide à la conduite des machines.

Pour d'autres, ces mêmes aspects sont considérés comme des inconvénients. Ils s'attendent à une augmentation de la charge et du temps de travail. Néanmoins, l'obstacle clairement le plus souvent mentionné est la nécessité d'effectuer des investissements ainsi que la mauvaise rentabilité de l'agriculture de précision, notamment dans le contexte actuel de baisse des prix des produits agricoles et de hausse des impôts, ce qui rend les agriculteurs soucieux de leur avenir.

Le deuxième obstacle concerne le parcellaire. Les exploitants ne peuvent pas imaginer une agriculture de précision sur de petites parcelles, qui constituent pourtant une caractéristique du parcellaire alsacien. Ils ont raison sur ce point car les instruments sont mal adaptés aux petites parcelles. De plus, les différences au sein des petites parcelles sont limitées.

Les autres obstacles mentionnés, bien que moins fréquemment, sont les suivants : la fragmentation du parcellaire, l'incertitude par rapport à l'utilisation de ce technologie, le manque de formation, le manque de confiance dans la fiabilité du système ainsi que la nécessité de s'équiper.

En **Bade-Wurtemberg**, les avantages cités sont essentiellement les retombées positives sur l'environnement, ainsi que les économies en engrais et en produits pesticides. Les inconvénients cités sont les coûts élevés, ainsi que les problèmes des petites structures. Quelques uns trouvent les logiciels pour PC encore immatures et craignent des défaillances techniques (GPS Signal).

3.3.18 Partie analytique : relation entre les facteurs individuels

Afin de compléter l'exploitation de l'enquête, une liste de corrélations potentiellement intéressantes a été constituée. Ainsi, par exemple, les liaisons entre le progrès potentiel supposé de l'agriculture de précision et la taille des parcelles, ou le management de la fertilisation azotée, ou bien encore les perspectives d'avenir de l'exploitation.

Malheureusement, l'exploitation statistique n'a que rarement mise en évidence des corrélations entre les différents facteurs.

Les seules relations statistiques qui ont pu être établies à partir des données **alsaciennes** sont les suivantes :

- Relation entre la fiabilité des recommandations de conseil et la mise en œuvre de ces recommandations : 55 % des exploitants suivent les recommandations lorsqu'ils font confiance au conseil. Ce pourcentage monte à 99 % lorsque la recommandation est considérée comme « fiable » ou « plus ou moins fiable ». Onze pour cent ne suivent pas les recommandations, même lorsqu'ils les jugent fiables.
- Relation entre la connaissance des différences majeures au sein des parcelles et le calcul de la fertilisation : sur la base de la connaissance de leurs parcelles, 81 % des exploitants sont capables de calculer judicieusement la fertilisation. Cette valeur atteint 100 % lorsqu'on englobe aussi le groupe des exploitants ne connaissant que partiellement les différences au sein de leurs parcelles. L'on peut également dire que 60 % des exploitants qui connaissent les différences au sein de leurs parcelles calculent judicieusement la fertilisation et que 96 % d'entre eux sont capables d'estimer plus ou moins bien la fertilisation à apporter.
- Relation entre l'intérêt pour l'agriculture de précision (question sur son potentiel de progrès) et l'hétérogénéité des parcelles : seuls 24 % des exploitants qui considèrent leurs parcelles comme hétérogènes voient un potentiel de progrès dans l'agriculture de précision. Cinquante-quatre pour cent n'en voient aucun et 32 % n'en voient que partiellement.
- Relation entre l'intérêt pour l'agriculture de précision et le besoin d'informations sur les différences au sein des parcelles : 25 % des exploitants ayant voulu obtenir davantage d'informations sur la variabilité des parcelles sont intéressés par l'agriculture de précision. Cependant, 27 % de ceux qui souhaitent davantage d'informations sur leurs parcelles ne sont pas intéressés par cette approche (n'y voient aucun potentiel de progrès). Du reste, 46 % de ceux qui ne croient pas à l'agriculture de précision estiment qu'ils ne nécessitent aucune information sur les différences internes à leurs parcelles. Soixante-trois % de ceux qui y croient souhaitent davantage d'informations.
- Relation entre l'utilisation de l'agriculture de précision du point de vue de l'exploitant et le potentiel de progrès qu'ils lui reconnaissent : ceux qui croient en l'agriculture de précision, du moins en partie, considèrent qu'elle pourrait être intéressante pour différents itinéraires techniques ¹ des parcelles (5 sur 6). Ceux qui ne s'y intéressent pas ou ne la connaissent pas vraiment pensent malgré tout qu'elle pourrait être intéressante, mais seulement pour 3,5 itinéraires en moyenne.

Des comparaisons des réponses obtenues en **Bade-Wurtemberg** ont aussi permis de déduire certains liens qui toutefois n'ont pas fait l'objet d'analyses statistiques.

A partir des réponses des exploitants badois aux différentes questions, il a été possible de déduire les points suivants :

- parmi ceux qui voient un fort potentiel dans l'apport de l'agriculture de précision, beaucoup croient aussi fertiliser de manière adéquate !
Probablement que ce groupe est particulièrement ouvert vis à vis de l'agriculture de précision car ils sont sensibilisés à l'importance d'une fertilisation bien adaptée. Ils attendent sans doute une adaptation aux besoins encore plus poussée ainsi qu'un allègement dans sa mise en œuvre par l'apport de nouvelles technologies.

¹ 6 techniques étaient proposées au choix dans le questionnaire : modulation intraparcellaire des intrants, cartographie du rendement, modulation de la fumure de fond, modulation de la fertilisation azotée, modulation du désherbage, guidage automatique du tracteur.

- lorsque l'appréciation du potentiel offert par l'agriculture de précision diminue, augmente en même temps l'incertitude de fertiliser de manière adaptée ! ceux qui ne sentent pas forcément sûrs de leurs pratiques de fertilisation ont en même temps une plus faible attente vis à vis des possibilités offertes par l'agriculture de précision.
Soit cette réponse indique que ce groupe est peu sensible à l'ajustement de la fertilisation soit qu'ils pensent que le recours aux nouvelles technologies ne peut pas permettre de répondre à la problématique et qu'il ne faut pas attendre que les exploitations individuelles résolvent ce point.

Cette évaluation concorde avec les relations ci-dessous :

- Ceux qui voient un faible potentiel dans l'agriculture de précision ont effectivement une plus forte tendance à surfertiliser !
- Toutefois, beaucoup de ceux qui voient un faible potentiel dans cette approche craignent qu'ils sous-fertilisent !
Il s'agit donc aussi d'un groupe qui a des doutes sur la quantité de fertilisation appropriée.
- Parmi ceux qui voient un faible potentiel dans l'agriculture de précision, une part relativement élevée est convaincue de l'homogénéité de ses parcelles !
En raison de la structure à petite échelle des parcelles, le fait est que les différences peuvent être moins marquées que sur les grandes parcelles. Lorsque ces parcelles se situent effectivement dans des régions homogènes, l'utilisation de la technique plus lourde de l'agriculture de précision n'a que peu de sens, à moins qu'elle ne soit appliquée de façon globale pour inclure à la fois les zones fortement structurées et les secteurs plus homogènes.
- A l'inverse, beaucoup de ceux qui voient un fort potentiel dans l'agriculture de précision sont convaincus que des informations intraparcellaires supplémentaires sont nécessaires !
- Plus le potentiel attribué à l'agriculture de précision est élevé, plus le refus envers une utilisation et un encadrement de l'agriculture de précision neutres en termes de coûts est limité.
- Dans ce cadre, l'acceptation à utiliser l'agriculture de précision augmente avec les attentes envers cette approche.
- Toutefois, une très forte attente envers l'agriculture de précision va de pair avec une augmentation des conditions de son utilisation.
- Il est frappant et concluant de constater qu'une diminution de l'état des connaissances sur l'agriculture de précision coïncide avec une augmentation du nombre d'exploitants n'ayant aucune idée de la manière dont celle-ci pourrait être mise en œuvre dans leur propre exploitation !

Les liens suivants sont également intéressants :

- chez ceux qui considèrent que l'agriculture de précision est bien adaptée pour la fertilisation azotée, la part de ceux qui considèrent ne pas fertiliser de manière ajustée est plus importante !

Manifestement, un problème est ici reconnu dont la solution est espérée par la mise en oeuvre de technologies de l'agriculture de précision.

- ceux qui considèrent au contraire que l'agriculture de précision est mal adaptée pour la fertilisation azotée jugent tous fertiliser de manière adaptée !

Aucune nécessité à changer les pratiques n'est exprimée par ce groupe, et c'est pourquoi l'agriculture de précision ne doit être appréciée que synonyme de dépenses supplémentaires et inutile.

4 Discussion des résultats

4.1 Discussion des résultats d'essais

L'objectif du présent projet résidait dans l'évaluation du potentiel des *technologies avancées pour la modulation des intrants*.

Afin de pouvoir mettre en œuvre cet objectif de manière adaptée, le but du projet a été concrétisé selon deux aspects :

- d'une part, l'évaluation de la modulation des intrants a été effectuée pour les conditions particulières *des petites structures de la plaine du Rhin Supérieur*.
- d'autre part, l'accent a donc été mis sur la *fertilisation azotée sur maïs*, qui possède une importance considérable dans cette zone.

Par le biais de ces concrétisations, les résultats doivent permettre d'évaluer le potentiel des technologies avancées pour cette intervention culturale la plus répandue dans la plaine du Rhin Supérieur qu'est la fertilisation azotée.

Dans ce cadre, les deux aspects de l'*utilité* et de la *praticabilité* des résultats possèdent une importance particulière, car ils permettent d'estimer le succès du projet effectué. Ci-dessous, ces deux aspects sont examinés de manière plus détaillée.

4.1.1 Utilité des résultats

Différents points de vue jouent un rôle dans l'évaluation de l'utilité des résultats :

- d'une part, la *capacité de mise en œuvre technique* elle-même a été évaluée par le biais d'essais sur la variabilité et d'une mise en œuvre concrète de la modulation à l'aide de différentes méthodes et variantes. Cette évaluation résulte des essais sur la variabilité et sur la réalisation de la modulation.
- d'autre part, la capacité de mise en œuvre des exploitants de la région a été évaluée par l'intermédiaire d'une enquête. Parallèlement aux aspects techniques, cette enquête a également pris en compte l'acceptance, la tolérance des exploitants ainsi que leur acceptation à investir.

Enfin est évaluée l'utilité de la modulation de la fertilisation azotée pour l'*environnement*.

Ci-dessous sont évalués les différentes sous-études traitées du point de vue de ces trois aspects, c'est-à-dire selon leur :

- utilité pour une mise en œuvre technique
- utilité pour une mise en œuvre entre exploitants et leur
- utilité pour l'environnement.

Utilité relative à une mise en œuvre technique

L'**évaluation de la variabilité sur les parcelles d'essai** comporte principalement la distribution intraparcellaire des paramètres suivants : rendement à la récolte, capacité de rétention d'eau du sol, facteurs de dégâts aux cultures, divers paramètres végétatifs, granulométrie, éléments nutritifs de base, pH, reliquat d'azote, conductivité électrique à l'aide de l'EM38.

L'utilité de ces études relatives à la variabilité réside

- dans l'évaluation des relations entre différents paramètres autres que ceux pouvant effectivement être utilisés et intégrés lors de la réalisation de la carte d'application, et
- dans la vérification des relations utilisées dans l'approche cartographique réalisée.

Au final,

- des corrélations pouvant être intégrées dans une approche cartographique par le biais de méthodes de télédétection ont été établies (granulométrie).
- on a montré que la forte charge de travail visant à déterminer la variabilité des reliquats d'azote ne devait pas être réduite en raison de la précision de la méthode,
- on a déterminé que la forte dynamique des reliquats d'azote exigeait des échantillonnages intensifs et soignés, effectués dans des délais proches de leur utilisation,
- on a montré l'absence de corrélation entre les distributions de rendement de différentes années,
- on a montré l'absence de corrélation entre le paramètre « rendement potentiel attendu » intégré dans la méthode et le rendement réel.

S'agissant en particulier pour les derniers points cités de paramètres importants de la méthode cartographique selon les « bonnes pratiques agricoles », cette méthodologie s'est avérée plus difficile que prévu.

Différentes méthodes ont été considérées lors de l'**évaluation de la mise en œuvre technique de la modulation des intrants**. L'utilité des résultats réside en particulier dans le fait que la mise en œuvre pratique des différentes méthodes de modulation a pu être testée dans les conditions régionales.

Dans ce cadre, l'approche cartographique selon les « bonnes pratiques agricoles » s'avère également techniquement réalisable dans la situation de structures agricoles de petite échelle, mais elle ne peut être considérée comme applicable dans la pratique sous sa forme simple, en particulier à cause de la lourdeur du travail préparatoire nécessaire.

Une amélioration de l'approche cartographique par l'élaboration de la carte d'application pour des îlots de parcelles semble très profitable du point de vue de la mise en œuvre technique. Les difficultés de mise en œuvre se produisent alors au niveau de l'organisation et des relations interpersonnelles, car cette approche est conditionnée par des activités coopératives et coordonnées entre plusieurs exploitants.

Une amélioration de l'approche cartographique par l'intégration d'une simulation de croissance peut également être confirmée du point de vue de la mise en œuvre technique. La mise en place d'une telle méthode requiert une charge de travail préparatoire importante. Lorsque celui-ci est effectué, de nombreux inconvénients de la méthode cartographique sont surmontés, en particulier le lourd travail préparatoire. Dans certaines conditions bien définies, cette méthode peut s'avérer une variante possible pour la mise en œuvre pratique.

Enfin, l'intégration de la télédétection dans l'approche cartographique est aussi techniquement possible. La corrélation de la distribution de paramètres importants avec des paramètres de télédétection ouvrent des possibilités d'intégration de cette méthode dans l'élaboration des cartes d'application. Un gros effort de recherche doit être effectué pour évaluer les rapports de corrélation entre des données de réflexion issues de bandes spectrales extrêmement étroites, comme peuvent en collecter des capteurs multispectraux modernes, et les paramètres d'entrée jouant un rôle important dans les cartes d'application.

L'approche spatialisée de la méthode cartographique recèle également un fort potentiel en termes de rentabilité. Ceci est confirmé par la présence dès aujourd'hui sur le marché des premières méthodes simples de télédétection bon marché.

Au contraire, l'évaluation d'une méthode online existante (« Cropmeter ») montre que sa mise en œuvre technique sur maïs n'est pas encore parvenue à maturité, même s'il faut préciser que cette méthode n'avait à l'origine pas été conçue pour une utilisation sur maïs.

Résultats relatifs à l'utilité sur le plan des aspects interpersonnels

Contrairement aux affirmations déduites précédemment, l'utilité de l'enquête réalisée doit être évaluée séparément des aspects techniques. Elle vise avant tout à l'obtention de solutions relatives à la mise en œuvre de la modulation entre exploitants.

Les résultats de l'enquête précisent des aspects qui doivent être pris en compte dans le cadre de la mise en œuvre de la modulation de la fertilisation azotée dans la pratique.

Tout d'abord, il s'avère que les exploitants sont relativement ouverts à cette thématique, tant en Alsace qu'en Bade. Toutefois, ils manifestent une réserve prudente, qui trouve surtout ses sources dans un manque de connaissances sur cette thématique. Il est étonnant que les exploitants signalent pourtant une certaine acceptation à effectuer des dépenses de couverture des surcoûts.

Ces résultats constituent un encouragement à la recherche de voies permettant d'intégrer les exploitants sur la base de cette ouverture, sans les surcharger ni les trop les absorber.

Le point ci-dessous constitue un second aspect d'ordre totalement différent :

Lors de la réalisation de l'étude sur la modulation des intrants, des complications sont intervenues avec les méthodes nécessitant une coopération et une coordination entre différents exploitants. Ces méthodes relèvent cependant de celles qui permettent une forte réduction du travail préparatoire dans les conditions des petites structures agricoles rencontrées. Cette problématique s'est clairement exprimée par exemple dans l'approche cartographique lors de l'élaboration d'une unique carte d'application commune, basée sur un îlot de parcelles :

Concrètement, les difficultés ont concerné la recherche de dates et de stratégies communes, et le respect des accords. Ces difficultés peuvent être surmontées par le biais de mesures structurelles et organisationnelles, au sein desquelles les compétences, les responsabilités, ainsi que les voies de transmission des informations et des données doivent être clairement définies. Des structures adaptées doivent être créées dans ce sens. Elles ont le potentiel d'entraîner d'autres effets utiles :

- elles permettent de réunir des exploitants travaillant de manière isolée, qui n'ont souvent pas les moyens de discuter de leurs soucis et de leurs difficultés, ce qui combat la perte du lien social dans la vie active.
- en outre, les compétences sociales sont encouragées par des exigences coopératives, et également attendues dans une certaine mesure.
- parallèlement, l'acceptation sociale des exploitations agricoles peut également augmenter, car la mise en œuvre de l'agriculture de précision rend visible la volonté d'une agriculture écologique durable.

Résultats relatifs aux bénéfices pour l'environnement

Le dernier aspect cité renvoie au troisième point, c'est-à-dire l'utilité des résultats sur le plan environnemental. On trouve ici un potentiel évident de réduction de substances nocives pour le climat, ou tout au moins polluantes :

- comme cela a pu être mis en évidence dans la bibliographie, la fertilisation azotée intraparcellaire permet globalement de réaliser des économies d'azote.
- Les études réalisées dans le cadre de ce projet montrent qu'une application modulée permet de réduire considérablement la part des sous-parcelles ayant reçu une fertilisation inadaptée, en particulier dans les parcelles à forte variabilité. Elle évite la surfertilisation de sous-parcelles qui auraient été trop approvisionnées en cas de fertilisation forfaitaire dans des parcelles soumises à une forte variabilité, ainsi que le lessivage correspondant. Ceci est d'autant plus important que dans ces conditions, et même avec la meilleure volonté, les exploitants génèrent inévitablement du lessivage par des applications adaptées seulement à l'échelle parcellaire.
- si en outre, on parvenait par le biais de la mise en œuvre des propositions de modulation de la fertilisation azotée à convertir la modulation des intrants en direction d'une exploitation d'îlots de parcelles, on pourrait réduire considérablement non seulement le trajet d'accès à la parcelle, mais aussi la fréquence des tournants sur les parcelles. Ceci contribuerait à une économie non négligeable de carburant, et de ce fait à une réduction des émissions de CO₂.
- Le risque de compaction du sol serait enfin fortement réduit par la diminution des zones de fourrière et de la pression exercée sur ces zones.

4.1.2 Mise en oeuvre pratique des résultats

L'utilité des résultats montrée précédemment est directement liée à ses possibilités de mise en oeuvre pratique. Elle se rapporte directement à l'objectif du projet. C'est pourquoi on montre ci-dessous dans quelle mesure les technologies avancées de modulation de la fertilisation azotée paraissent adaptées à un usage pratique dans le contexte des structures agricoles de petite taille de la plaine du Rhin Supérieur. Les sous-études effectuées dans ce but seront réparties entre les études relatives à *la variabilité* et les études concrètes *d'intégration de méthodes de modulation possibles*. En outre, *l'enquête* fournit des aspects de la mise en oeuvre de la modulation de la fertilisation issus de la pratique.

Dans le cadre de l'évaluation précédemment décrite de la **variabilité sur les parcelles d'essai**,

- Se dégagent des approches pratiques relatives à l'intégration de paramètres variables dans la méthode cartographique intégrant la télédétection.
- on a montré que la nécessité de réaliser une collecte soignée de la variabilité des reliquats d'azote avec une forte densité d'échantillonnage était difficile à appliquer dans la réalité, ce qui incite à remettre globalement en question la praticabilité de l'approche simple de la méthode cartographique selon les bonnes pratiques agricoles.
- il est également apparu que la variabilité du rendement potentiel attendu ne pouvait être déduite à partir de distributions individuelles du rendement.

Les deux derniers points constituant des paramètres d'entrée de la méthode cartographique selon les bonnes pratiques agricoles, la mise en pratique de cette méthode dans les conditions régionales de l'étude s'avère plus difficile que prévu.

Un test de différentes **méthodes de modulation des intrants** dans la pratique a montré que la méthode cartographique selon les « bonnes pratiques agricoles » n'était pas praticable dans les conditions données en raison de la forte charge de travail préparatoire.

L'amélioration de *l'approche cartographique par l'élaboration de la carte d'application à l'échelle d'îlots de parcelles* s'avère techniquement bien plus applicable. Le problème réside alors dans la réunion de plusieurs exploitants au sein d'une méthode de modulation, en l'absence de mesures de création de conditions globales structurelles et organisationnelles.

En ce qui concerne l'amélioration *de l'approche cartographique par l'intégration d'une simulation de croissance*, la mise en oeuvre pratique a été non seulement reconnue, mais des dimensions totalement nouvelles de la mise en oeuvre de la modulation des intrants ont même été ouvertes grâce au fait que les problèmes survenus avec l'approche cartographique simple aient été surmontés.

En ce qui concerne l'amélioration *de l'approche cartographique par le biais de l'évaluation du potentiel de la télédétection*, l'intégration pratique de la méthode dans l'approche cartographique a finalement aussi pu être reconnue. Cette méthode paraît avoir une importance dans la pratique en cas d'effort vers une optimisation de la rentabilité grâce à un traitement centralisé des données par une approche spatialisée.

La méthode online disponible (Cropmeter) a été diagnostiquée comme non applicable dans la pratique pour la modulation de la fertilisation azotée sur maïs. Il serait utile de tester d'autres capteurs online.

Les résultats de l'**enquête** ont montré que les conditions globales permettaient aussi une mise en œuvre pratique de la modulation de la fertilisation dans les conditions d'exploitations de petite taille rencontrées dans la plaine du Rhin Supérieur.

4.1.3 Validation des résultats

Les résultats relatifs à l'utilité et à la praticabilité ont pu être validés à l'aide d'autres résultats publiés (littérature), par comparaison entre les résultats des études personnelles ainsi que par le biais de l'enquête.

Validation par les références bibliographiques

Certains points de vue fondamentaux des résultats des études ont pu être confirmés par comparaison avec des résultats publiés :

Ainsi, la nécessité d'aller vers une standardisation et une normalisation des interfaces à la suite des nombreuses complications intervenues au cours des essais coïncide avec les conclusions d'AGRA EUROPE (17/2004).

HEIßENHUBER (2003) confirme l'expérience acquise au cours du projet sur la forte charge de travail et la faible utilité relative lors de l'utilisation concrète de l'approche cartographique. Il arrive à la conclusion que les attentes économiques de la fertilisation intraparcellaire ne seront pas comblées sans difficultés. Du point de vue du projet, certaines mesures structurelles et organisationnelles sont indispensables sur ce point.

L'une de ces mesures dérivée de l'expérience du projet réside dans l'idée que l'élaboration de la carte d'application dans la méthode cartographique devrait être effectuée sur la base d'îlots de parcelles. LANDTECHNIK (3/2005) et LANDPOST (2005) décrivent également l'énorme potentiel de cette pratique en termes de gain de temps.

Une autre mesure réside dans la préconisation d'un rassemblement de toutes les données dans un SIG, afin d'améliorer la gestion spatialisée. Cette préconisation concorde avec l'opinion de BÖRNER G. (2004) et du BAUERNZEITUNG (2004).

Les attentes économiques ne pouvant pas être comblées sans difficultés, il est nécessaire de mettre en place une mise en place prudente et progressive, ce qui est également l'avis du LANDTECHNIK (1/2004) et du BAUERNZEITUNG (2002). Ceci est vrai d'un point de vue technique, mais aussi vis-à-vis de la situation des exploitants et concorde avec les impressions décrites dans le projet comme avec les résultats de l'enquête.

La mise en garde du Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) contre les erreurs de calcul de la fertilisation azotée par des capteurs sensibles à l'azote (BAUERNZEITUNG, 2005) apparaît également au sein du projet lors de la discussion critique d'une méthode simple de

téledétection apparue sur le marché. Il est montré que beaucoup de paramètres influents ne sont pas pris en compte ou bien qu'on part du principe qu'ils n'ont pas d'influence sans réellement le vérifier.

Par contre, les corrélations significatives entre la conductivité électrique du sol, le pH ainsi que les teneurs en K et en Mg (DOMSCh H., KAISER T., WITZKE K. et SACHSE H., 2003) n'ont pas pu être confirmées par la présente étude.

Validation par les résultats d'essais

La comparaison entre la validation des résultats des essais et les résultats de l'enquête montre plusieurs concordances :

Ainsi, le **PC** a également fait son apparition chez l'entrepreneur ayant participé à l'étude, de même qu'une connexion Internet. Comme pour la majorité des réponses à l'enquête, des difficultés existent dans l'exploitation de l'entrepreneur sur le plan du programme agricole consacré à l'agriculture de précision. De même, la manipulation du PC constitue pour lui aussi une activité peu plaisante, ce qui représente l'un des obstacles à l'intégration de l'agriculture de précision dans l'exploitation. Sur ce point, les obstacles sont cependant totalement justifiés. De plus, il existe une aversion contre le fait de traiter des données géoréférencées sur le PC.

Comme le montrent aussi clairement les résultats de l'enquête, l'exploitation intégrée au projet est fondamentalement ouverte à une **approche intraparcellaire**. Cependant, lors de l'application concrète sur le site, on ne voit pas vraiment l'intérêt de la méthode car on pense déjà fertiliser de manière appropriée et adaptée. Selon l'entrepreneur, les dépenses liées à la modulation de la fertilisation selon l'approche cartographique ne sont pas justifiées, et ne sont pas suffisamment compensées par leur utilité. Ceci correspond par ailleurs au résultat des études de modulation de la fertilisation azotée réalisées au sein du projet.

Des problèmes d'organisation se révèlent pendant l'année d'étude 2004 lors de la modification de l'approche cartographique en direction de la réalisation de la carte d'application pour des **îlots de parcelles**. Bien qu'il existe sur ce point une certaine ouverture d'après les résultats de l'enquête, le manque de clarté constaté au cours de l'étude pratique sur les plans des compétences et des responsabilités se retrouve dans les résultats de l'enquête sous forme de doutes.

Ce parallèle existe aussi sur le plan de l'acceptation au **paiement de dépenses supplémentaires** : l'entrepreneur est également disposé à augmenter ses dépenses et à investir dans l'agriculture de précision. Il a d'ailleurs déjà mis ces intentions en pratique. Cependant, ce point est à juste titre soumis à la condition que ces investissements soient rentables. Sur ce point, l'expérience oblige à faire prévaloir le scepticisme. Par contre, il n'y a aucun problème concernant l'acceptation de dépenses supplémentaires d'un point de vue purement écologique.

Par rapport aux **obstacles, aux avantages et aux inconvénients**, l'entrepreneur partage également l'opinion majoritaire non infondée relative à la charge de travail trop importante de

l'approche cartographique, surtout dans les petites structures agricoles de la plaine du Rhin Supérieur. Il voit des possibilités dans le « suivi chlorophylle » par le biais d'un capteur optique, si la manipulation ne requiert pas trop de temps supplémentaire.

Par rapport à la validation des résultats de l'enquête, on peut conclure que les opinions et jugements de l'entrepreneur correspondent assez bien à ces résultats. Sur le point des résultats déduits à partir des études effectuées, on peut dire que la situation est évaluée de manière similaire dans l'enquête, si l'on excepte le fait qu'aucune approche constructive n'y est proposée pour résoudre les problèmes analysés, ce qui est effectué au sein du projet.

Discussion et perspectives vues du côté français

L'étude qui a été menée côté français dans le cadre du projet consacré aux technologies avancées pour la modulation intra-parcellaire des intrants, s'est faite en 2 temps :

- de 2000 à 2002, la première étape nécessaire à cette étude a consisté à caractériser la variabilité intra parcellaire en mesurant et enregistrant de nombreux paramètres agronomiques géoréférencés, tant au niveau du sol que sur la végétation en place, selon un maillage fixe, à raison de 10 points par hectare. Ces prélèvements ont été complétés par des mesures de résistivité électrique.
- de 2003 à 2004, la mise en œuvre d'une expérimentation de modulation intra parcellaire d'intrants (densité de semis et dose d'azote) qui tient compte de la variabilité intra parcellaire mise en évidence.

Le projet a été complété en 2005, par une enquête réalisée auprès de la profession agricole dans le but de mieux appréhender la perception des agriculteurs vis à vis de ces nouvelles technologies.

Au terme de la première étape, une analyse statistique et géostatistique des données agronomiques enregistrées a conclu que les parcelles expérimentales de Witternheim et d'Ebersheim, malgré la variabilité a priori observée, ne remplissaient pas les conditions requises pour la mise en œuvre de la modulation intra parcellaire : il n'y a pas de structure spatiale de la variabilité et les variables agronomiques d'intérêt ne se situent pas dans une plage sensible pour la culture dans le contexte des conduites culturales pratiquées par les agriculteurs.

Ce résultat n'a malheureusement été acquis que dans le courant de l'année 2004. De ce fait, l'expérimentation qui consistait à moduler la dose d'azote a pris un an de retard côté français, par rapport à l'expérimentation qui a été réalisée en Bade-Wurtemberg.

Pour la mise en œuvre de l'expérimentation en 2003, nous avons donc décidé de faire varier la densité de culture selon la méthodologie *BRUNT*, basée sur la comparaison de bandes parallèles alternées.

En 2004, au vu des résultats de l'étude géostatistique, nous avons fait varier la dose d'azote en utilisant également la méthode *BRUNT*.

Les résultats de ces expérimentations n'ont pas toujours été concluants et faciles à interpréter, et, à travers l'utilisation de ces nouvelles technologies, on a aussi pu mesurer la difficulté à obtenir certaines données (problème d'enregistrement du signal dGPS, ou des données du capteur d'humidité,...).

En 2003, malgré une différence au niveau de la densité de plantes au champ, il n'y a pas de différence significative du rendement. En 2004, la variabilité du rendement n'a pas été affectée par des niveaux de fertilisation azotés différents : en fait, on mesure la variabilité naturelle du rendement au sein d'une parcelle de maïs. Les écarts de doses étaient-ils trop faibles ? Cette expérimentation nous a toutefois permis de conclure quant à de éventuelles économies d'azote à réaliser dans un souci à la fois économique et environnemental en adaptant la dose apportée. On a également pu mettre en évidence que dans la parcelle de Witternheim, le niveau de fertilisation azotée pratiqué par l'agriculteur (230 U), était excédentaire.

Ce constat, plutôt décevant pour la mise en œuvre de l'agriculture de précision en Alsace est conforté par la vision qu'en ont les agriculteurs. En effet, à travers l'enquête réalisée auprès de 158 agriculteurs alsaciens début 2005, il ressort que très peu d'entre eux ont déjà eu à faire à cette technologie et la grande majorité d'entre eux n'est pas prête à faire le pas. D'une part, parce que cela représente un investissement financier important non envisageable dans le contexte économique agricole actuel. D'autre part, parce que la structure des exploitations alsaciennes morcelée et faite de parcelles de petite taille n'est pas adaptée à l'agriculture de précision.

Pourtant, en théorie, les agriculteurs sont relativement ouverts à cette technologie car ils y voient une façon de mieux adapter leurs intrants, en particulier l'azote, mais ne peuvent l'envisager sur leur exploitation.

Actuellement, les rares agriculteurs en Alsace équipés en matériel d'agriculture de précision, se limitent à réaliser la cartographie de leurs rendements : cela leur permet d'avoir une meilleure connaissance de leurs parcelles et de leurs potentialités, mais ils ne sont pas encore passés à la modulation d'intrants (hormis expérimentation). Le recul n'est pas suffisant, car il faut intégrer la variabilité climatique et plusieurs années sont nécessaires pour se faire une idée.

Par ailleurs, le retour sur investissement dans du matériel spécifique n'est pas certain. Enfin, il n'y a pas localement de structure qui encadre et conseille ces agriculteurs.

La démarche que nous avons eue pour mettre en évidence la variabilité intra parcellaire (mesures de critères agronomiques et cartes de rendement) est relativement exigeante et elle a montré ses limites. D'autres techniques se développent, en particulier celles basées sur l'enregistrement et l'exploitation en direct de paramètres agronomiques (caractérisation de la biomasse de la culture) pour une intervention modulée (ex : N-Sensor), celles basées sur la mesure de résistivité ou l'interprétation d'images aériennes ou satellitaires (télédétection). A ce titre, Arvalis-institut du végétal, en collaboration avec EADS Astrium et le CETIOM a développé le procédé *FARMSTAR* depuis 2002. Opérationnel actuellement sur blé et colza et en cours de test sur maïs, il a été utilisé sur 180 000 ha en France en 2005 sur une zone allant de la Charente Maritime au Nord en passant par la région Centre. Quinze coopératives, trois Chambres d'Agriculture et deux négociants proposent cet outil à leurs adhérents. Ce concept, permet, grâce à des photos prises par satellite et par avion, de mesurer l'indice foliaire et la teneur en chlorophylle des cultures présentes sur la zone couverte par le satellite. Des cartes de végétation sont établies à la parcelle. Les données sont interprétées grâce à des modèles agronomiques dans le but d'élaborer des conseils techniques. Pour le blé 5 cartes sont réalisées :

- en sortie d'hiver pour préciser l'azote absorbé et donner la dose totale prévisionnelle d'azote,
- une carte du peuplement et du potentiel de rendement en sortie d'hiver,

- une carte de l'estimation précoce du risque de verse au début de la montaison,
- une carte sur l'état de développement courant montaison et une réactualisation du potentiel de rendement,
- enfin, une carte de préconisation du 3^{ème} apport d'azote. Un fichier numérique associé à cette carte permet à l'agriculteur de réaliser une modulation en point par point de la dose d'azote au sein de sa parcelle.

Ces conseils sont transmis aux agriculteurs par l'intermédiaire de leur organisme économique. Jusqu'à présent la modulation de la dose d'azote est encore peu pratiquée par les agriculteurs. Depuis janvier 2005, le CDER Informatique¹ de la Marne a adapté leur logiciel Agrimap+ avec la collaboration de John Deere et d'Arvalis-Institut du végétal. Ce logiciel permet d'intégrer les données numériques issues de « *FARMSTAR* », de les convertir et de les transmettre vers l'électronique embarquée du tracteur afin de réaliser une application modulée d'engrais.

Ce type de technologie, plus souple que celles qui passent par des prélèvements et des mesures au champ, est amené à se développer. L'utilisation d'images satellites permet également aux agriculteurs d'estimer la variabilité de la biomasse de leur parcelle, qui n'est pas toujours liée à la cartographie des types de sol.

Cependant, dans le contexte de la plaine du Rhin supérieur, où la culture du maïs est largement dominante, il faut préciser que le concept *FARMSTAR* n'est pas encore opérationnel (il est en test cette année dans le sud-ouest).

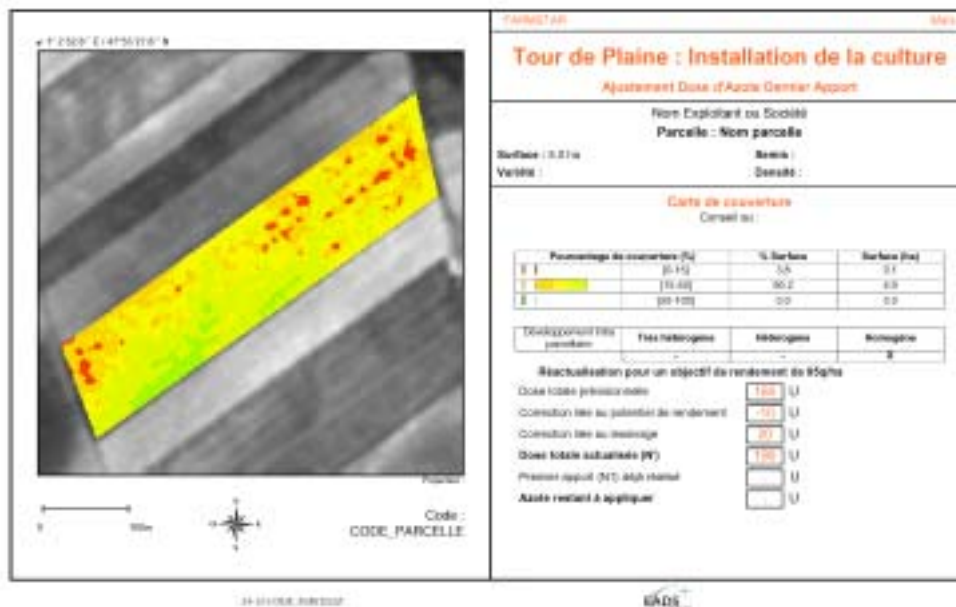
Le projet *FARMSTAR Maïs* prévoit, sur la base d'images satellitaires prises à différents stades de la culture, plusieurs rendez-vous, en particulier pour ajuster la dose d'azote au 2^{ème} apport fin mai - début juin et aider au démarrage ainsi qu'à l'arrêt de l'irrigation.

Ce type de conseil présente à la fois un intérêt économique (meilleure gestion des intrants, gain de rendement, gain de temps) et environnemental (adaptation des intrants), mais permet aussi, grâce à la précision des images, une meilleure conformité par rapport à la réglementation.

Toutefois, le référencement et la mise en œuvre coûtent cher. C'est pourquoi, pour rendre le produit accessible aux agriculteurs il faut couvrir une grande surface et travailler avec un distributeur qui puisse diffuser le concept largement.

Depuis peu, le CDER Informatique de la Marne a été repris par la société ISAGRI, spécialisée dans l'informatique agricole.

Exemple de cartographie pour l'ajustement de la dose d'azote au 2^{ème} apport dans le cadre de FARMSTAR Maïs



La modulation intra parcellaire d'intrants est un concept qui est encore assez timidement utilisé en France, mais qui prend de l'ampleur avec la démocratisation de l'utilisation des images satellites. Avec la mise au point de nouvelles technologies, cette pratique est donc sûrement amenée à se développer, d'autant que le contexte économique (baisse des prix, augmentation du prix du fuel,...) et réglementaire vis à vis de l'environnement incite de plus en plus les agriculteurs à trouver des solutions pour assurer leur revenu tout en gérant au mieux leurs intrants.

Note du secrétariat ITADA : en 2006, 256 000 hectares étaient couverts par FARMSTAR en France (Source : ARVALIS , dossier Farmstar du 13.12.2006)

4.2 Discussion des résultats de l'enquête

Si l'on résume les résultats de l'enquête, on ressort certains enseignements centraux, qui permettent de tracer quelques perspectives pour la modulation de la fertilisation azotée et son acceptation chez les agriculteurs.

Un point important d'entrée est que la majorité des agriculteurs enquêtés sont fondamentalement ouverts à cette thématique. Il faut aussi tenir compte qu'en même temps une retenue prudente est de mise. Celle-ci est naturellement légitime et est un signe que les agriculteurs sont soucieux des difficultés potentielles.

Si l'on veut dans le cadre de la modulation de la fertilisation azotée préserver cette acceptation et cette tolérance et même l'améliorer, il est nécessaire d'assurer un encadrement individuel et abordable de l'exploitant agricole. Celui-ci devra être techniquement qualifié mais aussi rester compréhensible et traçable afin de combler le déficit d'information mis en évidence par l'enquête.

Les craintes formulées au sujet des difficultés de coordination et de communication pour une gestion potentielle par îlots de parcelles voisines pourraient être levées par la création d'une centrale chargée de la mise en œuvre. Ainsi, les compétences et les délégations autorisées tout comme les canaux de communication et les flux de données devraient être clairement définies. Des conditions clarifiées notamment sur le plan de la protection des données sont nécessaires pour atteindre une acceptation d'une gestion centralisée des données. Des conditions claires délivrent conformément à cela aussi les conditions contactuelles pour réaliser de premiers essais de gestion d'îlots de parcelles. Les moyens limités consacrés au paiement des coûts supplémentaires conditionnent une pratique rentable d'application de la modulation, ce qui œuvre en faveur d'une mise en œuvre effective sur des surfaces suffisantes. Il existe ici un potentiel d'intégration des avantages présentés de la télédétection dans un système de production de cartes d'application.

De même, il serait pensable d'intégrer une simulation de croissance par lequel, comme avec « apollo » des points relatifs à la rentabilité joueraient un rôle. Une fois un tel système mis en place, la charge de préparation se réduit de manière remarquable.

De plus il est possible de se démarquer des périodes de forte charge de travail ce qui sur le plan pratique est un avantage conséquent.

5 Conclusion

A partir des résultats des expérimentations sur la „variabilité“ et sur l'applicabilité technique de « différentes technologies de modulation de la fertilisation azotée », dans les conditions de petites structures agricoles, complétés par les enseignements d'une enquête il a été possible de dessiner une proposition de mise en œuvre qui vise à atteindre l'objectif du projet.

On a constaté que les technologies testées ne conviennent pas à elles seules à permettre une mise en œuvre de la modulation de la fertilisation azotée dans les conditions de la pratique. Néanmoins, à partir de toutes les expériences faites, on a pu réunir des aspects partiels qui comprennent un potentiel pour permettre dans une synthèse de surmonter les difficultés de la transposition de la modulation de la fertilisation azotée. Ces difficultés consistent en particulier en :

- des complications techniques, aussi longtemps qu'un système n'est pas encore bien établi dans son exploitation,
- dans une forte charge de travail préparatoire et des difficultés rencontrées dans l'acquisition des paramètres d'entrée nécessaires pour la réalisation d'une carte d'application,
- des aspects relationnels, lorsqu'il s'agit de mise en œuvre de solution, afin d'améliorer la rentabilité par une prise en compte de grandes surfaces (gestion d'ilôts de parcelles),
- une mise en œuvre avec des méthodes alternatives (télédétection, modélisation de la croissance) dans les structures insuffisantes, afin de surmonter les difficultés structurelles, d'ordre organisationnelle et améliorer la rentabilité,
- une disponibilité insuffisante en capteurs sensoriels en ligne adaptés.

Ces difficultés prises de manière isolées sont apparues au départ insurmontables. Si l'on prend les principaux aspects de toutes ces sous parties en considération dans l'élaboration d'un concept global, on entrevoit des possibilités pour une application de la modulation des apports d'azote même dans les conditions de petites structures agricoles.

La figure 181 présente les principaux résultats des expérimentations conduites et les enseignements de l'enquête avec leur effet sur les conditions pour la transposition de l'objectif recherché. Les paramètres en dehors de l'ellipse ébauchent les conditions initiales à prendre en compte. A l'intérieur des cases vertes (claires) sont ébauchées les conditions qui sont déclinées de l'enquête. Les cases rouges (foncées) symbolisent les paramètres de clarification essentielles issues des expérimentations pour une transposition pratique.

A partir de ces conditions résultent des cadres d'application qui doivent être mis en place afin que la modulation intraparcellaire de la fertilisation puisse être envisagée dans les petites structures agricoles du Rhin supérieur. Ces conditions sont décrites en dehors de l'ellipse.

Avec un système de mise en œuvre de la modulation des intrants qui intégrerait toutes les conditions pointées, il serait alors pensable d'arriver au développement d'une application de la modulation de la fertilisation azotée dans les petites structures du Rhin supérieur.

Si l'on s'intéresse de plus près à ces conditions, il devient évident que la solution pour le développement des travaux préparatoires à la modulation des intrants passe par une prestation de services.

De cette façon il devient possible de :

- garantir une gestion abordable et individuelle ainsi que la compétence technique de spécialistes
- d'établir une centrale de communication et de coordination
- de produire des cartes d'applications sans trop solliciter l'agriculteur
- et de résoudre les problèmes de compétences et de responsabilité de la mise en oeuvre.

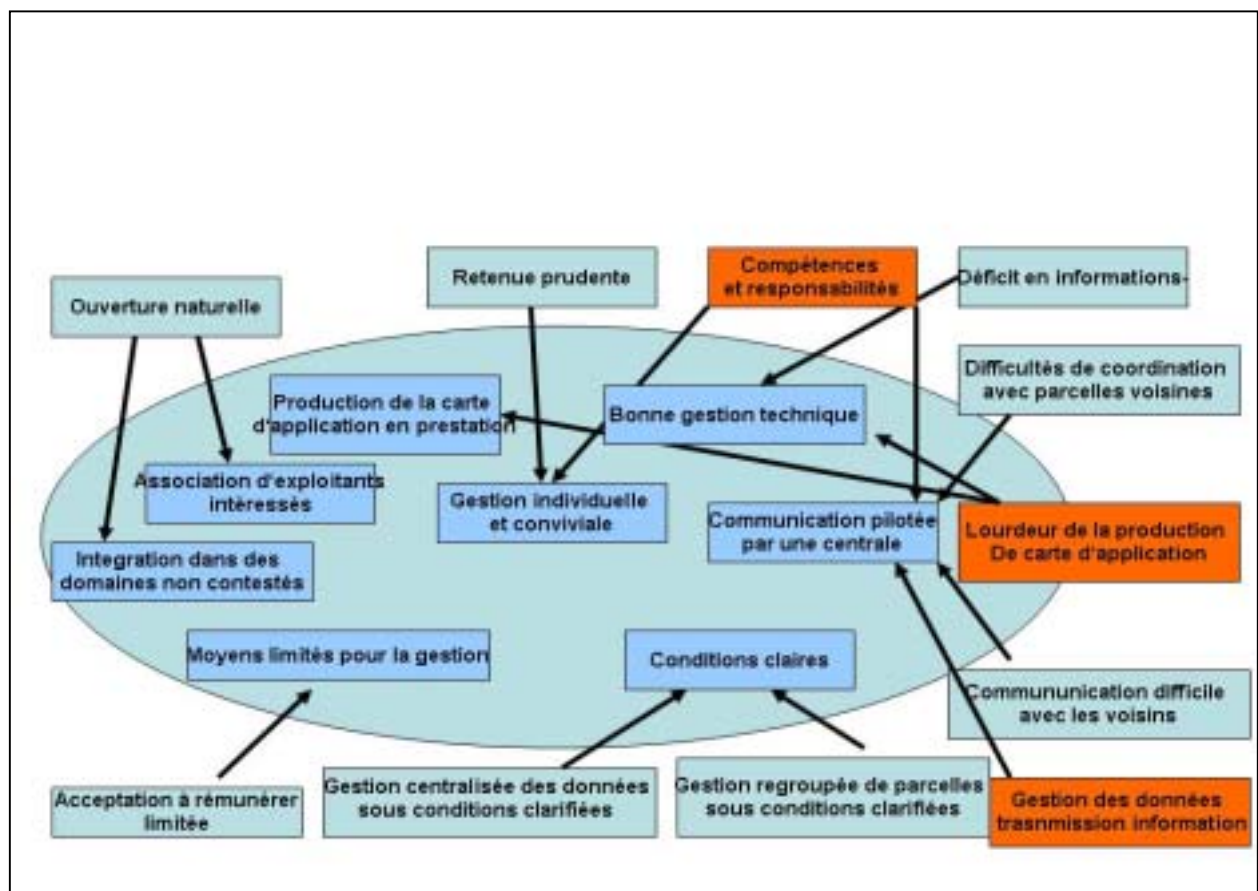


Fig. 181 : conditions dans lesquelles une application pratique de la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée serait envisageable dans le Rhin supérieur.

On montre ainsi que le déroulement des préparatifs pour la modulation de la fertilisation azotée (réalisation des cartographies d'application) en prestation de service permet de surmonter les difficultés techniques et structurelles par :

- intégration de toutes les données caractérisant la variabilité,
- intégration de toutes les technologies à disposition,
- travail de toutes les données nécessaires sous forme de SIG,
- production de cartes d'application de préférence à l'échelle d' ilôts de parcelles afin de permettre une meilleure rentabilité du travail. Ceci est envisageable :

- par un travail commun des données de différentes parcelles permettant un remembrement virtuel et la gestion d'îlots de parcelles,
- par intégration de données de télédétection et
- prise en compte de modèles de croissance
- établissement d'une centrale de coordination de toutes les interventions,
- une centrale commandant la communication vers les différents concernés.

Il est pensable de mettre en œuvre des projets pilotes qui prendraient en considération ces différents points. En raison de la forte dynamique qui existe dans le domaine de l'agriculture de précision, un tel système de prestation de services devrait être ouvert à toutes les orientations possibles, dans le sens de l'intégration de surfaces agricoles et d'agriculteurs aussi bien que dans celui du recours à de nouvelles technologies.

Même si le recours à la modulation de la fertilisation azotée s'avère plus difficile que l'on ne le pensait au départ, il apparaît des possibilités de développement même dans les conditions de petites structures agricoles par la prise en compte des différentes parties identifiées permettant la valorisation des avantages de la modulation.

Le déficit en conduite culturale reste ouvert. Jusqu'à aujourd'hui, il n'est pas bien clarifié pour toutes les conditions comment il faut pratiquer (GERHARDS 2005). Il n'est pas toujours possible de savoir, si une intervention dans des conditions difficiles conduit à un gain de rendement, ou si d'autres facteurs prépondérants limitent les performances à un minimum, conditions dans lesquelles une dépense supplémentaire s'avère non rentable.

Il serait aussi souhaitable que dans des conditions difficiles, l'agriculteur dispose d'aides à la décision claires, afin que l'application de la modulation dans toutes les circonstances repose sur des réflexions et des choix de techniques culturales issus de fondamentaux bien établis

6 Résumé

Ce rapport traite des travaux et des résultats du projet n°2 du programme de travail ITADA III sur le thème « Technologies avancées pour la modulation intraparcellaire des intrants ».

Il porte sur le thème des possibilités de réalisation d'un épandage adapté des intrants sur les plus petites sous-unités homogènes des parcelles agricoles. Cette prise en compte de la variabilité lors de l'application doit être rendue possible par l'intégration de technologies avancées.

Afin que ces études aient une utilité pratique, la problématique a été concrètement orientée selon deux caractéristiques des conditions locales :

La première concrétisation concerne la concentration sur l'application de l'intrant « azote », qui a une grande importance économique et écologique. La seconde concrétisation porte sur la situation typique des petites structures agricoles de la plaine du Rhin Supérieur, avec ses exigences particulières et une large domination du maïs parmi les cultures.

Le projet traite ainsi de l'intégration des technologies avancées pour la modulation de la fertilisation azotée sur maïs, dans les conditions particulières des petites structures de la plaine du Rhin Supérieur. Ces concrétisations visent à évaluer le potentiel de ces technologies dans le cadre d'une utilisation massive dans la plaine du Rhin Supérieur, afin d'aboutir à une utilité pratique directe au niveau régional.

Différentes études ont été effectuées pour répondre aux buts du projet :

- des *études de la variabilité* complètent la documentation variée sur les données de variabilité intraparcellaire issue du projet précédent.
- la *modulation de la fertilisation azotée* a été réalisée à l'aide de différentes méthodes avancées, afin d'évaluer et d'optimiser la capacité de mise en œuvre technique.
- Une *enquête* a été effectuée pour juger de la capacité de mise en œuvre de la modulation par les exploitants, qui met en avant l'acceptation et la tolérance des exploitants vis-à-vis de l'approche.

L'évaluation de **la variabilité** sur les parcelles d'essai comporte principalement la distribution intraparcellaire des paramètres suivants : rendement à la récolte, capacité de rétention d'eau du sol, facteurs de dommages, divers paramètres végétaux, granulométrie, éléments nutritifs de base, pH, reliquat d'azote, conductivité électromagnétique à l'aide de l'EM38. Les corrélations entre tous les paramètres importants ont été évaluées pour déterminer si elles étaient significatives ou non, afin de déterminer les similitudes entre les distributions des différents paramètres.

La **méthode testée de modulation de la fertilisation azotée** par le biais de l'approche cartographique selon les « bonnes pratiques agricoles » s'avère également techniquement réalisable dans la situation de structures agricoles à petite échelle. Cependant, elle ne peut être considérée comme applicable dans la pratique sous sa forme simple, en particulier à cause de la lourdeur du travail préparatoire nécessaire.

Une amélioration de l'approche cartographique par l'élaboration de la carte d'application pour des îlots de parcelles amène des avantages considérables grâce à une nette réduction de la charge de travail préparatoire. Les difficultés de mise en œuvre se produisent alors au niveau

de l'organisation et des relations interpersonnelles, car cette approche est conditionnée par des activités coopératives et coordonnées entre plusieurs exploitants.

L'intégration d'une simulation de croissance au sein de l'approche cartographique ouvre des possibilités concrètes de dépassement des difficultés rencontrées dans cette approche. La prise en compte de la rentabilité comporte également un fort potentiel.

Enfin, la possibilité d'intégrer la télédétection dans l'approche cartographique a été mise en évidence. Ses avantages résident dans un potentiel d'économie lié à l'approche spatialisée.

Au contraire, l'évaluation d'une méthode online existante (« Cropmeter ») montre que l'outil n'est pas adapté sur maïs, même s'il faut préciser que cette méthode n'avait à l'origine pas été conçue pour une utilisation sur maïs.

Des études complémentaires portant sur l'optimisation de la modulation montrent qu'une réduction de la charge de travail lors de la déduction de la carte d'application dans l'approche cartographique initiale (offline) selon les « bonnes pratiques agricoles » n'est pas judicieuse. L'énorme influence des préconisations irréfléchies de doses minimales de la part de l'entrepreneur est également montrée.

L'enquête sur l'agriculture de précision illustre l'ouverture de principe des exploitants envers la thématique. Ils expriment en même temps une réserve prudente.

Il s'avère qu'un déficit d'information existe sur cette thématique. Les solutions à l'échelle inter-exploitations engendrent des doutes en raison des difficultés potentielles de coordination et de communication. Dans des conditions claires, l'ouverture envers une centralisation des données, et dans une moindre mesure envers des méthodes intégrant des îlots de parcelles, est étonnamment grande. Il existe également une acceptation de principe de paiement des surcoûts liés à une exploitation en îlots de parcelles, bien que les exploitants n'aient pas d'idée précise sur le niveau de ces surcoûts.

En résumé, on peut dire qu'aucune des méthodes évaluées n'était adaptée individuellement à la modulation des intrants du point de vue pratique, dans les conditions particulières régionales.

Les difficultés concernaient :

- des complications techniques, tant qu'un système n'est pas établi dans l'exploitation,
- une forte charge de travail préparatoire et des difficultés liées à la collecte des paramètres d'entrée destinés à la réalisation de la carte d'application dans la méthode cartographique,
- les rapports interpersonnels, lorsqu'il s'agit d'approches visant à améliorer la rentabilité par le biais d'une approche spatialisée (exploitation d'îlots de parcelles),
- un manque de structures permettant de surmonter les difficultés structurelles et organisationnelles et d'améliorer la rentabilité grâce à une approche spatialisée basée sur des méthodes alternatives (télédétection, simulation de croissance),
- un manque de disponibilité de capteurs online adaptés.

Si l'on déduit à partir de ces difficultés les exigences devant être satisfaites par un système de modulation de la fertilisation azote dans les conditions particulières des petites structures de la plaine du Rhin Supérieur, il devient clair que la solution réside dans le déroulement des mesures de préparation de la modulation par le biais d'une prestation de services.

Celui-ci permettrait :

- de garantir une gestion individuelle et conviviale ainsi qu'une bonne gestion technique
- d'établir une communication et une coordination pilotées par une centrale
- de produire des cartes d'application sans surcharger les exploitants
- de surmonter les problèmes de responsabilités et de compétences.

Il apparaît que les difficultés techniques et structurelles pourraient être surmontées par le biais du déroulement de la préparation de la modulation par une prestation de services, dans la mesure où :

- toutes les données importantes relatives à la variabilité sont intégrées,
- une attention est prêtée aux possibilités d'intégration de toutes les méthodes potentielles,
- toutes les données nécessaires sont traitées de manière centralisée au sein d'un environnement SIG,
- la production des cartes d'application est spatialisée dans la mesure du possible, afin d'obtenir des effets positifs en termes de rentabilité.

Ceci est possible :

- par le biais d'un traitement commun des données de différentes parcelles selon une exploitation potentielle en îlots de parcelles,
- par l'intégration de données de télédétection, et
- par la prise en compte de simulations de croissance
- une centrale de coordination est établie pour toutes les mesures,
- une centrale de communication est mise en place.

La mise en place de projets pilotes intégrant ces points devrait être envisagée, afin de mettre en place un tel système de prestation de services.

Le déficit agricole existant demeure ouvert : jusqu'à présent, les exploitants ne disposent pas de recommandations agricoles pour la totalité des conditions globales, et se retrouvent particulièrement seuls face à leurs décisions et responsabilités dans les situations extrêmes et difficiles, telles qu'elles peuvent se produire en cas de forte variabilité au sein des parcelles agricoles.

SUMMARY

Subject of this report have been the investigations and results of project N° 2 of ITADA working program III entitled “Advanced technologies to modulate the use of inputs in single parcels and scattered agricultural land”.

Topics are the possibilities of an adapted application of operating facilities (inputs) to the smallest homogeneous subdivisions of agricultural parcels.

Using advanced technologies should make it possible to take in consideration the adequate application of operating facilities. To achieve a practical use from the investigations, the question of the project has been focussed on the following two concrete conditions on site:

The first concretisation refers to the concentration on the use of nitrogen. Nitrogen is of essential relevance under economic as well as ecological aspects.

The second concretisation relates to the typically scattered holdings in the Upper Rhine-region with its special demands and the predominant cultivation of maize.

Therefore in this project the use of advanced technologies to modulate the fertilization of nitrogen in maize is discussed under the special conditions of the small structured Upper Rhine -region. These concretisations are useful to estimate the potential of advanced technologies for this essential application in the Upper Rhine -region to appreciate the immediate practical gains for the region.

To achieve this objective different investigations have been realized:

- tests about the existing variability (in addition to the existing manifold documentation about the variability of smallest homogeneous subdivisions out of the precedent project),
- modulation of the fertilization of nitrogen, carried out with different advanced technologies to proof and to optimize technical practicability,
- a survey to check the chances for an introduction of the modulation into farmers practice. Thereby considerations concerning the acceptability and tolerance of those methods have been essential.

During the **examination concerning the existing variability**, in essential the following parameters have been considered: crop yield, water-capacity of soils, different factors of damage, different plant-parameters, soil-particle size distribution, basic nutrients, pH-value, N_{min}-concentration and electromagnetic conductivity with EM38.

The significance of the correlations between all relevant parameters were checked up to verify the similarity of the distributions of different parameters.

From the checked **methods to modulate the application of nitrogen**, the mapping approach according to the “good agricultural practice” is technically practicable, also under small structured situations. However in its original version it needs too much preparation-effort that makes it hardly practicable.

An improvement of the mapping approach regarding to calculate the application map for larger areas instead of small parcels brings essential advantages due to an strong reduction of preparation effort.

Instead difficulties arise from organisational and human relations aspects, because cooperative and coordinating activities of several farmers are necessary to realise this approach.

Integration of a growth-simulation-model into the mapping approach offers concrete possibilities to overcome the established problems of the mapping approach and offers a big potential by considering economic aspects.

Finally are demonstrated several possibilities of integrating remote sensing methods into the mapping approach. The extensive approach can lead to economic advantages.

Checking a method of Realtime Sensor Approach the tested “cropmeter” has proven to be improper for maize. Thereby it has to be admitted, that the tested sensor originally has not been constructed for the use in maize.

The results of additional investigations for optimisation of the modulation show, that it does not make sense to reduce the complexity of calculation for the application-map using the original method of mapping approach offline (“good agricultural practice”). Further is proven the big influence of insufficiently considered minimum quantities for the application of fertilizer by the farmer.

A **survey about precision farming** shows that regional farmers are open minded about precision farming. Nevertheless farmers stay reserved concerning investments.

Information-deficiencies are evident. Concerning interplant solutions doubts are existing concerning potential difficulties in communication and coordination.

Under clear conditions an unexpected open mindedness about central data management is given but open mindedness about methods working with larger areas instead of single parcels is reduced.

Also a cardinal disposition consists in paying excess expenditure for methods working with multiple parcels. However farmers have no idea about the amount of costs for this.

It can be **summarised**, that the tested methods are improper and unpractical for the modulation of fertilisation under the given conditions. Difficulties consist in

- technical complications as long as a system is not established on a farm,
- great operating expense concerning the preparation of application maps,
- difficulties to collect the input parameters in order to enable the calculation of the application map, using the mapping approach,
- the range of interpersonal problems, if parcels of different neighbours should be integrated in a method of precision farming,
- insufficient structures to integrate remote sensing or simulation models of growth in order to overcome the economic, structural and organisational problems,
- insufficient availability of appropriate online sensors.

Based on these difficulties needs can be derived, that a system to modulate the application of nitrogen fertilisation under the small structured conditions in the Upper Rhine-region should fulfil. It becomes clear, that a solution exists in carrying out all preparations for the modulation of production facilities by service delivery.

Using precision farming by service delivery enables

- an adequate expert advice,
- a contact point for communication and coordination,
to calculate application maps without farmers are swamped with and

- to overcome problems concerning responsibilities and competences.

It turned out that, carrying out the preparations for modulation of nitrogen fertilisation by service delivery, technical and structural difficulties can be overcome

- by integrating all relevant data of variability,
- by leaving open the possibility of integration of all kinds of methods of modulation,
- by central processing of all essential data using GIS,
- by calculating application maps on a large scale instead only for single parcels, to become more effective.

This is possible

- by common processing of data of different parcels or groups of parcels,
- by integrating remote sensing,
- by considering growth-simulation models e.g. the tested model "APOLLO",
- by establishing a central contact point to coordinate all measures,
- by establishing a central point for communication.

Considering these basic principles pilot projects could be organised to establish such a system of service delivery.

As an open question agronomic deficiencies persist. Until today farmers have not agronomic recommendations for all situations. Especially in extreme and difficult situations as they might arise in situations of high variability within parcels, farmers are left alone with their decisions and responsibilities.

7 Répertoires

A. Bibliographie

Bibliographie en langue D

- AGRA-EUROPE (10/2004):** GPS auf dem langen Weg in den bäuerlichen Alltag – bislang noch keine echten Fortschritt für die Landwirtschaft – Gesellschaft der FAL-Freunde diskutierte mit Pionieren
- AGRA-EUROPE (17/2004):** Weltweite Standardisierung soll „Precision Farming“ zum Durchbruch verhelfen, AGRA-EUROPE 17/04, 26.April 2004, Länderberichte 9
- AGRI CON GMBH und HYDRO AGRI GmbH:** Hydro-N-Sensor genauer-schneller-konsequenter. Informationsschrift. Kontakt unter: www.agricon.de und www.hydroprecise.de
- AGROSAT (2005):** 3-Zonenkarte im Einsatz, aus www.agro-sat.com/zonenkarte.htm
- AGROSAT (2005):** Chlorophyllmonitoring zur Schwachstellenanalyse, aus www.agro-sat.com/2.2.HP2.htm
- AL-KARADSHEH E.:** Potentials and development of precision irrigation technology, Landbauforschung Völkenrode, FAL Agricultural Research, Sonderheft 248, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.
- AUERHAMMER H und ROTHMUND M. (2004):** Wieviel Technik muss sein? DLG-Mitteilungen 2/2004, S.22 ff.
- BACH, H. und RÜHLING, I. (2001):** Erprobung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung zur Reduzierung/Optimierung des Düngeaufwandes in Wasserschutzgebieten für eine grundwasserschonende Bewirtschaftung und eine optimale Standortnutzung mit Einsatz der DGPS-Technik und Fernerkundung. Bericht zum Pilotprojekt i.A. des Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden Württemberg, Vista Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH (Hrsg.): 79 S.
- BAUERNZEITUNG (2002):** Schritte zum Ackerbau mit GPS, BAUERNZEITUNG 47. Woche 2002 S. 19 ff.
- BAUERNZEITUNG (01/2004):** Individuell behandeln. BAUERNZEITUNG 1. Woche 2004, S. 26
- BAUERNZEITUNG (22/2004):** Mehr Präzision im Feld. Artikel in Bauernzeitung 22. Woche 2004, S. 20f
- BAUERNZEITUNG (11/2005):** Pflanzenfarbe täuscht, FAL warnt vor Fehlern bei der Bemessung der Stickstoffdüngung mit Spektrolsensoren. Artikel in Bauernzeitung 12. Woche 2005, S. 31
- BILLER R. (2004):** Das Projekt Advanced Optoelectronic System (AOS), in LANDTECHNIK 1/2004, S.20 ff.
- BINDER H. (2004):** mündliche Mitteilung
- BINDER H. (2004/2):** mündliche Mitteilung während dem Test des Cropmeters 2004
- BLW (19/2004):** Maschine lenkt sich selbst, (BLW 19/2004), S. 36 ff.
- BLW (43/2004):** Exakter Traktor-„Blindflug“, Automatische Lenksysteme für präzises und entspannteres Arbeiten, BLW 43/2004, S. 36 ff.
- BOESS J. und BENNE I. (2003):** Die Hofbodenkarte des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung. Zeitschrift für angewandte Geologie 3/02, 48. Jahrgang
- BÖRNER G. (2004):** Nachhaltiges „Land-Wirtschaften“ mit GIS. In ESRI arcaktuell 3/2004
- BÜNTING K.D.(1996):** Deutsches Wörterbuch, ISIS Verlag AG, Chur/Schweiz
- BW agrar (43/2004):** John Deere setzt auf schlaue Maschinen, Automatisches Lenksystem, elektronische Mähdreschersteuerung, BW agrar 43/2004, S.35
- CHAPPUIS A.:** Genauigkeit bis zum Feldrand; www.dlg-test.de

- CIS GmbH:** ExpertFilter, Fehlerhafte Ertragsdaten eliminieren. CiS GmbH Gesellschaft für Computerintegration und Softwareentwicklung mbH
- CLAAS (2003):** Information auf Werbeanzeige/-prospekt (2003), vgl. www.claas.de
- DAF-/KTBL (2004):** Geografische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum. Defizite und Entwicklungspotenziale. DAF-/KTBL-Tagung am 27. und 28. Oktober 2004. KTBL Schrift 428. Vertrieb: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH; 2004 142 S., ISBN 3-7843-2172-0
- DEMMELE (1999):** Zitiert nach **LUDOWICY C., SCHWAIBERGER R. und LEITHOLD P. (2002):** Precision Farming, Handbuch für die Praxis. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 168 S.
- DLG Merkblatt 303 (2001):** Ertragsermittlung im Mähdrescher – Ertragsmessgeräte für die lokale Ertragsermittlung, Ergänztes und überarbeitete Neuauflage, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
- DLG Merkblatt 315 (1999):** Teilflächenspezifische Düngung, Grundlagen, Konzepte, technische Lösungen; Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
- DLG-Merkblatt 316 (1999):** GPS in der Landwirtschaft, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
- DLG-Merkblatt 317 (1999):** Landwirtschaftliches BUS-System (LBS). Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
- DLG-Mitteilungen (11/2003):** Präzision: Technik plus Management, DLG Mitteilungen 11/2003
- DLG-Mitteilungen (12/2004):** Auto Trac – die nächste Generation, Artikel in DLG-Mitteilungen 12/2004, S. 66
- DLG-Mitteilungen (7/2005):** Neues vom Sensor, Artikel in DLG Mitteilungen 7/2005. S. 54 ff.
- DLZ (3/2004):** Nagelprobe Ausgleichszahlungen: Der GIS-basierte Flächenantrag erlebt bereits dieses Jahr seine Feuertaufe. dlz 3/2004, S. 140 ff.
- DLZ (5/2004):** Allzweckwaffe, Deutsche Landwirtschaftszeitung 5/2004, S. 122 ff.
- DLZ (5/2004):** Homogene Bestände steigern den Gewinn, Deutsche Landwirtschaftszeitung 5/2004; S.42 ff.
- DLZ (3/2005):** Online: Ackerfrüchte mit Lebenslauf. Deutsche Landwirtschaftszeitung 3/2005, S. 180 ff.
- DLZ (7/2005):** Pflanze berät Spritze, Deutsche Landwirtschaftszeitung 7/2005, S. 148 ff.
- DOHMEN B., REH A. und HOPPE B. (2004):** Genau applizieren, ohne viel zu investieren, Bauernzeitung 15. Woche 2004, S.16
- DOMSCH H. (2002):** Kartierung der elektrischen Bodenleitfähigkeit und ihr Beitrag zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. Zeitschrift für angewandte Geologie 3/02, 48. Jahrgang, Hrsg. Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den staatlichen geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland
- DOMSCH H., LÜCK und EIESNREICH (1999):** Ermittlung geophysikalischer Kennwerte für die großmaßstäbige Kennzeichnung landwirtschaftlicher Flächen. Jahresbericht des ATB Potsdam-Bornim: S.16.
- DOMSCH H., KAISER T., WITZKE K und SACHSE H. (2003):** Elektrische Bodenleitfähigkeit und Nährstoffbeobachtung, Landtechnik 3/2003, S.140 ff.
- DOMSCH H. und WARTENBERG G. (2000):** Teilflächenspezifische Bewirtschaftung mit GPS, Teil 3. Getreide 6 (2): 136-141.
- ENGELKE B. (2002):** Regelungsmöglichkeiten in der mechanischen Unkrautbekämpfung, Landtechnik 1/2002, S.16 ff.
- EHLERT D. (2004):** Stickstoff-Einsatz auspendeln?, Artikel in dlz 7/2004, S.48 ff.
- EHLERT D., DANNER K.-H. und VÖLKER U. (2004):** Applikation nach Pflanzenmasse, In: LANDTECHNIK 2/2004, S. 76 ff.
- EHLERT D. und LANGNER H.-R. (2004):** Mobile Plattform zur Informationsgewinnung; In LANDTECHNIK 6/2004, S. 326 ff.

- EHLERT D. und LANGNER H.-R. (2004):** Sensoren für die Präzisionslandwirtschaft. Artikel in FORSCHUNGSREPORT 1/2004, S. 8 ff.
- ETLV:** ADAM, Alternatives Digitales Agrar-Managementsystem, Merkblatt des ETL e.V., Verein zur Einführung der teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung e.V., Hansstraße 21. 18182 Bentwisch.
- FEIFFER A. (2003):** Kosten sparen bei Mähdrusch, Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft. S. 667 ff.
- GANDORFER M. und HEIßENHUBER A. (2003):** Ökonomik der variablen N-Düngung, Technische Universität München, Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues.
- GERHARDS R. (2005):** Weniger Herbizide dank GPS, Geo-Informationssystem und digitaler Bildanalysetechnik, Zusammenfassung des Vortrags vom Freitag, 14. Januar 2005, FAL-Tagung, agroscope, FAL Reckenholz
- GERARDS R. (2005/b):** Mündliche Mitteilung auf dem Workshop Präzisionsfarming 2005, Ihinger Hof.
- GLA (1990):** Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 7812, Kenzingen. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg 1991 (Hrsg.).
- GRAEFF S. (2003):** mündliche Mitteilung, 2003
- JANTSCHKE C., SPREER W., MÜLLER C. und KÖLLER K. (2005):** Störfaktoren bei der Bodenfeuchte, Ermittlung mit der Time Domain Reflectometry, Landtechnik 3/2005, S. 132 ff.
- JANTSCHKE C., KNAPPENBERGER T und KÖLLER K. (2005):** Der Messwert der Bodenfeuchte, Eine zusätzliche Messgröße für den präzisen Landbau, Landtechnik 3/2005, S.134 ff.
- JUNG D. (2004):** Flottenmanagement mit AGRO-COMBINE-Online; Information und Dokumentation von Mähdreschereinsatz und Leistungsdaten. Artikel in Landtechnik 4/2004. S. 200 ff.
- KERSCHBERGER M., KERSCHBERGER E. und LEITHOLD P (2004):** Bodenuntersuchung und Grunddüngung. Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft. S. 519 ff.
- KERSCHBERGER M. und LEITHOLD P. (2005):** Optimierung der N-Düngung, Sensorgestützte Düngestrategien zahlen sich aus. Artikel in LANDPOST vom 9. April 2005 S. 28 ff.
- KERSCHBERGER M. und HESS H. (2004):** Mehr ernten mit weniger Dünger; BAUERNZEITUNG 47. Woche 2004, S. 16 ff.
- KIELHORN A (2004):** Positionsgenauigkeit von Satellitensignalen beim Einsatz von CompactFlash-GPS-Empfängern, Fachhochschule Osnabrück, University of Applied Sciences, Fakultät Agrarwissenschaftlicher Landschaftsarchitektur
- KNAPPENBERGER und KÖLLER (2005):** Chancen und Herausforderungen einer Echtzeitregelung der Saattiefe, Landtechnik 3/2005, S. 130 ff.
- KRAMER E. und SCHWARZ J. (2004):** Anforderungen zukünftiger Einsatzszenarien an autonome Feldroboter. Landtechnik 5/2004, S. 258 ff.
- LAMP J., HERBST R, und REIMER G:** Digitale Hof-Bodenkarten als Basis für Applikationskarten im Präzisen Landbau; Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, C. – A. Universität Kiel, AG Bodeninformatik, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, HU-Berlin, Fachgebiet Precision Agriculture
- LANGNER R. und BÖTTGER H. (2004):** Bildgestützte Unkrautererkennung, LANDTECHNIK 4/2004, S. 202 ff.
- LANGNER R., BÖTTGER H. und EHLERT D. (2003):** Anforderungen an die Dynamik teilflächen-spezifischer Applikationstechnik, LANDTECHNIK 4/2003, S.244 ff.
- LANDPOST (2005):** „Gewannebewirtschaftung“; Kosten sparen durch eine neue Form der Kooperation?, Landpost 21. Mai 2005, S. 32 ff.
- LANDTECHNIK (1/2005):** Geografische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum, Ergebnisse der KTBL/DAF-Tagung vom 27./28. Oktober 2004 im Forum der FAL Braunschweig, Artikel in Landtechnik 1/2005, S. 52
- LANDTECHNIK (3/2005):** Gewannebewirtschaftung, Landtechnik 3/2005, S.124

- LATACZ-LOHMANN U. (2005):** Gewannebewirtschaftung, zitiert nach Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft, Nr. 2/Februar 2005
- LEHRKE U. und MÖLLER K (2005):** Mit der Pflanzenanalyse gezielter düngen. top agrar 4/2005, S. 60 ff.
- LEINKER M, KIELHORN A. LEHMANN B, und TRAUTZ D. (2003):** Teilflächenspezifische Wirtschaftsdüngerausbringung, Tagungsbeitrag 46. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften vom 25.-27.09.2003 in Gießen
- LILIENTHAL H.:** Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft. Landbauforschung Völkenrode, FAL Agricultural Research, Sonderheft 254, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.
- LÜCK E., EISENREICH M. und DOMSCH H. (2002):** Innovative Kartiermethoden für die teilflächenspezifische Landwirtschaft. Stoffdynamik in Geosystemen, Band 7, Herausgeber BLUMENSTEIN O. und SCHACHTZABEL H, im Selbstverlag der Arbeitsgruppe Stoffdynamik in Geosystemen ISSN 0949 – 4731.
- LUDOWICY C., SCHWAIBERGER R. und LEITHOLD P. (2002):** Precision Farming, Handbuch für die Praxis. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 168 S.
- KRAMER E. und VON HASELBERG C. (2004):** Hightech-Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion
- LINK J. (2005):** Kurzbeschreibung zur Wachstumssimulation APOLLO, schriftliche Mitteilung per Mail.
- LUDOWICY Chr., SCHWAIBERGER R. und LEITHOLD P. (2002):** Precision Farming, Handbuch für die Praxis, DLG-Verlag, 168 S.
- MACHÉ R.:** Den Bodenzustand in Echtzeit messen, Lose Kopie, Quelle nicht rekonstruierbar
- MAIER J. (2003):** Präzisionslandwirtschaft – Prüfung einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung im WSG Weisweil, Statusbericht 2002 (unvollständig), Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung (IfuL)
- MAIER J. (2004):** In Mais funktioniert das Pendel (noch) nicht: Artikel in Badische Bauern Zeitung (BBZ) Nr. 27 vom 3. Juli 2004, S. 22 ff.
- MARZOLFF. I.; (1999):** „Großmaßstäbige Fernerkundung mit einem unbemannten Heißluftzeppelin für GIS-gestütztes Monitoring von Vegetationsentwicklung und Geomorphodynamik in Aragón (Spanien)“ Freiburger Geographische Hefte, 57. Freiburg i. Br., 226 S. + 99 S. Kartenanhang.
- MOHN R. (2005,a):** Gewannebewirtschaftung mit Satellitenunterstützung - Vorteile für Landwirtschaft und Umwelt, Fachvortrag zum Feldtag am 28.09.2005: Überleben durch Anpassung – das Modell Riedhausen als Beispiel betrieblicher Weiterentwicklung - unter Bezugnahme auf den *PREAGRO-Abschlussbericht*.
- NOAK O. (2004):** GPS-gestützte automatische Lenksysteme, Landtechnik 5/2005, S.256 ff.
- PALSTEK (2005):** Die Eigenheiten des Global Positioning System, GPS-Navigation, Teil 1, PALSTEK 1/05, S. 68 ff.
- PANTEN K.:** Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen, Landbauforschung Völkenrode, FAL Agricultural Research, Sonderheft 232, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.
- PAUL W. und SPECKMANN H. (2004):** Radarsensoren, Neue Technologie zur präzisen Bestandesführung. LANDTECHNIK 2/2004, S. 92 ff.
- PREAGRO:** www.preagro.de
- RADEMACHER J. (2003):** Einflüsse der Düngung auf Ertrag und Mähdrescherleistung, Landtechnik 4/2004, S.198
- RADEMACHER J. (2004):** Einflüsse auf die Genauigkeiten der Online-Proteinmessung im Mähdrescher, Landtechnik 4/2003, S. 238 ff.
- RECKLEBEN Y. (2003):** Ertrags- und Proteinunterschiede von Weizen bei teilflächenspezifischer Bewirtschaftung, Landtechnik 4/2003, S. 242 ff.

- RECKLEBEN Y. (2005):** Sensorsysteme zur Bestandesführung, Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft, Vortrag RKL-Tagung am 6. Januar 2005 in Neumünster. S.1181 ff.
- RECKLEBEN Y. und ISENSEE E. (2005):** Vergleich von Sensorsystemen für die N-Düngung. LANDTECHNIK 3/2005.
- RÖSCH C. und DUSSELDORP M. (2005):** Einsatzmöglichkeiten moderner Agrartechnik im Öko-Landbau, Ökologie&Landbau 134, 2/2005, S.39 ff.
- RUCKELSHAUSEN A., TRAUTZ D., KIELHORN A. und LINZ A. (2005):** Mit dem Sensor genauer hacken und striegeln. top agrar 4/2005, S. 108 ff.
- ROHMANN U. und RÖDELSPERGER M. (1994):** Maßnahmenkombinationen und Varianten zur Sanierung des nitratbelasteten Trinkwassers der Gemeinde Weisweil. Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe: 39 S.
- RÜHLING I. (2001):** Nutzbarmachung von Verfahren der Präzisionslandwirtschaft am Oberrhein. Analyse und Interpretation der Variabilität von Ackerflächen in der Rheinebene. Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung (IfuL) Müllheim, Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF) Colmar; 140 S.
- SAUER J (2003):** Gammaspectrometrische Messungen an der Erdoberfläche – ein Beitrag zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. Zeitschrift für angewandte Geologie 3/02, 48. Jahrgang
- SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P., BLUME H.-P., BRÜMMER G., HARTGE K.-H., SCHWERTMANN U. (1984):** Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHIEVELBEIN C. (2004):** Kommentar zur Werbung von Autoguide: Wenn die Nacht zum Tag wird. Aus BAUERNSTIMME 11/2004.
- SCHMID A. und MAIDL F.-X.:** Optimierung der teilflächenspezifischen Bestandesführung mit berührungsloser Sensorik nach Bestandesheterogenität, Technische Universität München, Lehrstuhl für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung;
- SCHMIDHALTER U. und ZINTEL A. (1999):** Schätzung der räumlichen Variation des Ton- und Wassergehaltes mit elektromagnetischer Induktion. Mitteilungen der DBG, S. 871-874.
- SCHMIDT T. und MAUSER W.:** AVIS und BVIS – Hyperspektrale Abbildende Spektrometer zur ökonomischen und ökologischen Optimierung der Pflanzenproduktion, Ground Truth Center Oberbayern, München, Kontakt: th.schmidt@gtco.de; www.gtco.de
- SCHULER B. (1991):** Bodenkarte von Baden Württemberg 1:25000, Blatt 7812 Kenzingen. Geologisches Landesamt Baden Württemberg (Hrsg.).
- SCHUTTE B., HERRMANN L., SCHREIBER M. und KUTZBACH H.D. (2004):** Die Kartierung des Kraftstoffverbrauchs; Zusätzliche Informationsgrundlage für den präzisen Ackerbau. In: Landtechnik 3/2004, S. 152 ff.
- SCHWARZ J. (2004):** Ökonomische und ökologische Aspekte des Sensoreinsatzes im Pflanzenschutz; LANDTECHNIK 5/2004, S. 264
- SCHWARZ J., KERSEBAUM Chr., WENDROTH O. und REUTER H. (2003):** Teilflächenspezifisches Stickstoffmanagement, Modellempfehlungen auf dem Prüfstand, Landtechnik 5'4/2003; S. 246
- SÖKEFELD M. und GERHARDS R. (2004):** Automatische Unkrautkartierung mit digitaler Bildverarbeitung. In LANDTECHNIK 3/2004, S. 154 ff.
- SOURELL und AL-KARADSHEH (2005):** Teilflächenspezifische Beregnung, Eine neue Beregnungsstrategie, Landtechnik 3/2005, S. 140 ff.
- SPANNER L. (2003):** Karten oder Sensortechnik? DLG-Mitteilungen 11/2003, S. 18 ff.
- STÖCKLIN K. (1998):** Funktionierendes Modell. Gespräch des Vorsitzenden des Arbeitskreises Wasserschutz mit Rene Bossert, BBZ 22, S.5.
- THÖSINK G., PRECKWINKEL J., LINZ A., RUCKELSLEBEN A sowie MARQUERING J. (2004):** Optoelektronisches Sensorsystem zur Messung der Pflanzenbestandsdichte. Landtechnik 2/2004, S. 78 ff.
- TRAPHAN K. (2005):**Sensorgestützte N-Düngung. LANDPOST vom 16. April 2005, S26 ff.

- TOP AGRAR (1/2004):** Düngerstreuer: Sauber an der Grenze lang, top agrar 1/2004, S. 116 ff.
- TOP AGRAR (11/2004):** Mit präziser Technik den Herbizidaufwand senken. top agrar 11/2004, S.68 ff.
- TRUNK K. (2003):** Erfahrungen mit GPS in einem Grossbetrieb, Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft, S. 1145
- WEIGERT G. und WAGNER P. (2003):** Entscheidungsregeln zur kleinräumigen N-Ausbringung, Technische Universität München, Professur für Unternehmensforschung und Informationsmanagement
- WENZLAFF R. und RECKLEBEN Y. (2003):** Mineraldüngerstreuer, Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft, S. 549 ff.
- WERNER A. (2005):** Zitiert nach „Rechnen und kontrollieren, Teilflächenspezifische Düngung als nachhaltige Betriebsführung“, BW agrar 21/2005, S. 19
- WOCHENBLATT MAGAZIN (3/2004):** Feldtechnik, Wochenblatt Magazin Baden-Württemberg, 29.Mai 2004
- ZEDDIES J. (2004):**Mindestflächen notwendig, Precision Agriculture wird wegen Cross Compliance bedeutender. BW agrar 22/2004, S.8
- ZIEKUR R. und SCHURICHT R. (2002):** Georadar und sein Beitrag zur teilflächenspezifischen Landwirtschaft, Zeitschrift für angewandte Geologie 3/02, 48. Jahrgang
- ZILLMANN E., LILIENTHAL H., SCHRAGE T. und SCHNUG EWALD (2004):** Significance of radar remote sensed imagery for agricultural applications, Landbauforschung Völkenrode 4/2004 (54): S. 199-210

Sites internet à consulter :

- www.bogballe.com
- www.claas.de
- www.garmin.com
- www.kemira-growhow.de
- www.magellangps.com
- www.preagro.de/index.php3

Bibliographie en langue F

- **AGPM Technique, 2001** - Manuel de référence technique maïs grain, maïs fourrage.
- **BOISGONTIER D., LECLERC H., LAURENT F., LE BARS J.M., ZWAENPOEL P., 1998** – Using field and crop characteristics for site specific nitrogen management on a winter wheat crop.
- **CHAMBRE d’AGRICULTURE Région Alsace, 2003** – Typologie des exploitations alsaciennes
- **LASSERRE D., RUHLING I., VETTER R., 2001** – Application de techniques d’agriculture de précision dans la Plaine du Rhin supérieur. Rapport final du projet ITADA 1.1.1 (1999-2001).
- **BOISGONTIER D., 2001** – Agriculture de précision : les matériels et nouvelles solutions disponibles. Perspectives Agricoles N° 271 (pages 32 à 47).
- **AYALA V., 2002** – L’agriculture de précision. Intervention à la journée technique maïs du 9 janvier 2002.
- **REUSSIR CEREALES GRANDES CULTURES, mars 2003** – L’agriculture de précision à l’épreuve du terrain.
- **REGION ALSACE, 2004** - Guide des sols d’Alsace - Petite région naturelle N°8 Plaine Centre Alsace.
- **PIRAUX F., 2004** – Etude de la variabilité intraparcellaire.

- **PIRAUX F., 2004 – Etude géostatistique de la variabilité intra parcellaire des parcelles Witternheim et Ebersheim pour l’agriculture de précision.**
- **HOULES V., 2004 – Mise au point d’un outil de modulation intra parcellaire de la fertilisation azotée du blé d’hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture.**
- **BOISGONTIER D., 2005 – Les Nouvelles Technologies de l’Information en agriculture. Plaquette éditée à l’occasion des Culturelles 2005.**
- **ARVALIS-Institut du Végétal - EADS Astrium : Dossier technique Farmstar.**
- **CDER Informatique, 2005 – Chaîne opérationnelle pour la réalisation d’apports modulés intra parcellaires : du satellite à l’épandeur. Communiqué de presse SIMA 2005.**
- **REUSSIR CEREALES GRANDES CULTURES, mai 2005 - De nouveaux outils pour mieux spatialiser l’information.**
- **LA FRANCE AGRICOLE, juillet 2005 - Les capteurs de rendement.**
- **AGRO-DISTRIBUTION, juillet-août 2005 - Epancre de l’azote avec modulation.**

Sites Internet à consulter :

www.arvalisinstitutduvegetal.fr

B. Description des figures

Fig. 1 : Hydro-N-Sensor : un outil pour la conduite culturale	15
Fig. 2 : différenciation du comportement de réfraction pour différents régimes d'apports en N.....	15
Fig. 3 : différence de réflexion radar pour différents états végétatifs	16
Fig. 4 : description du principe du capteur pendulaire.....	17
Fig. 5 : GVIS et AVIS	18
Fig. 6 : spectre électromagnétique sous accentuation de longueurs d'ondes de la lumière visible.....	19
Fig. 7 : un exemple d'application de GVIS sur betterave à sucre.....	19
Fig. 8 : plan de projet initial et compléments apportés ultérieurement.....	21
Fig. 9 : mesure de la résistivité électrique avec un quad équipé d'un matériel ARP.....	26
Fig. 10 : mise en oeuvre théorique de l'application de la méthodologie « Brunt »	28
Fig. 11 : données brutes dont sont issues les cartes de rendement pour les différentes variantes.....	28
Fig. 12 : cartes de rendement interpolées pour les différentes variantes.....	28
Fig. 13 : carte interpolée des différences de rendement entre les deux variantes.....	29
Fig. 14 : plan des essais sur les parcelles de Witternheim et Ebersheim en 2003	30
Fig. 15 : formule pour le calcul de la fertilisation azotée en Alsace.....	31
Fig. 16 : carte inter-annuelle de rendements à Witternheim.....	32
Fig. 17 : carte inter-annuelle de rendements à Ebersheim.....	32
Fig. 18 : méthode de bilan d'Arvalis.....	33
Fig. 19 : plan schématique de la parcelle d'essai de Witternheim.....	34
Fig. 20 : plan schématique de la parcelle d'essai d'Ebersheim	35
Fig. 21 : localisation des surfaces d'essais dans la plaine rhénane	37
Fig. 22 : localisation des surfaces d'expérimentations D au sud de Weisweil	37
Fig. 23 : surfaces d'essais du côté allemand.....	38
Fig. 24 : données brutes du battage 2003 sur une largeur régulière de pixel (6m de largeur de coupe) .	40
Fig. 25 : données brutes en pourcents, rapportées à chaque parcelle	Fig. 26 : données brutes en pourcents rapportées à toutes les parcelles
.....	40
Fig. 27 : données brutes rendement 2003, application modulée	Fig. 28 : données brutes du rendement 2003 application classique.....
.....	41
Fig. 29 : carte interpolée 2003 Rendement machine corrigées	Fig. 30 : séparation selon l'application forfaitaire
.....	Fig. 31 : séparation selon l'application modulée
41	données brutes non corrigées
Fig. 32 : carte des rendements attendus établie pour la fertilisation	42
Fig. 33 : données brutes de différence entre le rendement réel et le rendement attendu	42
(gris = identique, clair = plus faible, foncé = plus élevé)	42
Fig. 34 : mesure de la conductivité électrique enregistrée avec GPS avec „Veris 3100“ (ex. de I-01)	Fig. 35 : densité de relevés de la conductivité électrique avec 1389 points de mesures
.....	45
Fig. 36 : mesure de la conductivité électrique avec „EM 38“ conductivité (toutes parcelles) localisée avec GPS	Fig. 37 : densité de relevées de la
.....	46
Fig. 38 : répartition de l'altitude avec mesures EM38	Fig. 39 : répartition de la résistivité électrique..
.....	46
Fig. 40 : données brutes de répartition de l'humidité du sol.....	47
Fig. 41 : points de prélèvements, lignes transversales et limites d'application	51
Fig. 42 : rôle de la carte d'application en N élaborée offline dans le flux de données de la technologie retenue en 2003	53
Fig. 43 : flux de données dans la détermination de la carte d'application en N	55
Fig. 44 : données brutes de rendement GPS	57
Fig. 45 : carte des rendements en maïs de l'année 2000	57
Fig. 46 : carte des rendements en maïs de l'année 2001	58
Fig. 47 : carte du rendement attendu en 2003	58
Fig. 48 : répartition des valeurs N_{min} mesurées sur les surfaces d'essais en 2003.....	59
Fig. 49 : tableau de détermination du besoin en fertilisant azoté minéral avec modulation intraparcellaire	60
Fig. 50 : carte d'application en urée pour les essais en 2003	61
Fig. 51 : répartition des classes d'apports d'urée sur les parcelles d'essais	61
Fig. 52 : carte d'application praticable avec l'outil d'épandage pour la modulation des apports d'urée en considération du dispositif de l'essai. (taille pixel = 10m, une valeur claire signifie un apport faible, une valeur sombre un apport important).....	62
Fig. 53 : réalisation des apports dans l'essai fertilisation	63
Fig. 54 : densité du réseau d'échantillonnage	64

Fig. 55 : préparation interparcellaire de la répartition des N_{\min} pour l'essai 2004	65
Fig. 56 : répartition des rendements pris en compte pour la répartition du rendement potentiel	66
Fig. 57 : carte de répartition du rendement potentiel attendu pour le calcul de la carte d'application en N	66
Fig. 58 : carte d'application d'urée (pour les deux parcelles du bas) basée sur les N_{\min} après la fertilisation	67
Fig. 59 : carte d'urée dérivée de la parcelle I -03 (fragment de la parcelle I-03).....	68
Fig. 60 : carte d'urée au niveau intraparcellaire uniquement dans les bandes d'essai	68
Fig. 61 : fertilisation modulée théoriquement dans les bandes traitées conventionnellement	68
Fig. 62 : fertilisation forfaitaire basée sur la moyenne dans les bandes traitées conventionnellement....	69
Fig. 63 : jonction des deux traitements en une unique carte d'urée selon le dispositif d'essai	69
Fig. 64 : répartition des classes	69
Fig. 65 : carte d'application utilisée sur la parcelle I-03	70
Fig. 66 : carte d'urée intraparcellaire avec la variante de fertilisation supplémentaire intégrée	70
Fig. 67 : répartition des classes de fréquence d'apports des cartes d'urée concernées.....	71
Fig. 68 : résultat de la calibration du modèle de croissance.....	73
Fig.69 : agencement des bandes d'essai (mesures spécifiques intraparcellaires en grisé)	74
Fig. 70 : dates de fertilisation selon le dispositif d'essai de 2005	74
Fig. 71 : formule de calcul de la fertilisation optimale sur les plus petites sous-parcelles	75
Fig. 72 : dispositif d'essai selon « Apollo » avec bandes de traitement modulées et non modulées	75
Fig. 73 : Protocole d'essai 2005 d'après « Apollo », transposé en « carte de valeurs de mesure » dans « Agromap Basic »	76
Fig. 74 : carte d'application destinée à la mise en pratique de l'essai de fertilisation en intégrant le modèle de croissance « Apollo », telle qu'elle a été effectuée au cours de l'année d'étude 2005	77
Fig. 75 : répartition des reliquats d'azote d'après l'échantillonnage du 03 juin 2005	77
Fig. 76 : application intraparcellaire d'azote (2005) calculée selon les bonnes pratiques agricoles sous forme de carte de répartition interpolée (carte des valeurs de mesure dans Agromap Basic).....	78
Fig. 77 : surfaces exclues de la mesure Apollo en 2005	79
Fig. 78 : le capteur pendulaire « Cropmeter » prêt à l'usage.....	81
Fig. 79 : position du pilote avec un accès aisé à la caméra embarquée	83
Fig. 80 : prises de vue à une altitude de vol d'environ 600 m.....	83
Fig. 81 : environnement des parcelles d'essai par une image oblique du 10 juin 2004 ; MERKEL, 2004).....	84
Fig. 82 : image à la verticale de la parcelle d'essai à l'aide d'un appareil photo numérique à une altitude de vol de 600 m (image originale non retravaillée).	84
Fig. 83 : le planeur motorisé télécommandé utilisé pour les prises de vue	85
Fig. 84 : à titre d'exemple, mode de fixation et de déclenchement de l'appareil APS directement fixé sur le centre de gravité et sur le fuselage du planeur	85
Fig. 85 : erreur résiduelle après 2 étapes de correction d'image par projection (15 amers)	87
Fig. 86 : image aérienne géoréférencée corrigée par une méthode simple ; prise de vue du 10 juin 2004 avec l'ULM, trois jours après une fertilisation du maïs au stade 7 feuilles (hauteur de genou) ; points de références issus des mesures stéréoscopiques effectuées précédemment	87
Fig. 87 : mosaïque d'images constituée à partir de trois images corrigées (prise de vue du 7 juin 2004 effectuée à l'aide du planeur motorisé, images n°5b, 6 et 8).....	88
Fig. 88 : image orthographique dérivée	88
Fig. 89 : partie visible du spectre électromagnétique (lumière) (axe de la zone spectrale inversé par rapport à la figure 90).	89
Fig. 90 : courbes de réflexion caractéristiques dans la zone du spectre électromagnétique	89
Fig. 91 : Répartition du rayonnement réfléchi au sol dans le R, le V et le B (vol du 7 juillet 2004).....	90
Fig. 92 : répartition des reliquats d'azote prise en compte (carte en isolignes, issue des valeurs échantillonnées aux points du maillage en mai 2003)	93
Fig. 93 : différences de niveau et de variance des reliquats d'azote pour les différences parcelles.....	93
Fig. 94 : valeur moyenne représentative de la répartition des reliquats d'azote	94
Fig. 95 : répartition des reliquats d'azote en cas de prise en compte forfaitaire de la valeur minimum....	95
Fig. 96 : répartition des reliquats d'azote en cas de prise en compte forfaitaire de la valeur maximum....	96
Fig. 97 : carte d'urée dans la parcelle I-03 selon les calculs (valeurs négatives incluses)	98
Fig. 98 : carte d'urée dans la parcelle I-03 (valeurs négatives non incluses).....	98
Fig. 99 : carte d'urée dans la parcelle I-03 avec épandage minimum de 100kg d'urée/ha	98
Fig. 100 : carte d'application (rendement attendu différencié, au minimum 0 kg d'urée/ha).....	100
Fig. 101 : carte d'application (rendement attendu différencié, au minimum 100 kg d'urée/ha).....	100
Fig. 102 : carte d'application (rendement attendu forfaitaire, au minimum 0 kg d'urée/ha)	100
Fig. 103 : carte d'application (rendement attendu forfaitaire, au minimum 100 kg d'urée/ha)	100
Fig. 104 : variabilité du pH Fig.105 : variabilité de la matière organique	108

Fig. 106 : variation des teneur en limon et en argile.....	110
Fig. 107 : variation des valeurs de pH	110
Fig. 108 : description des parcelles d'essais par les images satellitales (12.08.2003)	111
Fig. 109 : Image satellite de la parcelle de Witternheim prise le 12/08/2003.....	112
Fig. 110 : Image satellite de la parcelle d'Ebersheim prise en août 2003.....	112
Fig. 111 : répartition des zones chargées en cailloux.....	112
Fig. 112 : carte de la résistivité électrique.....	113
Fig. 113 : carte de la résistivité électrique de la parcelle d'Ebersheim.....	114
Fig. 114 : carte des rendements interpolés toutes densités confondues	118
Fig. 115 : Carte interpolée des différences de rendement entre 75 000 et 85 000 plantes/ha	119
Fig. 116 : Carte interpolée des différences de rendement entre 85 000 et 95 000 plantes/ha	119
Fig. 117 : Carte interpolée des différences de rendement entre 75 000 et 95 000 plantes/ha	120
Fig. 118 : carte interpolée des rendements de la parcelle, toutes densités confondues.....	122
Fig. 119 : Carte interpolée des différences de rendement entre 80 000 et 90 000 plantes/ha	123
Fig. 120 : Carte interpolée des différences de rendement entre 90 000 et 100 000 plantes/ha	123
Fig. 121 : Carte interpolée des différences de rendement entre 80 000 et 100 000 plantes/ha	124
Fig. 122 : carte de rendement à Witternheim dans les différentes modalités.....	127
Fig. 123 : carte interpolée des différences de rendement entre « dose X » et « modulé »	127
Fig. 124 : carte interpolée des différences de rendement entre « dose X » et « dose X – 50 »	128
Fig. 125 : carte interpolée des différences de rendement entre « modulé » et « dose X - 50 ».....	129
Fig. 126 : carte de rendement à Ebersheim dans les différentes modalités.....	131
Fig. 127 : distribution du rendement de maïs sur différentes années	134
Fig. 129 : cartes de différences entre reliquats d'azote déterminés au niveau intraparcellaire et forfaitairement	137
Fig. 130 : Propriétés de l'ammoniaque et des nitrates dans le sol.....	141
Fig. 131 : application d'engrais au niveau intraparcellaire du 7 juin 2004 ;	150
on distingue le capteur pendulaire (non utilisé ici) à l'avant du tracteur	150
Fig. 132 : carte de différences (application « Apollo » – application « bonnes pratiques agricoles ») de la totalité des parcelles I-02 et I-03 ; résolution plus fine.....	156
Fig. 133 : distribution des fractions granulométriques argile (Ton), sable (Sand) et limon (Schluff) en pour cents.....	159
Fig. 134 : distribution de l'alimentation azotée de la plante.....	161
Fig. 135 : système de prise de vue potentiel plus moderne, « Vixel Ultracam » par exemple.....	162
Fig. 136 : déduction d'une carte à 3 zones à partir d'une image aérienne (www.agrosat.com)	165
Fig. 137 : Logiciel avec l'image aérienne infrarouge originale, un masque classé et la carte d'application dérivée.....	166
Fig. 138 : possibilités simples de classification d'images pour les canaux du rouge et du vert.....	167
Fig. 139 : distribution du rayonnement réfléchi standardisé pour le rouge en tant que paramètre d'entrée pour la modulation de la fertilisation azotée (zones sombres = beaucoup, zones claires = peu)	170
Fig. 140 : distribution du rayonnement réfléchi standardisé pour le vert.....	171
Fig. 141 : distribution du paramètre standardisé R/V	172
Fig. 142 : comportement des facteurs de correction dérivés à des fins d'intégration dans le calcul des applications en intraparcellaire.....	173
Fig. 143 : capteur pendulaire modifié dans le maïs à hauteur de genou (stade 7 feuilles).....	176
Fig. 144 : discussion sur l'utilisation du capteur pendulaire sur maïs	177
Fig 145 : distribution des reliquats d'azote les 10 et 17 mai 2003.....	183
Fig. 146 : distribution des reliquats d'azote le 20 septembre 2003	183
Fig. 147 : valeurs des reliquats d'azote en automne par rapport au printemps	184
Fig. 148 : pourcentage de reliquat d'azote en automne par rapport au printemps selon différents traitements et selon les parcelles.....	186
Fig. 149 : test de corrélation entre les reliquats d'azote du printemps et de l'automne	186
Fig. 150 : carte d'urée des parcelles I-01 et I-02	188
Fig. 151 : carte d'urée de la parcelle I-02	188
Fig. 152 : carte d'urée de la parcelle I-01	189
Fig. 153 : distribution des classes [rendement] séparées selon les deux traitements	190
Fig. 154 : différences des courbes de distribution du rendement et du rendement potentiel attendu.....	191
Fig. 155 : carte de différences (rendement et rendement potentiel attendu)	192
Fig. 156 : différences de hauteur entre traitement conventionnel et modulé aux différentes dates de mesure	194
Fig. 157 : différences de hauteur (cm) entre traitement conventionnel et modulé aux différentes dates de mesure	195

Fig. 158 : carte de différences (application « Apollo » – application « bonnes pratiques agricoles ») de la totalité des parcelles I-02 et I-03 ; résolution plus fine.....	202
Fig. 159 : variabilité des paramètres d'entrée du bilan d'azote	203
Fig. 160 : bilan prenant en compte les apports et l'exportation	204
Fig. 161 : distribution intraparcellaire du bilan au moyen des apports et de l'exportation.....	204
Fig. 162 : bilan prenant en compte les apports et l'exportation	205
Fig. 163 : distribution intraparcellaire du bilan considérant la situation de départ ainsi que les apports et l'exportation	205
Fig. 164 : corrélation entre le niveau des valeurs de départ des reliquats d'azote en automne et de l'augmentation au printemps	209
Fig. 165 : distribution intraparcellaire du bilan basé sur l'état de départ, les apports et l'exportation	210
Fig. 166 : appréciation de la situation économique de l'exploitation vis à vis de l'environnement	215
Fig. 167 : appréciation de la situation économique de l'exploitation vis à vis de l'environnement	215
Fig. 168 : faibles différences dans la répartition des exploitations par classes de taille entre les différents groupes enquêtés.....	217
Fig. 169 : répartition par classe de la taille des parcelles.....	218
Fig. 170 : valeurs moyennes pour les valeurs des sols (mini, maxi, moyenne)	219
Fig. 171 : répartition des surfaces en grandes cultures.....	220
Fig. 172 : estimation des enquêtés vis à vis de l'homogénéité de leurs parcelles	221
Fig. 173 : estimation des enquêtés sur leur connaissance des différences au niveau des parcelles.....	221
Fig. 174 : estimations au sujet de la nécessité de disposer de plus d'informations sur les parcelles pour leur exploitation	222
Fig. 175 a : réalisation des travaux sur l'exploitation (Alsace).....	222
Fig. 175 b : Réalisation des travaux de l'exploitation (Pays de Bade).....	223
Fig. 176 : répartition des sources du conseil	223
Fig. 177 : votre expérience vous permet-elle de bien apprécier la fertilisation à apporter ?.....	224
Fig. 178 : taux d'acceptation à l'investissement en agriculture de précision.....	228
Fig. 179 : accord pour une administration des cartes de rendement et de fertilisants par un prestataire centralisateur des données	230
Fig. 180 : analyse des problèmes chez les différents groupes enquêtés	231
Fig. 181 : conditions dans lesquelles une application pratique de la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée serait envisageable dans le Rhin supérieur.....	249

C. Description des tableaux

Tab. 1 : données techniques sur GVIS et AVIS.....	18
Tab. 2 : variation du besoin en azote (kg/q) en fonction du niveau de rendement.....	33
Tab. 3 : mesures de données sur les points de la grille en 2003.....	44
Tab. 4 : principales différences entre les technologies pour l'application de la modulation.....	49
Tab. 5 : données techniques sur l'épandeur à engrais Bogballe MR 3.....	52
Tab. 6 : données techniques sur ACT (www.ccgis-agrar.de).....	52
Tab. 7 : paramètres entrant dans la détermination de la dose d'engrais.....	54
Tab. 8 : quantités moyennes de fertilisant selon « Apollo » et selon les « bonnes pratiques agricoles ».....	78
Tab. 9 : prises de vues effectuées à partir des plates-formes « lowcost ».....	86
Tab. 10 : Paramètres dérivés des valeurs de réflexion.....	91
Tab. 11 : résultats de l'analyse de la variabilité empirique de la parcelle (Witternheim).....	107
Tab. 12 : résultats de l'analyse de la variabilité empirique de la parcelle (Ebersheim).....	109
Tab. 13 : données calculées.....	117
Tab. 14 : résultats de rendement et d'humidité.....	121
Tab. 15 : rendements obtenus.....	125
Tab. 16 : rendements Ebersheim 2004.....	130
Tab. 17 : résultats des calculs de corrélation des distributions de rendement du maïs entre les différentes années étudiées.....	135
Tab. 18 : résultats des tests de corrélation entre les différents échantillonnages de printemps.....	138
Tab. 19 : résultats des comparaisons printemps/automne des reliquats d'azote.....	138
Tab. 20 a : résultats des tests de corrélation entre les deux échantillonnages automnaux.....	139
Tab. 20 b : résultats des tests de corrélation entre les deux opérateurs.....	139
Tab. 21 : coefficient de détermination de la répartition du rendement 2004 et des teneurs en N et en C de la plante et du grain (2004) à partir de la corrélation avec les mesures d'humidité.....	142
Tab. 22 : influence des conditions sur les doses de fertilisant.....	152
Tab. 23 : influence des conditions-cadres sur la gamme des doses de fertilisant.....	153
Tab. 24 : pourcentage de la surface ayant reçu des doses trop importantes par rapport au calcul basé sur les bonnes pratiques agricoles.....	153
Tab. 25 : coefficient de détermination entre les différents inventaires terrestres de maturité.....	158
Tab. 26 : coefficient de détermination entre les distributions des fractions granulométriques.....	159
Tab. 27 : corrélations restantes ayant un intérêt.....	160
Tab. 28 : coefficients de détermination des éléments nutritifs de la plante.....	162
Tab. 29 : Bandes d'absorption des pigments (d'après Huss, 1984).....	163
Tab. 30 : valeurs moyennes des reliquats d'azote.....	184
Tab. 31 : rendement sur les sous-parcelles traitées différemment.....	190
Tab. 32 : décalage de la distribution des classes de rendement par rapport à la distribution sur la surface totale.....	190
Tab. 33 : décalage de la distribution du rendement et du rendement potentiel attendu.....	191
Tab. 34 : différence de rendement par rapport au rendement potentiel attendu.....	192
Tab. 35 : différence de rendement par rapport à l'objectif de rendement, par parcelle.....	193
Tab. 36 : potentiel d'économie lié à une collecte différenciée des paramètres d'entrée de la mesure de modulation et à l'absence de prise en compte des préconisations de dose minimale.....	198
Tab. 37 : potentiel d'économie lié à une collecte différenciée des paramètres d'entrée de la mesure de modulation et à l'absence de prise en compte des préconisations de dose minimale.....	199
Tab. 38 : Bilan des valeurs moyennes.....	205
Tab. 39 : bilan des valeurs moyennes.....	206
Tab. 40 : bilan des valeurs moyennes selon différents traitements.....	206
Tab. 41 : augmentation des reliquats d'azote entre l'automne 2003 et le printemps 2004.....	208
Tab. 42 : Types de sols cités par les agriculteurs alsaciens enquêtés.....	219

D. Abréviations

ACT	Agrar Computer Terminal (récepteur GPS et ordinateur de bord de la firme Agrocom)
AGPM	Association Générale des Producteurs de Maïs
AOS	Advanced Optoelektronic System
APCO	Association des producteurs de céréales et oléagineux du département Haut-Rhin
APOLLO	Application of Precision Agriculture for Field Management Optimization
APS	Advanced Photo System. Les films <i>APS-Filme</i> (Kodak Type IX240) se distinguent très nettement des films largement vulgarisés tel que le film 35mm ; ils se composent d'une cassette close, dans laquelle le film reste durablement ; il sort uniquement pour être soumis à l'impression, au développement voire à des travaux de retouche. Chaque cassette indique le statut du film , qui peut avoir 4 états : "vierge", "en partie impressionné", "totalement impressionné" et "développé". Les films ne peuvent pas être soumis deux fois à l'impression ou bien donné au développement pas du tout utilisés.
ARAA	Association pour la Relance Agronomique en Alsace
ARP	appareil de mesure de la conductivité électrique
Arvalis	Arvalis - Institut du végétal
ASCII	abréviation pour „American Standard Code for Information Interchange“. ASCII-Code est une méthode pour coder du texte en caractères binaires. Le système ASCII utilise pour ce faire environ 256 combinaisons de 8-Bit-nombres binaires, afin de transformer et coder chaque possibilité de frappe et d'écriture sur le clavier
ATB	Institut Agrartechnik Bornim
AVIS	Airborne Visible and Infrared Spectrometer –Spectrometre de l' Université München transporté par appareil aérien
B	Bleu
BAC Pro	Baccalauréat professionnel
BEPA	Brevet d'études professionnelles agricoles
BLW	Office fédéral de l'agriculture (Suisse)
BRUNT	Bâtir des Références en Utilisant les Nouvelles Technologies
BTA	Brevet Technicien Agricole
BTS	Brevet de Technicien Supérieur, (staatlich geprüfter Gastronom)
BW	Bade-Wurtemberg
CAD	Computer Aided Design
CAL	Calcium-Ammonium-Laktat
CAU	Coefficient Apparent d'Utilisation d'un engrais
CEBIS	signifie CLAAS-Elektronisches-Bord-Informationen-System. CEBIS est un système informatique embarqué avec des fonctions d'information, de surveillance et d'orientation de la moissonneuse batteuse. CEBIS possède un grand écran et est d'usage facile grâce à un menu compact et bien structuré facile à consulter. CEBIS offre aussi la possibilité d'enregistrer la quantité de carburant utilisée. Il est ainsi possible, par ex., à l'entrepreneur d'établir une facturation plus précise. (Vgl. www.claas.de).
CERES	déesse romaine de l'agriculture, un algorithme simulateur de la croissance porte son nom
CROPGRO	modèle de simulation de la croissance (growth) des céréales (crop)
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CV	Coefficient de variation (= écart type résiduel/moyenne- statistiques - analyse de la variance)
DGPS	Differential Global Positioning System est un système de localisation géographique par satellite. DGPS est un GPS différentiel avec un signal de référence corrigé et ainsi doté de plus de précision.
DGM	Digitales Geländemodell
DLZ	revue agricole allemande GmbH
EC	La valeur EC donne, combien de sels nutritifs se trouvent dans une solution nutritive. Plus précisément, elle donne la <u>conductivité</u> d'une solution. Comme tous les sels augmentent la conductivité d'une solution, la valeur EC n'indique pas si la solution nutritive a suffisamment d'éléments nutritifs dont les plantes ont besoin.
EDV	exploitation des données par informatique
EM38	appareil d'enregistrement au champ de la conductivité électrique
GPS	Global Positioning System; système de navigation pilotée par satellite pour le géopositionnement

GLA	Institut de géologie du Land de Bade-Wurtemberg)
GPS	Globales Positionierungs System mittels Satellit
GTCO	Ground Truth Center Oberbayern
GVIS	groundbased Visible and Infrared Spectrometer – Bodengestütztes Abbildendes Spektrometer der Universität München
ha	hectare (100*100 = 10.000 m ²)
IfuL	Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung, Müllheim (bei der Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, Baden-Württemberg)
INS	In Kombination mit GPS: Satellitengestützte Inertialnavigation: INS übernimmt als kreiselgestütztes System die Blickrichtungserkennung einer Position (GPS) von fernerkundungsgetragenen Aufnahmesystemen
ITADA	Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique: Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung, Colmar.
JGB	fabricant de machines agricoles
K	potassium
CAC	capacité d'échange en cations,
LAP	Institut des productions végétales : Landesanstalt für Pflanzenbau (Bade-Wurtemberg)
LBS	Landwirtschaftliches Bus-System, Schnittstellenparameter an landwirtschaftlichen Bordcomputern
LEL	Institut agricole Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume Schwäbisch Gmünd, Baden-Württemberg
LEP	Landesentwicklungsprogramm
LUFÄ	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (Augustenberg)
Mg	Magnesium
MS	Matière sèche
N	Azote
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index. L'index NDVI donne une mesure de l'activité photosynthétique et est fortement corrélé avec la densité et la vigueur de la végétation.
RFU	Réserve utile facilement utilisable
N _{min}	Reliquat en azote minéral (nitrate et ammonium)
P	phosphate, phosphore
PC	Personal Computer – ordinateur personnel
PCMCIA	PC Memory-Card International Association
pH	La valeur pH est une mesure de l'importance du pouvoir acide ou basique d'une solution. Le terme vient de „pondus Hydrogenii“ ou potentia Hydrogenii (lat. pondus= poids; potentia=energie; hydrogenium= hydrogène). pH<7 correspond à une solution acide, pH 7 corespond à une solution neutre, pH>7 correspond à une solution basique.
PDA	descriptif pour Pocket PC's
q	(=100kg) - quintal
QUAD	petit véhicule tous terrains
R	Rouge
RU	réserve en eau utile du sol
RC	radio controled, pilotage à distance avec l'aide de fréquences radio
RS323	Schnittstelle an landwirtschaftlichen Bordcomputersystemen
SIG	Système d'Information Géographique; banque de données digitales avec références spatiales
Tab	Tableau
TDR	Time Domain Reflectometry, méthode de mesure de la teneur en eau
UPV	Unpiloted vehicles, avions ou véhicules sans pilotes
VDLUFÄ	Verband der Deutschen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VERIS	Appareil pour la mesure de la conductivité électrique
WSG	Wasserschutzgebiet – Périmètre de captage protégé
ZG	Zentralgenossenschaft (ZG Raiffeisen Karlsruhe) / coopérative agricole Raiffeisen Karlsruhe

ANNEXES

Itinéraires techniques des parcelles	272
Analyses de sols et rendements de Witternheim et Ebersheim	273
Plan d'essai de Witternheim 2004	275
Plan d'essai d'Ebersheim 2004	276
Analyses statistiques des résultats	277
Questionnaire d'enquête sur l'agriculture de précision	279

1. Itinéraire technique de la parcelle de Witternheim en 2003

Date de Semis : 18 avril 2003,
Variété : PR 38 F 10 à 3 densités : 75 000 – 85 000 – 95 000 gr/ha
Désherbage : Mikado 0.75 l/ha + Basis 20 g/ha + Surf 2000 0.1l/ha en post-levée
Fumure: 600 kg/ha de 8.10.20, soit 48 unités N, 60 unités P et 120 unités de K en pré-semis, le 1/04/03
Urée (46 %) à 400 kg/ha, soit 184 unités N le 19/05/03
Soit au total : 232 U N / 60 U P / 120 U K
Insecticide : Bétacyfluthrine 0.5 l/ha (lutte contre la pyrale)
Irrigation : réalisée à l'aide d'un pivot : 15 tours à 12 mm, soit 180 mm entre le 18 juin et le 8 août 2003.
Date de récolte : 28 août 2003

2. Itinéraire technique de la parcelle d'Ebersheim en 2003

Apport de compost à l'automne 2002 avant labour, 50 T/ha
Date de Semis : 15 avril 2003,
Variété : DK 312 à 3 densités : 80 000 – 90 000 - 100 000 grains/ha
Désherbage : Alachlore 4 l/ha + Prowl 2 l/ha + Atrazine 750 g/ha en post semis pré-levée
Banvel 0.6 l/ha sur des plaques de liseron
Fumure : 200 kg/ha de 18.46, soit 36 unités N et 92 unités P en pré-semis
170 kg/ha de chlorure de potassium (60%), soit 100 unités K en pré-semis
Urée (46 %) à 160 kg/ha, soit 75 unités N en post-levée
Soit au total : 110 U N / 92 U P / 100 U K
Insecticide : Cyperméthrine 0.75 l/ha à la mi-juin (lutte contre la pyrale)
Irrigation : 6 passages à raison de 30 mm par passage, soit 180 mm au total entre fin juin et le 10 août
Date de récolte : 6 octobre 2003

3. Itinéraire technique de la parcelle de Witternheim 2004

Date de Semis : 17 avril 2004,
Variété : PR 38 A 24 à 90 000 gr/ha
Désherbage : Mikado 0.75 l/ha + Basis 20 g/ha + Surf 2000 0.1l/ha en post-levée
Fumure: 650 kg/ha de 8.10.20, soit 52 unités N, 65 unités P et 130 unités de K en pré-semis, le 29/03/04
Urée (46 %) à 2 doses : X = 140 unités N, soit 300kg/ha et X-50 = 90 unités N, soit 210 kg/ha, le 8/06/04
Soit au total : 2 doses d'azote : 190 U et 140 U
65 U P et 130 U K
Insecticide : Bétacyfluthrine 0.5 l/ha (lutte contre la pyrale)
Irrigation : réalisée à l'aide d'un pivot : 8 tours à 15 mm, soit 120 mm entre le 28 juin et le 9 août 2004.
Date de récolte : 28 octobre 2004

4. Itinéraire technique de la parcelle d'Ebersheim 2004

Date de Semis : 13 avril 2004,
Variété : Masaba à 80 000 grains/ha
Désherbage : Spectrum 1 l/ha + Prowl 2.2 l/ha en post semis pré-levée
Banvel 0.5 l/ha sur des plaques de liseron en post-levée
Fumure : 150 kg/ha de 18.46, soit 27 unités N et 70 unités P en pré-semis
150 kg/ha de chlorure de potassium (60%), soit 90 unités K en pré-semis
Urée (46 %) à 3 doses : X = 150 unités N, soit 330 kg/ha, X – 50 = 100 unités N, soit 220 kg/ha et X + 30 = 180 unités N, soit 390 kg/ha, le 9/06/04
Soit au total : 3 doses d'azote : 210 U - 180 U et 130 U
70 U P et 90 U K
Insecticide : Cyperméthrine 0.75 l/ha à la mi-juin (lutte contre la pyrale)
Irrigation : 4 passages à raison de 30 mm par passage, soit 120 mm au total entre fin juin et le 15 août
Date de récolte : 6 octobre 2004

Analyse de sol et rendement sur 3 ans dans la parcelle de Witternheim

point	rdt00	rdt01	rdt02	rdt moyen	argile	limon	sable	pH	P2O5 (ppm)	K2O (ppm)	Mg (ppm)	% M.O	Zn (ppm)
1	145.3	116.1	81.5	114.3	26	33.3	40.8	7.2	340	400	80	3.2	51
2	116.5	118.4	87.1	107.3	24	33.9	41.7	7.0	350	450	90	3.9	76
3	140.1	136.3	138.3	138.2	26	35.8	38.2	6.9	100	210	100	3.0	34
4	146.1	134.8	123.3	134.7	27	29.9	43.1	6.5	140	280	120	2.5	25
5	131.3	123.8	112.1	122.4	21	37.0	42.2	6.6	240	330	110	3.5	31
6	143.6	114.6	122.5	126.9	21	34.2	44.7	6.5	210	250	100	2.5	36
7	147.5	129.2	118.5	131.7	18	34.0	47.7	6.0	200	310	90	3.0	29
8	131.3	107.2	110.7	116.4	19	30.7	50.0	6.0	170	260	110	3.5	34
9	137.3	120.4	117.7	125.1	21	31.6	47.5	6.6	290	290	100	2.7	30
10	140.8	130.5	119.8	130.4	24	32.7	42.9	6.4	150	240	120	3.0	26
11	156.9	128.0	113.4	132.8	24	34.7	41.4	7.1	240	350	90	3.1	25
12	161.4	125.7	135.3	140.8	24	35.7	40.2	7.2	70	180	90	3.0	19
13	131.2	122.6	127.3	127.1	25	34.7	40.4	6.7	360	400	90	3.1	27
14	138.8	106.8	104.8	116.8	28	31.3	41.0	7.1	380	400	100	2.7	28
15	133.7	124.0	126.5	128.1	27	33.3	40.2	6.9	300	440	110	2.9	24
16	152.6	118.2	147.5	139.5	25	34.9	40.3	6.9	190	420	120	2.8	27
17	120.0	134.8	113.8	122.9	23	34.1	42.5	7.0	130	270	90	3.7	22
18	112.7	111.4	114.7	112.9	26	33.9	40.6	6.8	210	380	100	3.4	28
19	127.5	117.9	106.1	117.2	26	28.4	45.7	6.7	200	270	100	4.5	23
20	124.6	120.9	114.5	120.0	22	31.4	46.7	6.8	380	300	80	3.0	24
21	135.5	118.7	94.3	116.2	27	28.7	44.1	6.1	160	280	120	3.2	24
22	122.5	107.6	134.1	121.4	26	31.4	42.8	7.1	150	360	90	3.0	21
23	149.9	134.4	125.3	136.5	25	30.0	45.1	6.3	200	420	120	2.7	23
24	152.1	132.0	118.5	134.2	25	32.8	42.5	6.2	190	340	110	2.5	25
25	138.7	115.0	128.3	127.3	27	29.7	43.2	6.5	140	330	140	2.6	25
26	128.6	121.1	137.9	129.2	27	30.8	42.6	6.6	90	280	120	2.4	21
27	133.7	113.9	134.0	127.2	27	28.4	44.3	7.1	190	290	80	2.7	19
28	88.9	104.1	129.3	107.4	25	28.8	46.6	7.1	290	320	70	3.7	17
29	133.8	106.5	109.2	116.5	27	31.7	41.6	6.9	110	170	80	3.2	23
30	133.2	118.3	118.8	123.4	26	31.5	42.2	6.8	100	220	100	3.1	19
31	124.9	111.0	132.8	122.9	25	31.6	43.0	6.7	90	220	110	3.0	19
32	131.1	133.3	132.8	132.4	27	30.5	42.8	6.7	60	170	100	2.9	19
33	114.2	119.3	123.6	119.0	26	33.3	40.7	6.9	80	190	100	3.3	20
34	110.8	120.6	116.6	116.0	24	31.5	44.1	7.1	130	260	90	2.9	21
35	105.0	103.2	120.0	109.4	27	33.9	39.4	6.8	120	260	110	3.4	18
36	101.7	118.5	110.8	110.3	29	33.4	37.7	6.9	320	350	140	2.9	23
37	137.9	97.8	119.2	118.3	27	32.4	41.0	6.8	430	400	130	2.9	19
38	119.9	117.3	116.1	117.8	25	32.6	42.0	6.9	240	270	120	3.3	23
39	120.9	131.7	135.5	129.4	25	33.9	41.3	7.1	300	290	100	3.6	21
40	106.6	116.7	129.2	117.5	25	33.2	41.8	6.4	260	370	120	3.5	26
41	123.6	116.3	125.0	121.6	25	30.8	43.9	6.9	240	320	110	3.6	23
42	144.0	98.1	132.2	124.8	24	33.1	42.6	7.2	110	260	90	3.0	21
43	123.4	95.0	127.8	115.4	25	31.8	43.0	6.8	210	330	100	2.7	21
44	130.4	132.5	124.6	129.2	26	30.0	44.0	6.5	190	390	130	3.4	20
45	133.7	115.9	134.6	128.1	25	31.5	44.0	6.3	270	510	140	3.3	23
46	125.4	109.6	135.5	123.5	26	28.3	46.2	6.4	310	460	130	2.9	27
47	142.7	133.4	125.1	133.7	25	31.3	44.1	6.9	400	470	130	2.9	28
48	111.6	131.9	136.2	126.6	25	33.4	41.8	7.3	290	390	90	2.8	25
49	119.2	123.3	131.4	124.6	24	33.1	42.6	7.2	300	330	80	3.0	21
ET	15.0	10.6	13.0	8.4	2.1	2.1	2.4	0.3	96.9	82.9	17.7	0.4	9.3
CV	11%	9%	11%	7%	8%	6%	6%	5%	45%	26%	17%	13%	37%
mini	88.9	95	81.5	107.3	18.3	28.3	37.7	6.0	60.0	170.0	70.0	2.4	17.0
maxi	161.4	136.3	147.5	140.8	28.9	37.0	50.0	7.3	430.0	510.0	140.0	4.5	76.0
moyenne	130.3	119.2	121.9	123.8	24.9	32.2	42.8	6.8	216.7	320.0	104.9	3.1	25.6

seuil (méthode allemande)

130 à 240	150 à 250	80 à 130
C.comp export	C.comp export	C.comp export
B.export+40	B.export+50	B.export+30
D.export/2	D.export/2	D.export/2
E.pas d'apport	E.pas d'apport	

Analyse de sol et rendement sur 3 ans dans la parcelle d'Ebersheim

point	rdt00	rdt01	rdt02	rdt3ans	argile	limon	sable	pH	P2O5 (ppm)	K2O (ppm)	Mg (ppm)	% M.O	Zn (ppm)	profondeur (cm)	RU (mm)	profondeur (cm)
1	137.3	81.0	120.5	113.0	17.9	29.2	52.9	6.2	150	200	80	1.9	6.7	35	70	35
2	137.5	89.6	124.4	117.2	18.8	30.3	50.9	5.3	130	240	70	2	5.4	35	85	101
3	131.7	78.7	125.2	111.9	18.8	34.1	47.1	5.8	100	200	80	1.9	5.3	35	120	120
4	152.4	92.7	119.9	121.7	16.4	31.4	52.2	6.4	190	230	70	1.9	5.6	35	120	120
5	137.9	89.4	127.0	118.1	16.2	28.9	54.9	6.8	220	200	80	1.9	5.6	35	120	120
6	135.8	95.6	110.5	114.0	17.2	40.6	42.2	7.2	290	180	60	1.8	10.8	45	120	120
7	129.7	78.5	107.8	105.4	18.1	43.4	38.5	6.7	140	100	100	1.9	13.1	45	120	120
8	130.0	78.9	120.1	109.7	16.8	39.2	44	6.2	130	110	100	1.7	12.2	35	120	120
9	135.8	79.0	128.1	114.3	16.4	33.9	49.7	6.3	160	130	80	1.9	6.2	40	120	120
10	121.7	101.2	126.5	116.4	17.8	34.9	47.3	6.2	160	170	80	1.9	5	35	120	120
11	140.8	83.0	124.4	116.1	19.2	38.8	42	6	120	170	90	2	6.7	85	80	80
12	139.8	81.5	118.7	113.3	19	35	46	6	130	180	90	1.9	6.2	50	120	120
13	142.4	88.4	114.4	115.1	18.5	31.6	49.9	6.4	180	190	70	2	5.9	35	120	120
14	139.4	97.2	133.9	123.5	15.1	26.7	58.2	6.2	170	200	70	1.8	6.2	50	120	120
15	130.5	92.8	122.2	115.2	14.9	30.2	54.9	5.8	130	180	60	2	12.1	35	120	120
16	143.4	97.5	112.0	117.6	18.8	34.1	47.1	6	130	220	70	2.1	7.5	70	50	120
17	133.7	101.0	134.6	123.1	16	30.2	53.8	6.1	150	230	50	1.7	6.8	80	120	120
18	121.2	111.4	112.9	115.2	17.3	35.8	46.9	6	140	210	80	1.9	7.1	60	120	120
19	130.0	90.0	133.4	117.8	19.2	39.8	41	6.2	120	170	80	2.1	10.1	60	120	120
20	152.6	80.4	132.3	121.8	19.5	36.7	43.8	6	130	220	80	2.1	6.9	35	120	120
21	131.5	94.9	122.6	116.4	19.5	36.5	44	6.4	160	190	70	1.8	6.2	35	120	120
22	125.4	67.6	122.5	105.2	18.3	42.2	39.5	6.5	100	200	100	1.9	11.8	40	120	120
23	134.9	72.8	112.8	106.9	18.8	38.4	42.8	6.5	100	130	90	1.8	10.1	45	120	120
24	141.1	93.2	120.9	118.4	17.9	38.8	43.3	6.5	150	150	80	2	9.1	60	120	120
25	117.3	90.9	125.0	111.1	18.9	34	47.1	6.5	170	180	70	1.8	6.8	45	55	120
26	135.3	85.2	125.8	115.4	18.5	33.2	48.3	6.5	200	210	70	2.1	6.9	75	50	120
27	126.0	101.8	125.7	117.9	16.6	27	56.4	6.6	340	160	60	1.9	20	40	80	120
28	137.7	90.9	120.2	116.3	17	30.2	52.8	6.4	170	160	70	1.9	7.7	35	120	120
29	103.9	91.6	120.2	105.2	16.5	24.6	58.9	6.8	210	160	60	1.7	6.4	50	120	120
ET	10.0	9.7	7.0	5.0	1.3	4.8	5.6	0.4	53.1	35.1	12.7	0.1	3.3		25.2	
CV	7%	11%	6%	4%	7%	14%	12%	6%	33%	19%	17%	6%	40%		24%	
min	103.9	67.6	107.8	105.2	14.9	24.6	38.5	5.3	100.0	100.0	50.0	1.7	5.0	35	50	63
max	152.6	111.4	134.6	123.5	19.5	43.4	58.9	7.2	340.0	240.0	100.0	2.1	20.0	40	120	120
moy	133.7	88.9	122.2	114.9	17.7	34.1	48.2	6.3	161.0	181.7	76.2	1.9	8.2	37%	104.5	35%

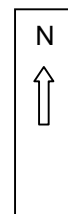
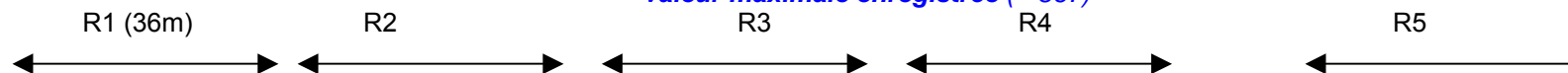
seuil (méthode allemande)

130 à 240 **150 à 250** **80 à 130**
 C, comp expor C, comp expor C, comp export
 B, export+40 B, export+50 B, export+30
 D, export/2

35.0 61.0
 100.0 189.0
 49.0 88.1

Plan de la parcelle de Witternheim (2004)

densité de plantes (x 1000/ha)
 valeur de la mesure au N-tester le 27/07/04 (stade floraison femelle) et % par rapport à la
 valeur maximale enregistrée (= 867)



C
H
E
M
I
N

	R1 (36m)			R2			R3			R4			R5				
	X (12 m)	X-50	X-50	X	X-50	X-50	X	X-50	X-50	X	X-50	X-50	T0 (6 m)	X	X-50	X-50	B
	190U	140U											50 U				
	80 828 95.5%	74 822 94.8%	79 796 91.8%	83 841 97%	78 823 94.9%	61 811 93.5%	79 805 92.8%	67 828 95.5%	77 850 98%	89 847 97.7%	85 762 87.9%	80 802 92.5%	74 696 80.3%	70 810 93.4%	70 811 93.5%	77 804 92.7%	
	X	X-50	X	X	X-50	X	X	X-50	X	X	X-50	X	T0 8 rgs	X	X-50	X	B 31 rgs
	71 748 86.3%	74 709 81.8%	77 792 91.3%	75 741 85.5%	79 778 89.7%	70 727 83.9%	79 801 92.4%	73 744 85.8%	75 855 98.6%	69 801 92.4%	80 792 91.3%	74 823 94.9%	71 739 85.2%	79 867 100%	78 796 91.8%	72 835 96.3%	
	X	X-50	X-50	X	X-50	X-50	X	X-50	X-50	X	X-50	X-50	T0	X	X-50	X-50	B
	74 780 90%	73 735 84.8%	81 816 94.1 %	77 756 87.2%	81 802 92.5%	78 798 92%	78 801 92.4%	77 787 90.8%	74 765 88.2%	77 807 93.1%	76 771 88.9%	74 727 83.9%	77 685 79%	75 837 96.5%	78 808 93.2%	74 801 92.4%	
Moy rendt	115.7	110.7	128.8	118	130	112.9	120.1	115.6	127	130	130.2	116.6	104.5	115.7	102.4	137.5	124.2
ET Rendt	11.4	10.9	13.8	8.4	10.4	10.7	9.0	10.0	12.2	10.2	8.5	12.1	7.9	6.0	9.4	10.9	12.5

Urée apportée le 8/06/04 B : bordure

Pas de RAR mesurés

R 1 à R 5 = répétitions

Plan d'essai Ebersheim (2004)

Densité de plantes (x 1000/ha)

valeur de la mesure au N-tester le 27/07/04 (stade floraison femelle) et % par rapport à la valeur maximale enregistrée (= 789)

R1 (36m)			Zone non enregistrée à la récolte					
X-50 (12 m)	X	X+30	(X)	PI	T0 (6 m)	X-50	X	X+30
130 kg	180kg	210 kg			30 kg			
74	74	85	(75)		81	75	81	81
703	772	789	(787)		673	750	721	715
89.1%	97.8%	100%	(99.7%)		85.3%	95.1%	91.4%	90.6%
rendement non mesuré	133,5 dt/ha	136,5 dt/ha	rendement non mesuré		121,1 dt/ha	104,2 dt/ha	146 dt/ha	rendement non mesuré
89 kg/ha	73 kg/ha	172 kg/ha			44 kg/ha			
Urée apportée le 08.06.04			PI = passage d'irrigation					
Rendement								

RAR (reliquats post-récolte - moyenne des 2 répétitions 0-90 cm – prélèvement le 12/10/04)

Analyse statistique des résultats 2003

Witternheim

Traitement	rdt moyen à 15%
densite 1	94.23
densite 2	99.68
densite 3	97.25
moy	97.1
ET	2.73
CV	3%

Traitement	rdt moyen à 15%
R 1	93.76
R 2	100.41
R 3	97.24
moy	97.1
ET	3.33
CV	3%

Traitement	rdt moyen à 15%
Rep 1, D3	92.22
Rep 2, D3	106.93
moy	99.6
ET	10.40
CV	10%

Traitement	rdt moyen à 15%
Rep 1, D1	93.69
Rep 2, D1	94.47
Rep 3, D1	94.26
moy	94.1
ET	0.41
CV	0.4%

Traitement	rdt moyen à 15%
Rep 1, D2	95.33
Rep 2, D2	103.29
Rep 3, D2	100.36
moy	99.7
ET	4.02
CV	4%

Ebersheim

Traitement	rdt moyen à 15%
densite 1	120.53
densite 2	121.95
densite 3	122.00
moy	121.5
ET	0.84
CV	1%

Traitement	rdt moyen à 15%
R 2	127.65
R 3	124.54
R 4	124.28
R 5	126.90
R 6	103.25
moy	121.3
ET	10.21
CV	8%

Analyse statistique des résultats 2004

Witternheim

Traitement	rdt moyen à 15 %
Témoin	104.5
Modulé	124.6
X	119.4
X-50	117.5
moy	116.5
ET	8.54
CV	7%

Traitement	rdt moyen à 15 %
Modulé	124.6
X	119.4
X-50	117.5
moy	120.5
ET	3.68
CV	3%

Traitement	rdt moyen à 15 %
Rep1	118.5
Rep2	125.6
Rep3	120.9
Rep4	120.3
Rep5	118.4
moy	120.7
ET	2.93
CV	2%

Traitement	rdt moyen à 15 %
Rep1 - X	115.7
Rep2 - X	130.0
Rep3 - X	120.1
Rep4 - X	118.0
Rep5 - X	115.7
moy	119.9
ET	5.92
CV	5%

Traitement	rdt moyen à 15 %
Rep1 - Modulé	137.5
Rep2 - Modulé	116.6
Rep3 - Modulé	127.0
Rep4 - Modulé	112.9
Rep5 - Modulé	128.8
moy	124.5
ET	9.89
CV	8%

Traitement	rdt moyen à 15 %
Rep1 - X-50	102.4
Rep2 - X-50	130.2
Rep3 - X-50	115.6
Rep4 - X-50	130.0
Rep5 - X-50	110.7
moy	117.8
ET	12.21
CV	10%

Ebersheim

Traitement	rdt moyen à 15 %
Témoin	121.1
X	139.5
X+30	136.5
X-50	104.2
moy	125.3
ET	16.23
CV	13%

Questionnaire sur la mise en œuvre de l'agriculture de précision

Vous êtes : (plusieurs réponses possibles)

- ... un exploitant agricole
- un entrepreneur de travaux agricoles
- ... un élève de Lycée Agricole
- autre : précisez _____

(poursuivre à partir de la partie 2 page 6)

Partie 1 : questions concernant l'exploitation

L'activité agricole sur l'exploitation est

- principale (le revenu agricole du couple exploitant est supérieur à 90 % du revenu total)
- partielle (le revenu agricole du couple exploitant est compris entre 50 % et 90 % du revenu total)
- secondaire (le revenu agricole du couple exploitant est inférieur à 50 % du revenu total)

L'activité non agricole du chef d'exploitation est :

Question sur la main d'oeuvre agricole :	UTH/an Déclaration MSA
Combien y a t'il en moyenne d'actifs réguliers qui travaillent sur l'exploitation ?	
→ dont permanents	
→ dont saisonniers	

Système d'exploitation :

conventionnel

biologique

Il existe de l'élevage

Oui → Nombre UGB : _____

→ Espèces : _____

Non

	Quelles sont les cultures présentes ?	env. [ha]
	Céréales à paille	
	Maïs grain	
	Culture fourragère comme culture principale y incl. maïs ensilage	
	Protéagineux	
	Oléagineux	
	Cultures spéciales, lesquelles :	
	Jachère	
	Autres	
	Culture intermédiaire : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non si oui : entre quelles cultures ?	

	Quelles sont les surfaces	env. [ha]	Pour quelle(s) culture(s)
	irriguées :		
	drainées :		

Questions sur l'homogénéité des parcelles	Oui	En partie	Non
Diriez-vous que vos parcelles sont homogènes ?			
Pensez-vous connaître par votre expérience les principales différences qui existent dans vos parcelles ?			
Si oui : Pensez-vous tenir compte de ces différences de manière adaptée ?			
Pensez-vous que plus d'information sur la variabilité à l'intérieur des parcelles serait utile ?			

Comment sont réalisés les travaux suivants sur votre exploitation ?				
Réalisation du :	Avec mon matériel	Avec du matériel extérieur *	En prestation par entrepreneur	Pas réalisé
Travail du sol				
Semis				
Fertilisation / Chaulage				
Protection des cultures				
Récolte (fauche)				
Récolte (transport)				
Ensilage				
Autres : _____				

* : matériel de CUMA, ou prêté par une autre exploitation

Où trouvez vous du conseil pour les productions végétales ?
(réponses multiples possibles)

- Services de la Chambre d'agriculture
- Instituts techniques
- Coopérative / négoce
- Industrie (semences, engrais, machinisme...)
- Autre (précisez) :

Questions sur la fertilisation	Oui	En partie	Non
Croyez-vous, que votre expérience vous permet de pouvoir bien apprécier les quantités à apporter ?			
Pensez-vous fertiliser de manière adéquate ?			
Craignez-vous actuellement de surfertiliser ?			
Craignez-vous actuellement de sous-fertiliser ?			
Faites-vous appel à du conseil pour la fertilisation ?			
Quels conseils appliquez-vous ?			
Est-ce que ces conseils vous semblent fiables ?			
Remarque ?			
Est-ce que vous appliquez parfois les conseils de fertilisation ?			
Est-ce que vous appliquez régulièrement les conseils de fertilisation ?			

Partie 2 : Questions sur l'usage de l'informatique au niveau de l'exploitation

Question sur l'utilisation de PC :			
	Oui	Non	
Possédez-vous un PC sur l'exploitation ? (si non, allez directement au pavé suivant)		(aller à la partie suivante)	
Si oui : depuis combien d'années ?	depuis _____ années		
	Oui	En partie	Non
Avez-vous un accès Internet ?		X	
Est-ce pour vous une aide précieuse ?			
Avez-vous suivi une formation en informatique ? (vous-même ou la personne qui utilise l'ordinateur)			
Vous sentez-vous à l'aise avec votre PC ? (vous-même ou la personne qui utilise l'ordinateur)			
- pour le traitement de texte ?			
- pour des calculs sur tableurs ?			
- pour un programme de comptabilité ?			
- dans un programme appliqué agricole ?			
Maitrisez-vous des travaux d'installation simples tels que par ex. le raccordement d'une imprimante ?			
Avez-vous déjà installé avec succès un logiciel ?			
Avez-vous déjà une fois établi un appareil sur un réseau ?			
Avez-vous plaisir à travailler sur votre ordinateur ?			

Possédez vous un matériel agricole (tracteur, moissonneuse,...) qui est déjà pré-équipé avec antenne GPS pour accueillir un **ordinateur de bord** permettant de piloter un outil Oui Non

Si oui, de quel type d'ordinateur embarqué s'agit-il ?

Cela fonctionne-t-il sans problème ?

Questions relatives à la notion de GPS	Oui	En partie	Non
Avez-vous déjà entendu parler de GPS ? (Système de repérage par satellite)		X	
Pourriez-vous décrire simplement le GPS ?			

Si oui :	Oui	Non	Depuis quand environ ?	Encore actuellement
Avez-vous déjà eu à faire avec le GPS ?				
En lien avec un système de navigation pour auto ?				
Lors de hobby, par ex. voile, modélisme aérien,...				
Sur votre exploitation ?				
Pour la cartographie de rendements ?				
Pour la mesure des superficies des parcelles ?				
Pour la prise d'échantillons de sols ?				
Pour une carte de fertilisation ?				
Pour une modulation intraparcellaire du semis?				
Pour une modulation intraparcellaire de la fertilisation de fond?				
Pour une modulation intraparcellaire de la fertilisation en azote ?				
Autres applications ?				

Avez-vous un **équipement GPS** sur une de vos machines agricoles ?

Oui

Non

Si oui, de quoi s'agit-il ?

Cela fonctionne-t-il sans problème ?

Partie 3 : Questions sur l'agriculture de précision et la modulation intraparcellaire des interventions

Comment vous estimez-vous informé sur la modulation intraparcellaire des interventions culturales ?

- Jamais entendu parler de cela ! (dans ce cas, poursuivez page 13)
- Un peu
- Moyennement
- Bien

Pourriez-vous à l'aide de quelques mots expliquer les notions suivantes ?	Oui	En partie	non
- agriculture de précision			
- exploitation modulée intraparcellaire			
- modulation des intrants			
- capteur de rendement			
- capteurs sensoriels en végétation (par ex.: Hydro N Sensor)			
- SIG (Système d'Information Géographique)			
- télédétection			

Selon vous, l'utilisation de l'agriculture de précision est intéressante ?	Oui	En partie	non	Ne sait pas
- pour une modulation intraparcellaire d'intrants				
- pour la cartographie du rendement				
- pour la modulation de la fertilisation de fond				
- pour la modulation de la fertilisation azotée				

- pour la modulation du désherbage				
- pour le guidage automatique du tracteur				
Désirez vous apporter des commentaires ou des compléments sur ces points ?				

Questions relatives à la motivation pour une application de l'agriculture de précision :	Oui	En partie	non	Ne sait pas
Pourriez-vous imaginer aborder l'agriculture de précision si vous étiez encadré convenablement et si cela était neutre en coût pour vous ?				
Croyez-vous, que le recours à l'agriculture de précision puisse améliorer vos performances économiques ?				
Croyez-vous, que le recours à l'agriculture de précision puisse être un atout pour progresser sur le plan <i>environnemental</i> ?				
Voyez-vous dans la mise en oeuvre de l'agriculture de précision un fort potentiel de progrès pour vous ?				
Vous voyez dans la mise en oeuvre de l'agriculture de précision un fort potentiel, mais vous ne pouvez pas imaginer, comment elle pourrait s'appliquer dans votre exploitation ?				
Vous n'attendez vraiment rien de l'agriculture de précision !				
Où voyez-vous le cas échéant le principal obstacle pour la mise en oeuvre de l'agriculture de précision ?				
Qu'est-ce qui devrait changer pour que l'agriculture de précision doive/puisse être introduite sur votre exploitation ?				

→ *Page 10 seulement pour exploitant !*
→ *Pour les autres, poursuite à la page 11*

→ **cette page seulement pour exploitant !**

Pourriez-vous concevoir que vos parcelles soient regroupées avec d'autres parcelles voisines pour une fertilisation modulée d'îlots de parcelles par entreprise (sans perte de temps pour arrêts fréquents de l'épandeur et demi-tours) si cela n'entraîne pas pour vous des charges supplémentaires ?	Oui	En partie	non	Ne sait pas
--	-----	-----------	-----	-------------

Question sur votre acceptation à investir pour la mise en oeuvre de l'agriculture de précision
(réponses multiples possibles)

Pour la mise en oeuvre d'agriculture de précision, vous pourriez envisager...

- Aucun investissement personnel
- Le recours à un cercle de machinisme (prestation) ou à un entrepreneur
- Des investissements personnels en commun avec des collègues (CUMA) (Maschinengemeinschaft)
- Des investissements dans des machines et équipements en propriété

Question sur votre acceptation à un surcroît de dépenses pour l'agriculture de précision à l'aide de 2 exemples (A et B) :

Quelles dépenses supplémentaires accepteriez-vous ?

ex A ... pour la réalisation d'une carte de rendement

(utilisable pour une exploitation d'îlots de parcelles ou aussi pour la production de conseil de fertilisation modulée en intraparcellaire)

ex B ...pour la réalisation d'une modulation intraparcellaire de la fertilisation

Dépenses supplémentaires pour :	A	B
En aucun cas:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trouve cela intéressant mais ne suis pas prêt à payer:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trouve cela intéressant mais n'ai pas d'idée de prix	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
jusqu'à env. 10 Euros/ha:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
entre 10 – 20 Euros/ha:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
entre 20 – 40 Euros/ha:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Accepteriez-vous la réalisation de vos cartes de rendement et de fertilisation en prestation de service par un organisme centralisateur des données ?

- Oui, pour une gestion des données indépendante (d'entreprises) et objective
- Eventuellement
- Non

Si vous avez déjà eu une expérience avec l'agriculture de précision.	Oui	Non
Y a t'il eu problème pour une modulation intraparcellaire de l'intervention ?		
Si oui : avec quoi [Produit] et quand [année] ?	↓	
Le problème rencontré s'est produit ...	Oui	Non
... à cause de logiciel pas encore au point ?		
... lors de la préparation d'une carte d'application		
... suite à des informations manquantes sur la variabilité intraparcellaire ?		
... suite à des problèmes de réception de signal de correction DGPS ?		
... suite à une incompatibilité de logiciels et de matériels informatiques ?		
... suite à des problèmes de contacts ou de raccordements des prises ?		
... lors de l'équipement des machines ?		
... lors de la conduite des outils informatiques ?		
... suite à des particularités locales ?		
...Autres :		

A combien estimez vous l'utilité économique de l'agriculture de précision ?

_____ Euros/ha pour _____ [nature de l'intervention] dans _____ [culture]

_____ Euros/ha pour _____ [nature de l'intervention] dans _____ [culture]

_____ Euros/ha pour _____ [nature de l'intervention] dans _____ [culture]

_____ Euros/ha pour _____ [nature de l'intervention] dans _____ [culture]

Vous pouvez ici compléter par des commentaires issus de votre expérience propre ?

Qu'est-ce qui, selon vous, plaide en faveur ou contre une exploitation modulée en intraparcellaire sur votre exploitation ?

Avantages :

Inconvénients :

Partie 4: Questions pour le chef d'exploitation

Age du chef d'exploitation	Année
Quel âge avez vous ?	

La formation professionnelle du chef d'exploitation est :

- agricole
 non agricole

plus précisément :

→ *seulement pour une exploitation agricole :*

Reprise de l'exploitation	Oui	Non	Non éclaircie
Est-ce que la reprise de l'exploitation est assurée ?			

Comment jugez-vous l'avenir économique de votre exploitation ?

→ Vous pouvez l'estimer grossièrement :

bon

moyen

mauvais

→ Vous ne pouvez pas bien l'estimer :

incertain

Comment appréciez-vous votre exploitation sur le plan de l'environnement ?

bien

moyenne

mauvaise

