

INRA

Institut National de la Recherche Agronomique
Unité Climat Sol et Environnement - Avignon



IUT Saint Jérôme
Département de chimie
Option productique

Etude de la variabilité spatiale de la teneur en azote nitrique de parcelles de blé dur.

Mickaël VANDROUX

Promotion 2001-2002

Responsable du stage INRA :
A.M. de COCKBORNE
Responsable du stage IUT :
J.P. GAÏA

2 avril-14 juin 2002

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier les équipes de l'unité climat, sol et environnement pour leur accueil et leur sympathie qui m'a permis de réaliser mon stage dans la bonne humeur. Je tiens à remercier tout particulièrement :

André CHANZY. Directeur de l'unité Climat, sol et environnement pour m'avoir permis de réaliser mon stage dans son service.

Anne-Marie de COCKBORNE. Ingénieur et maître de stage, pour son aide précieuse, ses conseils et sa disponibilité.

Jean-Pierre GAÏA. Professeur au département chimie de l'I.U.T St-Jérôme, pour avoir parrainé mon stage.

Ghislain SEVENIER. Technicien de recherche pour ses conseils en informatique, sa sympathie et pour les parties de pétanque.

Liste des tableaux et figures

1-) Liste des figures.

Figure 1 : Organisation de l'INRA.

Figure 2 : Les différentes phases du sol.

Figure 3 : Le cycle de l'azote.

Figure 4 : Plan de prélèvement des deux parcelles du site INRA.

Figure 5 : Parcelles agriculteurs profils des teneurs en azote nitrique.

Figure 6 : Parcelles INRA profils des humidités moyennes.

2-) Liste des tableaux.

Tableau 1 : Lieux des prélèvements des parcelles agriculteurs.

Tableau 2 : Moyenne des 13 contrôles.

Tableau 3 : Parcelles agriculteurs : teneur moyenne en azote nitrique.

Tableau 4 : Parcelles extérieurs : CV des teneurs en azote nitrique.

Tableau 5 : Parcelles agriculteurs : humidité pondérale par horizon.

Tableau 6 : Parcelles agriculteurs : CV de l'humidité pondérale.

Tableau 7 : Parcelles site : teneur moyenne en azote nitrique.

Tableau 8 : Parcelles site : CV des teneurs en azote nitrique.

Tableau 9 : Parcelles site : humidité pondérale par horizon.

Tableau 10 : Parcelles site : CV de l'humidité pondérale.

Tableau 11 : Estimation du nombre de prélèvement.

Sommaire

INTRODUCTION	3
CHAPITRE 1 : Présentation de l'INRA	4
CHAPITRE 2 : Rappels théoriques	7
1-) Le sol	7
2-) Définitions	7
2.1 Humidité pondérale par rapport au sol humide	7
2.2 Humidité pondérale par rapport au sol sec	8
2.3 Densité du sol	8
2.4 Densité apparente du sol	8
3-) Le cycle de l'azote	8
4-) Variabilité spatiale	9
CHAPITRE 3 : Matériels et méthodes	11
1-) Présentation du dispositif	11
1.1 Parcelles des agriculteurs	11
1.2 Parcelles domaine INRA	11
1.3 Prélèvement et conservation du sol	11
2-) Méthode d'extraction de la solution du sol	12
3-) Méthode de mesure de l'humidité du sol	12
4-) Ionométrie : électrode spécifique de nitrate	12
4.1 Principe général	12
4.2 Remarques générales	13
4.3 Détermination de l'ion nitrate	13
4.3.1 Matériel	13
4.3.2 Interférences	14
4.4 Etalonnage	14
4.5 Mode opératoire	14
5-) Méthode de calcul	15
CHAPITRE 4 : Présentation des résultats	16
1-) Méthodologie	16
1.1 Fidélité de la méthode	16
1.2 Comparaison de méthode	16
2-) Résultats	17

2.1 Variabilité spatiale	17
2.2 Estimation du nombre de prélèvements	18
2.3 Corrélacion de rang	19
3-) Discussion et conclusion	19

Introduction

Un programme de recherche a débuté depuis près de deux ans, sur l'influence du climat dans le cadre de la culture du blé dur, blé utilisé pour la panification. Les parcelles qui sont suivies avec ce type de culture sont situées dans les départements des Alpes-de-Haute-Provence, de Vaucluse et des Bouches-du-Rhône, et l'altitude varie en fonction des lieux de 950 m à 3 m. Un suivi est réalisé au niveau du climat, du végétal à différents stades et du sol pour la fertilisation azotée et l'humidité.

Dans le cadre de ce travail, il m'a été confié l'analyse de la teneur en azote nitrique du sol et son humidité au moment de la mise en culture des parcelles.

Les données ainsi obtenues seront utilisées au niveau d'un « modèle générique pour simuler les cultures et leurs bilans hydrique et azoté » (Brisson et al, 1998).

Présentation de l'INRA

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

L'INRA est un centre de recherche au service de l'agriculture, des industries agro-alimentaires et de , la gestion du territoire, pour une alimentation et un environnement de qualité.

Statut :

L'INRA est un établissement public à caractère scientifique et technologique sous tutelle du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et du ministère de l'agriculture et de la pêche.

Budget :

Il s'élève à trois milliards de franc(soit 457 million d'euros) qui proviennent pour plus de 80% de l'état ; le reste est issu de ses propres ressources.

Personnel :

L'INRA rassemble 8700 salariés dont 3800 chercheurs et ingénieurs ; 1000 étudiants en thèse, 1000 stagiaires et chercheurs étrangers accueillis chaque année.

Relations

L'INRA entretient des collaborations scientifiques avec les écoles agronomiques, vétérinaires et agro-alimentaires, les universités, les organismes scientifiques français et étrangers ; l'INRA dispose également d'un fort partenariat industriel agricole et régional avec 10 entreprises créées sur la base des recherches INRA, 3800 missions à l'étranger et l'édition de 450 ouvrages scientifiques ainsi qu'une publication annuelle de 8000 articles.

Implantation régionales (figure 1)

L'INRA comporte 350 unités de recherche et 180 unités expérimentales réparties dans 232 centres régionaux ce qui représente plus de 70 % du personnel hors région parisienne ; 120000 hectares de terrains sont disponibles pour les expérimentations.

Objectifs

Les travaux effectués par l'INRA ont, pour but de préparer l'agriculture, l'agro-alimentaire et l'environnement de demain. Il faudra pour cela assurer la place de l'agriculture européenne dans un contexte de mondialisation des échanges ; assurer qualité, hygiène et

santé des produits issus du secteur agro-alimentaire ; respecter la protection de l'environnement.

Les départements de recherche

***Productions végétales :**

génétique et amélioration des plantes pathologie végétale et malherbologie, physiologie et biochimie végétales, phytopharmacie et écotoxicologie, recherches forestières, zoologie ;

***Productions animales :**

élevage et nutrition des animaux, génétique et animale, hydrobiologie et faune sauvage, pathologie animale, physiologie animale ;

***Industries agro-alimentaires :**

biotechnologie des fruits légumes et dérivés, microbiologie, nutrition alimentation et sécurité alimentaire, technologie des glucides et des protéines, transformations des produits animaux ;

***Environnement physique et agronomie :**

Unités : **Climat, Sol et Environnement.**

***Sciences humaines et sociales :**

Unités : biométrie, économie et sociologie rurales, systèmes agraires et développement ;

L'Unité Climat, Sol et Environnement

Ses travaux s'insèrent parmi les très nombreux programmes de recherche concernant l'environnement. les recherches se dirigent plus particulièrement vers : l'analyse des flux de polluants dans le sol, l'eau et l'atmosphère, le dépérissement forestier, l'érosion des sols, la fertilisation raisonnée, la dépollution des effluents... L'unité mène des recherches visant à améliorer les connaissances relatives à la physique du sol et aux processus de transport de masse et d'énergie dans les sols et, d'une façon plus générale, dans les milieux poreux. Ces phénomènes de transport concerne l'eau (infiltration, évaporation, absorption racinaire), les solutés (nitrates), les gaz (oxygène, gaz carbonique, vapeur d'eau) et de la chaleur. Les thèmes de recherche abordés sont les suivants :

-Modélisation :

- des écoulements rapides dans les milieux à porosité multiforme,
- des transferts de gaz dans les milieux poreux hétérogènes,
- de l'évolution des états de surface sous l'action des pluies (rugosité) et conséquences de cette évolution sur les phénomènes de stockage et d'infiltration.

-Modélisation des transferts hydriques sol-racines et analyse des interactions entre les propriétés physiques et mécaniques des sols et les modèles d'architecture racinaire.

-Effet des propriétés hydriques et mécaniques des lits de semences sur la mise en place des peuplements végétaux.

-Analyse des mécanismes géochimiques déterminant la qualité des eaux.

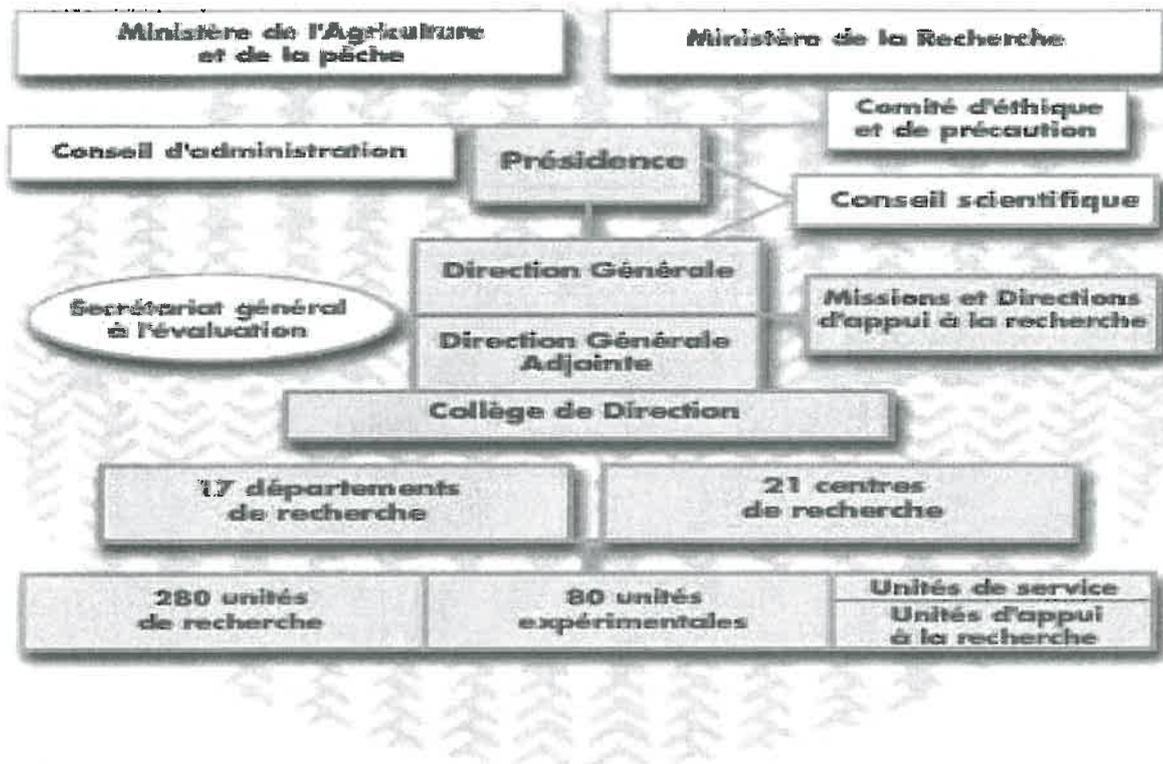


Figure 1 : Structure de l'INRA.

Rappels théoriques :

1-) Le sol : (figure 2)

Le sol est un milieu hétérogène composé de trois phases.

La phase solide constitue la matrice du sol, se composant d'argile, limon, sable et gravier. C'est ce que l'on appelle la texture du sol.

La phase gazeuse inclue l'air et la vapeur d'eau.

La phase liquide, l'eau, mobile ou non, contenant des sels dissous.

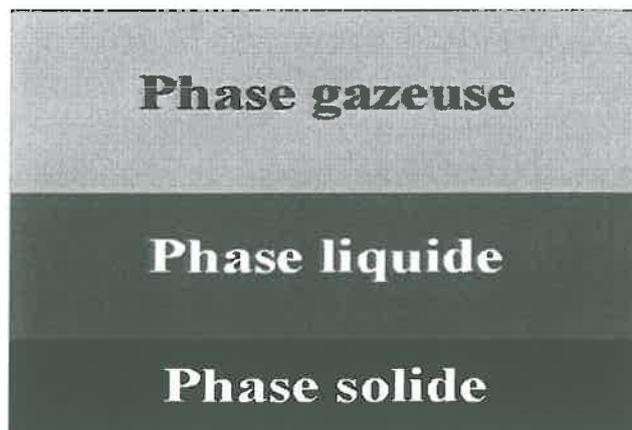


Figure 2 : Les différentes phases du sol

La structure désigne l'arrangement des particules dans le sol. Elle détermine la répartition dans l'espace de la matière solide et des pores. Elle est le siège des transferts et influence l'ensemble des propriétés physiques du sol.

La porosité est un espace vide, résultant de l'arrangement des différents éléments constituant le sol.

2-) Définitions

2.1 Humidité pondérale du sol par rapport au sol humide :

c'est le rapport de la différence entre la masse de sol humide (Sol_w) et la masse de sol sec (Sol_d) sur la masse de sol humide.

$$H_w = (Sol_w - Sold) / Sol_w$$

2.2 Humidité pondérale du sol par rapport au sol sec :

c'est le rapport de la différence entre la masse de sol humide (Sol_w) et la masse de sol sec ($Sold$) sur la masse de sol sec ($Sold$).

$$H_w = (Sol_w - Sold) / Sold$$

2.3 Densité solide du sol :

C'est le rapport entre la masse de solide (M_s) et le volume de solide (V_s).

$$\rho_s = M_s / V_s$$

2.4 Densité apparente du sol :

C'est le rapport entre la masse de solide (M_s) et le volume total occupé par le sol (V_t)

$$\rho_d = M_s / V_t = M_s / (V_s + V_a + V_w)$$

3-) Le cycle de l'azote (figure 3)

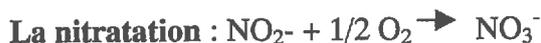
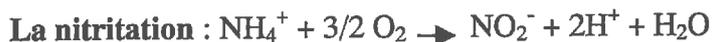
L'azote dans le sol est présent à 95 % sous forme organique et 5 % sous forme minérale (NH_4^+ , NO_3^- , N_2 ...). C'est le cycle de l'azote, ce phénomène est la conséquence de transformation de nature microbienne.

Description du cycle :

Fixation : l'azote passe de l'atmosphère à la terre
Assimilation : transformation de l'azote inorganique en matière organique (acides aminés, protéines ...).

La minéralisation : processus inverse, qui consiste en la décomposition microbienne de l'azote organique pour donner de l'ammonium utilisable par les plantes.

La nitrification : réaction d'oxydation de l'ion ammonium NH_4^+ , peu mobile en ion nitrate très mobile (lessivage).



La dénitrification : Processus biologique qui permet le passage de l'azote dans l'atmosphère (ex : effet de serre). Cette réaction se produit dans les conditions particulières de pH, température, aération du sol, teneur en matière organique. Elle correspond à une succession de transformation :



Un milieu réducteur et l'absence d'oxygène sont indispensables.

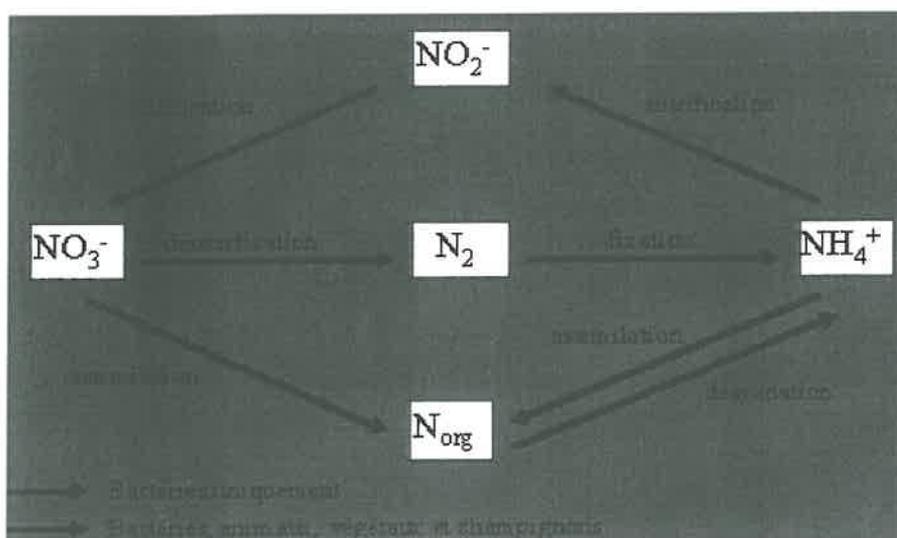
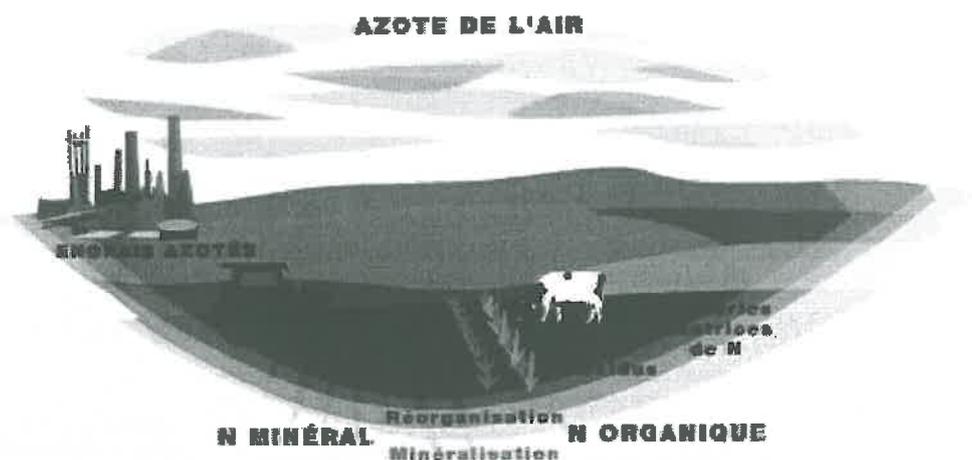


figure 3 : Le cycle de l'azote

4-) Variabilité spatiale

De nombreux auteurs ont observé de très fortes hétérogénéités de teneur en nitrate tant dans le sens horizontal et vertical, que dans le temps. Ils insistent sur l'importance qu'il y a de connaître avec précision la quantité d'azote minéral présent dans le sol à un moment donné, car ceci est absolument nécessaire à une estimation correcte du bilan azoté. Ce n'est qu'à cette condition qu'une meilleure politique d'utilisation des engrais azotés pourra être mise en œuvre

Cette variabilité spatiale et temporelle des teneurs en azote nitrique du sol peut avoir plusieurs origines (Lindeman, 1986 ; Cameron et al 1979 ; Dauriach, 1992 ; Sablier, 1992 ; Bruckler et al, 1997).

→ Elle peut être interne, c'est-à-dire liée aux conditions du sol :

- L'état structural, qui influence les mécanismes de transferts des solutés ;
- La roche-mère ;

- Le relief, dans le sens où les quantités d'azote nitrique présentes dans le sol sont directement liées aux quantités et mouvements d'eau ;
 - La population microbienne ainsi que le caractère aléatoire de son activité ;
 - Les phénomènes de transfert propres à la solution du sol (diffusion, dispersion, convection).
- Elle peut être due à une intervention externe :
- Le travail du sol ;
 - Le climat, qui joue sur les quantités d'eau, mais aussi sur l'activité des micro-organismes du sol ;
 - La culture en place sur le site étudié ;
 - Les apports d'intrants (eau ou engrais)

Matériel et méthodes

1-) Présentation du dispositif

1.1 Parcelles des agriculteurs.

On s'est intéressé à 9 parcelles d'une superficie moyenne de 4 hectares situées à des altitudes différentes. La plus haute se situe à Redortier (Alpes-de-Haute-Provence) et la plus basse au niveau de la mer à Arles (Bouches-du-Rhône) (tableau 1). Il est à noter que la nature des sols varie en fonction de la situation géographique (annexe I).

Chacune de ces parcelles est cultivée en blé dur. La profondeur d'enracinement est estimée à 120 cm, aussi pour le suivi de l'azote nitrique, nous nous sommes intéressés à l'horizon 0-120 suivant un pas de 30 cm. Pour chaque parcelle trois profils ont été réalisés suivant la diagonale et sont équidistants. Cependant, en fonction de la nature du sous-sol, certains prélèvements n'ont pu être effectués jusqu'à 120 cm, et dans ce cas les horizons ont été de 15 ou 25 cm.

Pour chaque échantillon de sol, il a été mesuré l'humidité pondérale et la teneur en azote nitrique. Pour ces parcelles, la densité en place qui est nécessaire pour estimer la teneur en azote nitrique à l'hectare, n'a pas été mesurée, aussi nous nous sommes donnés une densité moyenne par horizon, compatible avec la nature des sols, dont les valeurs sont données au tableau 1.

1.2 Parcelles du site INRA.

Un autre site d'étude a été retenu : INRA, domaine Saint-Paul à Montfavet (84). On a considéré deux parcelles, l'une a été conduite en climat sec, et pour ce faire, elle a été mise sous couvert plastique (photo 1), l'autre a été conduite en climat « humide », donc non couverte (photo 2).

Lors de l'instrumentation des parcelles au mois de novembre 2001, il a été mesuré à la sonde gamma densité, la densité du sol en place.

La culture appliquée a également été du blé dur et, nous nous sommes intéressés à l'horizon 0-180 cm, suivant un pas de 30 cm, et dans ce cas il a été réalisé 14 profils par parcelle (figure 4). Le sol est un limon argileux calcaire.

1.3 Prélèvement et conservation du sol.

Pour les parcelles des agriculteurs, les prélèvements des sols se feront à deux périodes : hiver et fin du printemps, début de l'été. Pour la période hivernale, les prélèvements se sont étalés du mois de décembre 2001 au mois de février 2002 (tableau 1), et ce sont ces échantillons qui font l'objet de mon étude.

Pour les deux parcelles INRA, les prélèvements de sols se feront à trois périodes différentes : hiver, printemps et automne. Pour la période hivernale, les prélèvements se sont étalés du 15 novembre au 19 novembre 2001, et ce sont ces échantillons qui font l'objet de mon étude.

Le sol prélevé à l'aide d'une tarière lorsqu'il n'est pas analysé dans les 48 heures doit être congelé, afin de bloquer l'évolution des micro-organismes. Ce qui a été le cas dans notre

Lieux	Altitude m	Dates de prélèvement
Couthézon (84)	44	20/12/01
Arles (13)	3	13/12/01
Oraison (04)	350	19/12/01
Redortier (04)	950	26/02/02
Saint-Saturnin (84)	37	12/12/01
Gréoux (04)	287	18/01/02
Valensole (04)	602	17/01/02
Saint-Christol (84)	845	26/02/02
Bollène (84)	45	2012/01

Tableau 1- Lieux de prélèvement des parcelles agriculteurs.

Serre		Extérieur	
bloc 1	Bloc 2	bloc 1	Bloc 2
S11	S25	E13	E28
S12	S26	E17	E24
S14	S28	E15	E26
S13	S27	E11	E22
S16	S22	E14	E27
S15	S21	E18	E23
S17	S23	E12	E21
SA8	S24	E16	E25

Figure 4- Plan de prélèvement des deux parcelles du site INRA. Les rectangles en grisé correspondent à des lieux non prélevés.

étude, où les échantillons ont été prélevés de fin 2001 à début 2002, et les analyses réalisées courant du mois d'avril 2002.

2-) Extraction du nitrate d'un sol congelé.

On tare un flacon plastique de 500 ml à fermeture hermétique et on met environ 120 g de sol congelé, pour ce faire on s'aide d'une balance à plateau, et on laisse décongeler durant la nuit à la température de 20°C.

Le sol décongelé, on pèse le flacon contenant le sol et on ajoute à l'aide d'un préleveur 200 ml d'eau déminéralisée. La quantité de sol humide et le volume d'eau déminéralisée pourront être modulés en fonction du poids de l'échantillon, mais il faudra toujours respecter le rapport $\text{sol}/\text{H}_2\text{O} = 1/2$.

On réalise une agitation mécanique de trois quart d'heure, puis on effectue la filtration sur filtre moyen.

L'analyse de l'ion nitrate dans le filtrat doit être faite en suivant. En effet, compte tenu que le sol a été congelé puis décongelé, il ne pourra pas faire un séjour de plus de 48 heures au froid, ceci pour éviter l'évolution des micro-organismes.

Pour chaque échantillon de sol, il a été mesuré l'humidité pondérale et la teneur en azote nitrique.

3-) Méthode de mesure de l'humidité du sol.

L'humidité du sol doit être réalisée au moment du prélèvement (humidité réelle), mais aussi après décongélation, car la congélation peut engendrer une perte d'un demi point à un point d'humidité. Si nous n'en tenons pas compte cela entacherait d'une erreur les résultats de la teneur en nitrate.

Mettre dans une boîte tarée (T_1) une masse de sol congelé de l'ordre de 50 g (Sol_w), pour ce faire, on s'aidera de la balance à plateau.

- Laisser décongeler 24 heures ;
- Peser la boîte contenant le sol humide ($T_1 + \text{Sol}_w = M_1$).
- Laisser sécher 24 heures à l'étuve à 105°C.
- Peser l'ensemble sec ($T_1 + \text{Sol}_d = M_2$).
- Sol humide : $\text{Sol}_w = M_1 - T_1$
- Sol sec : $\text{Sol}_d = M_2 - T_1$

Humidité pondérale par rapport au sol humide

$$W_w = \frac{M_1 - M_2}{\text{Sol}_w}$$

Humidité pondérale par rapport au sol sec

$$W_d = \frac{M_1 - M_2}{\text{Sol}_d}$$

4-) Inométrie : électrode spécifique de Nitrate

4.1 Principe général

Cette méthode électrochimique est basée sur la loi de NERST. On mesure la différence de potentiel entre deux électrodes plongeant dans une solution, l'une est l'électrode de

référence, l'autre celle spécifique de l'ion nitrate. Le potentiel à travers la membrane de l'électrode spécifique est donné par la relation :

$$E = E_0 \pm 2.3 \frac{RT}{nF} \text{Log}A$$

E : potentiel mesuré entre les électrodes (mV)

E₀ : potentiel standard de l'électrode de référence (mV)

R : constante des gaz parfaits (8.32J/mol/°K)

T : température en degré Kelvin

n : valence de l'ion

F : nombre de Faraday

A : Activité de l'ion à doser.

$$2.3 \frac{RT}{nF} : \text{coefficient de NERST, égale à } 59.2 \text{ mV pour } 20^\circ\text{C}$$

4.2 Remarques générales

- L'électrode spécifique répond à une activité ionique et non à la concentration. Cependant pour des concentrations égales ou inférieures à 1.10^{-2} N, l'activité ionique et la concentration peuvent être confondues, le coefficient d'activité ionique étant alors égal à 1.
- La comparaison de solutions échantillons entre elles et à une gamme étalon, nécessite que l'ensemble des solutions soit à la même force ionique. Pour ce faire, on utilisera un ajusteur de force ionique en quantité égale ou inférieure à 50 fois la dose de l'ion à déterminer.
- L'électrode spécifique n'est pas totalement spécifique de l'ion à doser, aussi apparaît très souvent un certain nombre d'interférences.

4.3 Détermination de l'ion NITRATE

1-) Matériel

- Millivoltmètre- pH-mètre
- L'électrode spécifique ORION se compose de deux parties, le corps de l'électrode et l'embout sensible interchangeable qui contient une solution gélifiée, une membrane saturée par le liquide échangeur d'ions et un réservoir de liquide échangeur. A cette électrode est incorporée l'électrode de référence dont le potentiel est constant. Avant utilisation la chambre externe doit être remplie par une solution de référence 90 00 46 (ORION). L'embout de l'électrode se change théoriquement tout les 6 mois. Cependant, il sera changé lorsque le coefficient de NERST sera supérieur à 60 mV ou inférieur à 55 mV, à ce moment là on observera une instabilité de la mesure et une diminution du domaine de linéarité.
- Ajusteur de force ionique et correcteur d'interférences

2-) Interférences

Dans le cas de l'ion nitrate, les ions interférents sont : Chlorure, Iodure, Nitrite, Carbonate, Bicarbonate (le pH doit être d'environ 4.5), les ions organiques.

Pour s'affranchir de l'aspect force ionique et interférences, nous utiliserons une solution remplissant les deux fonctions (Ajusteur de force ionique et correcteur d'interférences)

⊕ La solution INRA, mise au point au laboratoire

Dans un litre de H_2SO_4 1.10^{-3} N, on dissout

5 g de $CuSO_4$

3.1 g de Ag_2SO_4

9.5 g de $KAl(SO_4)_2, 12 H_2O$.

3-) Préparation de la gamme d'étalonnage : Elle est préparée à partir d'une solution de nitrate de sodium 0.1 N (ORION) ou 6200 mg NO_3 /l.

Titre en mole/litre	NO_3^- mg/l	V. solution en ml	V. total ml
1.10^{-2} N	620	20 ml de 1.10^{-1} N	200
1.10^{-3} N	62	20 ml de 1.10^{-2} N	200
1.10^{-4} N	6.2	20 ml de 1.10^{-3} N	200
5.10^{-5} N	3.1	10 ml de 1.10^{-3} N	200
1.10^{-5} N	0.62	20 ml de 1.10^{-4} N	200

4.4 Etalonnage

Le domaine d'étude pour l'ion nitrate se situe entre 1.10^{-1} M et 1.10^{-5} M, mais la zone de linéarité est entre 1.10^{-2} M et 5.10^{-5} M.

La relation qui lie le Log de la concentration (Log C) à la différence de potentiel (E mV) s'exprime par une équation du type :

$$Y = aX + b \quad \text{où} \quad Y = \text{Log } C \text{ et } X = E$$

a et b étant des paramètres d'ajustement

L'ajusteur de force ionique permet de mettre les solutions échantillons et étalons à la même force ionique. Ce qui permet de comparer les échantillons aux étalons avec une précision de ± 2 %.

4.5 Mode opératoire

Pour effectuer la mesure on prélèvera 10 ml de la solution étalon et on y ajoutera 1 ml de correcteur d'interférence INRA. Pour les échantillons de concentration inconnue, on procédera de la même façon.

On passera en premier la gamme étalon par ordre croissant des concentrations, puis les 8 échantillons de concentration inconnue, l'étalon 1.10^{-3} M (62 mg NO_3 /l), et ainsi de suite, jusqu'à épuisement de la série. Lorsque celle-ci sera terminée, passer la gamme étalon.

5-) Méthode de calcul : Azote nitrique en kg/ha

❖ Données dont on dispose

1 ha = 10 000 m²

Densité par horizon g/cm³ ou T/m³

NO₃ : exprimés en mg/l de la solution d'extraction ou µg/ml.

Humidité du sol W_d et W_w exprimée en relatif.

❖ Calculs à effectuer

Masse de sol dans l'horizon 30 cm pour 1 hectare

Volume : 10 000 x 0.30 = 3 000 m³

Masse de sol en tonne dans un horizon : densité du sol x 3 000 = M_h

Volume de solution de sol (V_{ssol}) dans la masse de sol M_{solw} ayant servie à l'extraction

$$M_{solw} \times W_w = V_{ssol}$$

On considère que la densité de la solution du sol est égale à 1, d'où la masse de V_{ssol} est M_{ssol} = V_{ssol}/1.

Masse de sol sec

$$M_{solw} - M_{ssol} = M_{sold}$$

Expression des teneurs en N_{NO₃}, mg/g de sol sec

Volume d'eau pour l'extraction = 200 ml

$$Elément(mg / g) = \frac{Elément(\mu g / ml) * (200 + V_{ssol}) * 14}{M_{sold} * 1000 * 62}$$

$$Elément(mg/g) \rightarrow Elément(g/kg) \rightarrow Elément(kg/T)$$

Expression des teneurs en N_{NO₃}, kg/ha de sol sec

$$N_{NO_3} \text{ en kg/ha} = N_{NO_3} \text{ kg/T} \times M_h$$

Présentation des résultats

1-) Méthodologie

1.1 Fidélité de la méthode

Pour s'assurer de la fidélité de la méthode et dans le cadre des bonnes pratiques de laboratoire, nous mesurons tous les 8 échantillons une solution dite de contrôle qui est de concentration connue. Présentement la concentration de cette solution est de 14 mg de N_{NO_3}/l . Entre le 4 avril et le 3 mai, j'ai réalisé 13 séries de 24 échantillons, et par série 3 solutions de contrôle ont été mesurées, ainsi que la gamme étalon en début et fin de la série. Les résultats sont donnés au tableau .

Date des mesures	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation %
4/04/02	13.6	0.2	1.79
5/04/02	13.8	0.1	0.80
9/04/02	13.6	0.2	1.17
10/04/02	13.9	0.9	6.48
11/04/02	13.7	0.1	1.03
16/04/02	13.7	0.2	1.25
17/04/02	13.6	0.3	1.94
18/04/02	13.7	0.3	1.96
23/04/02	13.4	0.1	0.98
24/04/02	13.5	0.1	0.98
25/04/02	12.6	0.2	1.19
30/04/02	13.9	0.2	1.40
3/05/02	13.7	0.6	4.34

Tableau 2– Moyenne des 13 solutions de contrôles.

L'analyse des résultats montre que pour une série donnée de mesures, le coefficient de variation est inférieur à 2 % comme le préconise le constructeur, exception faite de deux séries réalisées les 10 avril et 3 mai, où la valeur du dernier contrôle de la série a été plus important que les deux autres.

En regroupant l'ensemble des périodes de mesure (durée d'un mois de mesures), nous obtenons une moyenne de 13,6 mg de N_{NO_3}/l , un écart type de 0,4 et un coefficient de variation de 3,11 %. L'écart à la valeur vraie est de 2,86 %.

On peut considérer que la méthode est juste (faible écart à la valeur vraie) et fidèle au cours du temps (coefficient de variation inférieur à 5 %).

1.2 Comparaison de méthode.

Afin de vérifier la justesse de l'électrode spécifique nitrate on a comparé les résultats à ceux obtenus pour les mêmes échantillons à l'électrophorèse capillaire méthode CIA, méthode ayant été étalonnée par rapport à des méthodes normées (de Cockborne et Sévenier, 1998).

Cette étude a porté sur 38 échantillons. Pour analyser les résultats nous avons utilisé la méthode statistique donnée en annexe.

Identité parcelle	N_NO ₃ kg/ha	Ecart type	Coefficient de variation
ARC	123	20	16,11
ARS	57	29	51,79
BRE	285	49	17,32
BUR	177	69	38,93
CAC	451	223	49,54
GRE	186	47	25,25
MAU	79	28	35,64
RIV	349	182	52,18
VAL	73	14	19,49

Tableau 3- Parcelles agriculteurs : teneur moyenne en azote nitrique (profil).

Identité parcelle	Horizon 0-30	Horizon 30-60	Horizon 60-90	Horizon 90-120
ARC	21,39	24,22	29,46	18,54
ARS	55,14	65,04	27,61	34,30
BRE	16,26	34,88	53,82	24,47
BUR	40,81	25,58	36,21	
CAC	51,70	40,59	79,98	59,76
GRE	25,11	31,03		
MAU	9,06	59,54	39,26	
RIV	42,03	58,89	53,55	69,33
VAL	38,24	15,96		

Tableau 4- Parcelles extérieurs : coefficient de variation des teneurs en azote nitrique par horizon.

Identité parcelle	Horizon 0-30	Horizon 30-60	Horizon 60-90	Horizon 90-120
ARC	18,01	19,16	18,13	22,70
ARS	17,75	19,97	22,74	23,35
BRE	15,72	15,91	16,32	19,82
BUR	23,26	24,96	24,68	
CAC	28,67	33,60	39,39	43,01
GRE	21,82	17,97	21,14	
MAU	25,20	28,21	24,28	
RIV	22,08	24,36	28,95	28,95
VAL	15,48	15,04	19,41	18,57

Tableau 5- Parcelles des agriculteurs : humidité pondérale horizon par horizon.

Identité parcelle	Horizon 0-30	Horizon 30-60	Horizon 60-90	Horizon 90-120
ARC	10,41	6,33	2,73	4,98
ARS	6,30	1,78	12,26	2,64
BRE	9,14	18,80	13,26	19,49
BUR	8,74	12,81	16,98	
CAC	6,25	13,51	3,65	8,88
GRE	30,45	21,42		
MAU	8,39	17,28	21,63	
RIV	9,45	10,69	9,30	6,33
VAL	4,65	6,1		

Tableau 6- Parcelles des agriculteurs : coefficient de variation de l'humidité pondérale par horizon.

Soient X les résultats de l'électrophorèse capillaire, et Y ceux de l'électrode spécifique. On calcule la valeur numérique de la relation Y en fonction de X, dont l'équation est de la forme $Y = aX + b$.

La valeur numérique de l'équation est :

$$Y = 1,1182 X + 1,0557 \quad \text{avec un coefficient de régression } r^2 = 0,9786$$

Nous avons testé si l'ordonnée à l'origine (**b**) est statistiquement significativement égale à zéro et si la pente (**a**) est statistiquement significativement égale à 1 (annexe II). Pour que l'hypothèse soit vérifiée, il faut que dans les deux cas, le T de Student observé soit inférieur au T de Student théorique à n-2 degrés de liberté.

Dans le cadre de notre étude, pour 36 (n-2) degrés de liberté et une probabilité de 0,999, le T de Student théorique est de 3,338. Le T de Student observé obtenu pour la pente de la droite est égal à 0,8017 et le T de Student observé obtenu pour l'ordonnée à l'origine est égal à 2,2890. En conséquence, la pente n'est pas statistiquement différente de 1 et l'ordonnée à l'origine n'est pas statistiquement différente de 0.

Donc les résultats obtenus par les deux méthodes ne sont pas statistiquement différents. Il y a adéquation entre les deux méthodes.

2-) Résultats

L'ensemble de nos résultats pour l'azote nitrique a été exprimé en N_{NO_3} kg/ha, et l'humidité pondérale en pourcentage.

2.1 Variabilité spatiale

- Parcelles des agriculteurs

Pour chacune des neuf parcelles nous avons estimé horizon par horizon, la valeur moyenne pour N_{NO_3} kg/ha et l'humidité pondérale.

Sur l'ensemble du profil les teneurs en azote nitrique varient suivant les parcelles entre 57 kg N_{NO_3} /ha (ARS - Arles) à 451 kg N_{NO_3} /ha (CAC - Saint-Saturnin-les-Avignon) (tableau 3). La variabilité spatiale d'une parcelle à l'autre, elle aussi très différente, passe de 16,11 % (ARC) à 52,18 % (RIV) (tableau 3).

Lorsqu'on analyse les profils des parcelles horizon par horizon, on observe que la tendance générale est à une teneur maximale en azote nitrique dans l'horizon de surface (figure 5), exception faite de deux parcelles (MAU et RIV), où la teneur la plus élevée se situe dans les horizons profonds. En ce qui concerne la variabilité spatiale, la valeur du coefficient de variation pour l'horizon 0-30 cm, passe de 9,06 % (MAU) à 55,14 % (ARS), pour l'horizon 30-60 cm de 15,96 % (VAL) à 65,04 % (ARS), pour l'horizon 60-90 cm de 27,61 % (ARS) à 79,98 % (CAC) et pour l'horizon le plus profond (90-120 cm) de 18,54 % (ARC) à 69,33 % (RIV) (tableau 4). On observe que pour certaines parcelles la variabilité spatiale la plus importante se situe dans les horizons de surface (BUR et VAL), pour d'autre on note l'inverse (BRE, GRE, MAU) et enfin certaines ne présentent pas de continuité dans un sens ou dans un autre.

Identité	Horizon	N_NO ₃ kg/ha	Ecart type	Coefficient de variation
Serre	0-30	75	20	26,13
	30-60	41	14	34,63
	60-90	14	6	43,78
	90-120	9	3	31,07
	120-150	13	6	42,48
	150-180	13	8	58,58
	Total		165	44
Extérieur	0-30	96	18	18,63
	30-60	67	19	28,09
	60-90	29	13	45,31
	90-120	20	9	44,66
	120-150	19	9	49,39
	150-180	15	8	54,73
	Total		241	53

Tableau 7- Parcelles site : teneur moyenne en azote nitrique (profil).

Identité parcelle	Horizon 0-30	Horizon 30-60	Horizon 60-90	Horizon 90-120	Horizon 120-150	Horizon 150-180
Serre	26,13	34,63	43,78	31,07	42,48	58,58
Extérieur	18,63	28,09	45,31	44,66	49,39	54,73

Tableau 8- Parcelles site : coefficient de variation des teneurs en azote nitrique horizon par horizon.

Identité parcelle	Horizon 0-30	Horizon 30-60	Horizon 60-90	Horizon 90-120	Horizon 120-150	Horizon 150-180
Serre	21,78	20,96	17,56	17,15	18,33	19,23
Extérieur	22,18	22,89	19,96	20,28	20,05	19,43

Tableau 9-Parcelles site : humidité pondérale horizon par horizon.

Identité parcelle	Horizon 0-30	Horizon 30-60	Horizon 60-90	Horizon 90-120	Horizon 120-150	Horizon 150-180
Serre	12,15	8,53	14,08	9,18	12,75	8,12
Extérieur	6,31	15,73	10,91	5,33	6,37	12,53

Tableau 10- Parcelles site : coefficient de variation pour l'humidité pondérale horizon par horizon.

L'humidité du sol est très variable d'une parcelle à l'autre. La parcelle la plus sèche se situe à Valensole (VAL) et la plus humide se situe à Saint-Saturnin-les-Avignon (CAC), dans une zone d'anciens paluds. La tendance générale est une humidité plus élevée dans les horizons profonds (tableau 5). Ces différences sont probablement liées aux facteurs climatiques (pluie et évapotranspiration potentielle), géographiques (altitude) et nature du sol.

Les coefficients de variation sont dans l'ensemble au plus égal à 20,0 %, exception faite de la parcelle GRE, où la valeur estimée dans l'horizon de surface est égale à 30,45 %. Par ailleurs, pour la variabilité spatiale, on retrouve les teneurs les plus faibles dans l'horizon de surface (tableau 6).

- Parcelles site INRA

Nous avons estimé, comme pour les parcelles des agriculteurs, la valeur moyenne pour N_{NO₃} kg/ha et l'humidité pondérale horizon par horizon. Les teneurs maximales se retrouvent toujours en surface (tableau 7).

Sur l'ensemble du profil (0-180 cm), nous avons estimé une valeur moyenne en azote nitrique de 165 kg/ha pour la parcelle sous serre, et pour celle non couverte une valeur moyenne de 241 kg/ha, avec des coefficients de variation du même ordre de grandeur, soit respectivement : 39,45 % et 40,14 % (tableau 7).

Pour la parcelle extérieur, la variabilité spatiale croît avec la profondeur, passant de 18,63 % en surface, à 54,73 % pour l'horizon profond (tableau 8).

Pour la parcelle sous serre, la variabilité spatiale croît jusqu'à l'horizon 60-90 cm, où le coefficient de variation égale 43,78 %, puis cette variabilité passe par un minimum à l'horizon 90-120, pour atteindre une valeur de 58,58 % dans l'horizon profond (tableau 8).

L'humidité pondérale est plus élevée dans les deux premiers horizons qu'en profondeur (tableau 9). De fait, les prélèvements de sol ont eu lieu entre le 15 et le 19 novembre 2001, où la pluviométrie a été au total de 8,5 mm (figure 6).

La variabilité spatiale pour la parcelle non couverte est faible pour certains horizons (5,33 % pour l'horizon 90-120 cm), mais assez étalée lorsqu'on passe d'un horizon à l'autre (15,73 % pour l'horizon 30-60 cm). Pour la parcelle sous serre les valeurs du coefficient de variation sont plus élevées, mais l'étalement est plus faible, ainsi on passe de 8,12 % (horizon 30-60 cm) à 14,08 % (horizon 60-90 cm) (tableau 10).

2.2 Estimation du nombre de prélèvements

Les contraintes de terrain ont conduit à réaliser trois profils par parcelle chez les agriculteurs et 14 pour celles du site INRA. Cependant, pour une précision donnée, il est possible d'estimer le nombre de prélèvements à réaliser. Nous avons considéré, le profil d'azote nitrique dans son ensemble, et nous avons retenu l'écart type obtenu lorsque nous avons fait la moyenne des trois profils et nous avons calculé l'erreur standard suivant le mode de calcul donné en annexe III (tableau 11).

Dans le cadre de notre étude, pour les parcelles des agriculteurs, il aurait été nécessaire d'effectuer 12 profils et 58 pour les parcelles INRA.

	Erreur Student	Ecart type	Nombre d'échantillons
Identité	d	ET	N
ARC	20	11	12
ARS	29	17	12
BRE	29	49	12
BUR	40	69	12
CAC	129	223	12
GRE	27	47	12
MAU	16	25	12
RIV	105	182	12
VAL	8	14	12
Parcelles INRA			
Serre	44	11.398	58
Exterieurs	53	13.677	58

Tableau 11-Estimation du nombre de prélèvement par le calcul statistique.

2.3 Corrélation de rang

Pour les parcelles d'agriculteurs d'une part et celles du site INRA d'autre part, nous avons réalisé une corrélation de rang (annexe IV) entre l'azote nitrique et l'humidité pondérale du sol horizon par horizon.

Pour ce faire, on classe par ordre croissant les deux types de données et on attribue un numéro d'ordre ou de rang à chaque observation. Dans notre cas, le rang ou numéro d'ordre a varié entre 1 et 79. On estime alors horizon par horizon la différence entre le rang de l'humidité et le rang de l'azote nitrique et suivant le calcul mentionné en annexe IV, on estime le coefficient de corrélation.

Le coefficient de corrélation de rang estimé pour les parcelles des agriculteurs est de 0,127 et pour les parcelles du site INRA de 0,678. Le coefficient de rang r_s , variera entre 1, corrélation maximale, et -1, corrélation nulle.

3-) Discussion et conclusion

Sur le plan méthodologique, la méthode utilisée pour la détermination de l'ion nitrate est fidèle au cours du temps puisque sur un mois, le coefficient de variation de la solution de contrôle a été estimé à 3,11 %. Cette méthode est juste car l'écart à la valeur vraie sur la même période n'est que de 2,86 %.

La comparaison de l'électrode spécifique à une méthode plus performante, l'électrophorèse capillaire, méthode CIA, montre une bonne adéquation des deux méthodes.

Dans le cadre de ce travail, le suivi de l'azote nitrique n'a concerné que l'état initial des dispositifs, aussi nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'aspect variabilité spatiale de la teneur en azote nitrique du sol et à l'humidité. Les résultats obtenus ont montré que, quelles que soit les parcelles considérées, la variabilité spatiale est plus élevée pour l'azote nitrique que pour l'eau. De fait, ceci est principalement lié au cycle de l'azote et à la répartition hétérogène des micro-organismes dans le sol. Le climat, qui joue sur les quantités d'eau, intervient aussi sur l'activité des micro-organismes du sol.

L'estimation du nombre de prélèvements a montré qu'il aurait été nécessaire d'accroître le nombre pour une meilleure précision.

La corrélation entre les deux paramètres étudiés, azote nitrique et humidité, se révèle faible pour les parcelles des agriculteurs. En revanche, elle est assez étroite pour les parcelles INRA. Dans ce dernier cas, cela s'explique par le fait que les prélèvements de sol ont eu lieu entre le 15 et le 19 novembre 2001, où la pluviométrie a été au total de 8,5 mm [Pluviométrie : 15/11 : 5 mm ; 17/11 : 3 mm ; 18/11 : 0,5 mm].

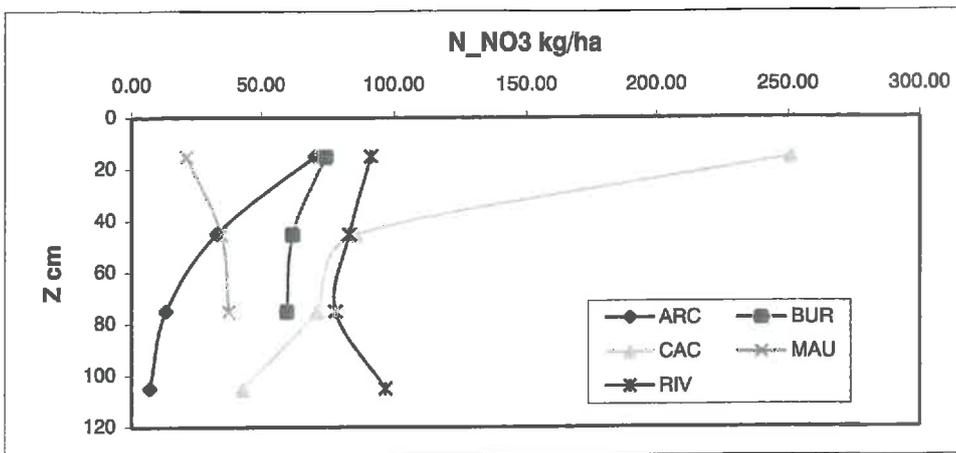


Figure 5 : Parcelles agriculteurs. Profils des teneurs en azote nitrique.

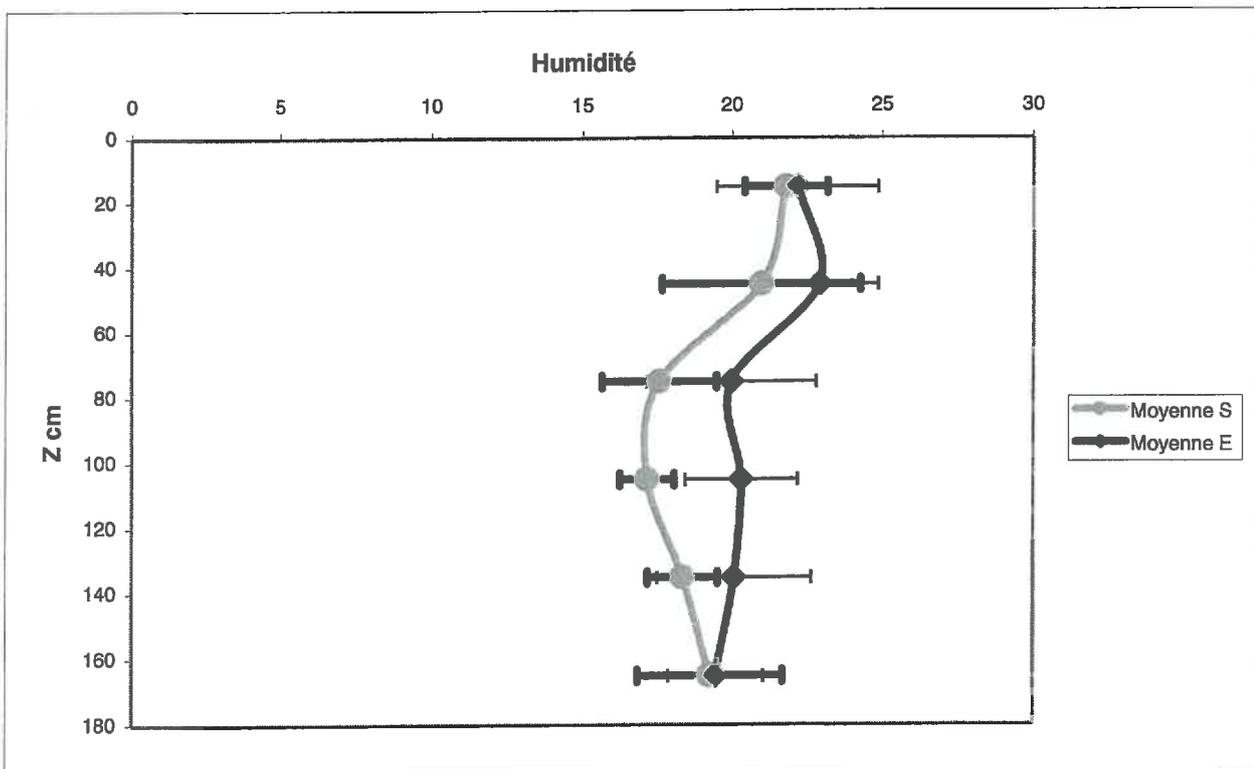


Figure 6 : Parcelles INRA. Profils des humidités moyennes pour les parcelles sous serre et celles à l'extérieurs.

Bibliographie

Bruckler L., de Cockborne A.M., Renault P., Claudot B., 1997 – Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. *Irrig Sci* 17 : 53-61.

Cameron D.R., Kowalenko C.G., Campbell C.A., 1979 – Factor affecting nitrate nitrogen and chloride leaching variability in a field plot. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, vol 43.

de Cockborne A.M. et Sévenier G., 1998 – Détermination par l'électrophorèse capillaire, méthode CIA, des anions minéraux et des cations majeurs. Comparaison avec différentes méthodes. *Spectra Analyse*, N°205, 12/1998, p11.

Dagnélie P., 1973 – Théorie et méthodes statistiques. Vol1 ; Ed. Presse Agronomique de Gembloux ; 378p.

Dauriach J., 1992 – Autour de l'environnement. *Fruits et Légumes* n°112, 32-33.

Lindman Y., 1986 – Contribution à l'étude statistique des répartitions et à la modélisation de la dynamique de l'azote nitrique dans le sol. Thèse de l'Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay – 310 p.

Sablier L., 1992 – Transfert d'eau et de nitrate dans la zone maraîchère du bassin versant de la Vistrenque (Gard). Première année d'étude : essai de quantification du bilan azoté d'une parcelle de salades ; réflexion sur la stratégie d'échantillonnage. mémoire ENITA – 39 p.

STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn.

Nadine Brisson, Bruno Mary, Dominique Ripoche, Marie-Hélène Jeuffroy, Françoise Ruget, Bernard Nicoullaud, Philippe Gate, Florence Devienne-Barret, Rodrigo Antonioletti, Caroline Durr, Guy Richard, Nicolas Beaudoin, Sylvie Recous, Xavier Tayot, Daniel Plenet, Pierre Cellier, Jean-Marie Machet, Jean-Marc Meynard, Richard Delécolle.

Annexe

Annexe 1 : Composition des sols.	1
Annexe 2 : Comparaison de deux populations.	2
Annexe 3 : Détermination du nombre de prélèvements.	3
Annexe 4 : Calcul du coefficient de rang ou coefficient de Spearman.	4

ANNEXE I

Granulométrie 5 fractions sans décarbonatation g/kg

Élément	ARC	ARS	BRE	BUR	CAC	GRE	MAU	RIV	VAL
Argile (<2microns)	231	189	130	223	300	228	300	330	272
Limon fin (2/20 microns)	321	298	256	261	353	226	499	337	249
Limon grossier (20/50 microns)	193	265	199	104	132	87	64	185	201
Sable fin (50/200microns)	209	241	332	99	101	209	58	134	151
Sable grossier (200/2000 microns)	46	7	83	313	114	250	79	14	127

ARC : sol limono-argileux

ARS : sol limoneux

BRE : sol limoneux

BUR : sol limono-argileux

CAC : sol limono-argileux

GRE : sol limono-argileux

MAU : sol limono-argileux

RIV : sol argilo-limoneux

VAL : sol limono-argileux

Comparaison de deux populations

Soient deux population X (valeurs dénombrées) et Y (valeurs simulées) appliquées à n échantillons, X donnant les valeurs x_i et Y les valeurs y_i . X et Y seront équivalentes si l'évolution des résultats y_i en fonction des résultats x_i est représentée par une droite d'équation $Y = aX + b$ telle que l'hypothèse suivante est vérifiée:

$$a = a_0 = 1$$

$$b = b_0 = 0$$

Nous testerons si l'ordonnée à l'origine (b) est statistiquement significativement égale à zéro et si la pente (a) est statistiquement significativement égale à 1.

On peut également dans un premier temps estimer si les deux populations sont fortement corrélées.

Dans tous les cas il faut calculer le test de Student observé et le comparer pour une probabilité définie et le degré de liberté $n-2$ à la valeur du test de Student théorique.

► Tests de conformité de a et b

1-) Hypothèse $a = a_0 = 1$

$$Ts_{obs} = |a - a_0| \sqrt{\frac{(n-2) * SCE_X}{SCE_Y - \frac{SPE^2}{SCE_X}}}$$

2-) Hypothèse $b = b_0 = 0$

Estimation de la variance résiduelle

$$\sigma_{xy}^2 = \frac{(1-r^2)SCE_Y}{n-2} = \frac{SCE_Y - \frac{SPE^2}{SCE_X}}{(n-2)}$$

$$Ts_{obs} = \frac{b}{\sqrt{\sigma_{xy}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{X_m^2}{SCE_X} \right]}}$$

n : nombre de données

SCE_X : somme des carrés des écarts des x

SCE_Y : somme des carrés des écarts des y

SPE : somme des produits des écarts x et y

X_m : moyenne des x

r : coefficient de corrélation

Ts_{obs} : T de Student observé

Ts_{th} : T Student Théorique

Détermination du nombre de prélèvements

Le problème se pose fréquemment de déterminer le nombre de mesures nécessaires pour atteindre une précision souhaitée. Cet aspect est étroitement lié à la notion d'intervalle de confiance, puisque la longueur d'un tel intervalle est directement fonction de l'effectif de l'échantillon considéré. Dans le cas de la moyenne on s'efforcera de déterminer la «vraie» valeur avec une marge d'erreur d , pour un degré de confiance $1 - \alpha$, c'est à dire de telle sorte que l'écart $|\bar{X}_m - m|$ ne dépasse d qu'avec une probabilité α (Dagnélie, 1973, vol I) [m = moyenne, valeur théorique].

On se donne donc un écart type (ET) conforme à la variable analysée, on se fixe un effectif de l'échantillon (n) et on calculera l'erreur-standard.

$$d = \frac{ET}{\sqrt{n}}$$

Puis on estimera l'effectif réel de l'échantillon.

$$n = \frac{u_{1-\alpha/2}^2 ET^2}{d^2}$$

Généralement l'égalité n 'est pas strictement vérifiée car n doit être un nombre entier. Si $\alpha = 0.05$ (valeur classiquement utilisée), on obtient.

$$n = \frac{1.96^2 ET^2}{d^2} \cong \frac{3.841 ET^2}{d^2}$$

En effet on a $\alpha = 0,05 \Rightarrow \alpha/2 = 0,025 \Rightarrow (1 - \alpha/2 = 0,975)$, on cherche cette valeur de 0.975 sur « la table de la distribution normale réduite – Fonction de répartition ». Dans notre cas, cela va correspondre à la valeur 1,9 située dans la première colonne à gauche à laquelle on ajoute 0,06 correspondant à la première ligne du haut.

u	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
...
1.8	0.96407	0.96485	0.96562	0.96638	0.96712	0.96784	0.96808	0.96926	0.96995	0.97062
1.9	0.9718	0.97193	0.97257	0.97320	0.97381	0.97441	0.97500	0.97558	0.97615	0.97670

Pour l'étude réalisée, α sera pris égal à 0.05, ET et d seront fixés lors du traitement des résultats.

Calcul du coefficient de corrélation de rang ou coefficient de Spearman

On calculera la corrélation existante non pas entre les valeurs observées, mais entre leurs rangs, c'est-à-dire, pour chacune des variables, les numéros d'ordres des observations rangées par ordre croissant.

Ce coefficient de rang r_s s'exprime par la relation :

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Où d_i est la différence de rang $X_i - Y_i$ relative aux différents individus et n le nombre d'observations.

A titre de contrôle on vérifiera :

$$\sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n Y_i = n(n+1)$$

Et

$$\sum_{i=1}^n d_i = 0$$

Le coefficient de rang r_s variera entre 1 (corrélation maximale) et -1 (corrélation nulle).

Résumé

Des parcelles de sol situées dans les départements des Alpes-de-Haute-Provence, de Vaucluse et des Bouches-du-Rhône, et ayant reçues une culture de blé dur, sont suivies au niveau de la fertilisation azotée et de l'évolution du végétal.

Le présent travail s'est intéressé uniquement à l'état initial de l'azote nitrique du sol. On s'est intéressé à l'horizon 0-120 cm, exception faite des parcelles suivies sur le domaine INRA, où l'horizon étudié était 0-180 cm.

La teneur en azote du sol estimée varie en moyenne entre 57 et 451 kg/ha. La variabilité spatiale estimée pour les différentes parcelles passe de 16,11% à 52,18%.

L'estimation du nombre de prélèvements à réaliser pour une meilleure prise en compte de la variabilité spatiale, a montré qu'il aurait été nécessaire de réaliser 12 prélèvements lorsqu'il en a été fait seulement 3, et 58 prélèvements lorsqu'il en a été effectué 14.

L'analyse de corrélation de rang entre l'azote nitrique et l'humidité a montré qu'il n'y avait pas ou peu de corrélation entre ces deux paramètres, exception faite pour les parcelles du domaine INRA ($r_s = 0,678$).

Mots clés : Sol, nitrate, humidité, variabilité spatiale, électrode spécifique.