

**UTILISATION À LA FERME  
DES OUTILS D'INFORMATION GÉORÉFÉRENCÉS  
EN VUE D'UNE OPTIMISATION DES INTRANTS  
ET UNE DIMINUTION DES PERTES ENVIRONNEMENTALES**

**Projet n° 24-810-255-04069**

**RAPPORT FINAL**

**JANVIER 2000**

**NOTE :** Les résultats, les opinions et les recommandations exprimés dans ce rapport sont ceux des auteurs. Ils ne sont pas nécessairement endossés par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agro-Alimentaire Canada.



## **Description du programme**

### **ENTENTE AUXILIAIRE CANADA-QUÉBEC POUR UN ENVIRONNEMENT DURABLE EN AGRICULTURE**

Le programme d'aide à l'innovation technologique a pour objectif de favoriser l'adoption et l'adaptation aux conditions pédologiques, climatiques et environnementales du Québec, de nouvelles technologies ou pratiques visant le développement d'une agriculture durable. Les secteurs d'intervention de ce programme concernent la qualité de l'eau et la pollution diffuse, la conservation des ressources et la fertilisation intégrée, la phytoprotection ainsi que l'intégration faune-agriculture.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>8</b>
<b>Description et méthodologie du projet.....</b>	<b>9</b>
<b>Résultats .....</b>	<b>10</b>
<b>A) Échantillonnage systématique.....</b>	<b>10</b>
a) Variabilité des éléments majeurs.....	10
b) Variabilité des éléments mineurs.....	21
c) Conclusion partielle (échantillonnage systématique) .....	26
<b>B) Les cartes de rendement.....</b>	<b>27</b>
a) Objectifs .....	27
b) Quelques résultats .....	27
<b>C) Diagnostic dans les zones de rendement contrastant .....</b>	<b>30</b>
<b>D) La fertilisation à taux variable.....</b>	<b>36</b>
<b>E) Utilisation des cartes de niveau pour l'aménagement des champs .....</b>	<b>40</b>
<b>F) Conclusion .....</b>	<b>42</b>

## **LISTE DES PARTICIPANTS**

<b>Requérant :</b>	<b>Le Club en conservation des sols « Club sol en mains »</b> 3025, rang de l'Île Saint-Jean-Baptiste-de-Nicolet (Québec) J3T 1T7 Tél. : 819-293-8532
<b>Conseillers au MAPAQ :</b>	<b>André Brunelle, agronome</b> <b>Victor Savoie, ingénieur et agronome</b> 460, boul. Louis-Fréchette Nicolet (Québec) J3T 1Y2 Tél. : 819-293-8501 - André Brunelle Tél. : 819-293-8255 - Victor Savoie
<b>Agriculteurs participants :</b>	<b>François et Gilbert Proulx</b> 3500, Les 60 Saint-Jean-Baptiste-de-Nicolet (Québec) J3T 1P4 Tél. : 819-293-5515
	<b>Ferme Val-des-Bois</b> 186, rang St-Joseph Sainte-Perpétue (Québec) J0C 1R0 Tél. : 819-336-6763 - 819-336-6330
	<b>Jean-René et Jérôme Tourigny</b> 3025, Les 40 Saint-Jean-Baptiste-de-Nicolet (Québec) J3T 1M8 Tél. : 819-293-5177 - Jérôme Tél. : 819-293-5575 - Jean-René
	<b>Sylvain Forcier</b> 65, 4 <sup>e</sup> Rang Saint-Bonaventure (Québec) J0C 1C0 Tél. : 819-396-2991

## ORGANISMES ASSOCIÉS AU PROJET ET CONTRIBUTION (1997)

<u>Nom</u>	<u>Adresse</u>	<u>Contribution</u>
Fédération des producteurs de cultures commerciales, UPA de Longueuil	UPA de Nicolet 1940, rue Des Pins, Nicolet J3T 1Z9	5000 \$
Covilac	40, rue de l'Église Baie-du-Febvre J0G 1A0	3040 \$
Nutrite inc.	7005, boul. Taschereau Brossard J4Z 1A7	3260 \$
Innotag inc.	3125, Bernard Pilon Saint-Mathieu-de-Beloeil J3G 4S5	500 \$
Reynald Prince, arpenteur géomètre	51, rue Bon-Air, C.P. 399 Saint-Léonard d'Aston J0C 1M0	5000 \$
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)	460, boul. Louis-Fréchette Nicolet J3T 1Y2	3750 \$
Ente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agroalimentaire	Rémi Asselin Représentant régional 460, boul. Louis-Fréchette Nicolet J3T 1Y2	9120 \$

## PRINCIPAUX COLLABORATEURS

<b>Victor Savoie</b> , ingénieur et agronome (coresponsable)	MAPAQ 460, boul. Louis-Fréchette, 1 <sup>er</sup> étage Nicolet (Québec) J3T 1Y2 Tél. : 819-293-8255
<b>Marcel Lavoie</b> , agronome	MAPAQ BRA de Drummondville 380, boul. St-Joseph Ouest, C.P. 68 Drummondville (Québec) J2B 6V6 Tél. : 819-475-8403
<b>Gilles Leblanc</b> , d.t.a.	MAPAQ BRA de Drummondville 380, boul. St-Joseph Ouest, C.P. 68 Drummondville (Québec) J2B 6V6 Tél. : 819-475-8403
<b>Nicol Lemieux</b> , agronome	MAPAQ 460, boul. Louis-Fréchette, 1 <sup>er</sup> étage Nicolet (Québec) J3T 1Y2 Tél. : 819-293-8255
<b>Denis Ruel</b> , agronome	MAPAQ 460, boul. Louis-Fréchette, 1 <sup>er</sup> étage Nicolet (Québec) J3T 1Y2 Tél. : 819-293-8255

## INTRODUCTION

Le projet avait pour but d'évaluer les techniques de géopositionnement appliqués à l'agriculture. De façon plus précise, les techniques suivantes ont été démontrées et évaluées.

- a) Utilisation du positionnement par satellite pour générer des cartes de teneur en éléments fertilisants des sols à partir d'un échantillonnage systématique géoréférencé.
- b) Évaluation de ces cartes de fertilité des sols comme outil de fertilisation à taux variable. Évaluation des applicateurs d'engrais à taux variable.
- c) Utilisation des capteurs de rendement et du géopositionnement par satellite pour générer des cartes de rendement.
- d) Évaluation de ces cartes de rendement comme outils de diagnostic en vue de l'amélioration de la productivité des champs.
- e) L'évaluation du système de positionnement par satellite haute précision comme outil de production de cartes de cotes de niveau en vue de l'aménagement (conformation) des champs.

## **Description et méthodologie du projet**

- Un champ de 5 à 10 ha a été identifié chez chacun des 4 agriculteurs participant au projet.
- Ces 4 champs ont été échantillonnés systématiquement aux printemps 1997 et 1998 à partir d'un grillage dont la maille était de 0,5 ha. Des cartes de distribution des divers résultats analytiques ont été produits pour chacune de ces deux années.
- Chez deux des quatre participants (ferme F. Proulx et ferme Val-des-Bois) une portion du champ a reçu une fertilisation phosphatée et potassique ajustée à la carte de fertilité du sol (fertilisation à taux variable). L'incidence de la fertilisation à taux variable sur le rendement a été évalué en comparant les cartes de rendement obtenues à partir de la fertilisation à taux variable et à taux uniforme.
- Des cartes de rendement ont été obtenues pour chacune des deux années. Elles ont été utilisées pour :
  - a) illustrer la variabilité du rendement;
  - b) mettre au point un système de diagnostic dans les zones de rendement basé sur l'échantillonnage des sols et l'examen d'un profil agropédologique dans deux zones de rendements contrastants relativement rapprochées;
  - c) évaluer l'impact des travaux d'amélioration de la conformation exécutés au cours de l'année 1997 sur les rendements obtenus en 1998.

- Des cartes de cotes de niveau ont été réalisées pour chacun des quatre champs par la méthode conventionnelle et à l'aide d'une station géoréférencée de précision. Les cartes obtenues ont été comparées afin d'évaluer la fiabilité et la précision de la cartographie par système de positionnement par satellite.

## **Résultats**

### **A) Échantillonnage systématique**

L'échantillonnage systématique, fait sur les mêmes champs deux années consécutives, a permis de recueillir les informations suivantes.

#### **a) Variabilité du pH et des éléments majeurs**

La teneur en éléments fertilisants majeurs (P, K, Ca, Mg) varie considérablement même dans des champs d'apparence relativement uniforme alors que les résultats du pH eau et pH tampon sont beaucoup moins variables. Le tableau 1 présente les résultats analytiques obtenus de l'échantillonnage du printemps 1997. Des résultats similaires ont été obtenus en 1998.

**Tableau 1 : Variabilité du pH eau et de la teneur en éléments fertilisants des champs (1997).**

	pH (eau)	P	K	Ca	Mg	Remarques
<b>Ferme Forcier (1997)</b>						
Min.	5,5	119	290	2056	331	
Max.	7,1	264	569	5153	936	
Moy.	6,2	179	372	3341	522	
Coeff. var. %	6,8	26	21	22	32	
n	20	20	20	20	20	Un sol d'apparence uniforme, de texture moyenne.
<b>Ferme Proulx (1997)</b>						
Min.	6,4	170	190	2000	120	
Max.	6,8	325	520	3500	290	
Moy.	6,6	236	334	2911	201	
Coeff. var. %	1,7	17	27	14	17	
n	27	27	27	27	27	Un champ d'apparence uniforme, de texture moyenne.
<b>Ferme Tourigny (1997)</b>						
Min.	6,4	106	337	3781	231	
Max.	7,1	189	642	6967	1131	
Moy.	6,7	142	478	5361	757	
Coeff. var. %	3,0	16	20	15	36	
n	24	23	23	23	23	Un champ légèrement vallonné, de texture moyenne.
<b>Ferme Val-des-Bois (1997)</b>						
Min.	6,0	50	65	900	90	
Max.	6,8	270	490	2700	680	
Moy.	6,3	150	202	1707	191	
Coeff. var. %	2,7	38	48	25	64	
n	28	28	28	28	28	Un sol sableux éolisé en certains endroits.

On y voit que les teneurs en phosphore varient environ du simple au double chez 3 des 4 fermes alors qu'une variation du simple au quintuple est observée sur les sols sableux éolisés de la ferme Val-des-Bois. L'amplitude de variation du potassium est, dans l'ensemble, légèrement plus grande que celle observée pour le phosphore. Le magnésium est l'élément majeur dont la teneur est la plus variable. Les résultats analytiques de l'échantillonnage 1998 (résultats disponibles sur demande) effectué sur les mêmes champs montre une amplitude de variation d'un ordre de grandeur légèrement supérieur. Là encore, la variabilité de la distribution augmente du phosphore au potassium pour être maximale pour le magnésium. La comparaison des résultats analytiques des années 1997 et 1998 (tableau 2) élargit encore un peu l'étendue de la variabilité des teneurs en éléments fertilisants du champ. La forte augmentation des teneurs en K, Ca et Mg observée à la ferme Forcier entre 1997 et 1998 résulte de l'apport d'amendements. Les autres champs montrent une variation annuelle prévisible étant donné la variabilité spatiale de la teneur en éléments fertilisants du sol. Il est en effet probable que la variabilité d'une année à l'autre provienne de la localisation des sites d'échantillonnage qui n'est pas exactement la même d'une année à l'autre.

**Tableau 2 : Variabilité de la teneur en éléments fertilisants des champs échantillonnés deux années consécutives (kg/ha).**

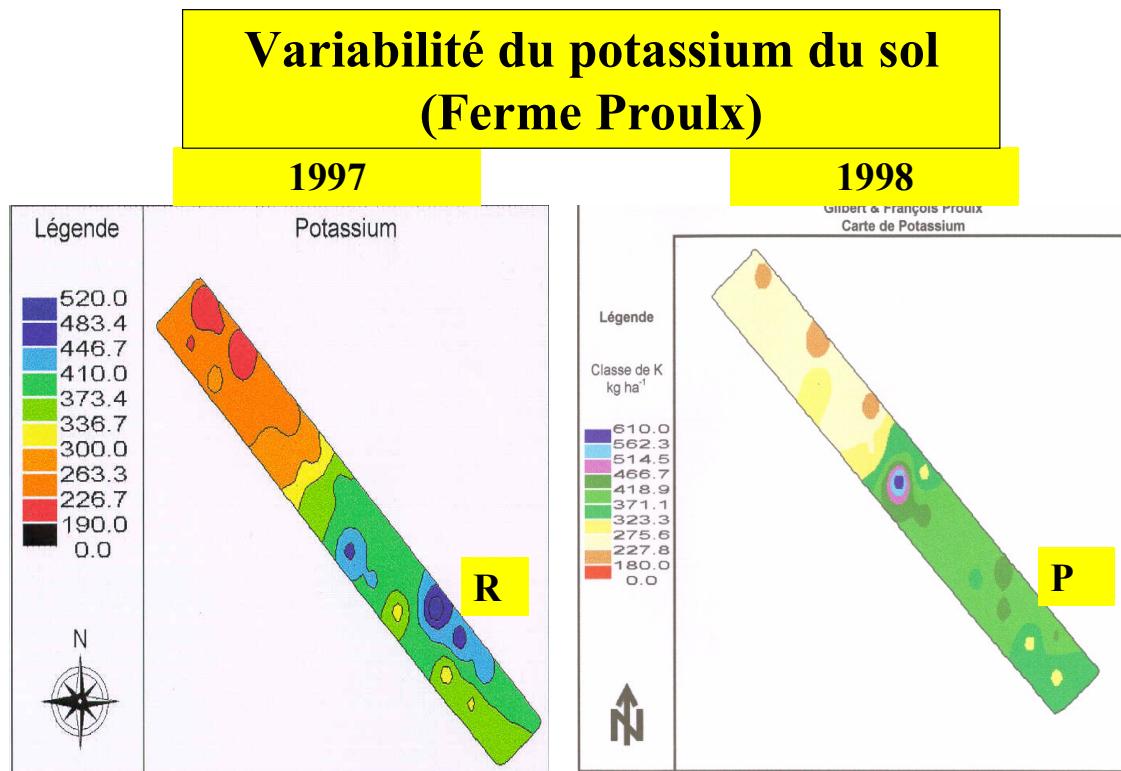
Phosphore			Potasse			Magnésium			Calcium		
Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
<b>Ferme Forcier</b>											
1997	119	264	179	290	569	372	331	936	522	2056	5153
1998	115	349	222	382	890	621	388	1681	694	4908	12 232
<b>Ferme Proulx</b>											
1997	170	325	236	190	520	334	120	290	201	2000	3500
1998	150	370	265	180	610	332	110	275	206	2100	4600
<b>Ferme Tourigny</b>											
1997	106	189	142	337	642	478	231	1131	757	3781	6967
1998	139	237	171	296	635	457	258	1160	743	3820	7759
<b>Ferme Val-des-Bois</b>											
1997	50	270	150	65	490	202	90	680	191	900	2700
1998	50	340	207	150	485	284	100	9458	238	1200	4200
2362											

En conclusion, il convient d'affirmer que la répétabilité des valeurs d'une année à l'autre est satisfaisante. Par contre, il demeure que la variabilité de la « fertilité » d'un même champ est très grande même si ceux-ci, à l'exception de la ferme Val-des-Bois, apparaissent relativement uniforme.

L'examen des résultats d'analyse d'un même élément sur un même champ révèle cependant une **variabilité de la représentation spatiale des zones de fertilité d'une année à l'autre**. Ainsi, par exemple, la carte de potassium de

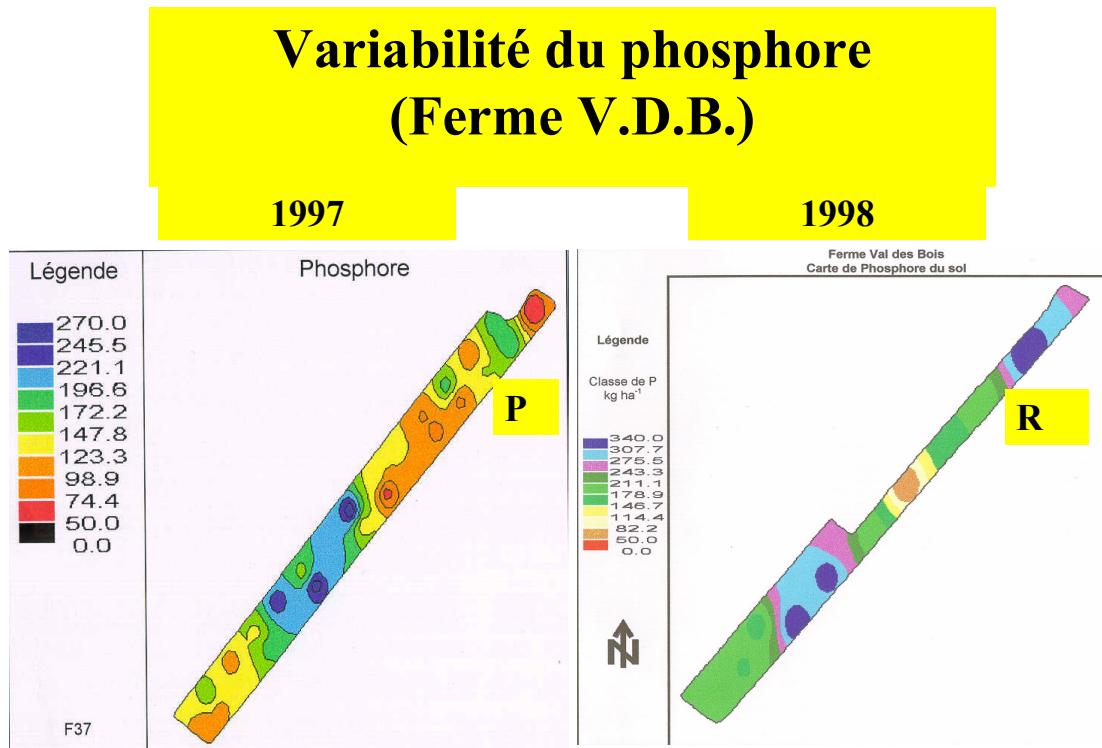
la ferme Proulx (figure 1) montre une zone riche en 1997 (R) alors que la carte de 1998 ne montre plus cette zone riche (P).

**Figure 1 :** Comparaison des cartes de teneur en potassium obtenues en 1997 et 1998 - (ferme Proulx).



Similairement, les cartes de phosphore de la ferme Val-des-Bois montre une zone très riche en P en 1998 (R<sup>+</sup>) alors que celle-ci n'est pas évidente en 1997 (P). (Figure 2).

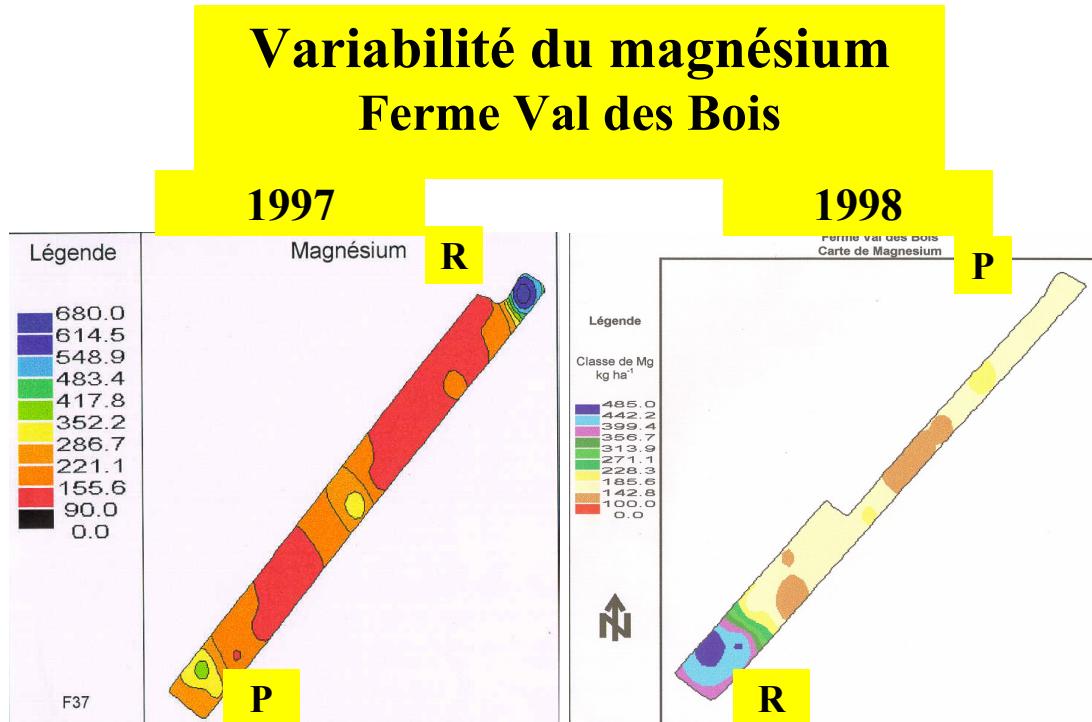
**Figure 2 :** Comparaison des cartes de teneur en phosphore obtenues en 1997 et 1998 - (ferme Val-des-Bois).



Cette apparente variabilité dans le temps semble plutôt le fait d'une grande variabilité spatiale. Ainsi un échantillon pris une année dans un endroit donné donnera parfois un résultat différent s'il est prélevé quelques mètres plus loin l'année suivante dans un champ où la variabilité est très grande. On est donc en droit de s'interroger sur la représentativité des cartes de fertilité lorsque ce phénomène se reproduit régulièrement. Dans le cas des 4 champs étudiés ici, les cartes de teneurs en éléments P, K, Ca et Mg ont été assez semblables d'une année à l'autre avec cependant des exceptions dont certaines sont

illustrées ici. Il est clair que pour une même densité d'échantillonnage, les risques d'observer une variabilité d'une année à l'autre augmentent avec la variabilité spatiale de cet élément, laquelle peut être évaluée via les coefficients de variation des résultats analytiques présentés au tableau 1. Comme on est en droit de s'y attendre, ces coefficients sont plus élevés à la ferme Val-des-Bois puisqu'il s'agit ici de sols sableux éolisés par endroits. Toute chose étant égale, le magnésium varie un peu plus fortement que les autres éléments. Les résultats analytiques montrent un très fort coefficient de variation de 64 % (tableau 1). Cette très grande variabilité sur le terrain s'est reflétée sur les cartes de magnésium des années 1997 et 1998 qui montrent des différences substantielles dont les deux plus évidentes sont situées aux extrémités du champ et ont été identifiées à la figure 3 par les symboles R (plus riche) et P (plus pauvre).

**Figure 3 :** Comparaison des cartes de teneur en magnésium obtenues en 1997 et 1998 - (ferme Val-des-Bois).



Il nous semble donc que la fiabilité des cartes d'analyse du sol ne soit pas toujours assez grande pour valider la technique d'application à taux variable, d'autant plus que les cartes obtenues dans le présent projet ont été produites à partir d'une densité d'échantillonnage (1 éch./acre) qui est deux fois plus élevée que celle qui est normalement offerte dans le commerce (1 éch./ha). Il va sans dire que l'échantillonnage à une densité encore plus faible aurait moins bien reflété la variabilité du champ et se serait donc traduit par une fiabilité encore moins grande. Néanmoins, l'échantillonnage systématique

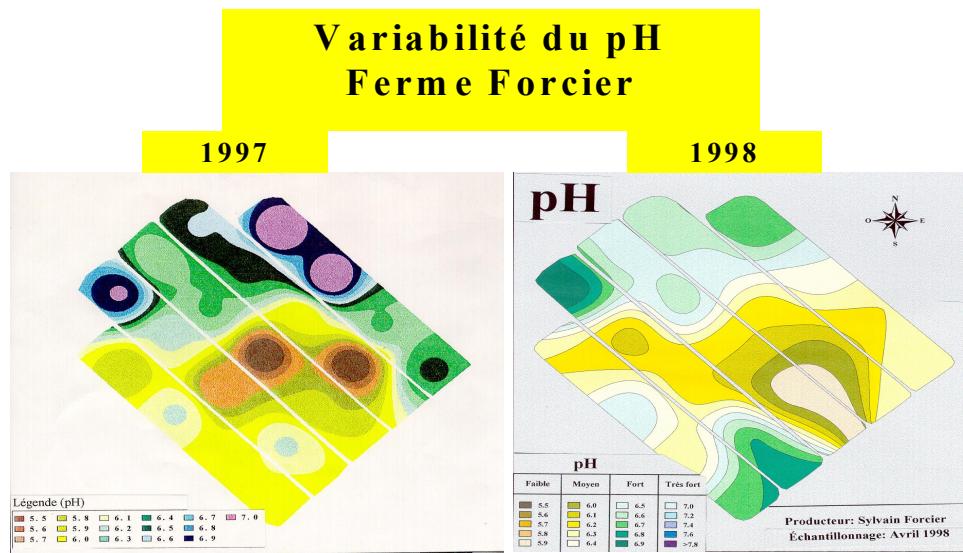
renseigne sur la variabilité des teneurs en éléments fertilisants sans pour autant en donner une représentation spatiale totalement fiable. La fertilisation à taux variable n'apparaît donc pas comme une alternative à prioriser pour le moment du moins, d'autant plus que les applicateurs à taux variables sont encore à l'état de développement. Elle aurait, par contre, l'avantage d'éviter la sous-fertilisation et la surfertilisation et les impacts négatifs qui en découlent respectivement sur la rentabilité et l'environnement. Cette technique demeure, cependant, tributaire de la fiabilité des cartes de fertilité.

Il convient cependant d'examiner la fiabilité des cartes de pH puisque les applicateurs de chaux à taux variable sont maintenant largement disponibles dans plusieurs régions du Québec. On verra tout de suite que le pronostic est beaucoup meilleur comme l'indique le très faible coefficient de variation des valeurs de pH issues d'un même champ (tableau 3). Cette faible variabilité se reflète dans la relative similitude des cartes de pH obtenues en 1998 et 1999 (figures 4 et 5). Les valeurs de pH tampon, sur lesquelles sont basées les taux d'application de la chaux, présentent, elles aussi, un faible coefficient de variabilité. Nous présentons ici (tableau 3), les valeurs obtenues en 1997 et 1998.

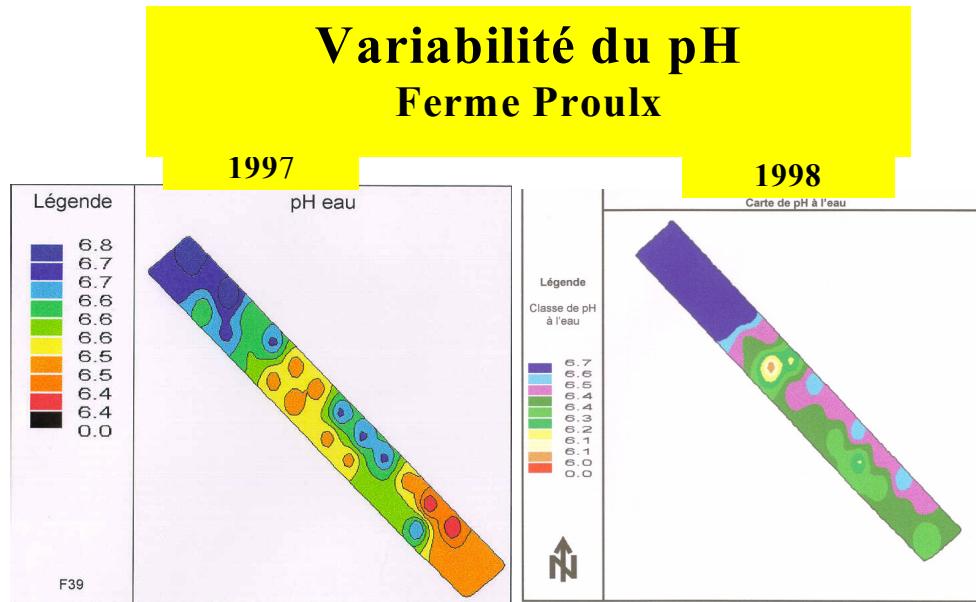
**Tableau 3 : Variabilité des valeurs de pH (eau) et pH (tampon) obtenues en 1997 et 1998.**

	<b>pH EAU</b>		<b>pH TAMPON</b>	
	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>
<b>Ferme Forcier</b>				
Min.	5,5	5,8	6,0	6,3
Max.	7,1	7,0	7,1	7,3
Moy.	6,2	6,4	6,7	6,8
Coeff. var. %	6,8	5,1	4,6	5,4
n	20	20	17	20
<b>Ferme Proulx</b>				
Min.	6,4	6,0	6,7	6,5
Max.	6,8	6,7	7,1	7,1
Moy.	6,6	6,5	6,9	6,8
Coeff. var. %	1,7	2,9	1,9	2,3
n	27	24	27	24
<b>Ferme Tourigny</b>				
Min.	6,4	6,4	6,6	6,5
Max.	7,1	7,1	7,0	7,3
Moy.	6,7	6,8	6,8	7,2
Coeff. var. %	3,0	2,8	2,2	4,3
n	24	24	9	24
<b>Ferme Val-des-Bois</b>				
Min.	6,0	5,9	6,3	6,3
Max.	6,8	6,5	7,1	6,8
Moy.	6,3	6,2	6,7	6,6
Coeff. var. %	2,7	2,7	2,8	2,4
n	28	21	28	21

**Figure 4 :** Comparaison des cartes de pH (eau) obtenues en 1997 et 1998 (ferme Forcier).



**Figure 5 :** Comparaison des cartes de pH (eau) obtenues en 1997 et 1998 (ferme Proulx).



b) **Variabilité des éléments mineurs**

Nous avons constaté que les teneurs en oligoéléments sont encore plus variables que celles des éléments majeurs. Le manganèse et le bore nous sont apparus particulièrement variables même dans les champs visuellement uniformes (tableau 4).

**Tableau 4 : Variabilité de la teneur en oligoéléments.**

	Zn	Cu	B	Mn
<b>Ferme Forcier 1998 (ppm)</b>				
Min.	2,5 <sup>(1)</sup>	3,7 <sup>(1)</sup>	0,26	5,5
Max.	34,7 <sup>(2)</sup>	57,0 <sup>(2)</sup>	0,70	15,9
Moy.	7,35	12,5	0,40	8,1
Coeff. var. %	101 <sup>(3)</sup>	94 <sup>(3)</sup>	28	33
n	20	20	20	20
<b>Ferme Proulx 1998 (ppm)</b>				
Min.	0,8	1,2	0,1	8
Max.	1,6	2,6	1,3	18
Moy.	1,1	2,0	0,5	12
Coeff. var. %	23	18	66	25
n	24	24	24	24
<b>Ferme Tourigny 1998 (ppm)</b>				
Min.	2,5 <sup>(1)</sup>	1,7	0,24	5,3
Max.	5,9	16,0 <sup>(2)</sup>	1,06	25,5
Moy.	3,2	3,8	0,5	14,7
Coeff. var. %	40	75 <sup>(3)</sup>	36	39
n	6	24	24	24
<b>Ferme Val-des-Bois 1998 (ppm)</b>				
Min.	0,9	0,5	0,1	9
Max.	2,6	2,8	0,8	66
Moy.	1,7	1,3	0,3	21,6
Coeff. var. %	29	43	79	66
n	21	21	21	21

<sup>(1)</sup> Valeur minimale anormalement élevée (seuil et détection à l'analyse ??).

<sup>(2)</sup> Valeur maximale anormalement élevée.

<sup>(3)</sup> Valeur excessivement élevée.

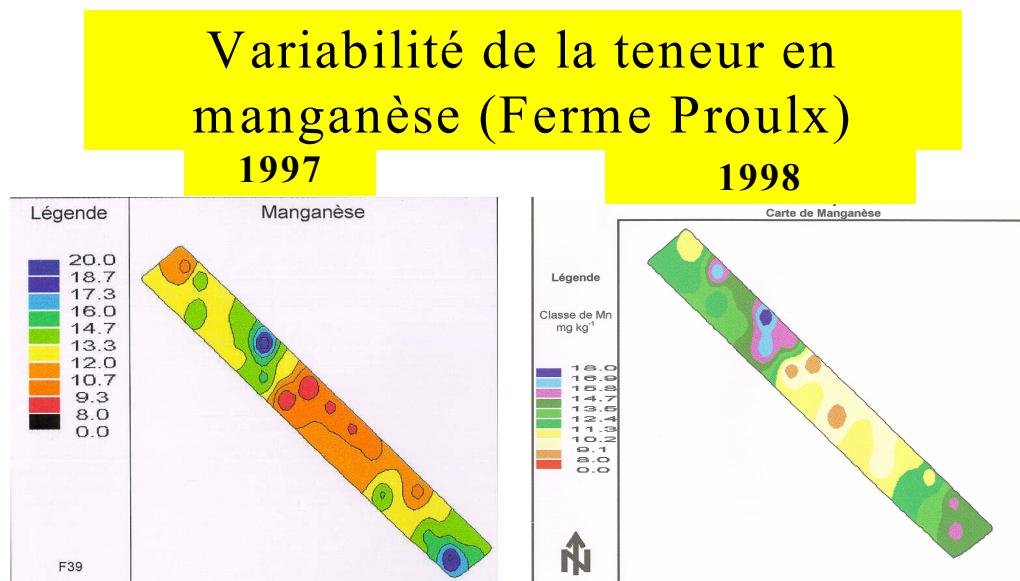
Les valeurs minimales en zinc aux fermes Forcier et Tourigny sont particulièrement élevées. Après renseignements pris auprès du laboratoire, cet état de fait serait attribuable au manque de sensibilité de l'appareil de détection (seuil trop élevé). La teneur maximale en zinc rapportée à ferme Forcier (34,7 ppm) est très, sinon excessivement élevée.

La variabilité de la teneur en manganèse des 4 champs est très grande. Ainsi, à titre d'exemple, chacun des 4 champs présente des zones où la teneur en se traduirait par une culture de céréales à paille carencée en manganèse alors que la valeur moyenne du champ est adéquate (12 ppm) à l'exception du champ Forcier où cette moyenne est trop faible (8,1 ppm). **Ici, encore, même si la fiabilité des cartes de teneur peut parfois être mise en doute, il demeure que l'échantillonnage systématique renseigne sur la présence de zones à faible teneur.** Ici, encore, nous utiliserons la répétabilité des cartes d'une année à l'autre comme indice de fiabilité.

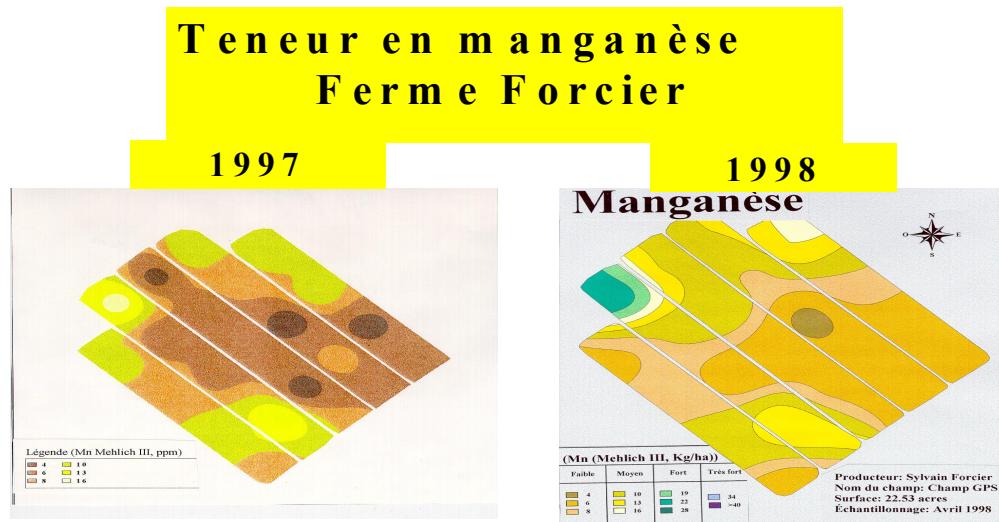
Les cartes des teneurs en manganèse de la ferme Proulx montrent une répétabilité acceptable entre les années 1997 et 1998 (figure 6). Il en est de même pour la ferme Forcier (figure 7). Par contre, à la ferme Val-des-Bois, où le coefficient de variation (tableau 3) est très élevé, la répétabilité (fiabilité) est beaucoup moins bonne (figure 8). Ainsi, la zone sud-ouest apparaît relativement pauvre (P) en 1997 et riche en 1998. Similairement, une zone au nord-est apparaît riche (R) en 1997 et pauvre (P) en 1998. Il semble donc

raisonnable d'établir un lien entre le coefficient de variation et la fiabilité qui devrait se traduire par une répétabilité au fil des ans.

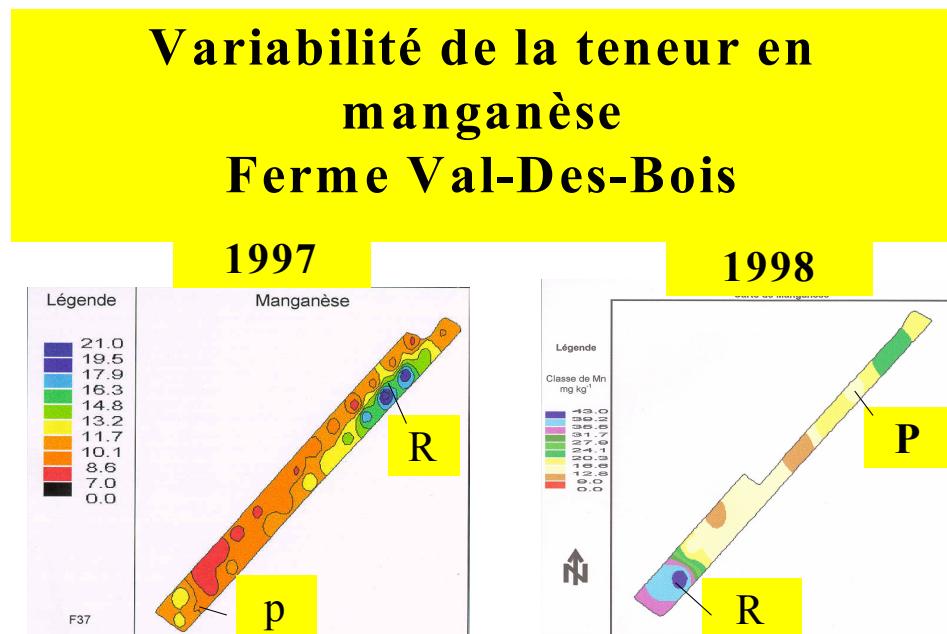
**Figure 6 :** Comparaison des cartes de teneur en manganèse obtenues en 1997 et 1998 à la ferme Proulx.



**Figure 7 :** Comparaison des cartes de teneur en manganèse obtenues en 1997 et 1998 à la ferme Forcier.



**Figure 8 :** Comparaison des cartes de teneur en manganèse obtenues en 1997 et 1998 à la ferme Val des bois.



c) **Conclusion partielle (échantillonnage systématique)**

Malgré le fait que l'échantillonnage ait été réalisé à une densité environ deux fois plus élevée que celle qui est généralement offerte commercialement (1 éch./acre vs 1 éch./ha), il semble que la variabilité de certains éléments ait été plus grande que la maille d'échantillonnage. Il en est parfois résulté des cartes dont la fiabilité peut être mise en doute telle qu'illustrée par la variabilité d'une année à l'autre. Le coefficient de variation des résultats d'analyses d'un même champ nous semble un bon indicateur de la fiabilité de la carte puisque des coefficients élevés (>25 %) résultent en des cartes qui comportent une ou plusieurs zones qui dont la teneur en un élément diffère d'une année à l'autre. Comme il fallait s'y attendre cette variabilité fut en général plus grande au site où les sols sableux étaient éolisés par endroits.

Malgré ces lacunes, l'échantillonnage systématique renseigne sur la variabilité d'un champ en regard de tel ou tel élément à défaut de localiser tout à fait fiablement la distribution géographique des teneurs en cet élément.

## B) Les cartes de rendement

### a) Objectifs

Le volet « cartes de rendement » comportait de multiples objectifs dont les principaux étaient :

- faire connaître cette nouvelle technologie en région;
- déceler les difficultés d'adaptation à ces équipements sophistiqués;
- évaluer les cartes de rendement comme outils de base pour illustrer la variabilité spatiale des rendements;
- évaluer les cartes de rendement comme outil d'amélioration de la productivité des champs. Cet objectif a été atteint via le diagnostic des zones à mauvais rendement en effectuant la caractérisation du profil de sol et l'analyse chimique du sol des deux zones.

### b) Quelques résultats

Nous avons constaté que les cartes de rendement s'obtiennent moyennement un investissement d'environ 13 000 \$ pour les capteurs de rendement, les systèmes de positionnement par satellite et les logiciels afférents. Cet investissement représente environ 5 % du coût d'acquisition d'une moissonneuse-batteuse neuve. Lorsque le battage est effectué à forfait, les

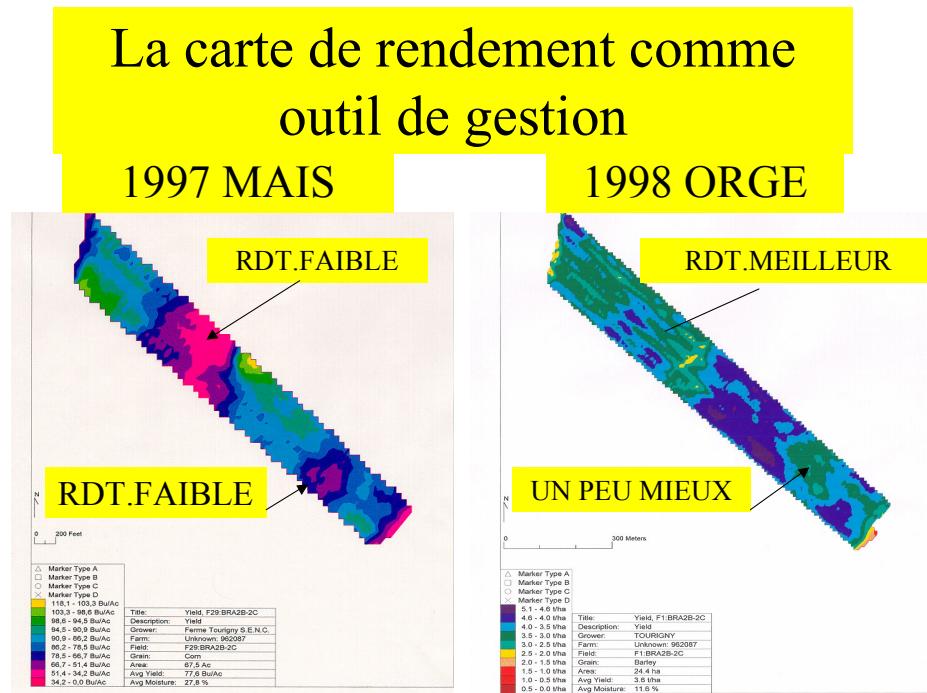
cartes de rendement peuvent généralement être obtenues pour 10 \$/ha et parfois moins lorsque ce service est utilisé comme outil de promotion par le contracteur. Nous avons constaté que ces équipements doivent être installés et calibrés par les fournisseurs et qu'un suivi technique doit être assuré par la suite tant pour les équipements proprement dits que pour les logiciels. Cet aspect nous apparaît primordial. L'utilisation de ces équipements exige un niveau de connaissance relativement élevé et une attention soutenue. Des données importantes ont été perdues ou rendues inutilisables à quelques occasions lors du déroulement du projet.

### 1. Visualisation des rendements

Les cartes de rendement se sont avérées des documents très utiles puisqu'elles permettent de visualiser de façon permanente la variabilité des rendements d'une culture que l'aspect visuel du champ ne laisse pas soupçonner.

Elles servent donc à illustrer l'étendue d'une zone à faible rendement et l'ampleur du déficit de rendement ce qui permet d'évaluer le manque à gagner d'un secteur à faible rendement. La carte de l'année subséquente permettra par la suite d'évaluer l'impact des travaux correctifs entrepris (figure 9).

**Figure 9 :** La carte de rendement comme outil de gestion - (ferme Tourigny).



Cet exemple illustre ce qui est, à notre avis, une des meilleures façons d'utiliser les cartes de rendement, soit :

- identification des zones problématiques;
- évaluation du coût économique en fonction de la superficie de ces zones et du déficit de rendement;
- évaluation du coût/bénéfice des mesures correctives via l'amélioration du rendement.

### C) Diagnostic dans les zones de rendement contrastant

L'amélioration d'une zone à faible rendement presuppose l'identification des causes du problème. Nous avons développé une technique qui peut se décrire comme étant un diagnostic dans des zones de rendements contrastants.

À l'aide de la carte de rendement, il s'agit de choisir deux zones rapprochées qui se distinguent par des rendements qui diffèrent de façon significative. Les coordonnées spatiales de ces deux zones sont retrouvées à l'écran et notées. Elles seront fournies au système de géopositionnement qui sera installé sur un tracteur ou sur un véhicule tout terrain de façon à pouvoir retrouver le centre des deux zones identifiées.

Le sol de chaque zone est échantillonné et analysé. Un profil agropédologique est effectué dans un endroit jugé représentatif de chaque zone. Une observation attentive de la morphologie du profil est effectuée de façon à identifier tout facteur pouvant influer sur le régime hydrique du sol, notamment, la texture et le taux de matière organique, la compaction (s'il y a lieu), la couleur des horizons qui traduit la qualité du drainage interne et finalement la hauteur de la nappe phréatique (s'il y a lieu). Toute différence agronomique apparente sera aussi notée, notamment la qualité du semis et du désherbage, la population, etc.

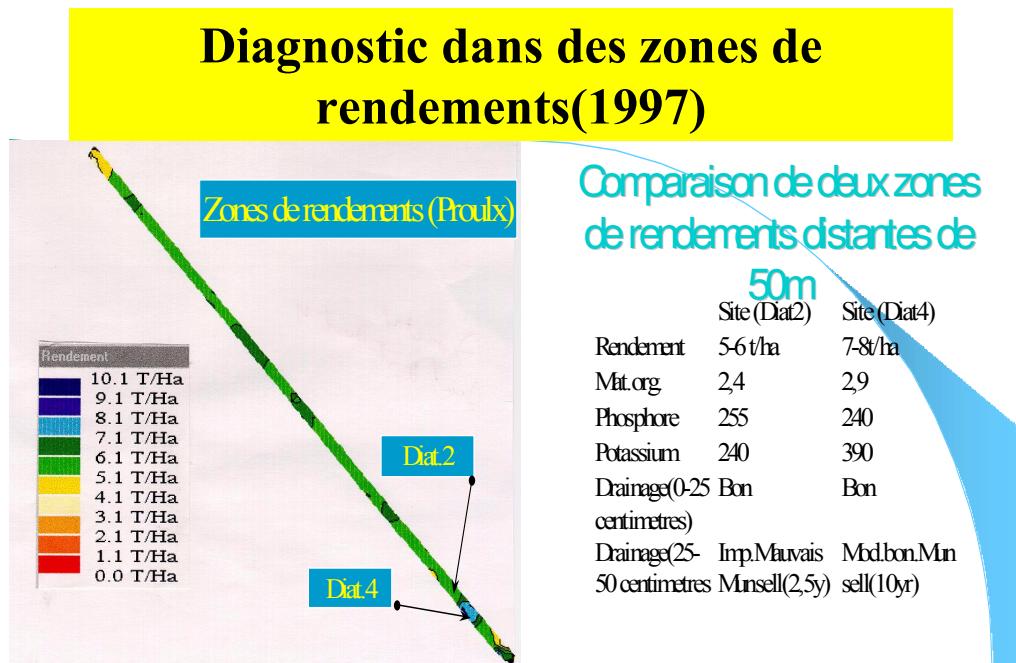
Ces observations incluant les résultats analytiques sont comparés afin d'identifier les différences.

Au cours des 2 années du projet, nous avons effectué ces diagnostics à au moins 4 endroits par champ. Dans plus de 75 % des cas, les différences de rendement pouvaient être attribuées à des régimes hydriques de qualité différente, notamment aux causes suivantes.

- Un drainage imparfait caractérisé par un sous-sol de couleur plus grisâtre ou plus bleuté que l'horizon correspondant de la zone à haut rendement.
- Un sol moins bien drainé en surface en raison d'une position topographique moins favorable (dépression, pied de pente, etc.) ou encore en raison d'une zone moins perméable (compactée) sous la couche de labour.
- Un ou plusieurs horizons de texture plus grossière et offrant en conséquence une moins grande réserve en eau utile.
- Un enracinement plus superficiel (plusieurs raisons possibles).

Nous rapporterons là un exemple typique de la majorité des observations (figure 10).

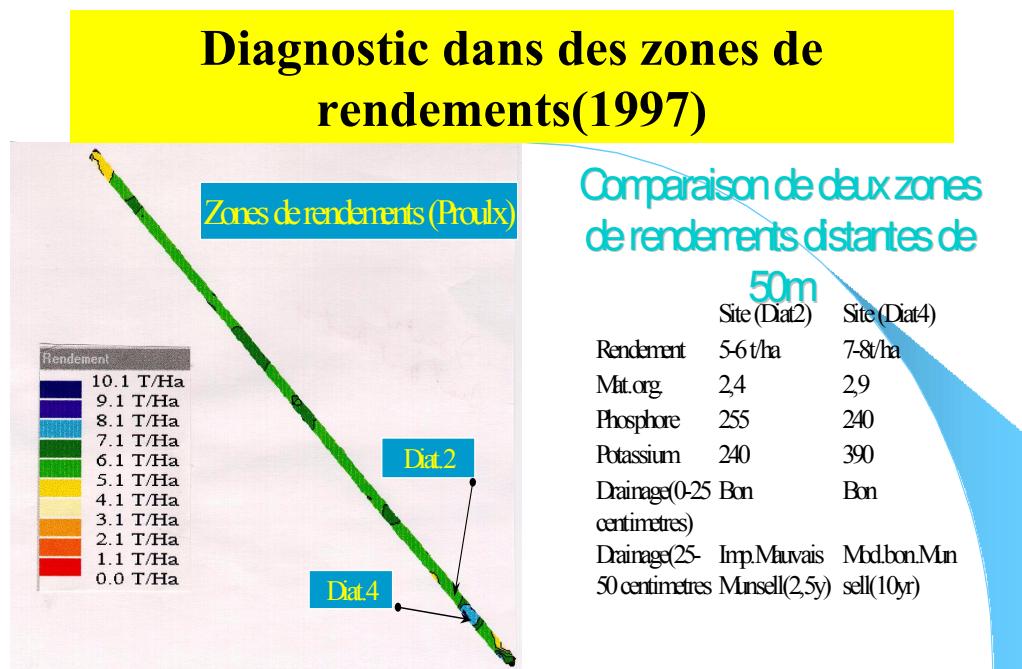
**Figure 10 :** Diagnostic dans des zones de rendement contrastants - (ferme Proulx, 1997).



On y observe qu'une différence de rendement d'environ 2 t/ha ne s'explique pas par la richesse du sol en éléments fertilisants mais plutôt par la qualité du drainage à 50 cm sous la surface qui est modérément bon dans la zone à rendement élevé et imparfait à mauvais dans la zone de rendement plus faible.

Similairement, le diagnostic fait à la ferme Tourigny en 1998 a clairement montré que le rendement n'était pas lié à la fertilité du sol mais à ses caractéristiques physiques. (Tableau 5 et figure 11).

**Figure 11 :** Diagnostic dans des zones de rendement contrastants - (ferme Tourigny, 1998).



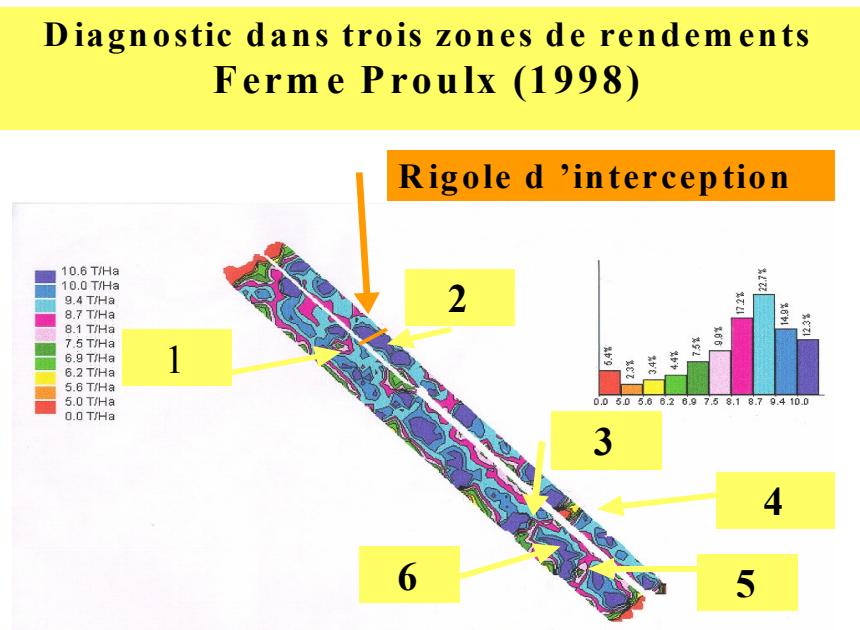
**Tableau 5 :** Caractérisation de zones de rendement de deux paires de diagnostic (zones 1 et 2) (3 et 4).

	Rdt t/ha*	pH	P	K	Mg	Remarques
<b>Zone 1</b>	3,0 - 3,5 (M)	6,1	239	658	724	Sol compact, dur.
<b>Zone 2</b>	4,6 - 5,1 (TB)	6,2	168	545	1060	Très bonne structure en surface.
<b>Zone 3</b>	4,0 - 4,6 (TB)	6,5	176	369	385	Belle structure en A et B.
<b>Zone 4</b>	3,0 - 3,5 (M)	6,1	225	474	760	Compact, dur et grisâtre dès la surface.

\* Selon la carte.

À la ferme Proulx, nous avons effectué 3 paires de sites diagnostiques en 1998 (figure 12).

**Figure 12 :** Diagnostic dans 3 zones de rendements contrastants (ferme Proulx, 1998).



Comme à l'habitude chaque paire de diagnostic était constituée de 2 zones à la fois rapprochées mais de rendement différent. On verra au tableau 6 les rendements et les teneurs en éléments fertilisants de chaque zone.

**Tableau 6 : Les rendements et les teneurs en éléments fertilisants de chaque zone (ferme Proulx 1998).**

	Rdt t/ha*	pH	P	K	Mg	Remarques
<b>Zone 1</b>	6,9 - 7,5 (M)	6,8	290	340	300	Un peu humide en surface.
<b>Zone 2</b>	10,6 (TB)	6,8	180	150	230	Plus sec; près d'une rigole d'interception.
<b>Zone 3</b>	10,6 (TB)	6,3	130	250	160	Près d'une rigole d'interception.
<b>Zone 4</b>	5,6 - 6,2 (P)	6,1	165	310	170	Zone légèrement dépressionnaire.
<b>Zone 5</b>	6,9 - 7,5 (M)	6,4	205	225	160	Loam sableux à drainage modérément bon.
<b>Zone 6</b>	10,6 (TB)	6,8	215	250	155	Loam sableux à drainage imparfait sous la couche de labour.

Ici encore la teneur en éléments fertilisants n'est pas reliée au rendement. Au contraire, les zones à rendement élevé ont une teneur égale ou inférieure à celles des zones à bas rendement. Cette situation se rencontre aussi à la ferme Tourigny. Cette apparente contradiction, n'en est pas une, puisqu'en les champs sont uniformément fertilisés alors que les exportations d'éléments sont moindres dans les zones à faible rendement. Il en résulte une accumulation plus rapide des éléments fertilisants résiduels dans le sol de ces zones à faible rendement.

On voit ici toute l'incidence des caractéristiques physiques du sol et son régime hydrique en particulier sur le développement des cultures. On comprendra mieux maintenant pourquoi on essayera souvent en vain d'améliorer les rendements via la fertilisation à taux variable si cette technique précède l'amélioration du régime hydrique des sols.

#### D) La fertilisation à taux variable

La fertilisation à taux variable consiste à moduler les apports d'éléments fertilisants en fonction des teneurs révélées par l'échantillonnage systématique. Nous avons évalué cette technique aux sites Proulx (sol uniforme) et Val-des-Bois (sol éolisé) pour les éléments phosphore et potasse. Nous rapporterons ici la démarche et les résultats obtenus à la ferme Val-des-Bois en 1998.

L'application à taux variable (ATV) s'est effectuée sur une lisière d'une largeur de 30 rangs de maïs et couvrant une superficie de 0,5 ha. Une lisière contiguë de même superficie fertilisée uniformément selon l'analyse moyenne du champ a été utilisée comme témoin. Ces deux parcelles n'ont pas reçu de fumier ou lisier à l'automne 1997 ou au printemps 1998.

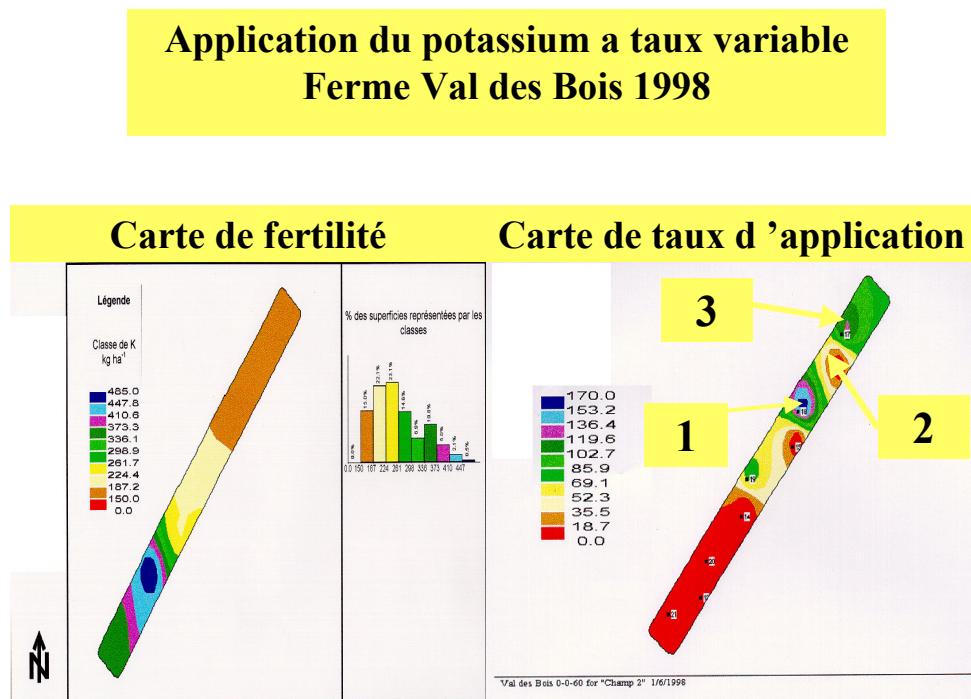
Elles ont été fertilisées de façon selon les informations fournies au tableau 7.

**Tableau 7 : Fertilisation des parcelles d'application à taux variable (A.T.V.).**

	N Total	P en bandes	P Volée	K Volée
Parcelle témoin	155	25	15	76
Parcelle A.T.V.	155	25	(Variable)	Variable

L'application à taux variable du P et K s'est faite en deux passages au stade 6-8 feuilles. La figure 13 illustre la carte de fertilité de l'élément potassium comportant un lissage des données résultant d'une interpolation des résultats analytiques géoréférencées. C'est la « carte de fertilité » remise au client. À droite de celle-ci, apparaît la carte des taux d'application qui est davantage basée sur le résultat analytique de chaque point d'échantillonnage. Par exemple, le tiers nord-est de la carte de fertilité montre une zone relativement pauvre en potasse. Par contre, la carte des taux d'application discrimine davantage puisque le taux d'application sera élevée dans le secteur 1, à peu près nul au secteur 2 et moyen au secteur 3 de cette même portion nord-est (voir flèches). L'application peut donc être plus précise que ne l'indique la carte de fertilité. La représentativité spatiale d'un échantillon donné et donc la fertilisation qui en découle n'est pas pour autant assurée. Le rendement parcellé fertilisé à taux variable fut de 9,42 t/ha, alors que celui de la parcelle témoin fut de 9,16 t/ha. À l'évidence, cette différence n'est pas significative, compte tenu de l'absence de répétition et compte tenu aussi de l'imprécision des rendements obtenus de la batteuse géopositionnée.

**Figure 13 :** Application du potassium à taux variable - ferme Val-des-Bois, 1998.



Dans l'ensemble, nous n'avons pas obtenu de rendements différents dans les 4 essais effectués au cours du projet (2 sites x 2 années). Le volet diagnostic dans les zones de rendements contrastants a d'ailleurs montré le peu d'incidence de la teneur en éléments fertilisants sur le rendement. Force est de constater cependant que l'application à taux variable tendrait à la longue à uniformiser un champ pourvu que la « carte de fertilité » reflète bien la réalité du champ. Nous avons vu au chapitre précédent que ceci peut être mis en doute, particulièrement lorsque la variabilité, telles qu'indiquées par le coefficient de variation des résultats analytiques d'un élément est grande ( $\geq 20-25\%$ ). Nous avions vu qu'alors, la répétabilité d'une carte d'un élément d'une année à l'autre n'était pas très bonne.

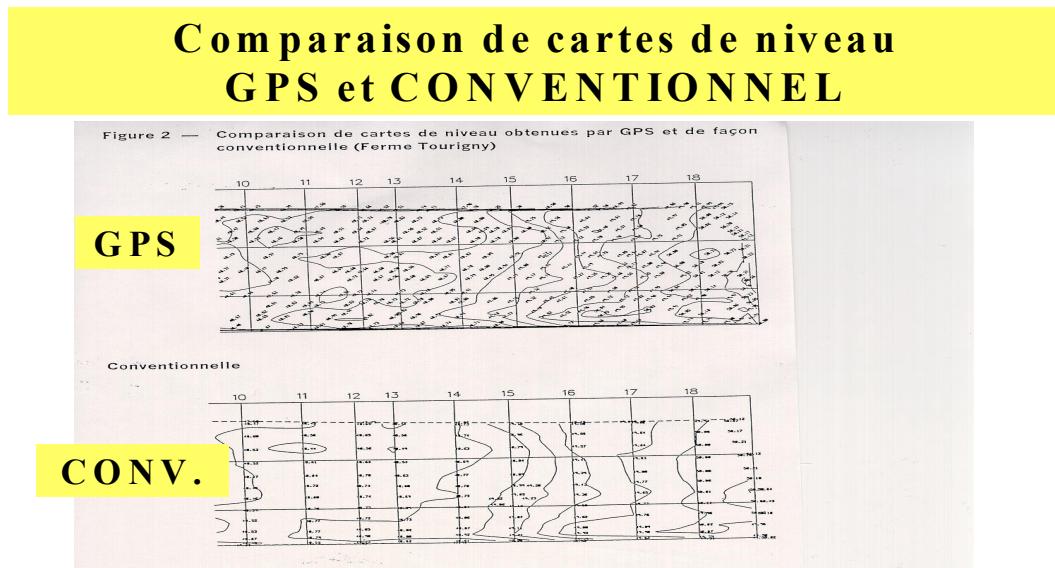
Nous croyons, cependant, qu'une « carte de fertilité » constituée à partir d'un échantillonnage dirigé et non systématique pourrait servir de base à la fertilisation à taux variable. Un échantillonnage dirigé consiste à échantillonner des modèles de terrain facilement reconnaissables (buttes, bas-fonds, etc.) de géoréférencer ces échantillons et ainsi constituer un outil plus valable pour l'application à taux variable. Il n'y aurait, cependant, pas d'assurance que des zones visuellement uniformes présentent peu de variabilité dans les teneurs en éléments fertilisants.

L'uniformisation des réserves du sol en éléments fertilisants est souhaitable en soi. Il faut, cependant, se garder de penser que ceci amène une amélioration des rendements puisque sous nos conditions, les régimes hydriques du sol et ses caractéristiques physiques nous sont apparus déterminants suite aux travaux réalisés au volet « diagnostic dans les zones de rendement contrastants ». Une application à taux variable offre cependant les avantages environnementaux puisqu'elle évite les zones de surfertilisation pourvu toutefois que la fiabilité de la carte le permette.

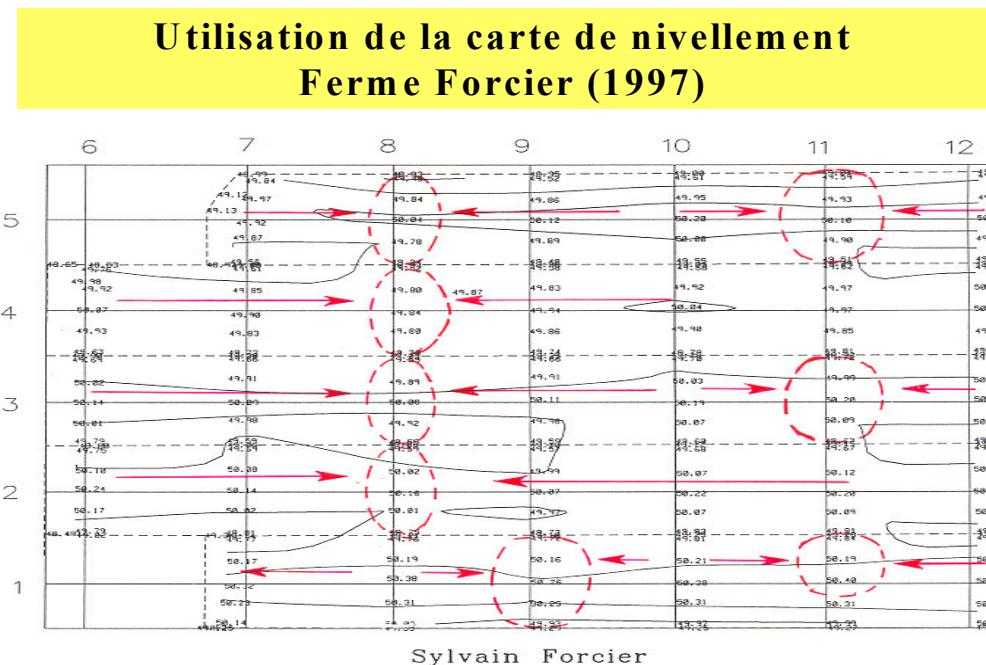
## E) Utilisation des cartes de niveau pour l'aménagement des champs

Au cours de la première année du projet, nous avons comparé les cartes de niveau produites par arpентage conventionnel avec celles obtenues par la technologie du positionnement (figure 14). La comparaison des deux cartes a clairement montré que cette nouvelle technologie produit des cartes précises et fiables. Les équipements requis se vendaient alors à un prix prohibitif (environ 70 000 \$) ce qui retarde l'adoption de ce système, bien que les prix de ces équipements soient actuellement en baisse. On verra à la figure 15 une portion d'une carte nivellation sur laquelle la direction des pentes est indiquées par les flèches et les zones d'accumulation ou replats sont indiqués par des cercles pointillés. Les cartes de niveau permettent de localiser ces très faibles dépressions peu ou pas visibles à l'œil mais qui souvent accumulent suffisamment d'eau pour nuire au rendement. La technologie du positionnement permet d'entrevoir le jour où ces cartes seront générées à bon compte à partir de senseurs installés sur les équipements aratoires.

**Figure 14 :** Comparaison des cartes de niveau GPS et conventionnel.



**Figure 15 :** Utilisation de la carte de nivellation - (ferme Forcier, 1997).



## F) Conclusion

Les résultats des deux années montrent la très grande variabilité de la teneur en éléments fertilisants majeurs même dans les champs qui, visiblement, apparaissent relativement uniforme.

Les résultats des deux années montrent que l'échantillonnage systématique des sols, à une densité de 1 éch./0,5 ha, a produit des cartes qui illustrent la très grande variabilité de la teneur des sols en éléments fertilisants majeurs. Cette variabilité est grande, même dans les champs d'apparence uniforme. Comme prévu, elle est encore plus grande à la ferme Val-des-Bois où le sol sableux comportait des zones éolisées. Le coefficient de variation des résultats analytiques annuels témoignent de cette grande variabilité. Nous avons constaté que celui-ci variait de 26 à 38 % pour le phosphore, de 21 à 48 % pour le potassium et de 27 à 64 % pour le magnésium. Nous avons aussi constaté que le coefficient de variation d'un élément était élevé, moins bonne était la répétabilité des cartes d'une année à l'autre. Dans ce contexte, la répétabilité peut, jusqu'à un certain point du moins, être assimilée à la fiabilité de la carte.

Ainsi, pour les éléments à forte variabilité, nous avons observé l'apparition de zones riches dans une plage que l'année précédente était désignée pauvre ou à l'inverse, l'apparition d'une zone pauvre dans ce qui était l'année précédente un secteur cartographié riche. Il semble donc que dans certains cas, la variabilité spatiale de la teneur d'un élément soit plus grande que le pas d'échantillonnage. Ceci est d'autant

plus inquiétant que ces lacunes ont été observées avec une densité d'échantillonnage (1 éch./0,5 ha) qui double celle qui est normalement offerte dans le commerce (1 éch./ha). **Il faut, cependant, se garder de généraliser à partir des 8 sites échantillons (4 sites x 2 ans) étudiés ici. Il convient, cependant, de garder ces observations en tête.**

Le pH a heureusement montré une variabilité beaucoup moins grande. Cela est heureux puisque ceci cautionne le chaulage à taux variable qui s'effectue de plus en plus au Québec.

Les éléments mineurs, particulièrement le bore et le manganèse, montrent une variabilité spatiale encore plus grande que celle observée pour les éléments majeurs.

Malgré quelques lacunes, l'échantillonnage systématique renseigne sur la variabilité d'un champ en regard de tel ou tel élément, à défaut de localiser très fiablement la distribution spatiale de la teneur de cet élément.

Les cartes de rendement se sont avérées des documents très utiles qui illustrent d'une façon permanente la variabilité des rendements d'un champ. Cette permanence offre un net avantage par rapport aux impressions fugaces obtenues au moment de la récolte. L'obtention d'une carte fiable se fait au prix d'une mise au point et d'une calibration des capteurs et des outils de géopositionnement. Un service après vente incluant un suivi au champ et une formation pratique sont

essentiels. Les cartes de rendement sont d'excellents outils de gestion puisqu'elles illustrent la variabilité du rendement et la superficie des zones à faible rendement. Elles permettent donc, dans un premier temps d'identifier les zones profitables de celles qui le sont moins. Les cartes de rendement permettent de visualiser le comportement des diverses parties de champ au fil des ans et des cultures pratiquées. Elles offrent surtout la possibilité d'évaluer l'impact des mesures correctives mises en place en vue d'améliorer un secteur à faible rendement.

Le projet nous a permis d'imaginer et de mettre au point la technique du diagnostic dans les zones de rendement contrastants. Cette technique consiste à choisir deux zones contiguës ou rapprochées qui diffèrent par des rendements contrastants. Dans chacune de ces zones, le sol est rééchantillonné et un profil agropédologique est effectué. Cette méthode, qui a l'avantage d'intégrer le comportement de la plante, a révélé que la grande majorité des différences de rendement résultait de régimes hydriques déficients sans que la teneur en éléments fertilisants ne soit habituellement en cause. Nous pensons que cette technique permet de valoriser la carte de rendement au point d'en faire un véritable outil de l'amélioration de la productivité des champs.

La fertilisation à taux variable a été testée à deux sites pour chacune des deux années. Dans tous les cas, nous n'avons pas observé de différence de rendement que nous pourrions qualifier de significative. Loin de nous surprendre, ces résultats comportent ceux obtenus au volet « diagnostic dans les zones de rendement contrastants ». Ils sont aussi tributaires de la fiabilité de la carte qui est acceptable

mais certainement pas totale comme le volet « échantillonnage systématique » l'a démontré.

La technologie des applicateurs à taux variable n'est pas non plus tout à fait au point puisque ceux-ci ne sont pas équipés pour appliquer plus d'un élément en un seul passage. Prenant pour acquis une fiabilité acceptable des « cartes de fertilité », l'application à taux variable aura pour avantage d'éviter les surfertilisations ou sous-fertilisations localisées et contribuera ainsi à la protection de l'environnement. L'augmentation du rendement n'est donc pas le seul barème qui doive présider à l'évaluation de cette technologie. La variabilité des données de pH étant beaucoup moindre, les cartes de pH tampon deviennent des outils intéressants qui permettent le chaulage à taux variable.

La technologie au positionnement par satellite permet de produire des cartes de niveau dont la précision et la fiabilité se comparent à celles produites par arpenteage conventionnel. Les équipements de haute précision requis sont, cependant, d'un coût prohibitif pour les firmes d'arpenteage engagées dans la confection de ces cartes.

Finalement, la technologie du géopositionnement nous semble en mesure d'amener une révolution de la production agricole en raison des possibilités de visualisation, de diagnostic et de suivi et d'évaluation qu'elle offre. Cette technologie est

suffisamment vulgarisée pour être à la portée de ceux et celles qui s'y intéressent et qui s'assurent d'un service après vente digne de ce nom.

*André Brunelle, agronome*

Conseiller régional en grandes cultures  
MAPAQ - Direction régionale du Centre-du-Québec

*Victor Savoie, ingénieur et agronome*

Bureau de renseignements agricoles  
MAPAQ - Nicolet

Nicolet, janvier 2000