

**Effets des événements hydrologiques  
(pluie et fonte de la neige) sur les  
pertes d'azote et de phosphore résultant  
de l'épandage du lisier de porc  
au printemps et à l'automne**

INRS-Eau, rapport scientifique No 308

Gangbazo, Georges  
Couillard, Denis  
Cluis, Daniel

Mars 1991

Entente auxiliaire Canada-Québec  
sur le développement agro-alimentaire

**Effets des événements hydrologiques  
(pluie et fonte de la neige) sur les  
pertes d'azote et de phosphore résultant  
de l'épandage du lisier de porc  
au printemps et à l'automne**

INRS-Eau, rapport scientifique No 308

Gangbazo, Georges  
Couillard, Denis  
Cluis, Daniel

Mars 1991

Entente auxiliaire Canada-Québec  
sur le développement agro-alimentaire

**Programme de recherche en  
Conservation du Sol et de l'Eau**

L'objectif de ce programme est:

- d'accroître les connaissances dans le domaine de la conservation des sols et de l'eau afin d'assurer aux producteurs agricoles des moyens d'éviter que leur sol se dégrade;
- d'évaluer des nouvelles technologies de conservation du sol incluant la mise au point de nouvelles pratiques culturales.

Pour ce faire, les gouvernements du Canada et du Québec ont convenu de mettre en place des équipes de recherche multidisciplinaires afin de trouver et d'expérimenter des solutions qui permettraient de répondre aux problèmes reliées à la conservation du sol et de l'eau au Québec.

Des contrats de recherche sont également accordés aux organismes qui disposent des ressources adéquates et suffisantes pour réaliser des travaux de recherche en conservation du sol et de l'eau.

Dans ce document, le genre masculin comprend le genre féminin et n'est utilisé que pour alléger le texte.

## RÉSUMÉ

Les objectifs du projet sont:

1) déterminer l'importance de certains facteurs (taux d'épandage, mode d'épandage, délai entre l'épandage et l'événement de pluie, intensité et durée de la pluie) et leurs interactions, sur la charge d'azote et de phosphore dans les eaux de ruissellement et de drainage, suite à l'épandage du lisier de porc au printemps;

2) obtenir l'effet des événements hydrologiques de l'hiver et du printemps (fonte de neige et/ou pluie), sur la charge d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage suite à l'épandage du lisier de porc tard à l'automne, soit juste avant la période de gel, alors que les risques de pluie sont faibles.

L'expérience a été réalisée en deux volets. Le premier consiste à simuler des pluies printanières, et le deuxième, le gel du sol et la fonte de la neige, sur des boîtes contenant 40 cm d'un sol de texture moyenne (loam sablo-argileux Coaticook) et sur lesquelles on a épandu du lisier de porc en surface ou enfoui à 20 cm de profondeur, à raison de 0 kg NTK/ha(T0), 150 kg NTK/ha(T1) et 300kg NTK/ha(T2). La pente des boîtes était de 3%.

La contribution totale de l'Entente Canada-Québec est de 95000 \$ sur trois ans.

Les résultats ont démontré que les événements hydrologiques ont des effets complexes sur la perte d'éléments nutritifs, notamment à cause des nombreuses interactions.

Sous les pluies printanières étudiées (C1:11mm/h-142min; C2:22mm/h-71min), les charges d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement représentent au maximum l'équivalent de 14 et 12% des charges épandues. Elles augmentent avec le taux d'épandage et diminuent avec le délai. L'enfouissement du lisier et le choix des jours d'épandage en fonction de la probabilité de l'avènement d'une pluie, sont deux méthodes qui permettent de minimiser la charge de polluants dans l'eau de ruissellement.

Sous les conditions hivernales et de fonte printanière, les charges totales d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage varient selon le mode et le taux d'épandage, sauf pour les nitrates où ni le mode, ni le taux d'épandage ne sont significatifs. Les charges augmentent avec le taux d'épandage et diminuent lorsque le lisier est enfoui comparativement à l'épandage à la surface du sol. Elles

varient pour T1 et T2, de 14.70 à 20.02 kg NTK/ha si le lisier est épandu à la surface du sol (3.5% de la quantité épandue), 11.15 à 13.88 kg NTK/ha si le lisier est enfoui dans le sol, (1.8% de la quantité épandue), 6.88 à 10.40 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha si le lisier est épandu à la surface du sol (3.0% de la quantité épandue), 3.80 à 4.82 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha si le lisier est enfoui dans le sol (1.0% de la quantité épandue), 1.64 à 2.94 kg P/ha si le lisier est épandu à la surface du sol (3.7 à 4.7% de la quantité épandue), 0.62 kg P/ha si le lisier est enfoui dans le sol (0.8% de la quantité épandue), 0.9 à 1.7 kg P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/ha si le lisier est épandu à la surface du sol (18.6% de la quantité épandue), 0.02 kg P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/ha si le lisier est enfoui dans le sol (une fraction très négligeable de la quantité épandue).

#### **ABSTRACT**

Pig manure was applied to a clay-loam soil contained in boxes and then runoff was measured under simulated rainfall (spring time conditions) and under rain and melting of snow (winter and early spring time conditions).

For the spring time conditions, three rates of manure [0 kg TKN/ha(T0), 150 kg TKN/ha(T1), 300 kg TKN/ha(T2)] with and

without incorporation(20 cm), two rainfall intensities [11 mm/h-142 min(C1) and 22 mm/h-71 min(C2)] with three different rainfall delays (1h, 24h, 48h) were applied. For the winter and early spring time conditions, the three rates of manure were applied with or without incorporation. Nitrogen and phosphorus concentrations were monitored in both runoff and drainage waters.

Results showed that under spring time conditions, N and P loads in runoff waters represent 14%(T1) and 17%(T2) of the amount contained in pig manure. They increased with rate and decreased with rainfall delay. Time of application with reference to rainfall delay and incorporation resulted in a significant reduction of N and P sources of pollution in runoff waters.

Under winter and early spring time conditions, N and P loads in runoff and drainage waters increased with rate of application and decreased with incorporation of manure. Nitrates are not influenced by these two factors. When manure is surface applied, load of TKN ranged from 14 to 20 kg/ha for T1 and T2 (respectively 3.5% of the quantity applied), from 11 to 13 kg/ha when manure is incorporated (respectively 1.8% of the quantity applied), total phosphorus ranged from 1.6 to 2.9 kg

P/ha for T1 and T2 (respectively 3.7 and 4.7% of the quantity applied), 0.62 kg P/ha when manure is incorporated (0.8% of the quantity applied).

**LISTE DES PARTICIPANTS**

Requérants:

Gangbazo G., D. Couillard, D. Cluis  
Université du Québec  
Institut National de la Recherche Scientifique  
INRS-Eau  
2700, rue Einstein, C.P. 7500  
Sainte-Foy, (Québec)  
G1V 4C7  
Téléphone: (418) 654-2541

Agent de projet:

Alain Juneau  
Agriculture Canada  
Gare Maritime Champlain  
901, rue Cap-Diamant, Pièce 350-4  
Québec, (Québec)  
G1K 4K1  
Téléphone (418) 648-4775

Contribution financière de l'Entente: 40624.11 \$ (1988-89);  
43269.38 \$(1989-90); 11106.51 \$ (1990-91). Total: 95000 \$

## TABLE DES MATIERES

	Page
Introduction .....	11
1.0 Hypothèse.....	13
2.0 Objectifs.....	13
3.0 Épandage du lisier de porc au printemps.....	14
3.1 Protocole expérimental.....	14
3.2 Résultats et discussions.....	18
3.2.1 Charge d'azote .....	18
3.2.2 Charge de phosphore .....	29
4.0 Épandage du lisier de porc tard à l'automne.....	32
4.1 Protocole expérimental.....	32
4.2 Résultats et discussions.....	35
4.2.1 Conditions météorologiques.....	38
4.2.2 Charge d'azote et de phosphore.....	39
5.0 Conclusion .....	46
6.0 Recommandations .....	51
Références bibliographiques.....	54

## Introduction

L'épandage du lisier sur les sols crée de sérieux problèmes de pollution de l'eau dans tous les pays où les productions animales sont concentrées sur un territoire restreint. C'est le cas en Italie (Pagliai et Sequi, 1981) en Hollande et en France (André et Dubois de la Sablonnière, 1983). La province du Québec ne fait pas exception à cette règle. Au total, les élevages porcins produisent près de  $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$  de lisier par année, soit 25% de la quantité totale de déjections animales (Thériault, 1983). A cause des nombreuses contraintes, telles que capacités d'entreposage insuffisante, productions sans sol, longs hivers, de grandes quantités de lisier de porc sont épandues sur les champs très tôt au printemps ou très tard à l'automne, sans égard aux conditions météorologiques. Comme le lisier de porc contient beaucoup d'eau (en moyenne 95%), il en résulte que l'épandage de si grandes quantité d'eau au printemps ou tard à l'automne sur des champs dénudés ou en pente, augmente les risques de ruissellement si une pluie survient dans les heures qui suivent (Pagliai et Sequi, 1981). Épandu très tard à l'automne, le lisier peut geler; son évolution dans le temps peut être très complexe, dépendant des conditions climatiques hivernales; toutefois, aucune donnée n'est disponible sur le sujet. Dans certains cas, il est épandu sur la neige ou sur des sols gelés; les conséquences négatives d'une telle pratique sur le plan environnemental sont bien connues (Reddy et al., 1977; Steenhuis, 1977; Steen-

huis et al., 1981).

Bien que la plupart des cours d'eau agricoles traversant des zones d'élevage intensif soient très pollués et que, dans la plupart des cas, l'on soupçonne l'épandage des déjections animales et particulièrement celle du lisier de porc d'en être responsable (Simoneau et Grimard, 1989; Primeau et Grimard, 1990a; 1990b), il n'existe presque pas de données originales sur l'effet des pratiques actuelles d'épandage (épandage de grandes quantités de lisier tôt au printemps et tard à l'automne) sur la qualité des cours d'eau. De telles connaissances sont nécessaires, non seulement pour comprendre les mécanismes de transport des polluants vers les cours d'eau et leur importance relative, mais aussi pour élaborer des éléments de solution et développer des modèles de prévision de la pollution diffuse due à l'épandage du lisier de porc.

Le but de ce projet, est de simuler l'effet de la pluie et de la fonte de la neige sur la charge d'azote et de phosphore dans les eaux de ruissellement et de drainage, lorsque des taux variés de lisier de porc sont épandus tôt au printemps ou tard à l'automne, en surface ou enfouis à 20 cm de profondeur, dans un sol de texture moyenne.

### 1.0 Hypothèse

Les événements hydrologiques sont des facteurs déterminants pour la perte d'éléments nutritifs dans l'eau de ruissellement et de drainage suite à l'épandage du lisier de porc au printemps et tard à l'automne.

### 2.0 Objectifs

Les objectifs du projet sont:

1) déterminer l'importance de certains facteurs (taux d'épandage, mode d'épandage, délai entre l'épandage et l'événement de pluie, intensité et durée de la pluie) et leurs interactions, sur la charge d'azote et de phosphore dans les eaux de ruissellement et de drainage, suite à l'épandage du lisier de porc au printemps;

2) simuler l'effet des événements hydrologiques de l'hiver et du printemps (fonte de neige et/ou pluie), sur la charge d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage suite à l'épandage du lisier de porc tard à l'automne, soit juste avant la période de gel, alors que les risques de pluie sont faibles.

### 3.0 Épandage du lisier de porc au printemps

#### 3.1 Protocole expérimental

L'expérience s'est déroulée au cours de l'hiver 1988-89, à Lennoxville, dans le sud-est du Québec, à l'intérieur d'un bâtiment chauffé, à une température moyenne de 10°C. On a utilisé un simulateur de pluie, conçu à la station de recherches du ministère de l'Agriculture du Canada à Lennoxville, d'après un prototype réalisé par Meyer et McCune(1958), pour étudier l'érosion hydrique du sol. Pour les besoins de ce projet, des buses calibrées pour donner les intensités voulues ont été utilisées. Le simulateur est dimensionné pour couvrir 24 m<sup>2</sup> de pluie artificielle, soit une surface de 4.0 m de largeur par 6.0 m de longueur.

On a utilisé des boîtes en bois recouvertes à l'intérieur d'une feuille en aluminium. Elles ont 30 cm de largeur(l), 88 cm de longueur(L) et 46 cm de profondeur(p). Chaque boîte est munie d'une gouttière de 5 cm x 30 cm x 5 cm (lxLxp). La gouttière recueille l'eau de ruissellement et l'évacue par un orifice de 1.5 cm de diamètre. Un autre orifice de même diamètre est pratiqué au fond de chaque boîte pour évacuer l'eau de drainage. Pendant les simulations, les boîtes sont distribuées au hasard sur une plate-forme en bois ayant 6.0 m de long, 1.0 m de large, une pente de 3 %.

Le sol utilisé pour les expériences est l'horizon de surface

(0-25 cm) d'une prairie sur loam sablo-argileux Coaticook (podzol humo-ferrique provenant d'un dépôt lacustre), (Tableau 3.1). Sa teneur en eau au moment des simulations était de 18.9%, soit 5.2% au dessous de la teneur en eau à la capacité au champ. Le sol a été décapé et entreposé à l'abri des intempéries, puis recouvert d'une toile en polyéthylène noir, pour minimiser la perte d'humidité. Le prélèvement de la couche de surface se justifie par le fait que, dans les conditions naturelles, le lisier est surtout en contact avec la couche arable du sol, qu'il soit épandu en surface ou enfoui dans le sol (Crane et al., 1981). Le sol est tamisé grossièrement à l'aide d'un tamis dont les mailles ont 1.25 cm de côté, pour le débarrasser des pierres et des débris végétaux.

Les boîtes sont remplies par strates successives: au fond 5 cm de pierres concassées (3-6 mm) préalablement lavées, suivi de quatre strates successives de 10 cm de sol compacté chacune à une densité apparente de  $1.2 \text{ Mg.m}^{-3}$ , soit la densité naturelle du sol non remanié. Lorsque la pluie doit être simulée 24 ou 48 heures après l'épandage, les boîtes sont recouvertes d'une toile en polyéthylène, pour éviter un assèchement excessif du sol.

Le lisier frais [95% d'eau, 5495 ppm d'azote total Kjeldahl (NTK), 4175 ppm d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), 8 ppm de nitrates

( $\text{N-NO}_3^-$ ), 1218 ppm de phosphore total (P) et 157 ppm d'orthophosphates ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) provient d'une ferme porcine d'engraissement. Prélevé dans la préfosse attenante à la porcherie après homogénéisation du contenu, il a été pompé dans des réservoirs de 200 L et entreposé à une température de 5°C. L'enfouissement du lisier consiste à l'épandre au-dessus des deux premières strates de sol préalablement compactées avant de poursuivre le remplissage des boîtes.

Le dispositif expérimental est de type factoriel, avec quatre variables indépendantes (deux à trois niveaux et deux à deux niveaux) et trois répétitions, ce qui a nécessité 108 boîtes. Les conditions choisies pour l'expérience (variables indépendantes) sont celles qui ont souvent été citées dans la littérature comme ayant un effet sur la pollution de l'eau de ruissellement suite à l'épandage des déjections animales sur le sol (Ross et al., 1979; Westerman et Overcash, 1981; Bottom et al., 1983). Ce sont:

- le taux d'épandage:  $T_0=0$ ,  $T_1=27.3$ ,  $T_2=54.6 \text{ m}^3/\text{ha}$  sur sol nu, soit l'équivalent de 0, 150 et 300 kg NTK/ha (0, 115, 230 kg  $\text{N-NH}_4^+$ /ha ou 0, 0.2, 0.4 g  $\text{N-NO}_3^-/\text{ha}$ ) ou encore 0, 35, 70 kg P/ha (0, 4.3, 8.6 kg  $\text{P-PO}_4^{3-}/\text{ha}$ ). Pour la superficie efficace des boîtes de sol ( $0.26 \text{ m}^2$ ), ces taux d'épandage correspondent respectivement à 0, 0.71 et 1.42 L de lisier;
- le délai entre l'épandage et l'événement de pluie:  $D_0=1$ ,

D1=24, D2=48 heures;

- le mode d'épandage: M1=épandage en surface; M2=enfouissement à 20 cm;

- l'intensité et la durée de la pluie: C1=11 mm/h pendant 142 min et C2=22 mm/h pendant 71 min, pour une hauteur de pluie égale à 26 mm, soit 6.76 litres d'eau dans chaque cas. Cette hauteur de pluie a une période de retour de l'ordre de 5 ans dans la région du sud-est du Québec, pour la période visée par l'étude, soit entre le 15 avril et le 15 mai, période de préparation du sol, des épandages du printemps et du semis.

Immédiatement après la simulation, un échantillon représentatif de l'eau de ruissellement est prélevé et placé au congélateur. De plus, vingt-quatre heures après la fin de la simulation, soit après que l'eau infiltrée dans le sol ait atteint un état d'équilibre, le volume total d'eau de drainage est mesuré, et un échantillon représentatif de cette eau est prélevé et congelé en vue des analyses chimiques. De plus, un échantillon de sol est prélevé à tous les 5 cm de profondeur pour un total de 8 échantillons par boîte. Ces échantillons sont également congelés.

On a analysé (variables dépendantes) sur chaque échantillon d'eau et de sol les concentrations en azote total Kjeldahl (NTK), azote ammoniacal ( $N-NH_4^+$ ), nitrates ( $N-NO_3^-$ ), phosphore total (P), et orthophosphates ( $P-PO_4^{3-}$ ) selon des méthodes

standardisées (Gangbazo,1991), puis calculé la charge de ces mêmes paramètres dans les eaux de ruissellement et de drainage. Dans le reste du texte, seul le terme nitrates ou  $N-NO_3^-$  sera utilisé pour désigner la somme des nitrites et des nitrates étant donné que les nitrites sont une forme instable de l'azote, leur concentration dans l'eau et dans le sol étant généralement négligeable (Dommergues et Mangenot,1970; Lesczynski,1976; McNeely et al.,1980).

La procédure GLM de SAS Pc (SAS Institute,1988), a été utilisée pour analyser l'effet principal des variables indépendantes de celui de leurs interactions sur les variables dépendantes. Les principaux résultats concernant les eaux de ruissellement sont présentés ci-dessous par souci de limiter le plus possible, le nombre de pages de ce rapport. L'analyse détaillée de toutes les données obtenues est présentée ailleurs (Gangbazo,1991).

### 3.2 Résultats et discussions

#### 3.2.1 Charge d'azote

##### 3.2.1.1 Azote total Kjeldahl (NTK)

L'enfouissement du lisier dans le sol et le choix des jours d'épandage en fonction de la probabilité de l'avènement d'une pluie sont deux bonnes méthodes de gestion du lisier dans la mesure où elles minimisent la pollution de l'eau de ruissel-

lement par l'azote total Kjeldahl. En effet l'étude des interactions T(MxD) et T(MxC) montre que la charge produite à la suite de la simulation des pluies sur les boîtes où le lisier est enfoui n'est pas significativement différente de celle des témoins. Dans tous les cas, l'eau de ruissellement exporte 1 à 10 g NTK/ha (Figures 3.1 et 3.2).

Par contre, lorsque le lisier est épandu à la surface du sol, la charge augmente avec le taux d'épandage quel que soit le délai entre l'épandage et l'événement de pluie [interaction T(MxD); Figure 3.1] et l'intensité-durée de la pluie [interaction T(MxC); Figure 3.2]. En effet l'étude de l'interaction T(MxD) montre que:

- quand la pluie a lieu dans l'heure qui suit, l'augmentation du taux d'épandage de 0 à 150 kg NTK/ha augmente la charge de 18 fois (0.36 à 6.9 kg NTK/ha) et qu'une augmentation du taux d'épandage de 150 à 300 kg NTK/ha augmente la charge de près de 5 fois (6.9 à 40.6 kg/ha). La tendance est quadratique (Figure 3.1a). Les pertes dues à T1 et T2 représentent respectivement 5 et 14% de la charge de NTK épandue;

- lorsque la pluie a lieu 24h après l'épandage, l'effet est linéaire: la charge augmente de 700 fois (0.01 à 7.0 kg/ha) entre T0 et T1. Par contre, elle augmente de deux fois, passant de 7.0 à 14.0 kg/ha si l'on double le taux d'épandage

(Figure 3.1b). Les pertes dues à T1 et T2 représentent respectivement 5% de la charge de NTK épandue;

- si la pluie a lieu 48h après l'épandage, l'effet est linéaire comme dans le cas précédent: la charge augmente de près de 4800 fois (0.001 à 4.8 kg/ha) entre T0 et T1, et double, passant de 4.8 à 9.6 kg/ha si l'on double le taux d'épandage (Figure 3.1c). Les pertes dues à T1 et T2 représentent respectivement 3% de la charge de NTK épandue;

Il s'en suit que l'effet du taux d'épandage sur la charge d'azote total Kjeldahl dans l'eau de ruissellement est beaucoup plus marqué lorsque la pluie a lieu dans l'heure qui suit l'épandage en surface que lorsqu'elle a lieu plus tard.

De la même façon, l'étude de l'interaction T(MxC) (Figure 3.2a) montre que:

- sous la pluie C1, l'effet du taux d'épandage sur la charge de NTK dans l'eau de ruissellement est quadratique: l'augmentation du taux d'épandage de T0 à T1 augmente la charge de 27 fois (0.3 à 8.6 kg/ha ou 6% de la charge épandue). Doubler le taux d'épandage fait presque quadrupler la charge, la faisant passer de 8.6 à 33.8 kg/ha ou 11% de la charge épandue;

- sous la pluie C2, l'effet est linéaire: l'augmentation du taux d'épandage de T0 à T1 augmente la charge de plus de 400

fois (0.01 à 4.3 kg/ha). Doubler le taux d'épandage double la charge, la faisant passer de 4.3 à 8.7 kg/ha. Les charges dues à T1 et T2 représentent respectivement 3% de la charge épandue.

Les résultats montrent aussi que, dans la plupart des cas, l'augmentation du délai entre l'épandage et l'événement de pluie permet de diminuer la charge d'azote total Kjeldahl dans l'eau de ruissellement:

- à un taux d'épandage équivalant à 150 kg NTK/ha, l'augmentation du délai de 1 à 24h diminue la charge de 29% (diminution de 6.3 à 4.5 kg/ha) sous la pluie C1 et le fait de doubler le délai diminue la charge de 42% par rapport à sa valeur précédente (diminution de 4.5 à 2.6 kg/ha). Par contre sous la pluie C2, on assiste à une augmentation de la charge pour toute augmentation du délai: les augmentations sont de 400% entre D0 et D1 et de 77% entre D1 et D2; elles sont difficiles à expliquer (Figure 3.3b).

- à un taux d'épandage équivalant à 300 kg NTK/ha, l'effet du délai est quadratique sous les deux pluies. Sous C1, la diminution de la charge de NTK est très élevée entre D0 et D1, puisque qu'elle est de 83% (45.0 à 7.8 kg/ha) et relativement faible entre D1 et D2, puisqu'elle est de 28% (7.8 à 5.6 kg/ha). Sous C2, la charge augmente de 91% entre D0 et D1,

passant de 3.3 à 6.8 kg/ha, et diminue à 4.1 soit de 35% par rapport à sa valeur précédente, lorsque le délai augmente à 48h (Figure 3.3c).

Westerman et Overcash(1981) ont obtenu des résultats similaires, alors qu'ils ont étudié l'atténuation du potentiel de pollution de l'eau de ruissellement à la suite de l'épandage du lisier de porc. Les résultats ont démontré que la concentration de polluants dans l'eau de ruissellement diminue avec l'augmentation du délai entre l'épandage et l'événement de pluie. Par exemple la concentration d'azote total Kjeldahl et de phosphore total diminue de 10 fois lorsque le délai passe de 1h à 3 jours.

Les résultats de ce projet confirment aussi ceux obtenus par Ross et al., (1979). Ces auteurs ont démontré en effet que l'injection élimine la pollution de l'eau de ruissellement par rapport à l'épandage à la surface du sol. La charge d'azote total Kjeldahl dans l'eau de ruissellement sur les parcelles où le lisier a été injecté et où la pluie a été simulée dans l'heure qui suit l'injection n'était pas significativement différente de celle qui provient des parcelles témoins. Dans les parcelles où le lisier est épandu à la surface du sol, les charges de l'eau de ruissellement après un délai de 1 et 7 jours sont généralement inférieures à celles obtenues pour un délai de 2h. La charge d'azote total Kjeldahl a décru par

exemple d'un facteur de 90 entre un délai de 2h et un délai de 7 jours.

### 3.2.1.2 Azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ )

L'étude des interactions T(MxD) et T(MxC) montre que la charge produite à la suite de la simulation des pluies sur les boîtes où le lisier est enfoui n'est pas significativement différente de celle des témoins. Dans tous les cas, l'eau de ruissellement exporte 1 à 170 g  $\text{N-NH}_4^+$ /ha (Figures 3.4 et 3.5).

Par contre, lorsque le lisier est épandu à la surface du sol, la charge augmente avec le taux d'épandage quel que soit le délai entre l'épandage et l'événement de pluie [interaction T(MxD); Figure 3.4] et l'intensité-durée de la pluie [interaction T(MxC); Figure 3.5]. En effet, l'étude de l'interaction T(MxD) montre que:

- lorsque la pluie a lieu dans l'heure qui suit, l'augmentation du taux d'épandage de 0 à 115 kg  $\text{N-NH}_4^+$ /ha augmente la charge de plus de 80 fois (0.08 à 6.8 kg/ha) et qu'une augmentation du taux d'épandage de 115 à 230 kg/ha augmente la charge de près de 5 fois (6.8 à 40.6 kg/ha). La tendance est quadratique (Figure 3.4a). Les pertes dues à T1 et T2 représentent respectivement 6 et 18% de la charge épandue;

- quand la pluie a lieu 24h après l'épandage, l'effet est linéaire: la charge augmente de plus de 100 fois (0.05 à 6.9 kg/ha ou 6% de la charge épandue) entre T0 et T1, et double, passant de 6.9 à 13.8 kg/ha ou 6% de la charge épandue si l'on double le taux d'épandage (Figure 3.4b).

- lorsque la pluie a lieu 48h après l'épandage, l'effet est linéaire comme dans le cas précédent: la charge augmente de plus de 4000 fois (0.001 à 4.4 kg/ha ou 4% de la charge épandue) entre T0 et T1, et double si l'on double, passant de 4.4 à 8.8 kg/ha ou 4% de la charge épandue si l'on double le taux d'épandage (Figure 3.4c).

Il s'en suit comme c'est le cas pour l'azote total Kjeldahl, que l'effet du taux d'épandage sur la charge d'azote ammoniacal dans l'eau de ruissellement est beaucoup plus marqué lorsque la pluie a lieu dans l'heure qui suit l'épandage en surface que lorsqu'elle a lieu plus tard. Ceci s'explique comme l'indiquent Comfort et al., (1988) par le fait que le sol a un nombre fixe de sites d'adsorption et que la compétition de ces sites par d'autres ions contenus dans le lisier est élevée immédiatement après l'épandage, avant qu'une grande proportion de l'ammoniaque se volatilise. Le potentiel de perte de l'azote ammoniacal via l'eau de ruissellement est donc plus élevé immédiatement après l'épandage que plus tard parce que la capacité d'adsorption de l'azote ammoniacal par le

sol est plus faible que plus tard après l'épandage.

L'explication précédente renforce aussi l'intérêt d'enfouir le lisier si possible immédiatement après l'épandage pour les raisons suivantes: 1) une quantité accrue de l'azote ammoniacal peut s'adsorber sur les sites réactifs du sol, ce qui minimise la volatilisation; 2) la quantité d'azote ammoniacal susceptible d'entrer en contact avec l'eau de ruissellement est réduite.

De la même façon, l'étude de l'interaction T(MxC) (Figure 3.5a) montre que:

- sous la pluie C1, l'effet du taux d'épandage sur la charge d'azote ammoniacal dans l'eau de ruissellement est quadratique: l'augmentation du taux d'épandage de T0 à T1 augmente la charge de plus de 80 fois (0.1 à 8.4 kg/ha); doubler le taux d'épandage quadruple la charge, la faisant passer de 8.4 à 33.4 kg/ha;

- sous la pluie C2, l'effet est linéaire: l'augmentation du taux d'épandage de T0 à T1 augmente la charge de plus de 4000 fois (0.001 à 4.2 kg/ha). Doubler le taux d'épandage double la charge, la faisant passer de 4.2 à 8.6 kg/ha.

La détermination des jours d'épandage en fonction de la

probabilité de l'avènement d'une pluie est aussi une bonne méthode de gestion: en effet, dans la plupart des cas, l'augmentation du délai entre l'épandage et l'événement de pluie permet de diminuer la charge d'azote ammoniacal dans l'eau de ruissellement:

- à un taux d'épandage équivalant à 115 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha, l'augmentation du délai de 1 à 24h diminue la charge de 31% (diminution de 6.4 à 4.4 kg/ha) sous la pluie C1, et le fait de doubler le délai diminue la charge de 45% par rapport à sa valeur précédente (diminution de 4.4 à 2.4 kg/ha). Par contre sous la pluie C2, l'effet du délai n'est pas significatif; la charge moyenne est de l'ordre de 1.8 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha (Figure 3.6b).

- à un taux d'épandage équivalant à 230 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha, l'effet du délai est quadratique sous les deux pluies. Sous C1, la diminution est très élevée entre D0 et D1, puisque qu'elle est de 83% (44.9 à 7.5 kg/ha) et relativement faible entre D1 et D2, puisqu'elle est de 32% (7.5 à 5.1 kg/ha). Sous C2, la charge augmente de 91% entre D0 et D1, passant de 3.3 à 6.2 kg/ha, et diminue à 3.9 soit de 40% par rapport à sa valeur précédente, lorsque le délai augmente à 48h (Figure 3.6c).

Les résultats ressemblent donc sensiblement à ceux obtenus pour l'azote total Kjeldahl et s'expliquent par le fait que la

proportion de l'azote ammoniacal par rapport à l'azote total Kjeldahl dans le lisier de porc était de 76%. De plus, la comparaison des résultats de la concentration d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) et d'azote total Kjeldahl (NTK) dans l'eau de ruissellement montre que la proportion de  $\text{N-NH}_4^+$  par rapport au NTK est de l'ordre de 100% quel que soit le traitement; ce rapport vaut autant pour les boîtes où le lisier est épandu en surface que pour celles où le lisier est enfoui dans le sol, et même pour les boîtes témoins. Cela s'explique par la faible capacité érosive des pluies simulées.

La figure 3.7 montre l'effet de l'intensité de la pluie sur la charge d'azote ammoniacal dans l'eau de ruissellement [interaction C(TxM)]. Il s'agit en réalité d'une autre façon de présenter les résultats de l'interaction T(MxC); (Figure 3.2). On remarque dans la figure 3.7 que pour deux pluies ayant la même hauteur, la charge exportée par celle dont l'intensité est de 22mm/h-71min est plus faible que celle exportée par la pluie de 11mm/h-142min. En effet pour T1, C2 exporte 3.6 kg  $\text{N-NH}_4^+$ /ha dans l'eau de ruissellement, soit deux fois moins que le charge exportée par C1 qui est de l'ordre de 8.5 kg/ha. Dans le cas de T2, la différence est de près de 4 fois (C2 exporte 8.8 kg  $\text{N-NH}_4^+$ /ha alors que C1 en exporte 33.4). Ces résultats s'expliquent par la différence entre les temps de contact de l'eau de ruissellement avec la surface du sol sous les deux pluies puisque le volume d'eau de ruissellement est

le même (Figure 3.8). En effet, en se basant sur les résultats de l'étude des modifications induites par l'épandage à la surface du sol sur le décalage du ruissellement c'est-à-dire le temps séparant le début de la pluie du début du ruissellement [Gangbazo(1991); Figure 3.9], on observe (Tableau 3.2) que pour T1, le temps de contact (TC) est 2.3 fois supérieur sous C1 que sous C2, et que pour T2, il est 2 fois supérieur sous C1 que sous C2. Étant donné que la zone d'interaction de l'eau de ruissellement avec la surface du sol n'est que de l'ordre de quelques millimètres [Sharpley et al., (1981) l'évaluent à 3 mm dans le cas du phosphore], une pluie dont l'intensité et la durée sont telles que le temps de contact est long, exportera plus d'éléments nutritifs solubles dans l'eau. Plus TC augmente, plus l'épaisseur de la zone d'interaction risque d'augmenter, ce qui peut être important, même si l'augmentation n'est que de l'ordre du millimètre.

### 3.2.1.3 Nitrates (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

L'augmentation du taux d'épandage n'a aucun effet significatif sur la charge de nitrates, sauf lorsque la pluie est simulée 48h après l'épandage. En effet dans ce cas, la charge augmente d'une valeur pratiquement nulle à 40 g N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha entre T0 et T1 et de 40 à 100 g N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha entre T1 et T2 (Figure 3.10). Cette augmentation de la charge est probablement due à la nitrification de l'azote et confirme les résultats de Wester-

man et Overcash(1981), qui ont constaté aussi une augmentation de la concentration des nitrates dans l'eau de ruissellement après un délai de 2 à 3 jours, et ont attribué cette augmentation à la nitrification.

### 3.2.2 Charge de phosphore

#### 3.2.2.1 Phosphore total (P)

Comme dans le cas de l'azote total Kjeldahl et d'azote ammoniacal, l'étude de l'effet des différents facteurs sur la charge de phosphore total dans l'eau de ruissellement montre que l'enfouissement du lisier dans le sol, et le choix des jours d'épandage en fonction de la probabilité de l'avènement d'une pluie, sont deux bonnes méthodes de gestion. En effet, la charge due à l'épandage de 35 ou 70 kg P/ha n'est pas significativement différente de celle des témoins où elle était pratiquement nulle comme en font foi les résultats des interactions [T(MxD); Figure 3.11] et [C(MxD); Figure 3.12].

Par contre, lorsque le lisier est épandu à la surface du sol, la charge augmente avec le taux d'épandage quel que soit le délai entre l'épandage et l'événement de pluie (Figure 3.11). L'allure de la réponse pour un délai donné est identique à celle observée pour l'azote total Kjeldahl (Figure 3.1) et l'azote ammoniacal (Figure 3.4): l'effet du taux d'épandage est quadratique pour un délai de 1h, et linéaire pour des

délais de 24 et 48h. Lorsque la pluie a lieu dans l'heure qui suit l'épandage (Figure 3.11a), la charge de phosphore total augmente de moins de 1 g P/ha à 1.5 kg/ha (soit 4% de la charge épandue) entre T0 et T1, et une augmentation du taux d'épandage de T1 à T2 augmente la charge de plus de 5 fois, la faisant passer de 1.5 à 8.1 kg P/ha (soit 12% de la charge épandue). Lorsque la pluie a lieu 24h après l'épandage (Figure 3.11b), la charge augmente de 13 fois (0.06 à 0.8 kg P/ha ou 2% de la charge épandue) entre T0 et T1 et de 2 fois (0.8 à 1.5 kg P/ha ou 2% de la charge épandue) entre T1 et T2. Dans le cas d'un délai de 48h (Figure 3.11c), la charge augmente de 6 fois entre T0 et T1 (0.2 à 1.3 kg P/ha ou 4% de la charge épandue) et moins de 2 fois entre T1 et T2 (1.3 à 2.3 kg P/ha ou 3% de la charge épandue).

Comme dans le cas de la perte d'azote total Kjeldahl et d'azote ammoniacal, le choix des jours d'épandage en fonction de l'avènement d'une pluie est aussi une bonne méthode de contrôle de la perte de phosphore total. Les résultats de l'étude de l'interaction T(DxC), (Figure 3.13) montrent en effet que les charges sont généralement inférieures après des délais de 24 et 48h qu'à l'intérieur d'un délai de 1h, où la charge augmente avec une tendance quadratique aussi bien sous C1 que sous C2. De plus, sous la pluie C2, l'effet du taux d'épandage n'est pas significatif pour les délais de 24 et 48h.

L'étude de l'effet de la pluie [interaction C(MxD); Figure 3.12] montre que quel que soit le délai entre l'épandage en surface et la simulation de la pluie, la charge de phosphore total produite par la pluie C2 est significativement inférieure à celle produite par la pluie C1, bien que le volume d'eau de ruissellement soit le même [Figure 3.8; interaction C(MxD)]. Les différences entre les effets des deux pluies sur la charge de phosphore total sont de 47% pour D0 (diminution de 4.7 à 2.5 kg/ha), 44% pour D1 (diminution de 0.9 à 0.5 kg/ha) et 71% pour D2 (diminution de 2.1 à 0.6 kg/ha); (Figure 3.12). Elles s'expliquent comme précédemment par la différence entre les temps de contact sous C1 et C2.

#### 3.2.2.2 Orthophosphates ( $P-PO_4^{3-}$ )

Comme dans les cas précédents, l'enfouissement du lisier de porc dans le sol, annule pratiquement la charge d'orthophosphates dans l'eau de ruissellement par rapport à l'épandage en surface comme en font foi l'étude des interactions [T(M); Figure 3.14] et [M(DxC); Figure 3.15].

Par contre lorsque le lisier est épandu à la surface du sol, la charge d'orthophosphates augmente avec le taux d'épandage, passant d'une valeur pratiquement nulle à 0.3 kg/ha ou 7% de la charge épandue entre T0 et T1 et double entre T1 et T2, passant de 0.3 à 0.7 kg/ha ou 8% de la charge épandue (Figure

3.14).

L'effet du taux d'épandage varie selon l'intensité-durée de la pluie et le délai entre l'épandage et l'événement de pluie. En général, sous la pluie C2, l'effet du taux d'épandage n'est pas significatif alors que sous la pluie C1, il est significatif pour D0 et D2 (Figure 3.16). De la même façon, l'effet du mode d'épandage est significatif sous C1 et non significatif sous C2 (Figure 3.15).

Les résultats du phosphore montrent donc que les pertes de phosphore total et d'orthophosphates représentent respectivement au maximum 12 et 8% de la charge épandue. Cette proportion relativement faible s'explique par la réduction de la quantité de phosphore disponible dans la couche superficielle du sol dès après l'épandage du lisier (Westerman et Overcash(1981).

#### 4.0 Épandage du lisier de porc tard à l'automne

##### 4.1 Protocole expérimental

L'expérience s'est déroulée aussi à Lennoxville, au cours de l'hiver 1989-1990, partiellement à l'extérieur et partiellement à l'intérieur du même bâtiment chauffé qui a servi lors des simulations de pluies printanières au cours de l'hiver précédent.

Les boîtes contenant le sol, et les procédures de remplissage et d'épandage, ainsi que les caractéristiques du lisier de porc sont les mêmes que précédemment. Les caractéristiques moyennes du sol sont sensiblement les mêmes que celles du sol utilisé en 1988-1989, sauf en ce qui concerne sa teneur en eau, qui est proche de la capacité au champ.

Pour contenir la neige, on a utilisé des boîtes en bois sans fond ayant 30 cm de largeur(l), 88 cm de longueur(L) et 50 cm de profondeur(p) qui sont fixées au-dessus des boîtes de sol. Les deux boîtes sont fabriquées de manière à s'imbriquer l'une dans l'autre. Un joint d'étanchéité en silicone, posé entre les bords supérieurs et inférieurs des deux boîtes, empêche toute fuite d'eau pendant la fonte de la neige. La profondeur des boîtes de neige est basée sur l'épaisseur maximale de neige au sol à la station météorologique de Lennoxville au début de mars, soit  $37 \pm 20$  cm (Ministère de l'Environnement du Québec, 1984).

Le dispositif expérimental est de type factoriel, avec deux variables indépendantes (une à trois niveaux et une à deux niveaux) et trois répétitions, ce qui nécessita 18 boîtes. Ce sont:

- le taux d'épandage: T0:0, T1:27.3, T2:54.6 m<sup>3</sup> lisier/ha sur sol nu, soit 0, 150 et 300 kg NTK/ha.

- le mode d'épandage: M1:épandage en surface; M2:enfouissement à 20 cm de profondeur;

Toutes les boîtes ont été préparées très tard à l'automne, soit le 9 décembre 1989, alors que les risques de pluie étaient faibles. Ensuite, elles ont été transportées dans un champ, et placées côte à côte sur une plate-forme en ciment ayant une pente de 3%. Les parois extérieures des boîtes ont été recouvertes de panneaux d'isolant rigide de marque 'STYROFOAM' de 5 cm d'épaisseur, pour favoriser le gel du sol dans le sens vertical. Une série de 5 thermocouples ont été installés dans l'air ambiant et à 0, 5, 15 et 35 cm de profondeur dans un groupe de trois boîtes pendant le remplissage avec le sol. Celles-ci ont été placées au début, au 1er tiers et au 2è tiers de la rangée. Les thermocouples étaient reliés à un enregistreur de données 'Multipoint recorder' modèle M11E, manufacturé par la compagnie 'Barber Coleman'. L'appareil dont la gamme de lecture varie de -50 à +50 °C, enregistrait continuellement l'évolution de la température de l'air et du sol.

Les températures minimales et maximales de l'air, ainsi que les hauteurs de précipitations de neige ou de pluie selon le cas, sont fournies par la station météorologique de Lennoxville, située à moins de 500 m de l'emplacement des boîtes.

On a mesuré séparément, le volume d'eau de ruissellement et/ou de drainage après chaque événement de pluie et/ou de fonte, la hauteur de neige sur les boîtes périodiquement, et calculé la charge d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage.

Après chaque événement de pluie et/ou de fonte, on a échantillonné séparément les eaux de ruissellement et/ou de drainage. La neige fraîche fût également échantillonnée à 4 reprises entre le 9 décembre 1989 et le 5 mars 1990. Elle contenait en moyenne 0.15 ppm d'azote total Kjeldahl (NTK), 0.03 ppm d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), 0.04 ppm de nitrates ( $\text{N-NO}_3^-$ ), 0.1 ppm de phosphore total (P) et 0.01 ppm d'orthophosphates ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ). De plus, à la fin de l'expérience, le sol de chaque boîte fût échantillonné à tous les 5 cm de profondeur pour un total de 8 échantillons par boîte. Tous les échantillons d'eau et de sol ont été rapidement placés au congélateur en vue de l'analyse chimique des mêmes paramètres que précédemment.

#### 4.2 Résultats et discussions

Il convient de mentionner que l'expérience n'a pas eu lieu entièrement à l'extérieur, comme cela était prévu au départ pour les raisons suivantes:

- 1) l'hiver 1989-1990 a été particulier dans la région du sud-

est du Québec, avec plusieurs événements de pluie entre le 9 décembre 1989 et le 5 mars 1990. De plus, au cours de cette période, la température maximale de l'air s'était élevée régulièrement au-dessus du point de congélation pendant une journée sur deux, si bien que la neige qui s'était accumulée dans les boîtes au cours des journées précédentes fondait.

2) au début du printemps, il restait peu de neige au sol à la station météorologique, et aucune trace de neige dans les boîtes. De plus, la température de l'air augmentait vite d'une journée à l'autre.

A cause de ces conditions, et pour ne pas risquer de compromettre l'expérience, il fût décidé de rentrer les boîtes à l'intérieur du même bâtiment qui avait servi lors des expériences de simulation de pluie, le 5 mars 1990, soit 87 jours après qu'elles aient été placées à l'extérieur, pour y simuler une fonte de neige.

Cette simulation consistait à remplir les boîtes avec 50 cm de neige, puis à installer à 30 cm au-dessus de chaque boîte, une ampoule à infra-rouge identique à celles utilisées dans les bâtiments agricoles, pour chauffer les loges de maternité de porcherie entre autres. La neige utilisée avait une densité, donc un équivalent en eau de 0.45. Cette densité s'apparente à celle d'une neige fraîche, ferme, partiellement consolidée

en glace, dont la densité varie normalement de 0.4 à 0.55 (McKay, 1972).

Pour évaluer la contribution de la neige à la charge d'éléments nutritifs dans l'eau de ruissellement et/ou de drainage au cours de la fonte, trois boîtes avec fond, isolées comme décrit précédemment et remplies de neige furent insérées au hasard entre les boîtes de sol au moment de la simulation de la fonte.

Au cours de la fonte, les panneaux isolants ont été maintenus autour des boîtes. Les thermocouples ont été également maintenus en place, ce qui a permis de continuer à enregistrer la température du sol à différentes profondeurs, et celle de l'air ambiant dans le bâtiment, jusqu'à la fonte complète de la neige. Les lampes à infra-rouge, et l'éclairage du bâtiment étaient éteints le soir, et allumés le matin, pour simuler l'alternance du jour et de la nuit.

La procédure GLM de SAS Pc (SAS Institute, 1988) a été utilisée pour analyser l'effet principal des variables indépendantes à savoir le taux (T) et le mode (M) d'épandage et celui de leur interaction (T x M) sur les variables dépendantes, c'est-à-dire les charges d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage. Comme dans la section 3, seuls les principaux résultats, en particulier ceux qui concernent le

total de la période de gel et de dégel sont présentés. Les autres résultats ont été commentés ailleurs (Gangbazo, 1991).

#### 4.2.1 Conditions météorologiques

La période du 9 décembre 1989 au 5 mars 1990 a connu quatre événements de pluie de 0.4 et 9.6 mm les 25 et 26 janvier, et de 2.6 et 16.6 mm les 9 et 10 février 1990 pour un total de 29.2 mm de pluie, et 124.9 cm de neige, soit l'équivalent de 124.9 mm d'eau en 26 événements. Au total, les événements de pluie et de neige ont donc produit l'équivalent de 154.1 mm d'eau sur les boîtes si l'on suppose que la neige a une densité de 0.1. Ces valeurs sont inférieures de l'ordre de 30% aux moyennes de la période. Si on suppose que la concentration de l'eau de pluie est la même que celle de la neige, alors la charge totale d'éléments nutritifs occasionnée par les précipitations est de 0.23 kg NTK/ha, 0.05 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha, 0.06 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha, 0.15 kg P/ha, 0.015 kg P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/ha. Ces valeurs sont en général négligeables par rapport à la charge apportée par l'épandage du lisier à l'automne, sauf pour les nitrates où la contribution des précipitations dépasse celle du lisier de 1.5 à 3 ordres de grandeur.

Il y eût aussi 4 événements de fonte en janvier, soit les 5, 18, 25 et 26 janvier, 3 événements en février, soit les 2, 10 et 23 février, et un événement le 3 mars 1990. Ces événements

ont occasionné au total un volume moyen d'eau de ruissellement de 30.53 L ou 120 mm et un volume moyen d'eau de drainage de 0.28 L ou 1.0 mm, soit au total 121 mm d'eau.

La température minimale de l'air était constamment sous le point de congélation au cours des 87 jours que les boîtes ont passé à l'extérieur, avec des extrêmes variant de -20 à -37°C. Cependant, la température moyenne maximale de l'air, qui était de l'ordre de -10°C en décembre, s'est élevée au-dessus du point de congélation à partir du mois de janvier, avec des extrêmes variant de 5 à 10°C.

La température extérieure a provoqué le gel du sol sur toute sa profondeur pendant toute la période où les boîtes étaient à l'extérieur, comme en font foi les températures moyennes du sol à 0, 5, 15 et 35 cm (Figure 3.17). On observe aussi qu'à cause de la taille relativement petite des boîtes, la température extérieure a eu une grande influence sur la température du sol à en juger par la similitude des variations temporelles de ces deux types de température.

#### 4.2.2 Charge d'azote et de phosphore

Aucun des facteurs, ni leur interaction n'a un effet significatif sur la charge de nitrates dont la valeur moyenne est de  $63.61 \pm 9.68$  kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha. Cette valeur est 160 000 fois plus

élevée que la charge maximale de nitrates épanchée à l'automne sous forme de lisier, soit  $0.4 \text{ g N-NO}_3^-/\text{ha}$ . Si l'on tient compte de la contribution des précipitations et des 50 cm de neige supplémentaires ajoutée lors de la simulation de fonte, soit l'équivalent de  $0.15 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$ , on constate que la charge moyenne de nitrates exportée à la fin de la période de dégel est 157 000 fois supérieure à la charge maximale de nitrates apportée par le lisier de porc à l'automne. Il en résulte que l'azote contenu dans le sol naturel s'est nitrifié au cours de la période de dégel.

L'effet du lisier est certainement très faible dans ce processus de nitrification puisque l'effet du taux d'épandage sur la charge de nitrates n'est pas significatif.

Tous les facteurs et leur interaction sont significatifs pour la charge d'azote total Kjeldahl, d'azote ammoniacal, de phosphore total et d'orthophosphates. Les effets sont linéaires dans tous les cas. Les charges augmentent avec le taux d'épandage quel que soit le mode d'épandage. Dans tous les cas, les charges dues à l'enfouissement sont inférieures à celles dues à l'épandage à la surface du sol parce que les événements hydrologiques qui ont eu cours pendant que le sol était gelé n'ont affecté que les boîtes où le lisier a été épanché à la surface du sol. Voici les résultats:

Lorsque le lisier est épandu à la surface du sol, le fait de doubler le taux d'épandage augmente la charge d'azote total Kjeldahl de 14.7 à 20.02 kg/ha (Figure 3.18), soit une augmentation de 36%. Si l'on soustrait de ces valeurs la contribution du sol naturel (9.38 kg/ha), on estime à 3.5%, le pourcentage de la charge de NTK épandue sous forme de lisier à l'automne qui est perdue au cours de la période de gel et de dégel. Lorsque le lisier est enfoui dans le sol à l'automne, le fait de doubler le taux d'épandage augmente la charge de NTK de 11.15 à 13.88 kg/ha (Figure 3.18). Il s'agit d'une augmentation de 24%. Si l'on soustrait de ces valeurs la contribution du sol naturel (8.42 kg/ha), on observe que le pourcentage de la charge de NTK, épandu sous forme de lisier à l'automne, qui est perdu est de 1.8%.

En ce qui concerne l'azote ammoniacal, le fait de doubler le taux d'épandage en surface augmente la charge totale de 6.88 à 10.4 kg/ha, soit une augmentation de 51% (Figure 3.19). Les pertes nettes représentent 3% de la quantité d'azote ammoniacal épandue à l'automne sous forme de lisier. Lorsque le lisier est enfoui, la perte totale est de 3.80 et 4.82 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha pour T1 et T2. Si l'on tient compte de la contribution du sol naturel (3.33 kg/ha), la perte d'azote ammoniacal représenterait environ 1% de la quantité épandue.

Dans le cas du phosphore total (Figure 3.20) et des orthophos-

phates (Figure 3.21), l'effet du taux d'épandage est significatif pour M1: la charge augmente linéairement avec le taux d'épandage. Par contre, il est non significatif pour M2. Par exemple, lorsque le lisier est épandu à la surface du sol, le fait de doubler le taux d'épandage à la surface du sol augmente la charge totale de phosphore total de 1.64 à 2.94 kg P/ha, soit une augmentation de 80%. Si l'on tient compte de la contribution du sol naturel (0.34 kg P/ha), la perte de phosphore total représente 3.7 et 4.7% de la quantité épandue. Par contre, lorsque le lisier est enfoui dans le sol, la charge moyenne de phosphore total est de 0.62 kg P/ha. La contribution du lisier est de 0.8%. Dans le cas des orthophosphates, le passage de T1 à T2 à la surface du sol augmente la charge totale de 0.9 à 1.7 kg/ha, soit une augmentation de 90%. La contribution du sol naturel étant de 0.1 kg/ha, la charge d'orthophosphates représente 18.6% de la quantité épandue. Lorsque le lisier est enfoui dans le sol, la charge moyenne est de 0.02 kg/ha quel que soit le taux d'épandage. La contribution du lisier est donc très négligeable.

Le tableau 4.1 résume les résultats décrits ci-dessus. Il indique que les pertes d'azote total Kjeldahl, d'azote ammoniacal et de phosphore total dans l'eau de ruissellement et de drainage représentent au maximum 3.5%, 3% et 4.5% de la quantité épandue sous forme de lisier de porc tard à l'automne. La perte d'orthophosphates est négligeable. Par contre, la perte

de nitrates est 157 000 fois plus élevée que la quantité épandue sous forme de lisier tard à l'automne, à cause de la nitrification, même dans les boîtes où il n'y a eu aucun épandage de lisier. Les pertes d'éléments nutritifs sont en général moins élevées lorsque le lisier est enfoui dans le sol à l'automne que lorsqu'il est épandu à la surface du sol. De plus, elles augmentent généralement avec le taux d'épandage. Par exemple, la perte d'azote total Kjeldahl est de 14.70 kg/ha pour T1 et 20.02 kg/ha pour T2 lorsque le lisier est épandu à la surface du sol. Par contre, elle est de 11.15 kg/ha pour T1 et de 13.88 kg/ha pour T2 lorsque le lisier est enfoui dans le sol.

Les données précédentes confirment en partie les observations faites par Bubbenzer et Converse(1975), à la suite de l'épandage du lisier de bovin sur des parcelles naturelles semées en trèfle pendant trois années consécutives. L'épandage d'automne a été fait entre le 1er et le 8 décembre au taux moyen de 127 kg NTK/ha. Les résultats démontrent que la fonte de la neige au printemps a entraîné une perte de 12 kg NTK/ha, 5 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha et 1.2 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha. Ces valeurs représentent 9.4, 14 et 120% de la quantité des différentes formes d'azote épandue à l'automne.

Les résultats de Tokarz et al., (1979) indiquent par contre que sur les parcelles où le lisier fut épandu à raison de 250 ou

500 kg N/ha à l'automne et incorporé dans le sol, la perte d'azote n'est pas significativement différente de celle des parcelles témoins. Par exemple l'épandage de 250 kg/ha a produit 3.8 kg NTK/ha, 1.2 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha et 0.2 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha dans l'eau de ruissellement au cours de la période de fonte. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues dans le cadre de ce projet et peuvent s'expliquer par les pertes d'éléments nutritifs qui ont eu lieu dans l'eau de ruissellement et de drainage avant que le sol ne gèle.

La répartition des pertes d'azote et de phosphore entre la période de gel et la période de dégel (Gangbazo, 1991), (Tableau 4.2) montre que:

1) lorsque le lisier est épandu à la surface du sol tard à l'automne, les pertes d'azote total Kjeldahl, d'azote ammoniacal et de phosphore total ont lieu surtout pendant que le sol est gelé en hiver, donc avec l'eau de ruissellement. Dans le cadre de ce projet, les pertes observées au cours de cette période représentent par rapport au total de la période de gel et de dégel, pour l'azote total Kjeldahl 54% pour T1 et 66% pour T2; pour l'azote ammoniacal 77% pour T1 et 88% pour T2; pour le phosphore total 74% pour T1 et 81% pour T2.

2) lorsque le lisier est enfoui dans le sol tard à l'automne, les pertes d'azote total Kjeldahl, d'azote ammoniacal et de

phosphore total ont lieu surtout pendant que le sol dégèle et que l'eau produite par la fonte de la neige s'infiltré dans le sol, et alimente les drains. Dans le cadre de ce projet, les pertes observées au cours de cette période représentent par rapport au total de la période de gel et de dégel, pour l'azote total Kjeldahl 72% pour T1 et 67% pour T2; pour l'azote ammoniacal 61% pour T1 et 55% pour T2; pour le phosphore total 86% pour T1 et 74% pour T2.

3) que le lisier soit épandu à la surface du sol ou enfoui dans le sol tard à l'automne, les pertes de nitrates ont lieu surtout au cours de la période de dégel avec l'eau de drainage, alors que les pertes d'orthophosphates ont lieu surtout au cours de la période de gel, avec l'eau de ruissellement. En effet, 98% de la perte de nitrates a eu lieu au cours de la période de dégel alors que 68 à 99% de la perte d'orthophosphates a eu lieu au cours de la période de gel.

Ces résultats montrent que l'érosion du sol en hiver sur sol gelé, lorsqu'il n'y a pas de couverture de neige peut être dommageable pour la qualité des cours d'eau, surtout lorsque le lisier est épandu à la surface du sol très tard à l'automne. Par contre, lorsque le lisier est enfoui dans le sol très tard à l'automne, et que le sol gèle au cours de l'hiver, les pertes d'azote total Kjeldahl, d'azote ammoniacal et de phosphore total sont relativement faibles pendant que le sol est

gelé, mais dès que le sol dégèle, l'eau issue de fonte de la neige s'infiltré dans le sol, transportant ces éléments vers les drains souterrains. Quel que soit le mode d'épandage à l'automne, les nitrates sont lessivés au printemps avec l'eau de drainage lors du dégel du sol, alors que les orthophosphates sont érodés en hiver, pendant que le sol est gelé et sans protection.

### 5.0 Conclusion

L'enfouissement du lisier de porc au printemps est une bonne méthode pour minimiser la pollution de l'eau de ruissellement dans la mesure où cette opération est réalisée avant le premier événement pluvieux. Dans ce cas, la charge moyenne de l'eau de ruissellement est très faible, s'apparentant à celle de l'eau de ruissellement sur les boîtes où il n'y a eu aucun épandage. Elle varie pour l'azote de 0 à 10 g NTK/ha, 1 à 170 g  $\text{N-NH}_4^+$ /ha, moins de 1 g  $\text{N-NO}_3^-$ /ha. Pour le phosphore total et les orthophosphates, la charge moyenne est inférieure à 1 g P/ha. Malheureusement la plupart des agriculteurs qui enfouissent le lisier dans le sol le font plusieurs jours après l'épandage, ce qui accentue les risques de pertes d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement si une pluie survient au cours de ce délai. En effet lorsque le lisier est épandu à la surface du sol ou qu'il n'est pas enfoui tôt après l'épandage, la charge diminue avec le délai entre l'épandage et

l'événement de pluie. Par exemple, la charge d'azote total Kjeldahl due à l'épandage du lisier à raison de 300 kg NTK/ha est de 40.6 kg/ha ( soit 14% de la charge épandue) si la pluie a lieu dans l'heure qui suit l'épandage, 14.0 kg/ha (soit 5% de la charge épandue) si la pluie a lieu 24h après l'épandage, et 9.6 kg/ha (soit 3% de la charge épandue) si elle a lieu 48h après l'épandage. Le choix des jours d'épandage en fonction de la probabilité de l'avènement d'une pluie est donc une bonne méthode pour minimiser la pollution de l'eau de ruissellement.

Lorsque le lisier de porc est épandu tard à l'automne, l'importance relative des processus physiques de ruissellement et de drainage au cours de l'hiver et du printemps diffère si le sol est gelé ou non gelé:

1) au cours de la période de gel, le processus dominant est le ruissellement de l'eau à la surface du sol qui est responsable de plus de 99% du volume d'eau récoltée au cours de la période. De plus, à cause des fontes répétées, la surface du sol était pratiquement nue pendant la majeure partie de l'hiver, de sorte que les gouttes de pluie et l'eau de ruissellement produite par la pluie et la fonte de la neige ont érodé la surface du sol, entraînant les éléments nutritifs épandus à la surface du sol, ce qui n'est pas le cas lorsque le lisier est enfoui dans le sol à l'automne. De plus, dans le cas où le lisier est épandu à la surface du sol, la charge

d'azote total Kjeldahl, d'azote ammoniacal, de phosphore total et d'orthophosphates augmente avec le taux d'épandage. Par exemple, l'épandage du lisier à raison de 27.3 ou 54.6 m<sup>3</sup>/ha à la surface du sol a occasionné des charges de 8.0 à 12.7 kg NTK/ha, 5.3 à 9.0 kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ha, 1.3 à 2.3 kg P/ha et 0.9 à 1.7 kg P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/ha dans l'eau de ruissellement au cours de la période où le sol était gelé, soit la période de 87 jours allant du 9 décembre 1989 au 5 mars 1990. Ces valeurs représentent 3.2, 3.2, 3.1 et 18.6% de la quantité épandue sous forme de lisier à l'automne.

2) au cours de la période de dégel et de fonte de neige printanière, le ruissellement et le drainage de l'eau ont eu cours. Le ruissellement était le processus dominant tant que la température moyenne du sol était inférieure à 0°C. A partir du moment où la température moyenne du sol a augmenté au-delà de 0°C, l'infiltration de l'eau a augmenté très fortement, si bien que le processus dominant était le drainage. Le volume d'eau de ruissellement ne représente que 19% du volume total recueilli au cours de cette période, alors que le volume d'eau de drainage en représente 81%. En général, les charges exportées par l'eau de ruissellement sont inférieures d'environ 5 ordres de grandeur à celles exportées par l'eau de drainage. Au cours de cette période, la nitrification de l'azote et l'exportation des nitrates par l'eau de drainage, qui étaient pratiquement nulles pendant que le sol était gelé,

se sont accrues. En effet, la charge de nitrates dans l'eau de drainage a augmenté rapidement après le 3<sup>e</sup> jour de fonte, alors que la température du sol avait augmenté rapidement de 0 à 15°C en 4 jours. La charge totale de nitrates est de l'ordre de 62 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha quel que soit le taux et le mode d'épandage. La nitrification et l'exportation des nitrates étaient aussi élevées dans les boîtes où il n'y a eu aucun épandage de lisier que dans les autres.

3) Si l'on considère globalement la période de gel et de dégel, les résultats montrent que le taux, le mode et l'interaction TxM sont tous significatifs pour la charge de tous les paramètres, sauf les nitrates dans l'eau de ruissellement et de drainage. La charge totale nette de nitrates étant de l'ordre de 62 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha, ce qui est 157 000 fois supérieure à la charge de nitrates épandue à l'automne sous forme de lisier. Les charges des autres éléments nutritifs augmentent avec le taux d'épandage, quel que soit le mode d'épandage. Cependant l'enfouissement permet de réduire la contamination des eaux par rapport à l'épandage à la surface du sol. Par exemple, lorsque le lisier est épandu à raison de 27.3 ou 54.6 m<sup>3</sup>/ha, la charge totale d'azote total Kjeldahl augmente de 14.7 à 20.02 kg/ha pour M1, soit 3.5% de la charge épandue, et augmente de 11.15 à 13.88 kg/ha pour M2, soit 1.8% de la charge épandue. La charge d'azote ammoniacal augmente de 6.88 à 10.4 kg/ha pour M1, ce qui représente 1.8% de la charge

épardue, et augmente de 3.8 à 4.82 kg/ha pour M2, ce qui représente 1.0% de la charge épandue. Dans le cas du phosphore total, la charge augmente de 1.64 à 2.94 kg/ha pour M1 ou 3.0% de la charge épandue; elle est de 0.62 kg/ha pour M2, ce qui représente 0.8% de la charge épandue. Pour sa part, la charge d'orthophosphates augmente de 0.9 à 1.7 kg/ha pour M1, soit 18.6% de la charge épandue; elle est de 0.02 kg/ha pour M2, ce qui est très négligeable par rapport à la charge épandue qui est de 4.3 à 8.6 kg P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/ha.

4) dans les boîtes où le lisier est épandu à la surface du sol à l'automne, la majeure partie, soit 55 à 80% de l'azote total Kjeldahl, de l'azote ammoniacal et du phosphore se sont perdus avec l'eau de ruissellement par érosion pendant que le sol était gelé. Dans les boîtes où le lisier est enfoui dans le sol à l'automne, la majeure partie, soit 55 à 85% de ces éléments se sont perdus avec l'eau de drainage, pendant que le sol était dégelé et que l'eau de fonte printanière de la neige s'infiltrait dans le sol. Quel que soit le mode d'épandage à l'automne, la majeure partie de la perte de nitrates, soit 98% a lieu au cours de la période de dégel, alors que la majeure partie de la perte d'orthophosphates, soit 70 à 99% a lieu au cours de la période de gel.

## 6.0 Recommandations

Pour minimiser la pollution des eaux de ruissellement, Il faut contrôler les taux d'épandage du lisier au printemps en les limitant au minimum requis par les cultures, planifier l'épandage en fonction de la probabilité de l'avènement d'une pluie au cours des jours qui suivent, et enfouir le lisier autant que possible immédiatement après l'épandage. Cependant, étant donné que la plupart des pluies de la période d'épandage du printemps risquent de provoquer plus d'infiltration que de ruissellement, il serait utile d'étudier l'effet à long terme de l'infiltration de l'eau et des éléments nutritifs sur la pollution des eaux de drainage ou sur la pollution de la nappe phréatique.

Si l'on se fie aux résultats obtenus à la suite de l'épandage du lisier tard à l'automne, on peut penser que la proportion des éléments nutritifs du lisier de porc qui est perdue entre l'hiver et le début du printemps est tellement faible qu'il ne faut pas s'inquiéter des effets négatifs possibles des pratiques actuelles d'épandage d'automne sur la qualité des cours d'eau. Pourtant, tous les indicateurs environnementaux montrent que dans les régions agricoles du Québec où l'on retrouve des concentrations animales élevées, les seuils critiques sont atteints ou dépassés dans la plupart des cours d'eau (Simoneau et Grimard, 1989; Primeau et Grimard, 1990a; 1990b). Il en est ainsi dans tous les pays où les productions

animales sont concentrées sur une petite partie du territoire agricole. Une des caractéristiques de la pollution diffuse agricole est que, pour la plupart des sources de pollution, les pertes relatives paraissent faibles et inoffensives lorsqu'on les considère séparément. Cependant, les effets individuels s'ajoutent les uns aux autres, avec une certaine accumulation dans le milieu aquatique, si bien que les problèmes n'apparaissent qu'à long terme. La situation est donc suffisamment inquiétante pour que l'on remette en question les pratiques actuelles d'épandage. La question n'est pas de savoir si les pertes d'éléments nutritifs suite à l'épandage des déjections animales sur le sol représentent une proportion importante de la quantité épandue, mais dans quelle mesure ces rejets limitent les usages de l'eau, et surtout quelles répercussions ces rejets peuvent avoir sur la chaîne alimentaire dont dépend le bien-être des êtres vivants. Ces aspects n'ont jamais été abordés scientifiquement à notre connaissance. Comme c'est le cas pour tous les problèmes environnementaux modernes, il faut agir avant qu'il soit trop tard. La recherche doit donc se poursuivre, notamment sur des parcelles naturelles et sur des bassins versants entiers, pour valider les résultats de nos simulations, mais aussi pour tenter de répondre aux questions soulevées ci-dessus. De plus, il n'est pas rare que le sol ne gèle pas au cours de l'hiver. Pourtant, il y a très peu de données sur la dynamique de l'azote et du phosphore dans ces conditions suite à l'épandage

du lisier de porc dans les conditions naturelles. Ce cas mérite aussi une attention particulière.

Impacts scientifiques et économiques:

Les résultats du projet montrent que la plupart des variables étudiées et leurs interactions ont des effets significatifs sur la pollution des eaux de ruissellement et de drainage. La modélisation des charges de pollution dues à l'épandage du lisier de porc est donc très complexe, et doit tenir compte de ces effets.

Les résultats montrent aussi qu'en planifiant les jours d'épandage en fonction de la probabilité de l'avènement d'une pluie dans les jours qui suivent, et en enfouissant le lisier immédiatement après l'épandage, les agriculteurs pourraient minimiser les pertes d'éléments nutritifs dans les eaux, ce qui réduirait d'autant les achats d'engrais minéraux.

Remerciements:

Ce travail n'aurait pas été possible sans le support technique et financier de plusieurs personnes et organismes que nous aimerions remercier. Ce sont:

Le ministère de l'Agriculture du Canada et le ministère le

l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec pour avoir financé une partie du projet, le ministère de l'Environnement du Québec et la station de recherches du ministère de l'Agriculture du Canada à Lennoxville pour les nombreux services offerts.

Messieurs Alain Juneau et Alain Pesant, respectivement agent de projet et conseiller scientifique, Réal Gagné, Kouassi Konan, Dominique Gagnon et Khalil Mamouny pour l'aide technique qu'ils nous ont donnée au cours de la réalisation du projet.

#### BIBLIOGRAPHIE

André, P., F. Dubois de la Sablonnière. 1983. Élevage intensif et qualité des eaux souterraines dans un département breton. TSM-L'eau; 5:251-258

Bottom, J.D., J.L. Taraba, I.J. Ross. 1983. Quality of runoff as function of time delay between manure application and rainfall event. ASAE paper no. 83-2614. ASAE, St-Joseph, Mich.; 30p.

Bubenzer, G.D., J.C. Converse. 1975. Impact of freezing and thawing soil conditions on the movement of nutrients by water from rural lands. Water Resources Center, University of Wisconsin, Technical Report WIS WRC 75-10, 41p.

Comfort, S.D., K.A. Kelling, D.R. Keeney, J.C. Converse. 1988. The fate of nitrogen from injected liquid manure in a silt loam soil. J. Environ. Qual., 17(2):317-322

Crane, S.R., P.W. Westerman, M.R. Overcash. 1981. Short-term chemical transformations following land application of poultry manure. Trans. ASAE; 24(2):382-390

Dommergues, Y., F. Mangenot. 1970. Cycle de l'azote. Dans: Ecologie microbienne du sol. Masson et Cie, éd.; Paris, pp155-

Gangbazo, G. 1991. Effets des événements hydrologiques sur la perte d'azote et de phosphore suite à l'épandage du lisier de porc. Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-EAU), Sainte-Foy, Québec, 275p + annexes

Lesczynski, D.B. 1976. Nitrate movement in plano silt loam under freezing and thawing conditions. Thèse de doctorat, Univ. du Wisconsin, Madison, USA, 173p

Mckay, G.A. 1972. Precipitation. Dans: Manuel des principes d'hydrologie. Gray, D.M. ed, Conseil National de Recherches du Canada, Ottawa, Ont, pp2.1-2.113

McNeely, R.N., V.P. Neimans, L. Dwyer. 1980. Références sur la qualité des eaux-Guide des paramètres de la qualité des eaux. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Direction de la qualité des eaux, Ottawa, Ont., No Cat. En37-54/1981F; 100p.

Meyer, L.D., D.L. McCune. 1958. Rainfall simulation for runoff plots. Agric. Eng., 39:644-648

Ministère de l'Environnement du Québec. 1984. Statistiques annuelles et mesuelles 1951-01--1980-12. Station 7024280 (R-05) Lennoxville-CDA. Service de la météorologie, Sainte-Foy, Québec, 1p

Pagliai, M., P. Sequi. 1981. The influence of applications of slurries on soil properties related to run-off. Experimental approach in Italy. Dans: Nitrogen Losses and Surface Run-off from Landspreading of Manures. Brogan, J.C., ed, Martinus Nijhoff/DR. W. Junk Pub., London, pp45-65

Primeau, S., Y. Grimard. 1990a. Rivière Yamaska 1975-1988. Volume 1: Description du bassin et qualité du milieu aquatique. Direction de la qualité du milieu aquatique, Ministère de l'environnement du Québec, Sainte-Foy, Qué, QE--66-1, Envirodoq 900060, 136p + annexes

Primeau, S., Y. Grimard. 1990b. Rivière Yamaska 1975-1988. Volume 2: Résultats complémentaires sur la qualité des eaux. Direction de la qualité du milieu aquatique, Ministère de l'environnement du Québec, Sainte-Foy, Qué, QE--66-1, Envirodoq 900060, 150p

Reddy, K.R., R. Khaleel, M.R. Overcash, P.W. Westerman. 1977. Conceptual modelling of nonpoint source pollution from land areas receiving animale wastes: I. Nitrogen transformations. ASAE paper no. 77-4046, 43p

Ross, I.J., S. Sizemore, J.P. Bowden, C.T. Haan. 1979. Quality of runoff from land receiving surface application and injection of liquid dairy manure. Trans. ASAE; 22(5):1058-1062

SAS Institute. 1988. The GLM procedure. Dans: SAS/STAT user's guide, release 6.03, Cary, NC, pp549-640

Sharpley, A.N., L.R. Ahuja, R.G. Menzel. 1981. The release of soil phosphorus to runoff in relation to the kinetics of desorption. J. Environ. Qual. 10(3):386-391

Simoneau, M., Y. Grimard. 1989. Qualité des eaux du bassin de la rivière l'Assomption 1976-1987. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité du milieu aquatique, EMA88-31, Envirodoq 890318, 234p + annexes

Steenhuis, T.S. 1977. Modeling nitrogen and other nutrient losses from winter spread manure. Thèse de doctorat, Université du Wisconsin-Madison, 219p

Steenhuis, T.S., R.E. Muck, G.D. Bubenzer, J.C. Converse. 1981. Modelling nutrient in runoff losses from winter spread manure. Dans: Proc. 4th Int. Symp. on Livestock Wastes/1980. ASAE, St-Joseph, Mich., pp281-285

Thériault, J. 1983. Inventaire du cheptel québécois. Dans: Manuel de gestion agricole des fumiers. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Sainte-Foy, Qc, pp21-24

Tokarz, M.B., D.D. Schulte, G.E. Laliberte. 1979. Characterization and assessment of non-point source pollution. Agricultural engineering department, University of Minitoba, 242p

Westerman, P.W., M.R. Overcash. 1981. Short-term attenuation of runoff potential of land-applied swine and poultry manure. Dans: Proc. 4th Int. Symp. on Livestock Wastes/1980. ASAE; St-Joseph, Mich.; pp289-292

TABLEAU 3.1

## Caractéristiques du sol

Paramètres	Unités	Valeurs <sup>(1)</sup>
Granulométrie <sup>(2)</sup>		
-sable	%	4,3
-silt	%	28,0
-argile	%	28,7
Composition		
-illite	%	77,6
-chlorite	%	14,6
-kaolinite	%	7,8
Densité apparente <sup>(3)</sup>	Mg.m-3	1,2
Teneur en eau	% BS	19,8
Teneur en eau (capacité au champ)	% BS	25,0
Matière organique	% BS	4,1
Carbone organique	% BS	3,1
Azote total Kjeldahl (NTK)	ppm	1100,0
Azote ammoniacal (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	ppm	4,2
Nitrates (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	ppm	12,7
Phosphore total (P)	ppm	882,7
Orthophosphates (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	ppm	32,5

(1) Moyenne; nombre d'échantillons: 12

(2) Sol naturel, non tamisé

(3) Densité au champ; sol non remanié

TABLEAU 3.2

Effet de l'épandage du lisier à la surface du sol sur le temps de contact de l'eau de ruissellement avec la surface du sol.

Pluie	Taux d'épandage	Durée de la pluie (min)	Décalage du ruissellement (min)	Temps de contact de contact (min)
C1	T0	142	88	54
	T1	142	19	123
	T2	142	9	133
C2	T0	71	30	41
	T1	71	18	53
	T2	71	6	65

TABLEAU 4.1

Résumé des pertes totales d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement et de drainage en hiver et au printemps suite à l'épandage du lisier de porc tard à l'automne

Paramètre	Charge totale		
	kg/ha	Proportion(%)*	
A. Azote total Kjeldahl (NTK)			
M1	T1	14.70	3.5
	T2	20.02	3.5
M2	T1	11.15	1.8
	T2	13.88	1.8
B. Azote ammoniacal (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )			
M1	T1	6.88	3.0
	T2	10.40	3.0
M2	T1	3.80	1.0
	T2	4.82	1.0
C. Nitrates (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )			
M1 ou M2	T1 ou T2	63.61	très élevée**
D. Phosphore total (P)			
M1	T1	1.64	3.7
	T2	2.94	4.7
M2	T1 ou T2	0.62	0.8
E. Orthophosphates (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )			
M1	T1	0.9	18.6
	T2	1.7	18.6
M2	T1 ou T2	0.02	négligeable

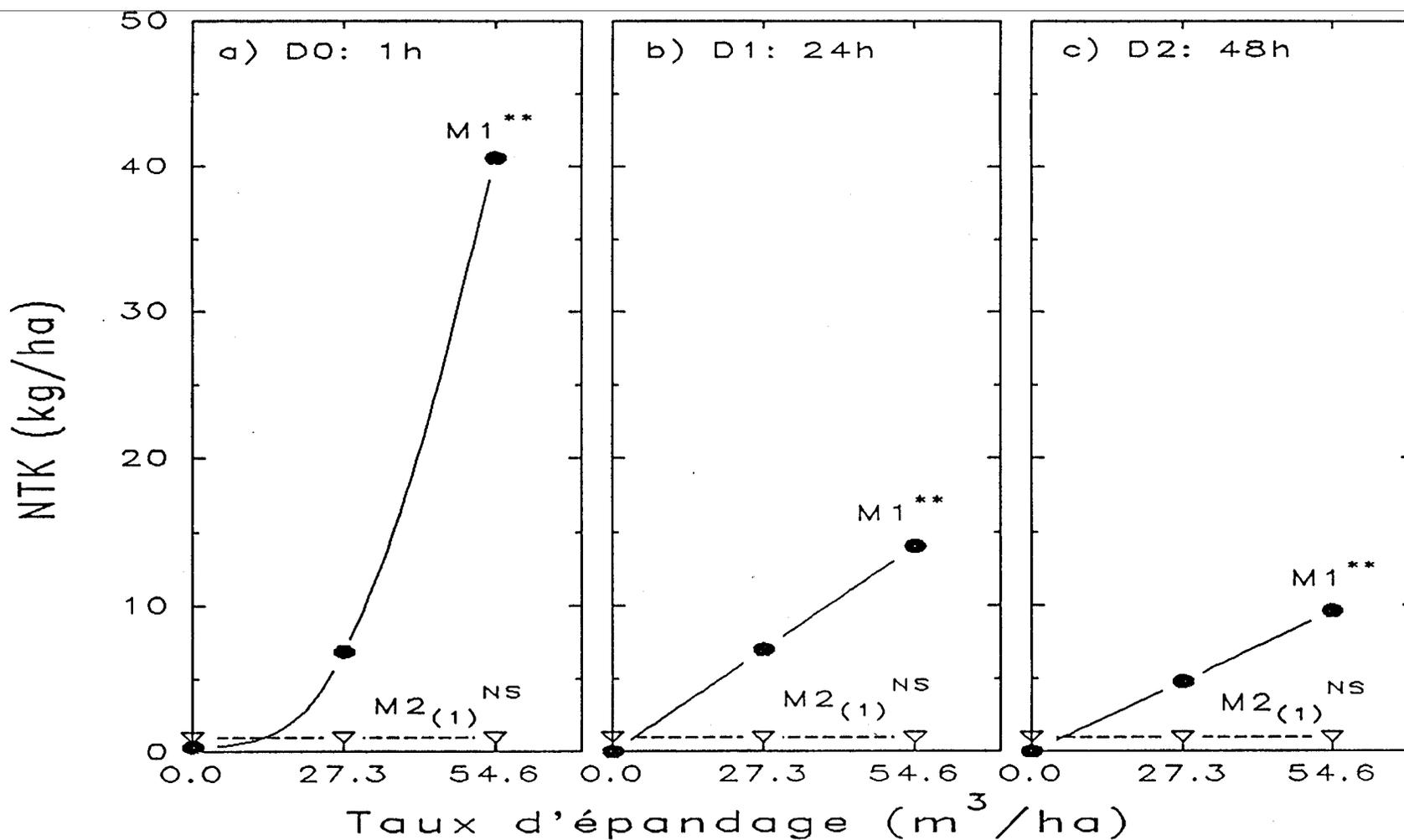
\* Pourcentage par rapport à la quantité épandue sous forme de lisier; \*\* 157 000 fois plus élevée que la quantité épandue.

TABLEAU 4.2

Répartition des pertes moyennes d'azote et de phosphore entre la période de gel(G) et la période de dégel(DG) lorsque le lisier de porc est épandu tard à l'automne

T	M	Pertes moyennes* (%)									
		NTK		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		P		P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	
		G	DG	G	DG	G	DG	G	DG	G	DG
0	1	32	68	51	49	3	97	67	33	92	8
0	2	32	68	51	49	3	97	67	33	92	8
1	1	54	46	77	23	2	98	74	26	99	1
1	2	28	72	39	61	2	98	14	86	88	12
2	1	66	34	88	12	2	98	81	19	99	1
2	2	33	67	45	55	2	98	26	74	68	32

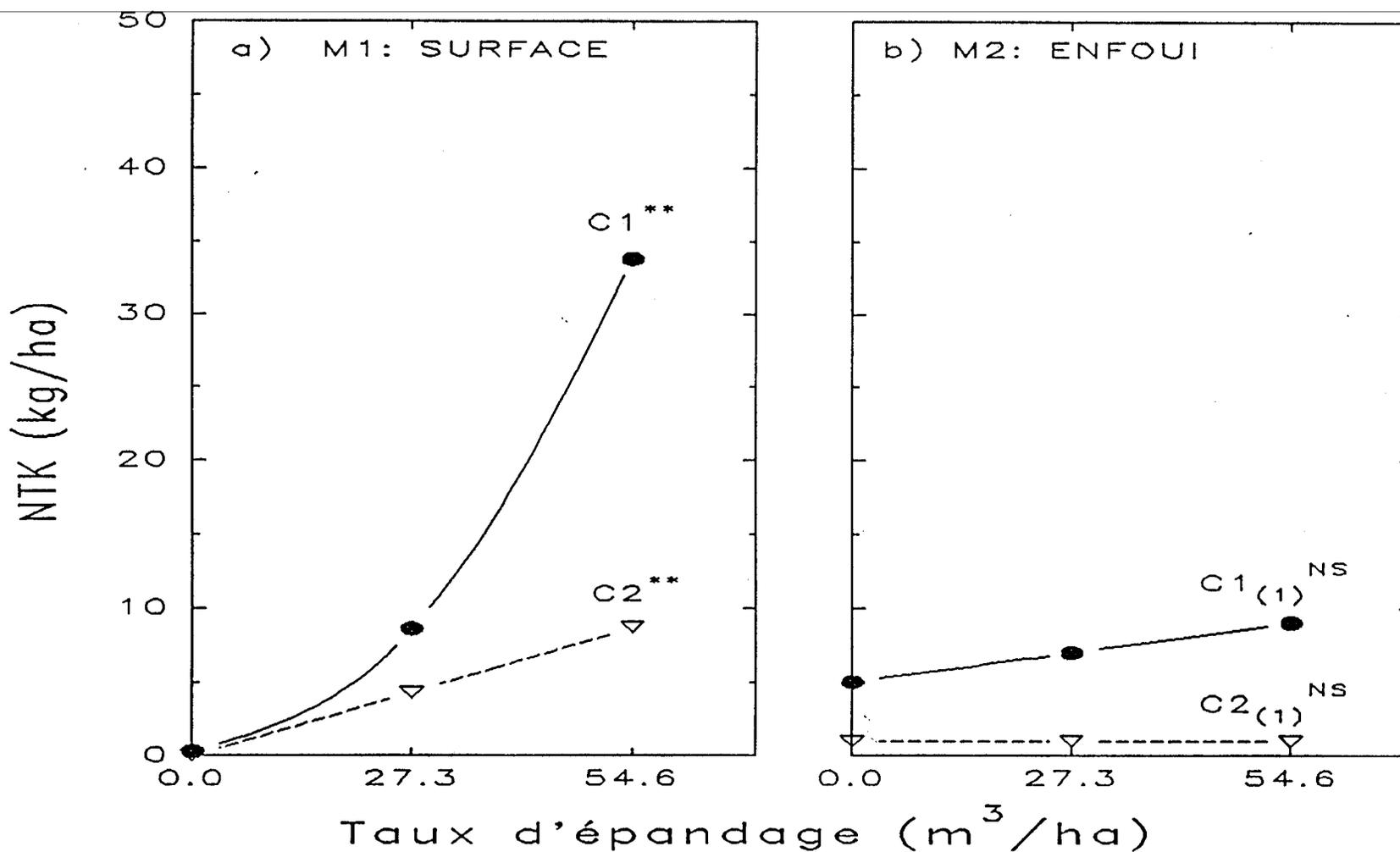
\* Nombre de répliques: 3



(1): Valeurs x 100

FIGURE 3.1:

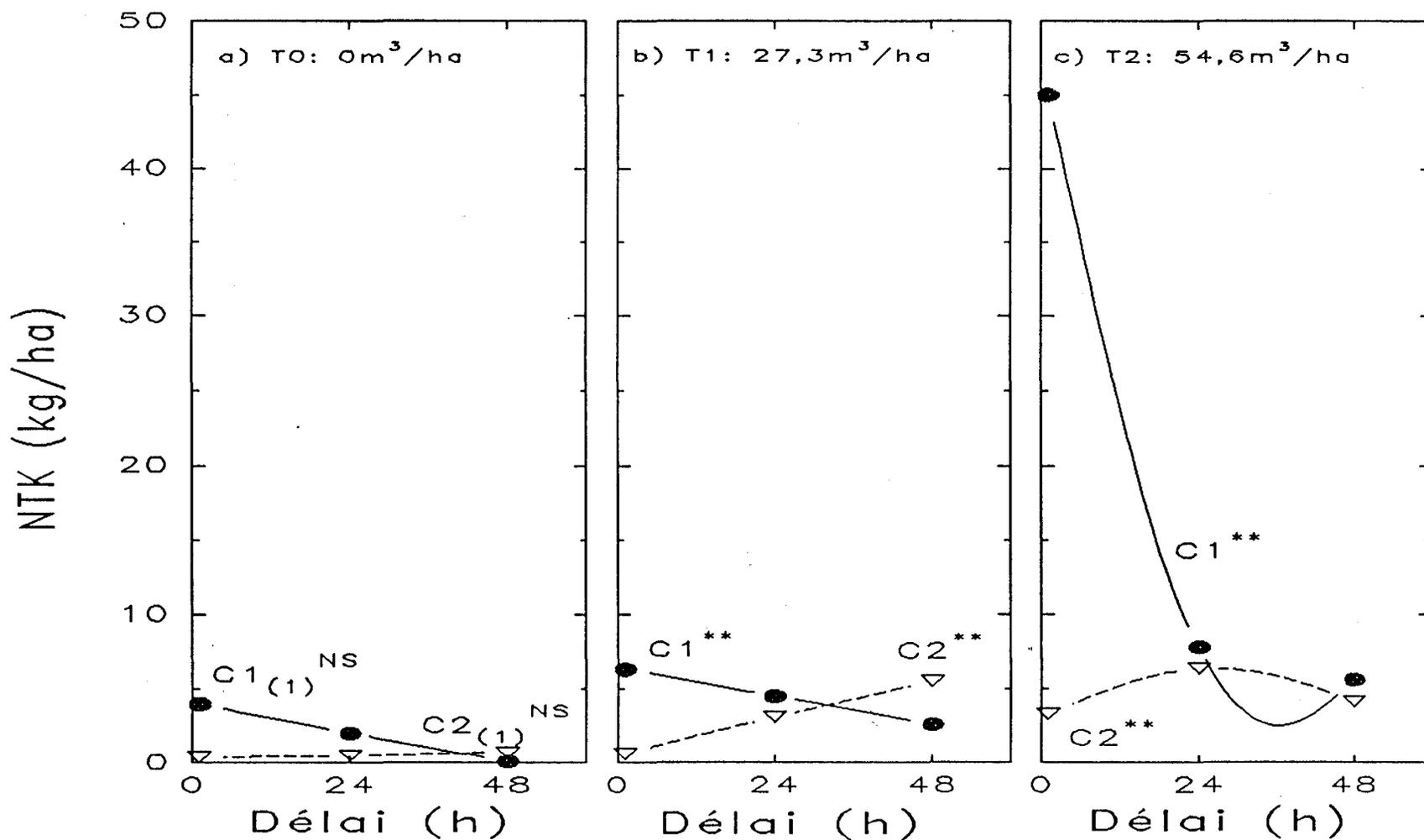
Effet du taux d'épandage sur la charge d'azote total Kjeldahl (NTK) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(MxD) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif



(1): Valeurs x 100

FIGURE 3.2:

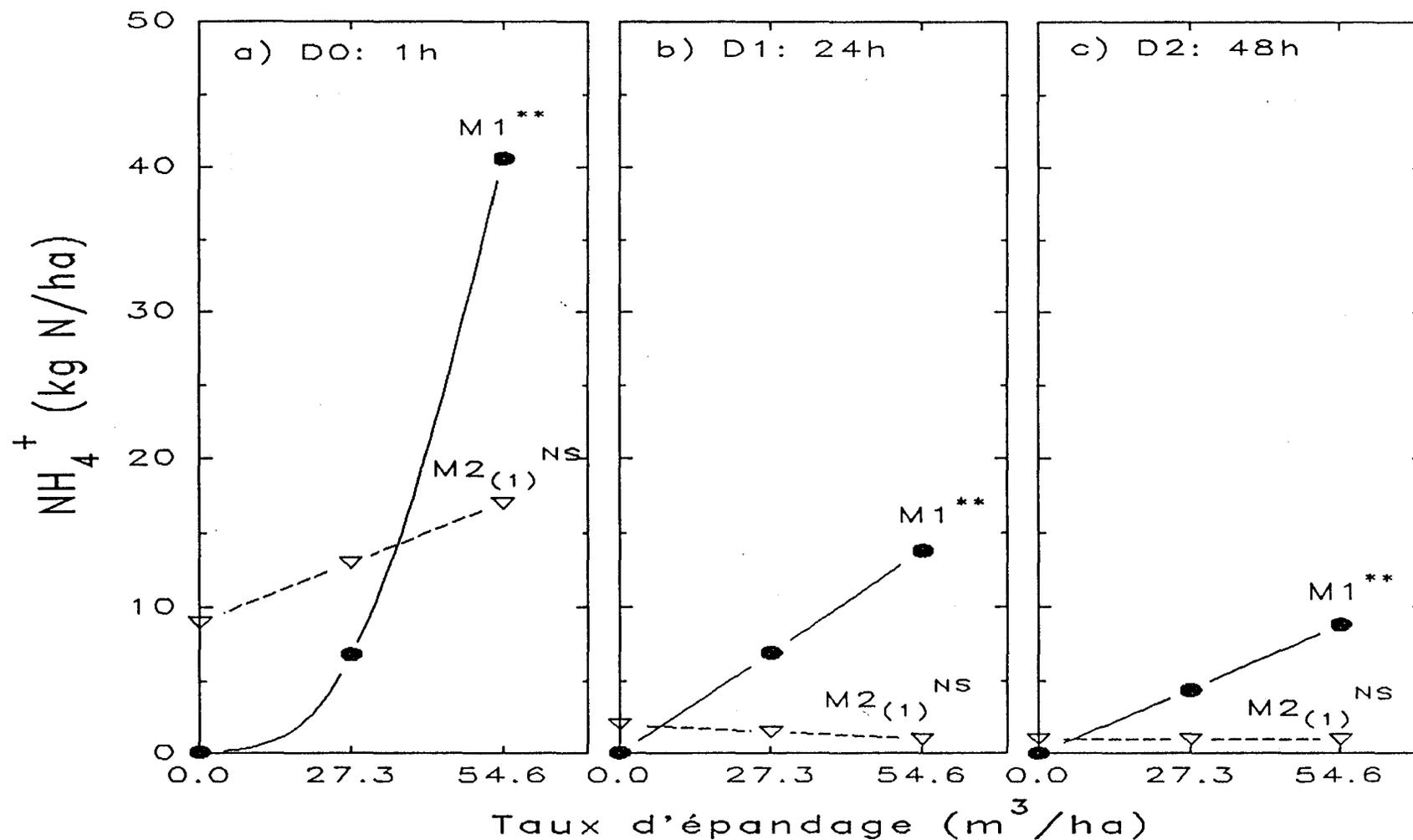
Effet du taux d'épandage sur la charge d'azote total Kjeldahl (NTK) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(MxC) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif



(1): Valeurs x 10

FIGURE 3.3:

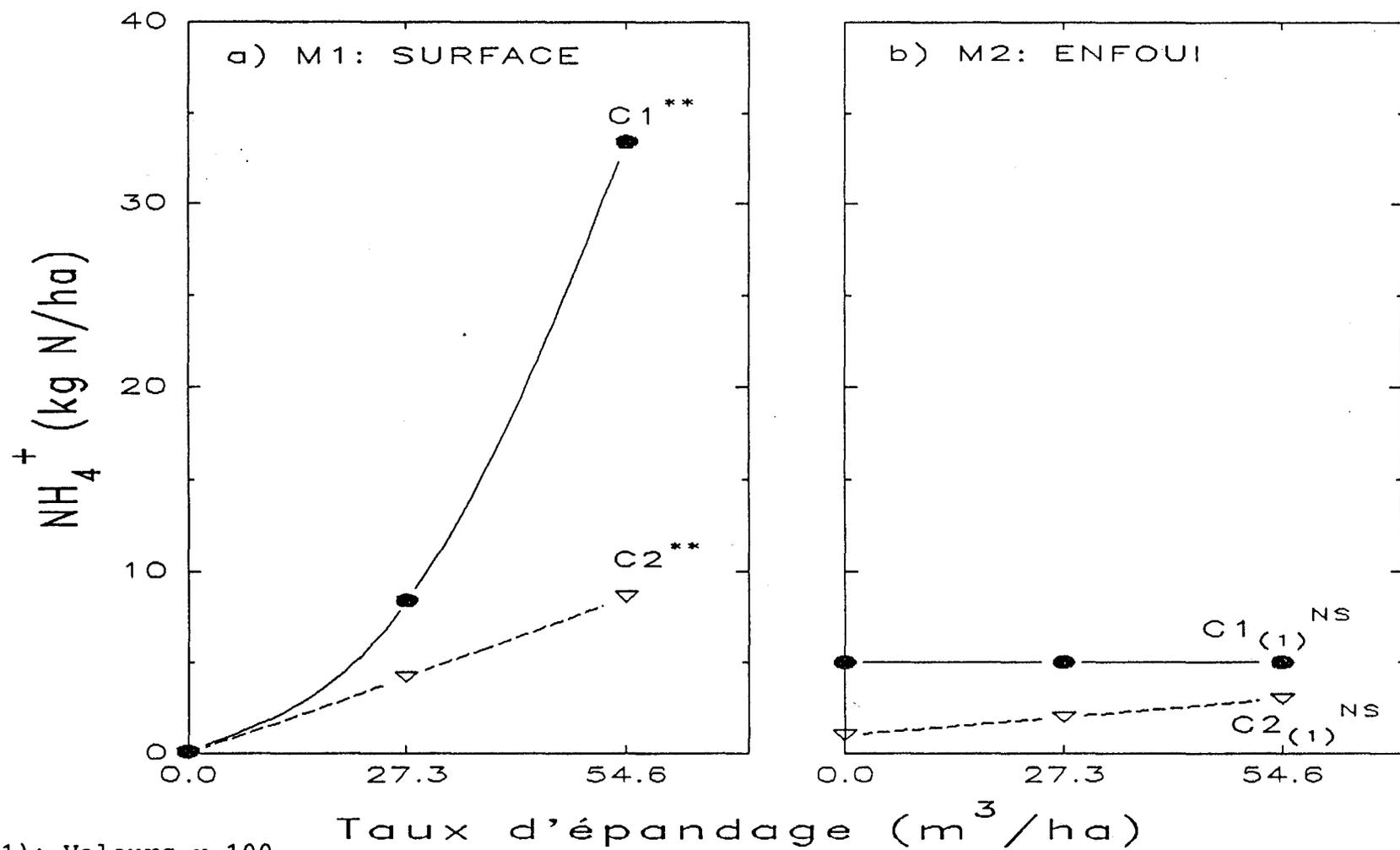
Effet du délai entre l'épandage et l'événement de pluie printanière sur la charge d'azote total Kjeldahl (NTK) dans l'eau de ruissellement. Interaction D(TxC) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif



(1): Valeurs x 100

FIGURE 3.4:

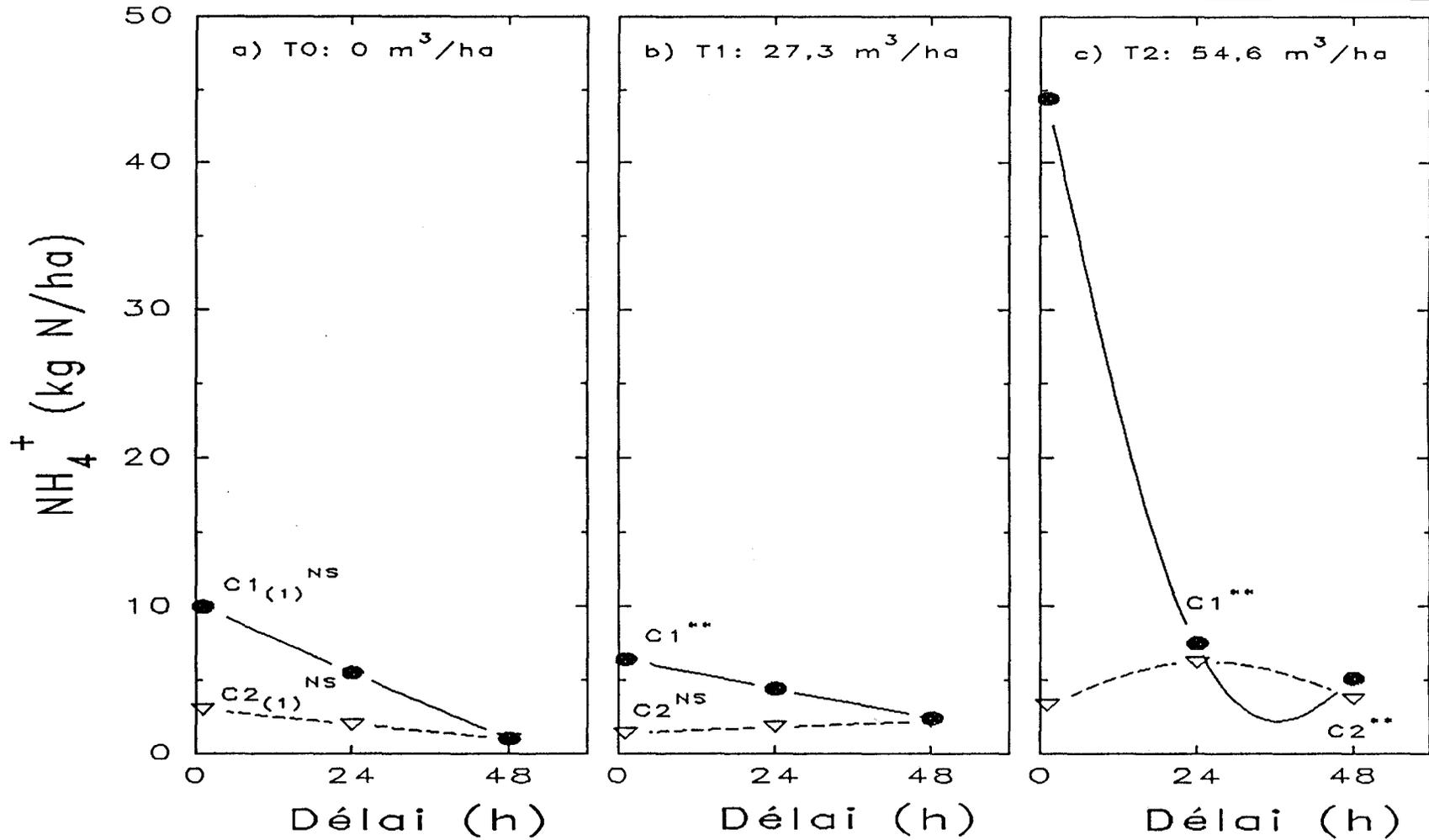
Effet du taux d'épandage sur la charge d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(MxD) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif



(1): Valeurs x 100

FIGURE 3.5:

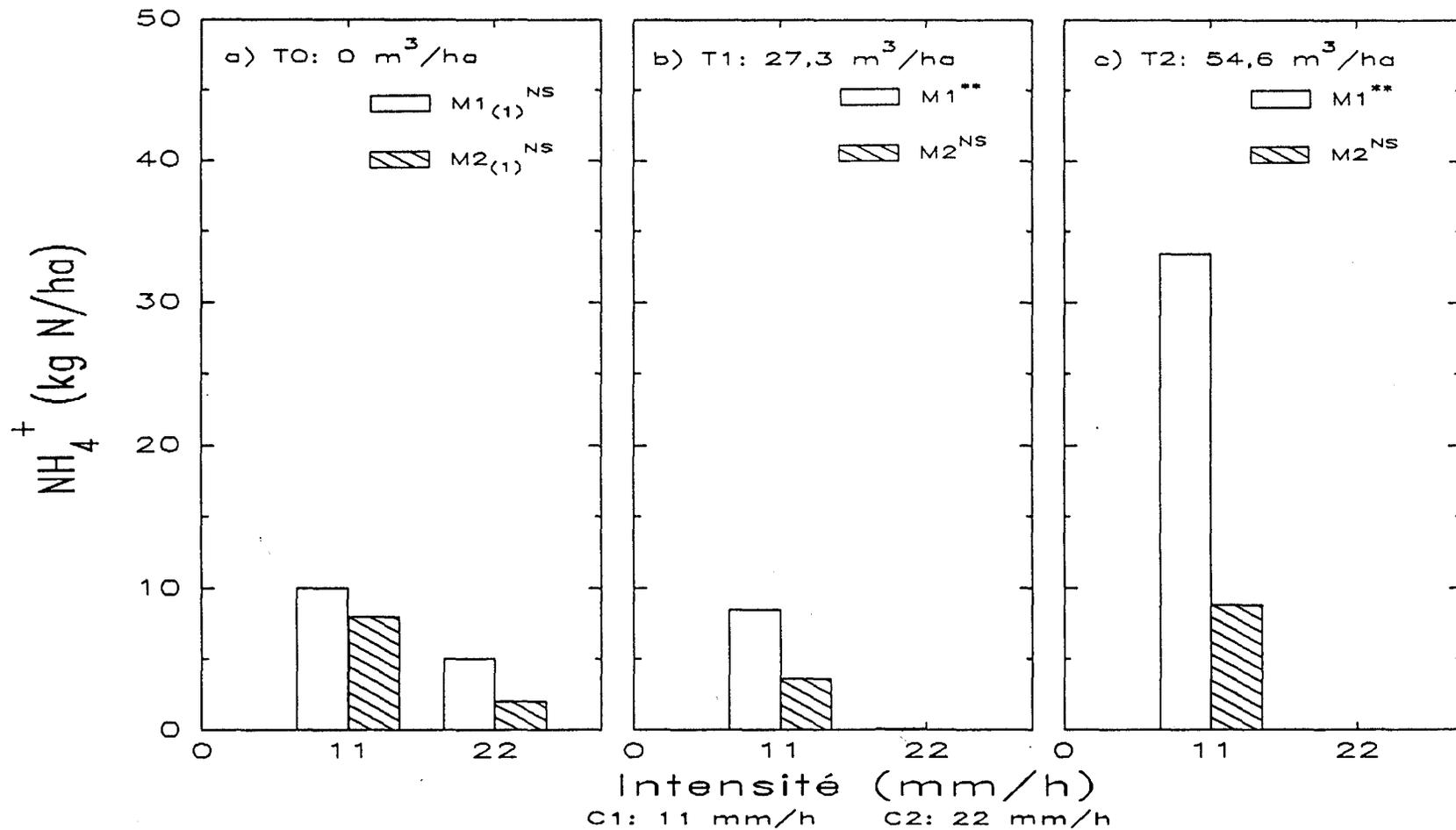
Effet du taux d'épandage sur la charge d'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(MxC) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif



(1): Valeurs x 100

FIGURE 3.6:

Effet du délai entre l'épandage et l'événement de pluie printanière sur la charge d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) dans l'eau de ruissellement. Interaction D(TxC) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif

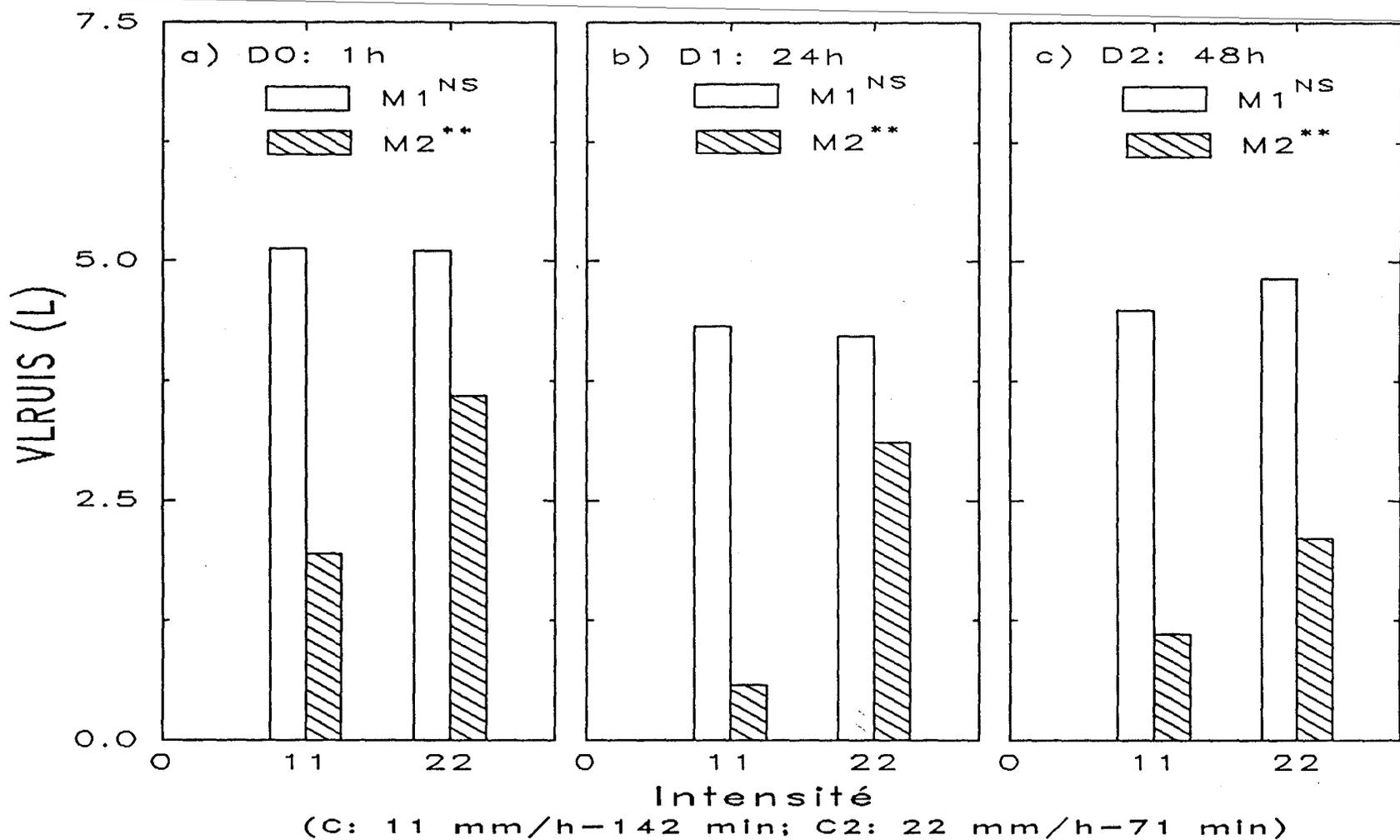


(1): Valeurs x 100

**FIGURE 3.7:**

Effet des pluies printanières sur la charge d'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) dans l'eau de ruissellement suite à l'épandage du lisier. Interaction C(TxM).

\*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif



**FIGURE 3.8:**

Effet de la pluie sur le volume d'eau de ruissellement (VLRUIS) dû à des pluies printanières. Interaction C(MxD) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif

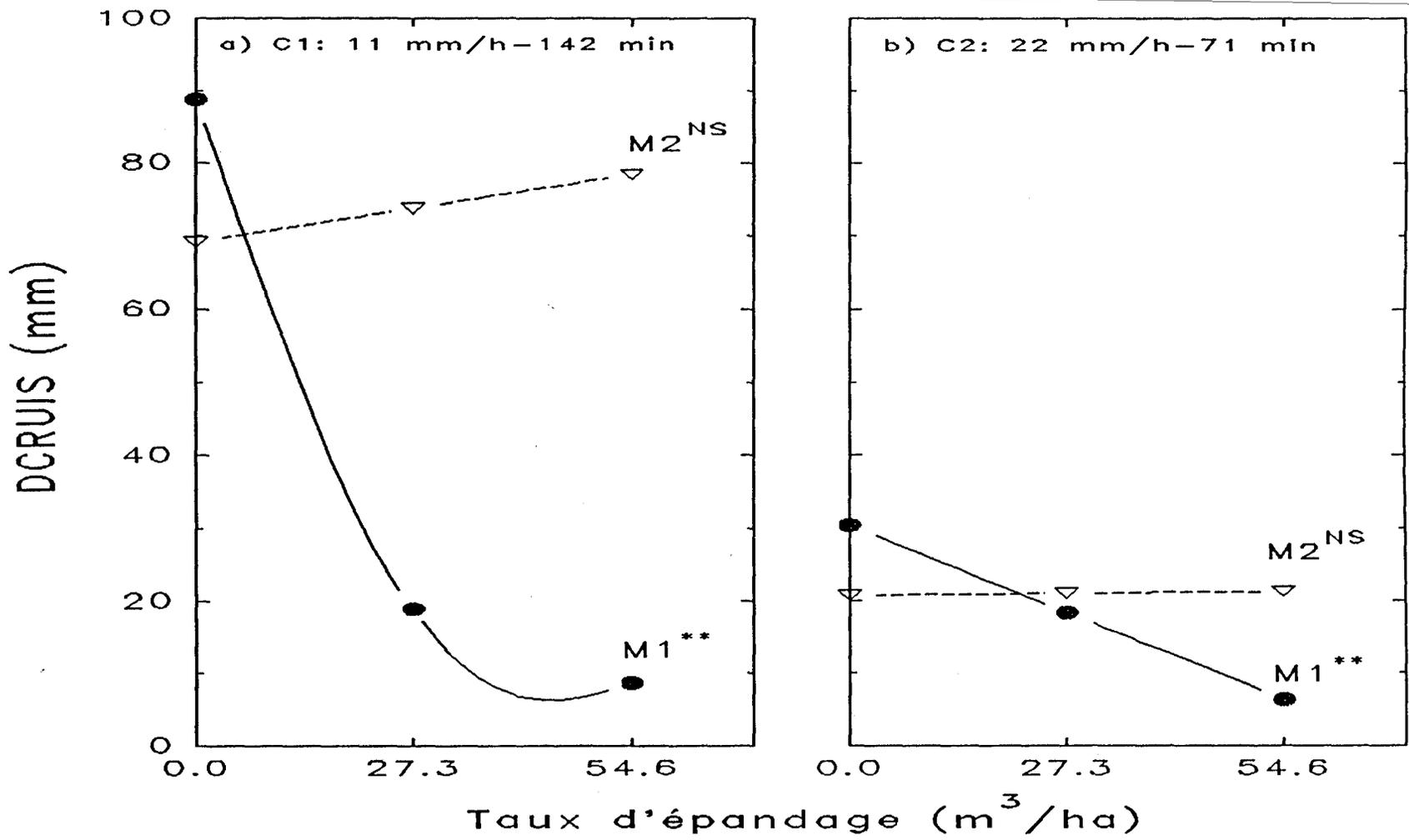
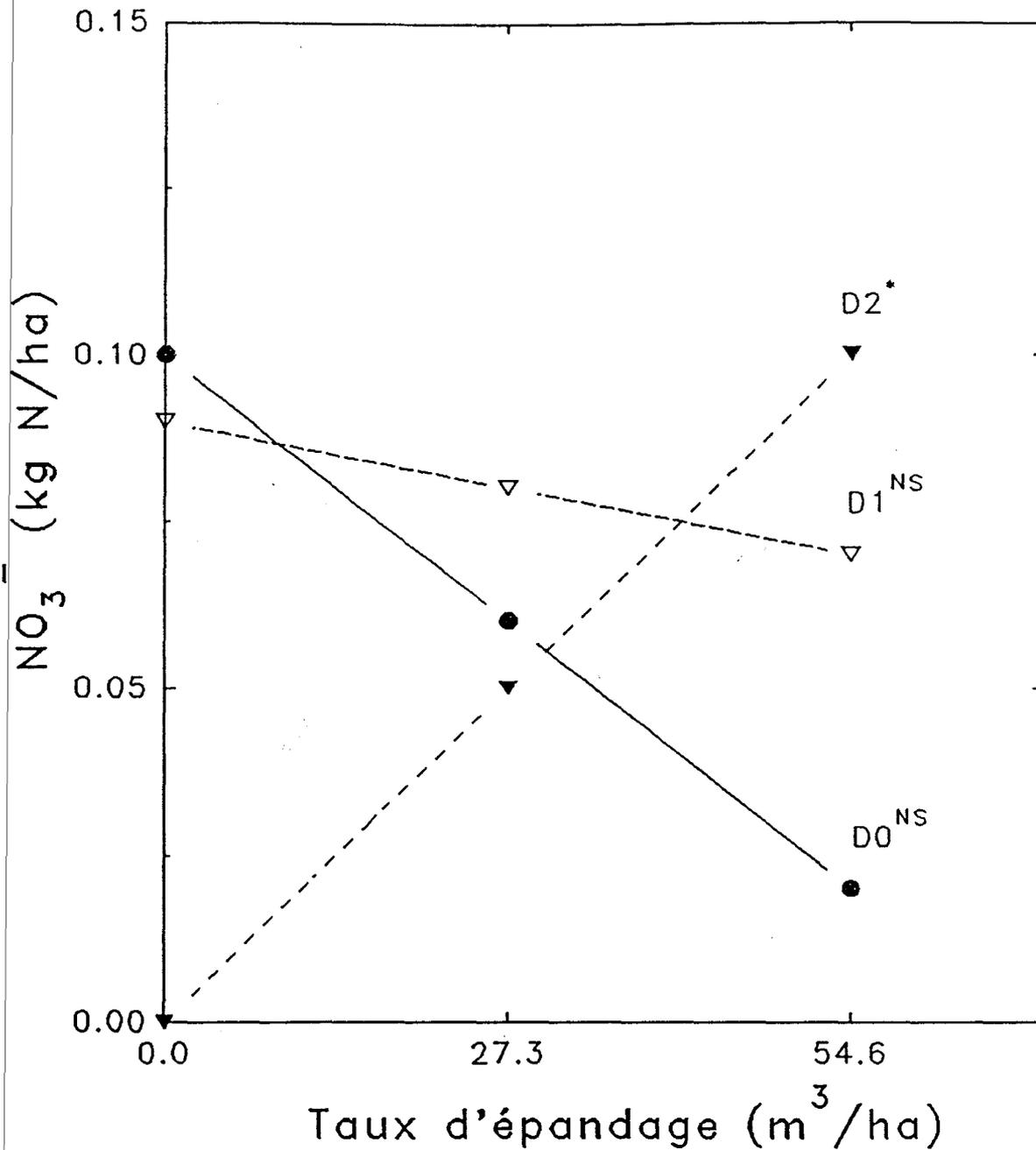


FIGURE 3.9:  
 Effet du taux d'épandage sur le décalage du ruissellement (DCRUIS) dû à des pluies printanières. Interaction T(MxC). \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif



**FIGURE 3.10:**

Effet du taux d'épandage sur la charge de nitrates (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(D). \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif

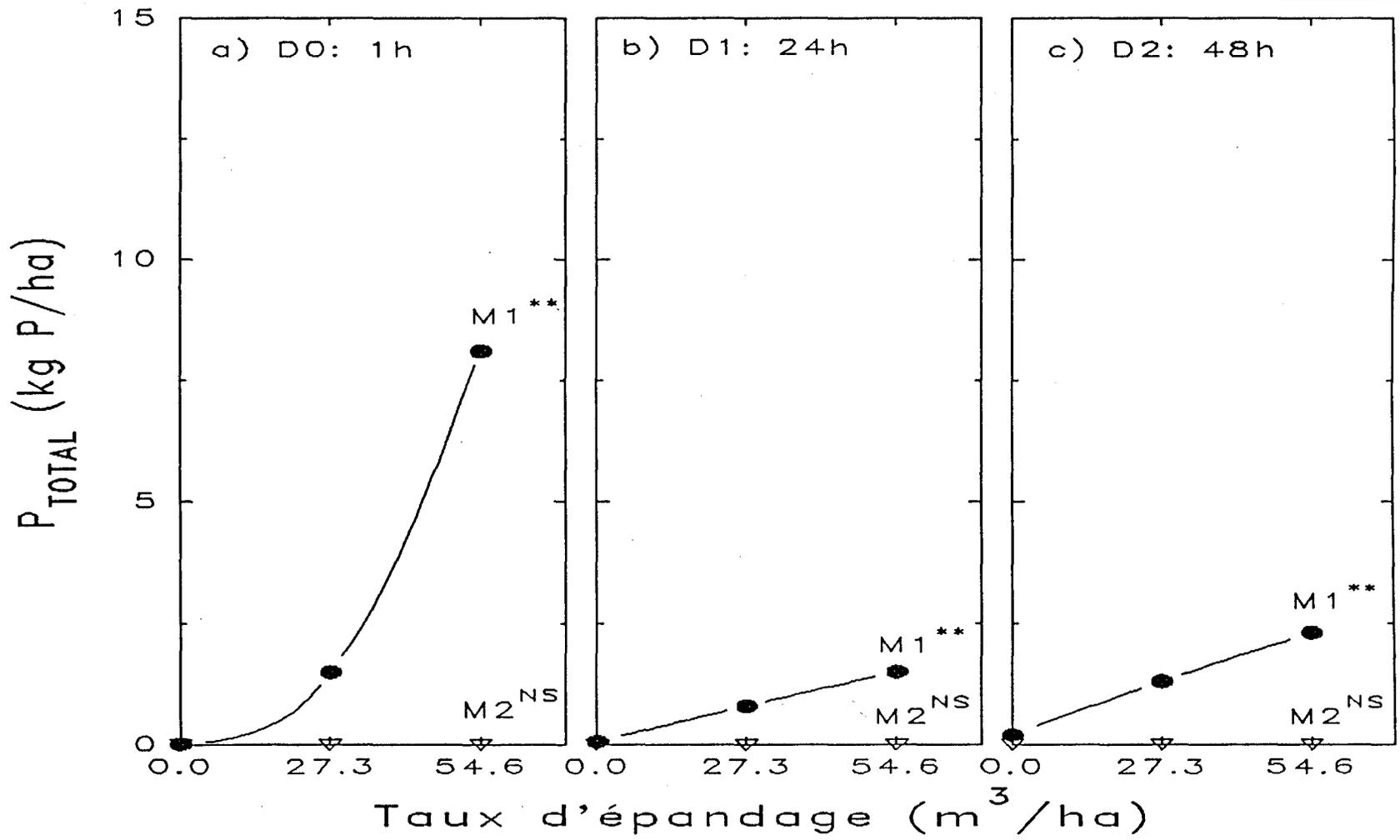


FIGURE 3.11:

Effet du taux d'épandage sur la charge de phosphore total (P) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(MxD)

<sup>\*\*</sup> significatif au seuil de 1%; <sup>\*</sup> significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif

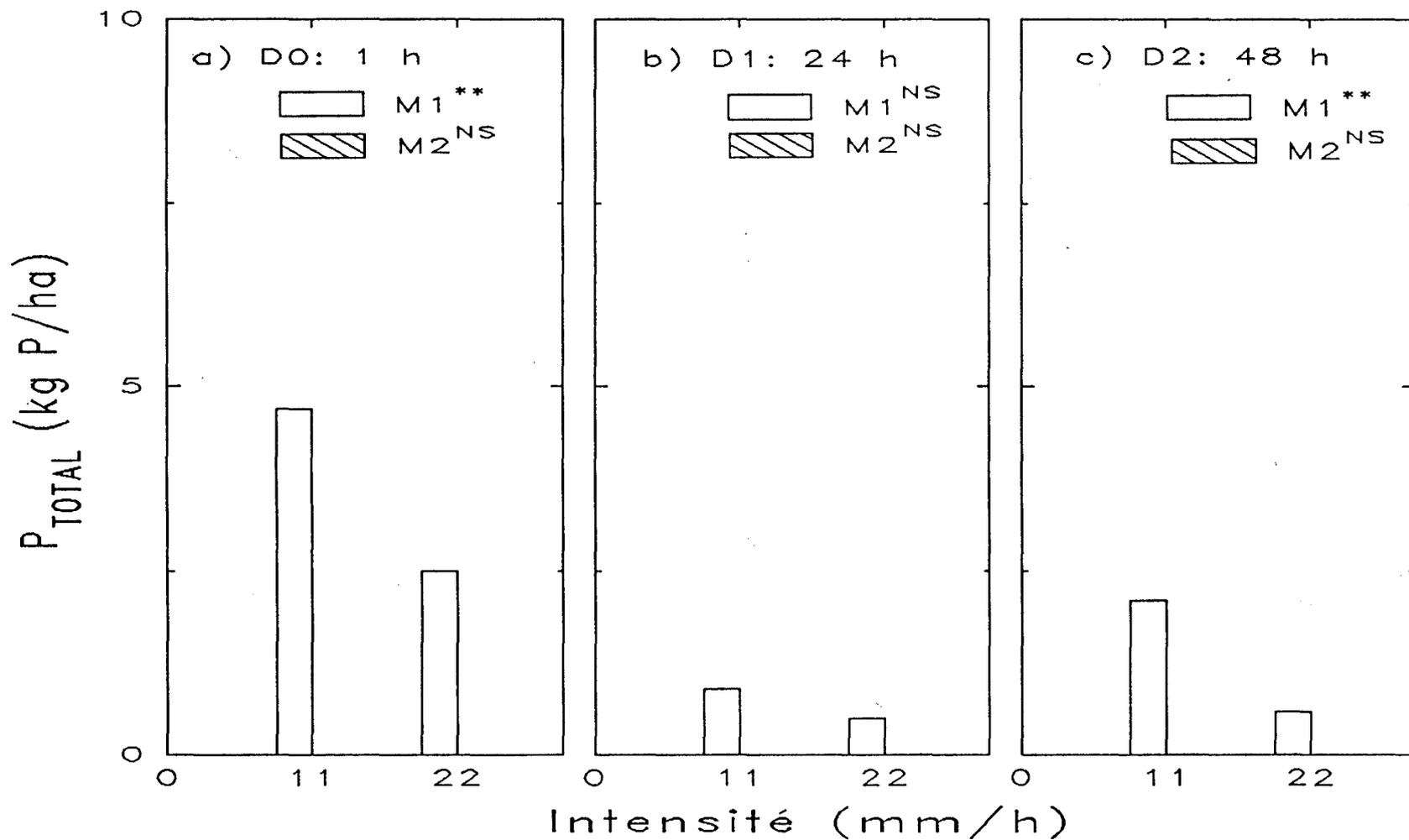


FIGURE 3.12:

Effet des pluies printanières sur la charge de phosphore total (P) dans l'eau de ruissellement suite à l'épandage du lisier. Interaction C(MxD)

\*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif

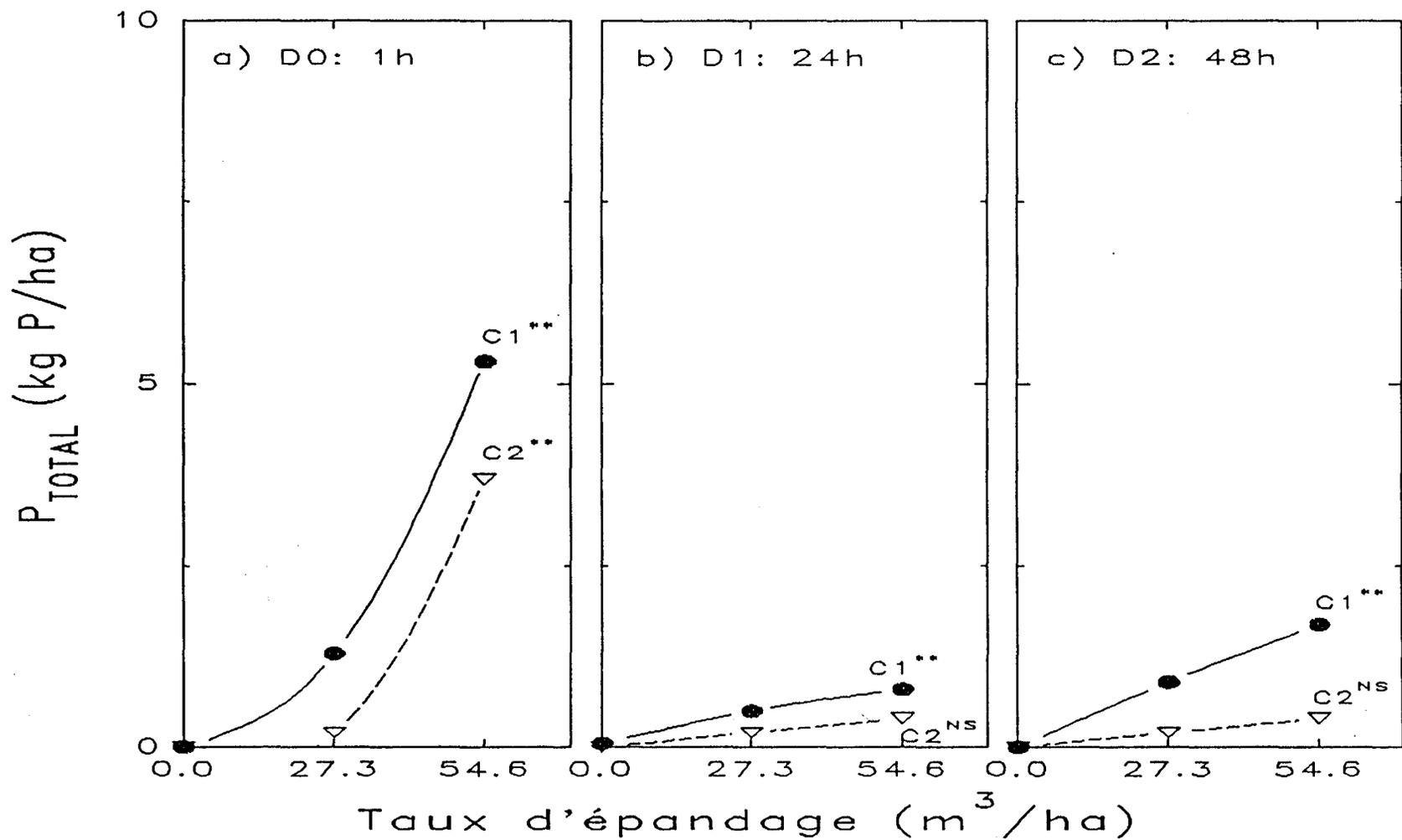
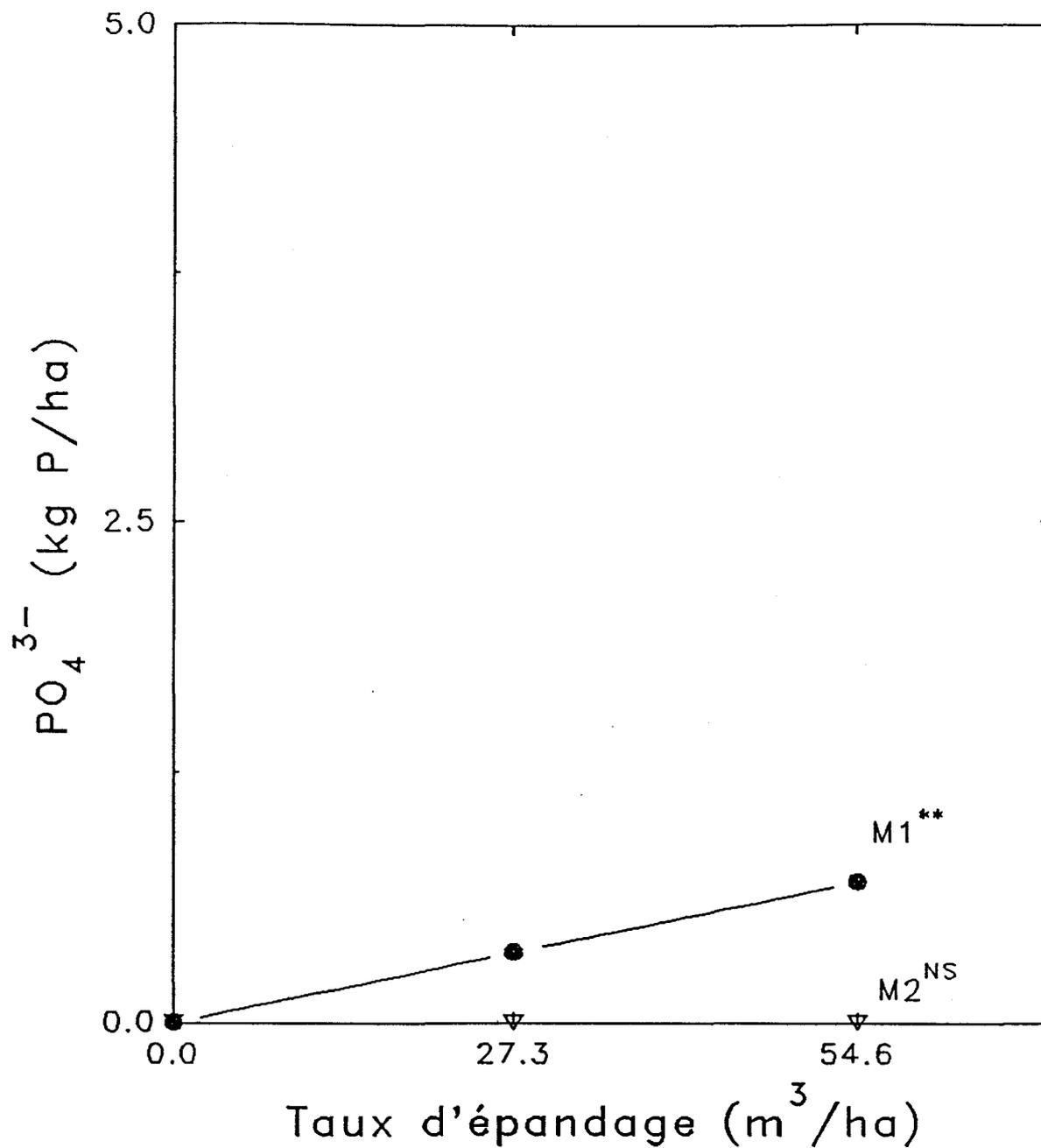


FIGURE 3.13:

Effet du taux d'épandage sur la charge de phosphore total (P) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(DxC)

\*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; NS non significatif



**FIGURE 3.14:**

Effet du taux d'épandage sur la charge d'orthophosphates ( $P-PO_4^{3-}$ ) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(M) <sup>\*\*</sup> significatif au seuil de 1%; <sup>\*</sup> significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif

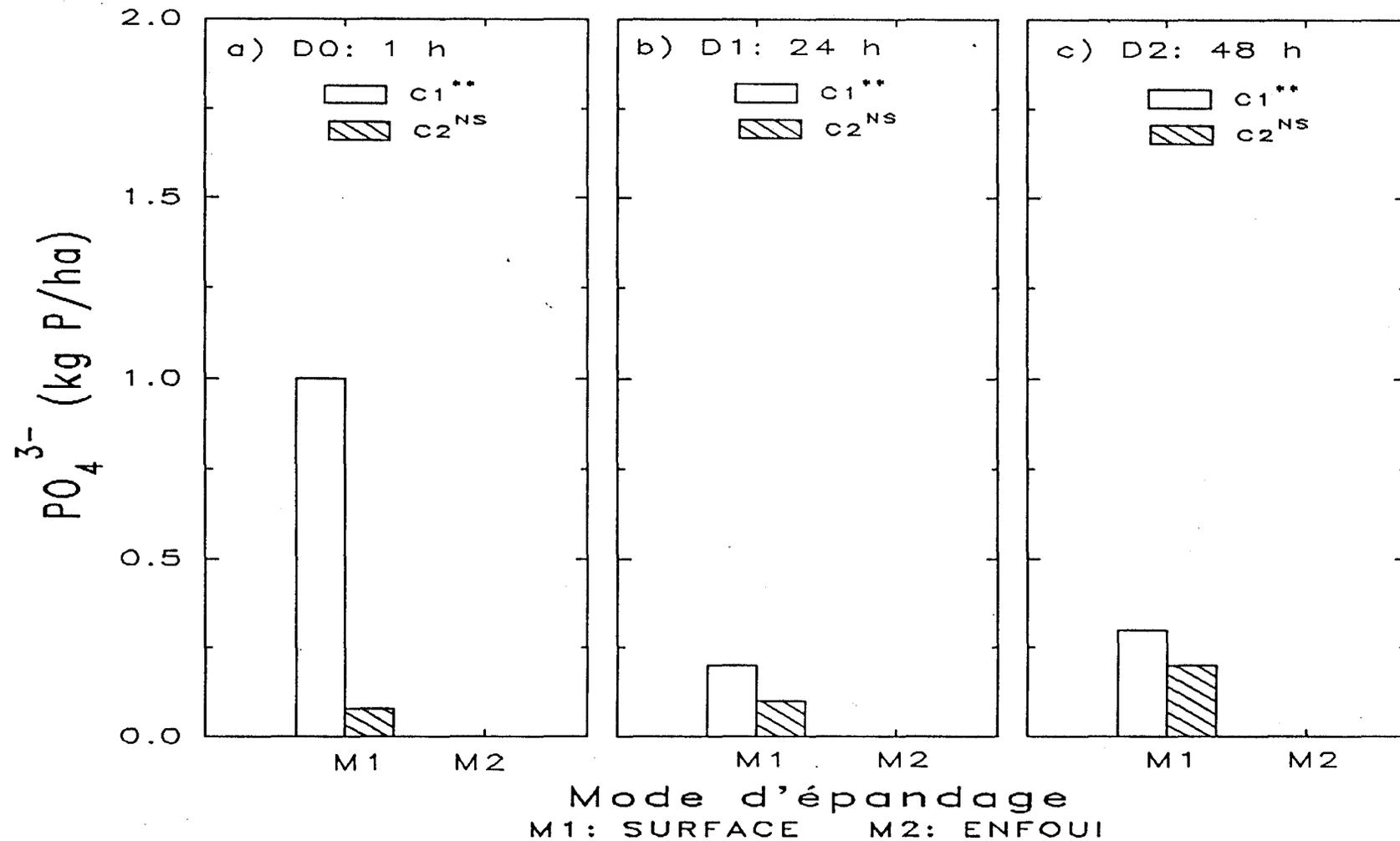


FIGURE 3.15:

Effet du mode d'épandage sur la charge d'orthophosphates ( $P-PO_4^{3-}$ ) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction M(DxC) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif

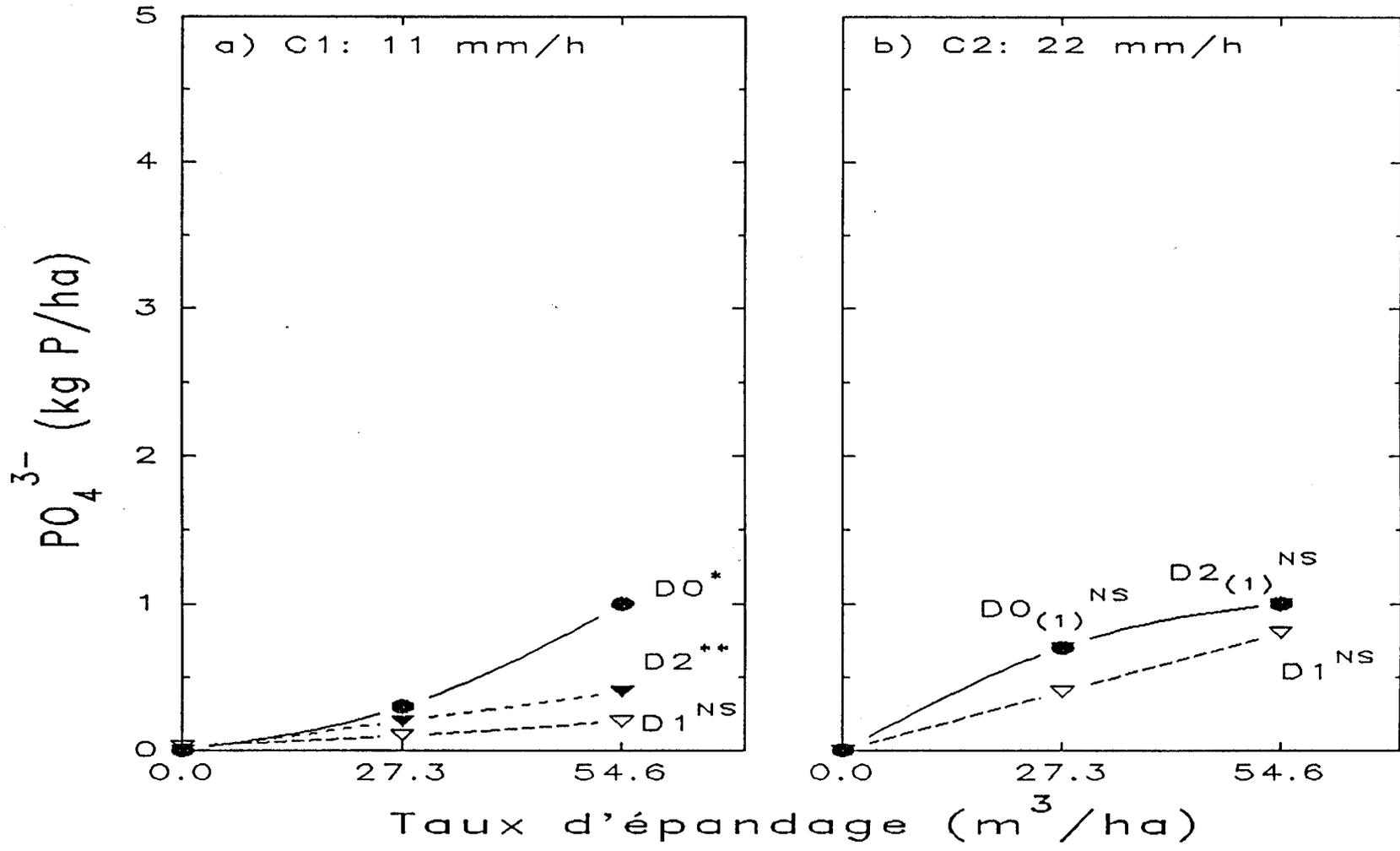
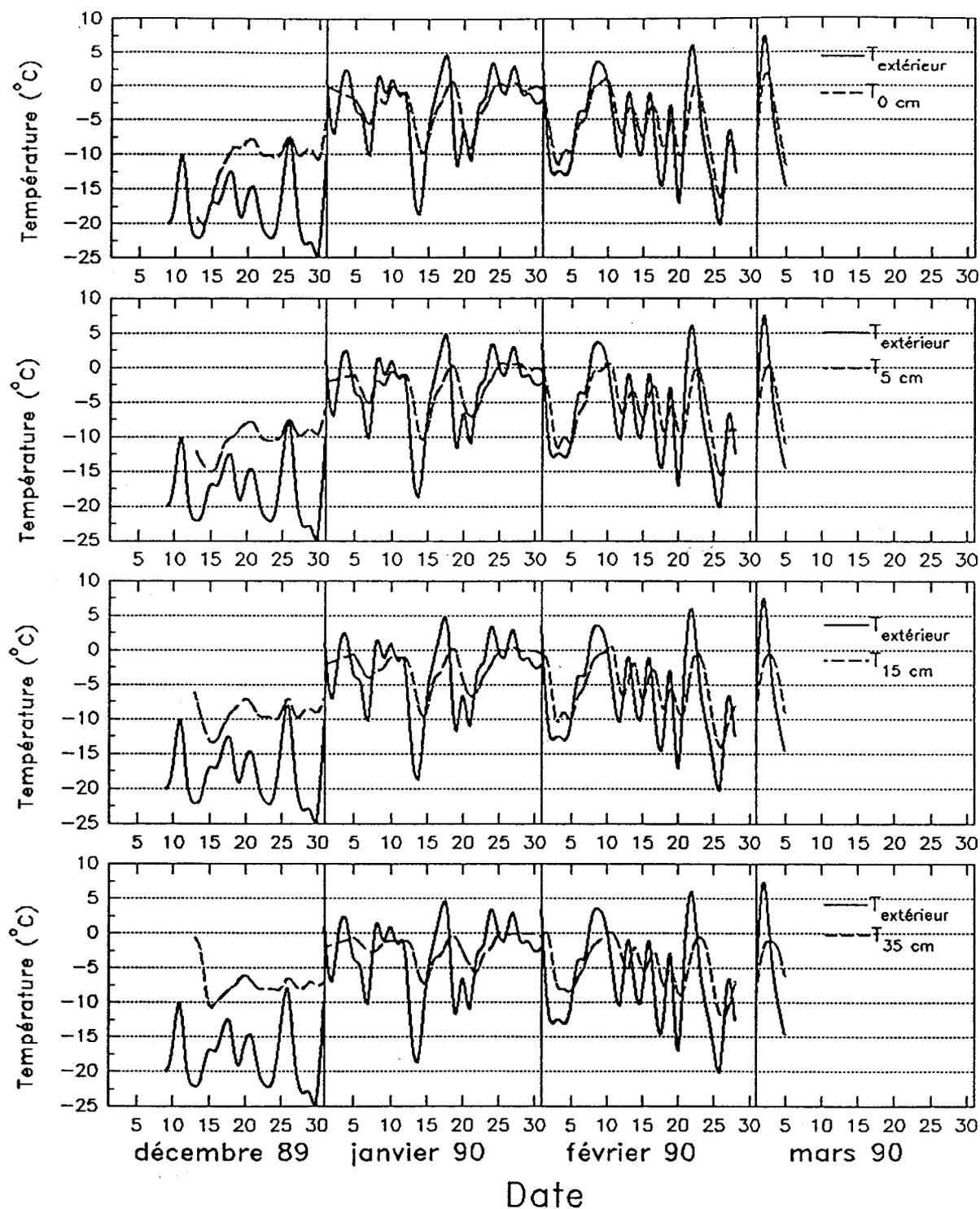


FIGURE 3.16:

Effet du taux d'épandage sur la charge d'orthophosphates ( $P-PO_4^{3-}$ ) dans l'eau de ruissellement due à des pluies printanières. Interaction T(DxC) \*\* significatif au seuil de 1%; \* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif



**FIGURE 3.17:**

Influence de la température moyenne extérieure sur la température moyenne du sol au cours de la période de gel.

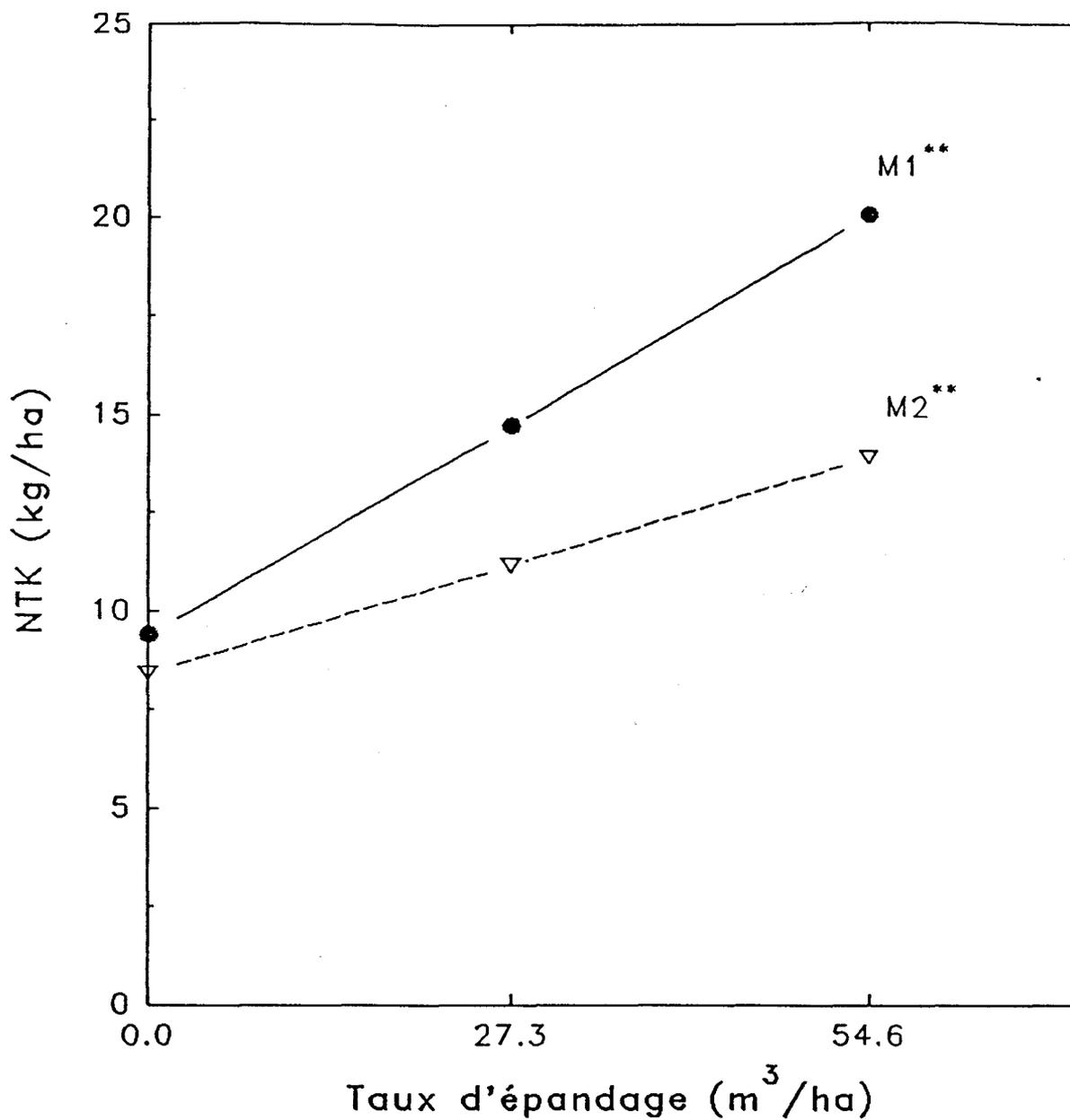
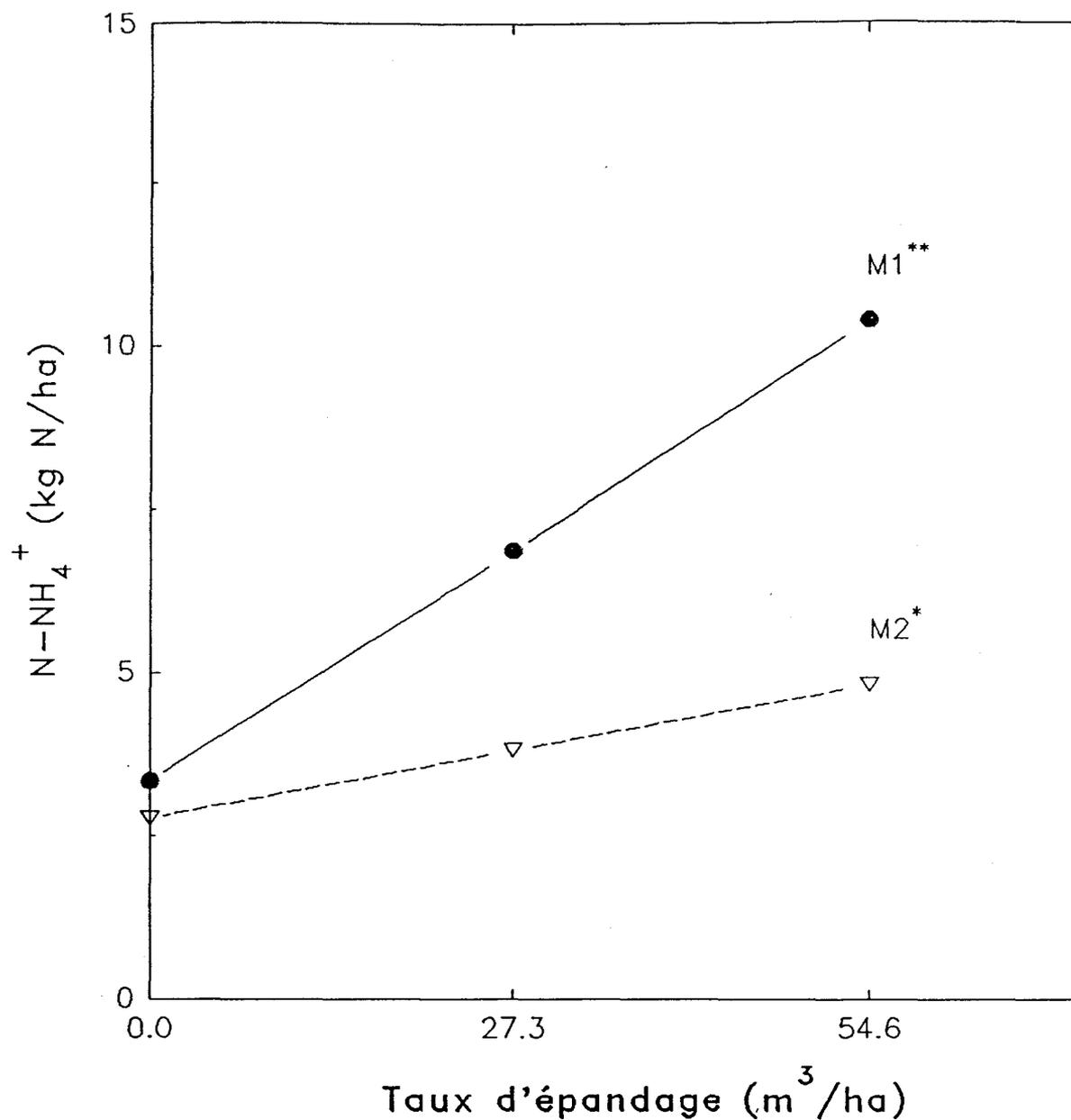


FIGURE 3.18:

Effet du taux d'épandage à l'automne sur la charge totale d'azote total Kjeldahl (NTK) dans l'eau de ruissellement et de drainage due aux fontes hivernales et printanières. Interaction T(M).

\*\* significatif au seuil de 1%;

\* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif

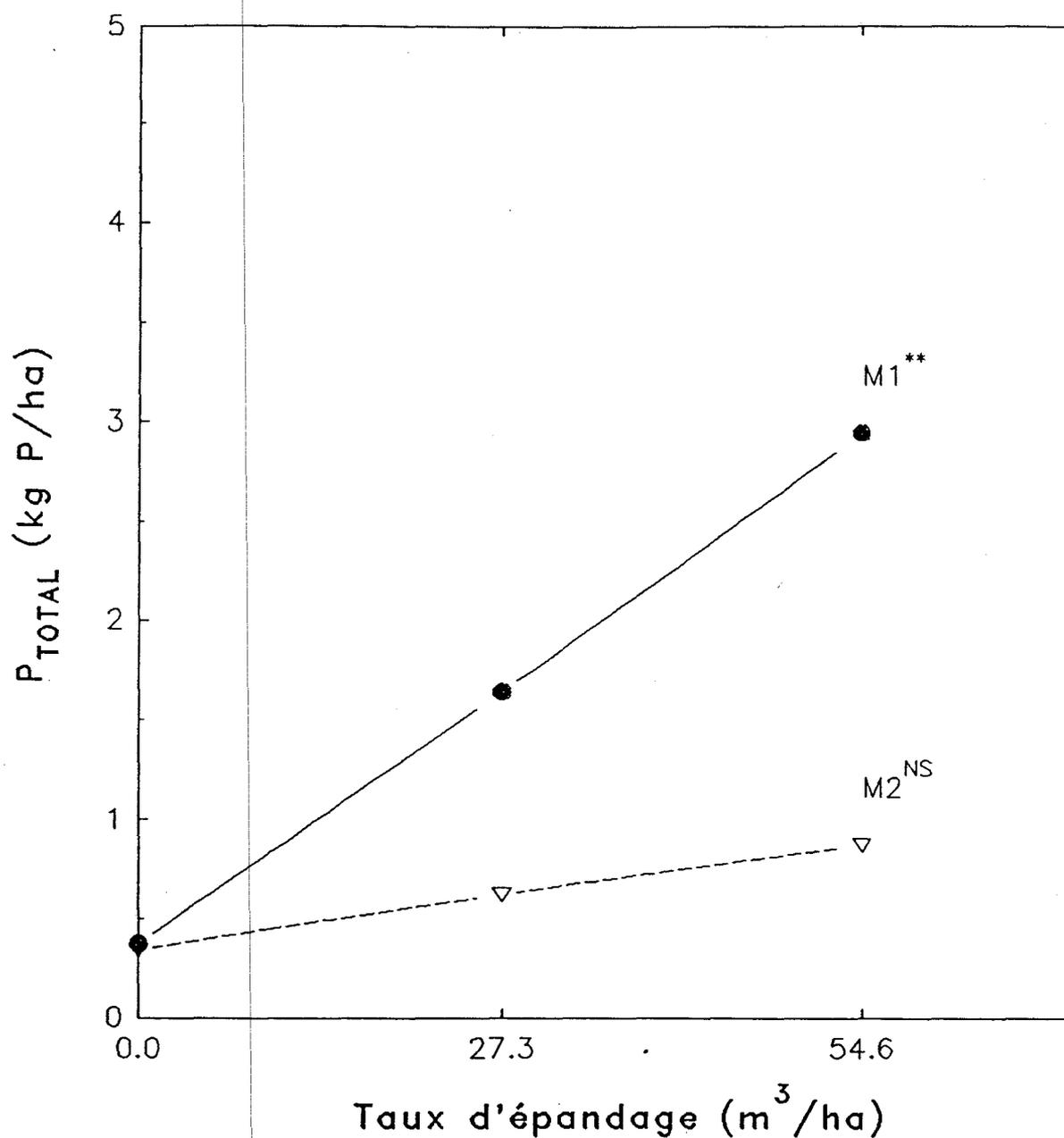


**FIGURE 3.19:**

Effet du taux d'épandage à l'automne sur la charge totale d'azote ammoniacal ( $N-NH_4^+$ ) dans l'eau de ruissellement et de drainage due aux fontes hivernales et printanières. Interaction T(M).

\*\* significatif au seuil de 1%;

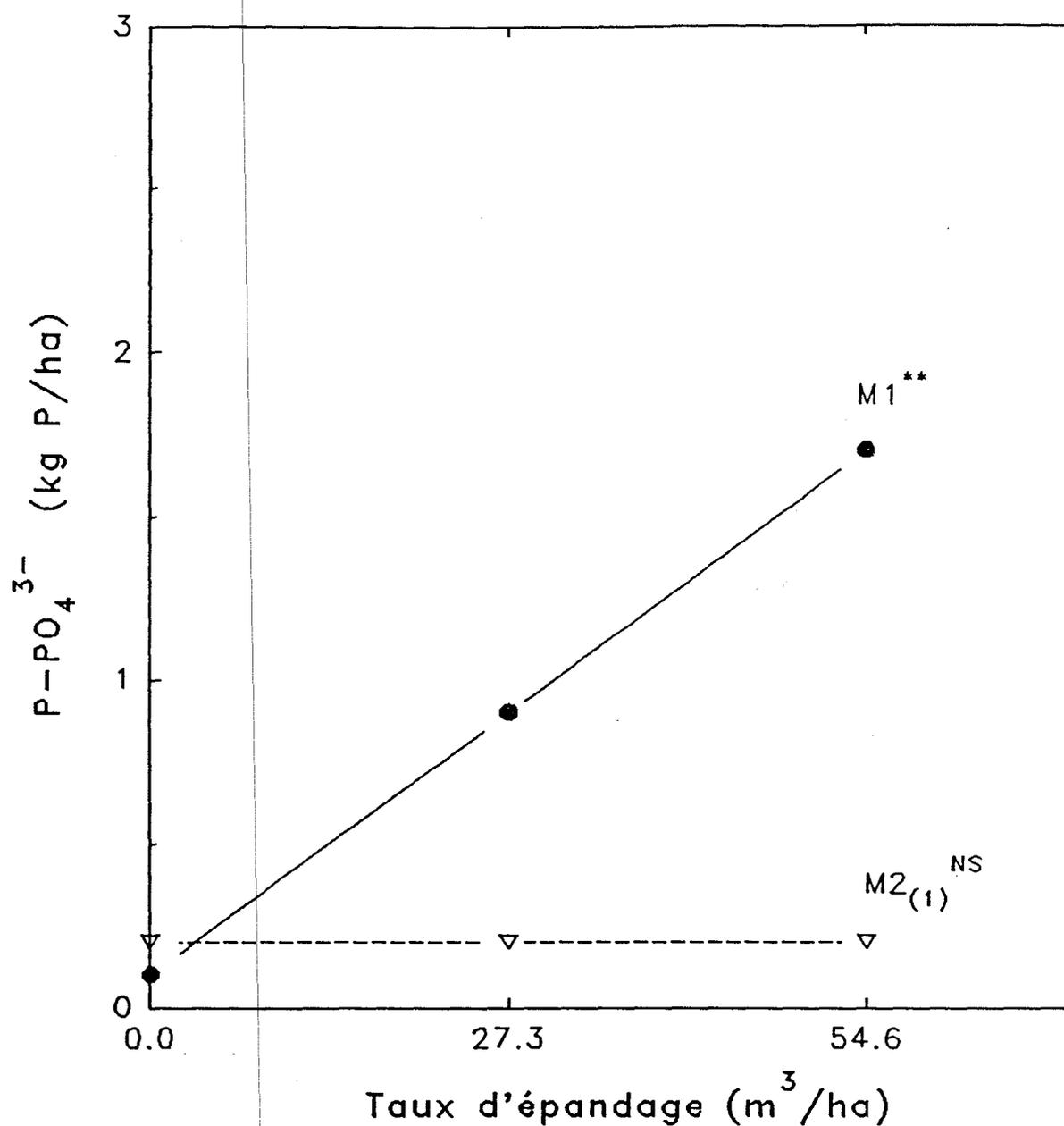
\* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif



**FIGURE 3.20:**  
Effet du taux d'épandage à l'automne sur la charge totale de phosphore total (P) dans l'eau de ruissellement et de drainage due aux fontes hivernales et printanières. Interaction T(M).

<sup>\*\*</sup> significatif au seuil de 1%;

<sup>\*</sup> significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif



**FIGURE 3.21:**

Effet du taux d'épandage à l'automne sur la charge totale d'orthophosphates ( $P-PO_4^{3-}$ ) dans l'eau de ruissellement et de drainage due aux fontes hivernales et printanières. Interaction T(M).

<sup>\*\*</sup> significatif au seuil de 1%;

\* significatif au seuil de 5%; <sup>NS</sup> non significatif