

NOTES TECHNIQUES
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 3

1995

Influence de la fumure azotée et du volume de sol
exploitable sur les relations sol - plante :
Application de la modélisation à une culture de
Panicum maximum conduite en vases de végétation
sur un vertisol de Nouvelle-Calédonie

Christiane THOMANN

NOTES TECHNIQUES
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 3

1995

Influence de la fumure azotée et du volume de sol
exploitable sur les relations sol - plante :
Application de la modélisation à une culture de
Panicum maximum conduite en vases de végétation
sur un vertisol de Nouvelle-Calédonie

Christiane THOMANN
Avec la collaboration technique de :
Philippe ANDRÉ
Philippe de MONTPEZAT
Pierre PROUZET
William NIGOTE
Léon TAPUTUARAI
Édouard OUCKEWEN



L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1995

/Thomann, C.
/André, P. (Collab.)
/de Montpezat, P. (Collab.)
/Prouzet, P. (Collab.)
/Nigote, W. (Collab.)
/Taputuarai, L. (Collab.)
/Ouckewen, E. (Collab.)

Influence de la fumure azotée et du volume de sol exploitable sur les relations sol -
plante : Application de la modélisation à une culture de *Panicum maximum* conduite en
vases de végétation sur un vertisol de Nouvelle-Calédonie

Nouméa : ORSTOM. Octobre 1995. 233 p.
Notes Tech. Sci. Vie ; Agropédol. ; 3

Ø68PROSOL

FUMURE ; AZOTE ; RELATION SOL PLANTE ; MODELISATION ; CULTURE ; VEGETATION ;
VERTISOL / NOUVELLE CALEDONIE

Imprimé par le Centre ORSTOM
Octobre 1995

 ORSTOM Nouméa
REPROGRAPHIE

**INFLUENCE DE LA FUMURE AZOTEE ET DU VOLUME DE
SOL EXPLOITABLE SUR LES RELATIONS SOL - PLANTE :
APPLICATION DE LA MODELISATION A UNE CULTURE DE
Panicum maximum CONDUITE EN VASES DE VEGETATION
SUR UN VERTISOL DE NOUVELLE-CALEDONIE**

par Ch. THOMANN

avec la collaboration technique de :

Philippe ANDRE
Philippe de MONTPEZAT
Pierre PROUZET
William NIGOTE
Léon TAPUTUARAI
Edouard OUCKEWEN

~ AVANT-PROPOS ~

Tout d'abord, un grand merci à B. BONZON, agronome au Centre ORSTOM de Nouméa, avec lequel j'ai travaillé pendant 5 ans, et qui m'a beaucoup appris dans le domaine de l'expérimentation. Je lui dois, en grande partie, la conception de cet essai.

Je remercie très sincèrement le laboratoire d'Agropédologie du Centre ORSTOM de Nouméa, dirigé par J. PETARD, qui a réalisé toutes les analyses de cette expérimentation qui sont à la base de ce travail.

Je suis infiniment reconnaissante aux chercheurs du Département de Physiologie Végétale et des Ecosystèmes du Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache, qui m'ont toujours très bien accueillie, et m'ont fait profiter de leurs compétences, chacun dans son domaine.

Ma reconnaissance va en particulier à J. THIERY, informaticien-modélisateur, qui n'a pas ménagé sa peine, et a fait part d'une remarquable patience à mon égard, car je n'avais jamais "pratiqué" l'informatique avant que les données de cette expérimentation soient traitées à l'ordinateur. J. THIERY a utilisé le programme "Voyons" pour le traitement des 25 000 données de l'essai ; j'ai beaucoup apprécié sa très haute compétence, alliée à un esprit mathématique brillant.

Un grand merci également à G. GUIRAUD, spécialiste de l'azote 15 dans ce Département, qui m'a initiée aux problèmes de l'isotope ^{15}N , et m'a permis, à 20 000 km du lieu de l'expérimentation de "cadrer" mes résultats d'analyses de l'azote 15. En l'absence de spectromètre de masse à Nouméa, j'ai appliqué la méthode des "ampoules", et des diagrammes réalisés par spectrométrie optique ; mes résultats se devaient d'être confirmés par quelques mesures effectuées au spectromètre de masse de Cadarache.

Je tiens également à remercier Ch. MAROL d'avoir eu la gentillesse de contribuer à m'aider dans ce travail technique sur ^{15}N , ainsi que dans la phase finale de la présentation de ce rapport. Que J.C. FARDEAU soit également remercié, d'avoir pris le temps et d'avoir eu l'amabilité de relire ce rapport ; j'ai apprécié, en sa qualité d'agronome, ses critiques pertinentes.

Enfin, merci à Mlle A.L. VIALA du Centre ORSTOM de Montpellier, qui a bien voulu se charger de la frappe de ce rapport.

Table des matières

I - INTRODUCTION	1
II - MATERIEL ET METHODES	2
2.1 Le dispositif expérimental	3
2.2 Les mesures effectuées	6
2.3 L'analyse statistique de variance	7
2.4 L'approche modélisatrice	7
2.5 Les modèles simples	8
2.6 Les modèles couplés	8
2.7 Comparaison de modèles couplés	18
III - RESULTATS	20
3.1 Les hauteurs et les vitesses de croissance	20
3.2 Les rendements	24
3.3 Les exportations d'azote total	38
3.4 Les exportations de phosphore	51
3.5 Les exportations de potassium	63
3.6 Les exportations de calcium	77
3.7 Les exportations de magnésium	92
3.8 Les exportations de sodium	107
3.9 Les exportations de silice	119
3.10 La production de matière minérale	133
IV - DISCUSSION	148
4.1 Interprétation des fonctions	148
4.1.1 Le rendement = fonctions "A - AH"	149
4.1.2 Le rendement = fonctions "P _{>} - P _{<} "	150
4.1.3 Le rendement = fonctions "D - H"	151
4.2 Bilan des éléments	170
4.2.1 Le bilan de l'azote	170
- Azote-engrais utilisé par la plante	171
- Azote-sol utilisé par la plante	183
- Bilan de l'azote-engrais	199
- Bilan de l'azote-sol	201
4.2.2 Le bilan du phosphore	205
4.2.3 Le bilan du potassium	209
4.2.4 Le bilan du calcium	211
4.2.5 Le bilan du magnésium	214
4.2.6 Le bilan du sodium	217
4.2.7 L'utilisation des éléments du sol par <i>Panicum maximum</i>	220
4.2.8 Observation sur le cumul des exportations	223
V - CONCLUSION	226
BIBLIOGRAPHIE	231

I - INTRODUCTION

Dans une étude précédente (THOMANN Ch. - 1988), nous avons souligné l'intérêt d'utiliser la graminée fourragère *Panicum maximum* comme plante-test tropicale, car elle présentait de nombreuses qualités de par ses réactions aux engrais et au sol, et de par l'homogénéité de sa culture. Nous avons précisé ses besoins en éléments NPK, pour atteindre un rendement optimum pour une culture en pots, sous serre, sur vertisol. Cet essai ne portait que sur un seul volume de sol (3 kg), qui recevait une fumure NPK, comprenant des variations dans les apports de chacun des 3 éléments. On en avait conclu qu'il était inutile d'apporter trop d'azote au départ, mais que par contre, le phosphore pouvait être apporté largement en fumure de fond, sachant que les sols tropicaux sont pour la plupart très déficitaires en phosphore. Il nous avait été possible également d'établir de nombreuses corrélations entre les éléments apportés et les éléments prélevés par la plante.

Cette graminée étant bien adaptée aux conditions tropicales humides de la Nouvelle-Calédonie, pays d'élevage par excellence, il nous a semblé opportun d'affiner et de parfaire ces résultats sur 2 points particuliers :

- le problème de l'azote, primordial pour une graminée, serait précisé, d'une part en faisant varier la nature de l'engrais azoté, d'autre part en utilisant des engrais marqués à l'azote 15 ;

- l'utilisation de pots de culture de volumes différents (2 kg à 9 kg de sol), pourrait nous aider à mieux comprendre les relations sol-plante.

Le type de fumure azotée la mieux appropriée à cette culture nous paraît intéressante à connaître, sachant que l'urée est actuellement le principal engrais azoté utilisé en Nouvelle-Calédonie, du fait de son fort pourcentage en azote - 46% - (les engrais étant importés, le coût relatif de l'urée sera moindre que celui des autres engrais azotés, à teneur en azote plus faible). Mais il était nécessaire de comparer l'action de l'urée à celle d'autres engrais azotés, afin de pouvoir chiffrer les différences, si toutefois il en existait. Le nitrate de calcium et le sulfate d'ammonium, par leurs ions NO_3^- et NH_4^+ étaient les plus propres à nous montrer ces différences. Pour mieux suivre leur devenir et leur évolution dans la plante et dans le sol, ces engrais azotés étaient "marqués" à l'azote 15.

De plus, il est couramment admis que dans les essais en vases de végétation conduits en serre, les résultats et les conclusions varient peu en fonction du volume de sol utilisé, du moment que la fumure a été apportée proportionnellement au volume de sol utilisé.

Du fait des très bonnes réactions de *Panicum maximum* aux apports d'engrais, il était intéressant de vérifier cette hypothèse, et au cas où elle ne se vérifierait pas, d'étudier les problèmes soulevés (on peut supposer en effet que les éléments prélevés par la plante en fonction des volumes croissants de sol, répondent à des lois, ou plus simplement à des fonctions mathématiques).

Pour ne pas trop alourdir le protocole, nous adopterons le principe de l'apport d'engrais en début d'essai, ce qui permettra d'obtenir un rendement optimum à la 1^{ère} coupe, et ensuite par coupes successives d'épuiser les réserves du sol ; car il paraît évident qu'à partir de la 3^{ème} coupe, la plante a certainement été "en manque" d'éléments nutritifs, et a dû prélever dans les réserves du sol, lesquelles apparaissent comme plus ou moins disponibles pour la plante selon les éléments. Il sera alors possible, pour l'azote en particulier, de chiffrer l'azote du sol "facilement accessible" (dans le cas du témoin), ou "maximal utilisable" (dans le cas d'apports d'engrais) pour un type de sol donné, c'est à dire le vertisol, dans cette expérimentation.

En résumé, on se propose d'étudier plus spécialement le prélèvement des éléments nutritifs (en provenance des engrais et/ou du sol) par la plante en fonction du type d'apport et des différents volumes de sol testés. Un bilan pour chaque élément pourra être exposé après 3 mois 1/2 de culture, car cet essai s'effectuera en circuit fermé, et tout sera pris en considération (plante, sol, percolats). Les nombreuses données seront examinées en détail pour chacun des paramètres étudiés, après analyse statistique. Les variations des paramètres en fonction des volumes de sol seront spécialement étudiées par application de modèles mathématiques, pouvant nous préciser les relations sol-plante en fonction du volume de sol. Cet essai de "modélisation" sera très largement développé sur les données "plante".

Enfin, pour mieux évaluer les transferts d'azote sol-plante, l'isotope ¹⁵N est utilisé, ce qui permettra d'effectuer un bilan extrêmement précis pour l'élément azote, élément fondamental dans le cas d'une culture intensive de graminée fourragère.

II - MATERIEL ET METHODES

Les principales données de base de l'essai sont schématiquement les suivantes.

2.1 LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

-Une plante : *Panicum maximum* (variété "green panic"), graminée fourragère.

-Un sol : le vertisol modal de Pouembout (Nouvelle-Calédonie) dont les principales données analytiques sont mentionnées dans le tableau I .

-Cinq poids de terre : répartis dans des pots de culture ("V", exprimés en kg de sol) :

$V_1 = 2,0$ kg ; $V_2 = 2,9$ kg ; $V_3 = 4,6$ kg ; $V_4 = 6,8$ kg ; $V_5 = 9,0$ kg.

Ces pots de culture sont identiques quant à leur diamètre, et leur système d'alimentation en eau; ils se différencient par la hauteur de la colonne de sol.

-Cinq traitements :

F_1, F_2, F_3 : recevant une fumure NPK, dont seule la nature de l'apport azoté varie :

F_1 : apport N sous forme de nitrate de calcium,

F_2 : apport N sous forme de sulfate d'ammonium,

F_3 : apport N sous forme d'urée,

ces 3 engrais azotés étaient marqués à l'azote 15.

F_4 : témoin, sans aucun apport d'engrais,

F_5 : témoin, recevant un apport PK, sans apport azoté.

-Une fumure minérale : avec un seul apport fertilisant en début d'essai.

La fumure minérale est apportée proportionnellement au poids de chacun des volumes de sol, en se basant sur l'équivalence : 1 ha = 3000 t de sol

apport N : 150 ppm, soit 450 kg ha⁻¹ ;

apport P₂O₅ : 250 ppm, soit 750 kg ha⁻¹, apporté sous forme de KH₂PO₄ ;

apport K : 200 ppm, soit 600 kg ha⁻¹, apporté sous forme de K₂SO₄, en complément du phosphate monopotassique.

Les 3 traitements F_1, F_2, F_3 , recevant la fumure NPK étaient comparés aux 2 témoins F_4 et F_5 .

-Soit, au total :

25 traitements (5 fumures * 5 poids de sol), réalisés en double, avec 3 répétitions (blocs), ce qui représente 150 pots de culture (occupant une seule serre),

dont : 90 avec une fumure complète NPK,

30 pots-témoins sans engrais,

30 pots-témoins avec une fumure PK.

L' expérimentation a été réalisée au Centre ORSTOM de Nouméa (Nouvelle-Calédonie), en janvier-février-mars 1986 (été austral).

TABLEAU I - VERTISOL DE POUEMBOUT (0 - 30 CM)

- pH	eau	6,35
	KCl	5,25
- C total %		1,63
- N total ‰		1,29
- C / N		12,7
- P ₂ O ₅	total ‰	0,33
	assimilable mg par kg de sol	27,0
- CE : meq %		80,0
<u>- bases échangeables : meq pour 100 g</u>		
	Ca ⁺⁺	39,7
	Mg ⁺⁺	36,0
	K ⁺	0,69
	Na ⁺	0,91
	cations échangeables	77,3
	taux de saturation %	96,6
<u>- bases totales : meq pour 100 g</u>		
	Ca ⁺⁺	45,6
	Mg ⁺⁺	112,0
	K ⁺	1,01
	Na ⁺	1,54

Les apports importants d'engrais sont justifiés par les faits suivants :

-*Panicum maximum* est une graminée très "gourmande" d'azote et de potasse ; dans cet essai, elle est donc placée dans les meilleures conditions possibles, pour donner une production optimum ; par comparaison, des essais réalisés avec *Panicum maximum* en Côte d'Ivoire (ROBERGE G. - 1974) et au Sénégal (ROBERGE G. - 1980) sur des expérimentations au champ, avec irrigation, utilisaient respectivement les fumures suivantes :

<u>Côte d' Ivoire</u>		<u>Sénégal</u>	
750 N	}	880 N	}
225 P ₂ O ₅		710 P ₂ O ₅	
750 K ₂ O		770 K ₂ O	
	en 6 épandages par an		apport en 3 étapes : .fumier .fumure d'implantation .fumure d'entretien

-les sols tropicaux sont généralement pauvres en P₂O₅, un apport important de phosphore accroît significativement leurs réserves, permettant ainsi un développement de la graminée, sans risque de carence phosphorique . Le vertisol testé ne renferme que 0,33 ‰ de P₂O₅ total (teneur médiocre), d'autant qu' "en matière d'élevage, les besoins en phosphore sont plus élevés qu'en culture intensive, et les apports devront en être forcés par rapport aux autres éléments minéraux utiles. C'est le plus souvent, en effet, la teneur en phosphore du fourrage qui est le facteur limitant de la croissance du bétail, comme de son appétence envers lui ; de plus un enrichissement en phosphore des terres pastorales entraîne presque toujours, directement par une meilleure humification et nitrification et, indirectement, en favorisant les légumineuses, un accroissement des quantités d'azote mises à la disposition des plantes, et, par voie de conséquence, une augmentation de la production de viande, et éventuellement de lait." (TERCINIER G. - 1967);

-cette expérimentation est basée sur le procédé par épuisement, avec un seul apport fertilisant en début d'essai, et des coupes successives, qui obligent la plante, après une plus ou moins grande consommation des engrais, à prélever les éléments du sol. Dans le cas de l'azote, les notions d'azote "accessible" et "utilisable" peuvent être ainsi précisées, pour le type de sol expérimenté, grâce à l'utilisation de ¹⁵N.

Les pots de culture sont alimentés régulièrement en eau par un système de toile en fibre de verre, reliant la cuve d'alimentation en eau à la surface du sol ; le sol contenu dans les pots est ainsi maintenu à un certain taux d'humidité, proche de la capacité de rétention.

2.2 LES MESURES EFFECTUEES

Elles concernent la plante, le sol, et les percolats recueillis en fin d'expérimentation :

-sur la plante :

les hauteurs sont mesurées - 2 fois par semaine - avant la 1^{ère} coupe et avant la 2^{ème} coupe ; on en déduit les vitesses de croissance en fonction du temps ;

la 1^{ère} coupe est effectuée 36 jours après le semis,

la 2^{ème} coupe est effectuée 31 jours après la 1^{ère} coupe,

la 3^{ème} coupe est effectuée 39 jours après la 2^{ème} coupe,

les chaumes sont recueillis au dépotage, ils représentent le bas des tiges après la 3^{ème} coupe,

les racines ont été extraites par lavage du sol .

Pour chacune de ces productions, on a déterminé :

le rendement (poids de matière sèche obtenu par pot),

et les teneurs en éléments N, P, K, Ca, Mg, Na, SiO₂, cendres, par analyse chimique du broyat de la matière sèche. On en déduit les exportations ou les immobilisations de ces éléments par les différentes parties de la plante :

Q_x exprime la quantité de l'élément "x" exportée par pot (pour la 1^{ère} coupe, la 2^{ème} coupe, la 3^{ème} coupe, les chaumes, les racines),

Q'_x exprime la quantité de l'élément "x" exportée, ramenée au kg de sol :

$$Q'x = Qx / V \text{ kg}$$

-sur le sol :

l'analyse chimique classique (pH, C, N, P₂O₅, cations échangeables, cations totaux) est effectuée :

sur le sol homogénéisé, avant la mise en place des pots,

à la fin de l'essai, sur le sol séché et tamisé de chaque pot ;

-sur les percolats :

recueillis après la 3^{ème} coupe, au bas de chacun des 150 pots.

La mesure des volumes et de la conductivité, l'analyse des éléments solubilisés (P, K, Ca, Mg, Na) ont été déterminées.

2.3 L'ANALYSE STATISTIQUE DE VARIANCE

Toutes les données ainsi obtenues sont exprimées pour chacun des 5 traitements (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5), et pour chacun des 5 volumes de sol (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5). Ces données sont particulièrement nombreuses pour la plante, du fait que 5 états du développement sont concernés : 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} coupes, chaumes et racines.

L'analyse statistique de variance a été effectuée sur l'ensemble des variables (plante, sol, percolats), elle permet d'établir les similitudes ou les différences entre les 5 traitements d'une part, entre les 5 poids de sol d'autre part.

2.4 L'APPROCHE MODELISATRICE

L'analyse statistique classique suppose que les différentes variables étudiées sont liées par des relations linéaires, auxquelles s'ajoutent des variations aléatoires. Dans une approche plus modélisatrice, on cherche à vérifier la pertinence du modèle linéaire et à le remplacer éventuellement par un modèle non linéaire plus approprié. Il existe potentiellement un nombre infini de modèles ; dans la pratique, on sélectionne les modèles les plus simples qui rendent compte de l'essentiel du phénomène étudié, et en particulier ceux dont les paramètres ont une interprétation (agronomique ou physique) directe. Le modèle linéaire (droite des moindres carrés) sert toujours de modèle de référence dans la mesure où il est le plus simple de tous. La représentation graphique des données expérimentales (et de la droite des moindres carrés) donne souvent une idée des modèles à explorer :

le modèle doit-il passer par l'origine ?

le modèle doit-il présenter une asymptote ? etc...

Dans ce qui suit, nous avons étudié essentiellement les variations de tel ou tel élément - de sa teneur ou de son exportation - (dans les tiges + feuilles des 3 coupes, dans les chaumes et dans les racines) en fonction des volumes croissants de sol.

Pour une meilleure comparaison de l'ensemble des résultats, nous avons opté pour un certain nombre de critères, qui permettent de distinguer en premier lieu, le cas des teneurs et le cas des exportations en éléments (N, P, K, Ca, etc.), sachant que l'exportation d'un élément par telle ou telle coupe, n'est en fait que le produit du rendement (exprimé en matière sèche) par la teneur de l'élément en question :

$$Q_x = Q * \text{teneur \% de } x$$

2.5 LES MODELES SIMPLES

Cette étude a été réalisée à l'aide du progiciel général de modélisation "Voyons"; "il est basé sur un interpréteur mathématique et graphique polyvalent, piloté par un langage structuré possédant de nombreuses commandes de calculs et de tracés vectoriels." (THIERY J. M. - 1991).

Les modèles retenus sont au nombre de 9 :

- la droite : "D",
- la puissance : "P",
- l'hyperbole : "H",
- les exponentielles :
 - exponentielle asymptotique : "A",
 - exponentielle décroissante : "E",
- les produits de ces modèles :
 - l'asymptote * hyperbole : "AH",
 - l'exponentielle * puissance ¹ : "E₁",
 - l'asymptote * puissance ¹ : "A₁",
 - l'exponentielle * puissance ² : "E₂".

Les teneurs en éléments (N, P, K, Ca, Mg, Na, SiO₂, cendres) exprimées en pourcentage, répondent à des modèles simples et dans la majorité des cas à des fonctions mathématiques élémentaires, et principalement à des droites, c'est-à-dire qu'une teneur, pour un traitement et un élément donnés, est proportionnelle au volume de sol. Dans ce cas, le problème de l'ordonnée à l'origine n'intervient pas .

2-6 LES MODELES COUPLES

Par contre **les exportations** (exportation d'un élément en fonction du volume de sol) sont exprimées par 2 variables :

- d'une part Q (en fonction de V) : quantité d'élément exporté, par exemple par la 1^{ère} coupe, pour un volume donné de sol,
- d'autre part Q' (en fonction de V) : quantité d'élément exporté, par exemple par la 1^{ère} coupe, ramenée au kg de sol, c'est à dire à l'unité de volume, ce qui permet la comparaison des différents volumes de sol entre eux.

Mathématiquement, ces 2 paramètres sont liés puisque : $Q' = Q / V$, donc leurs représentations sous forme de fonctions mathématiques seront également liées.

Ainsi, les fonctions pour Q devraient nous donner pour Q' les équivalents mathématiques suivants :

<u>fonction pour Q</u>	<u>fonction pour Q'</u>
droite ("D")	hyperbole ("H")
puissance ("P")	puissance ("P")
asymptote ("A")	asymptote * hyperbole ("AH")
exponentielle * puissance ¹ ("E ₁ ")	exponentielle décroissante ("E")
asymptote * puissance ("A ₁ ")	asymptote ("A")
exponentielle * puissance ² ("E ₂ ")	exponentielle * puissance ¹ ("E ₁ ")

. pour toutes les fonctions se rapportant aux éléments exportés par les 3 coupes, la fonction devait nécessairement partir de l'origine. Pour les chaumes et les racines, nous avons souvent admis la droite, ne passant pas par l'origine, car Q' répondait au mieux à une hyperbole, et donc Q à une droite ;

. bien que Q' réponde souvent à une droite, nous avons préféré choisir la fonction la plus proche, du type exponentielle décroissante ("E") ou asymptote * hyperbole ("AH") afin que pour les volumes de sol importants, bien au delà de 10 kg, le Q' ne devienne pas nul, comme il pourrait l'être avec une droite qui couperait nécessairement l'axe des abscisses ;

. pour un paramètre donné (par exemple l'immobilisation de l'azote par les racines), il est préférable qu'il soit représenté par la même fonction pour les 5 traitements ; si dans certains cas, cela se vérifie, bien souvent on est obligé d'admettre des fonctions différentes, car il est évident que le témoin F₄ ne réagit pas de la même façon que le traitement F₂ par exemple, qui a reçu et utilisé beaucoup d'engrais ;

. le suivi des exportations pour un traitement donné, nous montre qu'il répond à une certaine logique, et pour mieux suivre ce qui se passe entre la plante, le sol et les engrais, nous avons représenté la succession des paramètres de la manière suivante :

1^{ère} coupe : toujours très importante, elle détermine les exportations totales de la plante,

2^{ème} coupe : beaucoup moins importante que la 1^{ère} coupe,

3^{ème} coupe : encore plus faible que la 2^{ème} coupe,

2^{ème} + 3^{ème} coupes : cette somme nous donne la tendance de l'évolution par rapport à la 1^{ère} coupe,

1^{ère} + 2^{ème} + 3^{ème} coupes (S₃) : cette somme représente l'exportation d'un élément pour une production et un traitement donnés ; c'est l'équivalent des fauches au champ,

chaumes,

racines,

chaumes + racines (SCR) : cette somme représente les parties de la plante qui restent sur place au champ, et sont donc réincorporées au sol,

$S_3 + SCR$: le total de l'ensemble représente ce que la plante a prélevé comme éléments à partir du sol et / ou des engrais.

Nous avons étudié systématiquement ces 9 paramètres pour chacun des traitements, en fonction des volumes de sol, et pour chacun des éléments suivis. Ils répondent tous à des fonctions, lesquelles varient suivant le traitement, la coupe ou la partie de la plante, et l'élément étudiés.

Un exemple sera donné pour chacun des modèles, pour permettre une meilleure visualisation.

Pour toutes ces représentations graphiques, l'axe des abscisses est le même (poids croissant de sol : de 0 à 10 kg, les points expérimentaux correspondant à V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) et l'axe des ordonnées exprime Q (mg exportés par pot de culture), ou Q' (mg exportés par kg de sol) ; seuls les rendements sont exprimés en g.

Les exemples choisis représentent donc une variable donnée, avec les erreurs relatives pour Q et Q' : voir figures 1 à 12.

Q (g ou mg par pot de culture)			Q' (g ou mg par kg de sol)			Variable
fonction	erreur %	fig.	fonction	erreur %	fig.	
droite (D)	11,6	1	hyperbole (H)	9,5	2	Mg(SCR)F ₃
puissance (P _{>})	2,2	3	puissance (P _{>})	2,2	4	N T F ₂
expon.- asymptote (A)	6,9	5	asyp. x hyperbole (AH)	6,8	6	T F ₅
expon. x puissance ¹ (E ₁)	8,8	7	expon. décroissante (E)	6,1	8	Ca(SCR)F ₄
asyp. x puissance (A ₁)	2,9	9	expon. - asymptote (A)	2,7	10	K 1c F ₂
expon. x puissance ² (E ₂)	7,4	11	expon. x puissance ¹ (E ₁)	7,1	12	Cend.3c F ₅

- Mg(SCR)F₃ : immobilisation du Mg par les chaumes + racines (= quantité de Mg présente dans les chaumes et les racines) pour le traitement F₃,

- N T F₂ : exportation de l'azote par l'ensemble de la plante, pour F₂,

- T F₅ : total de la production végétale pour F₅,

- Ca(SCR)F₄ : immobilisation du Ca par les chaumes + racines, pour F₄,

- K 1c F₂ : exportation du potassium à la 1^{ère} coupe, pour F₂,

- Cend.3c F₅ : production de cendres à la 3^{ème} coupe, pour F₅.

Le tableau II précise les formules mathématiques de ces différentes fonctions.

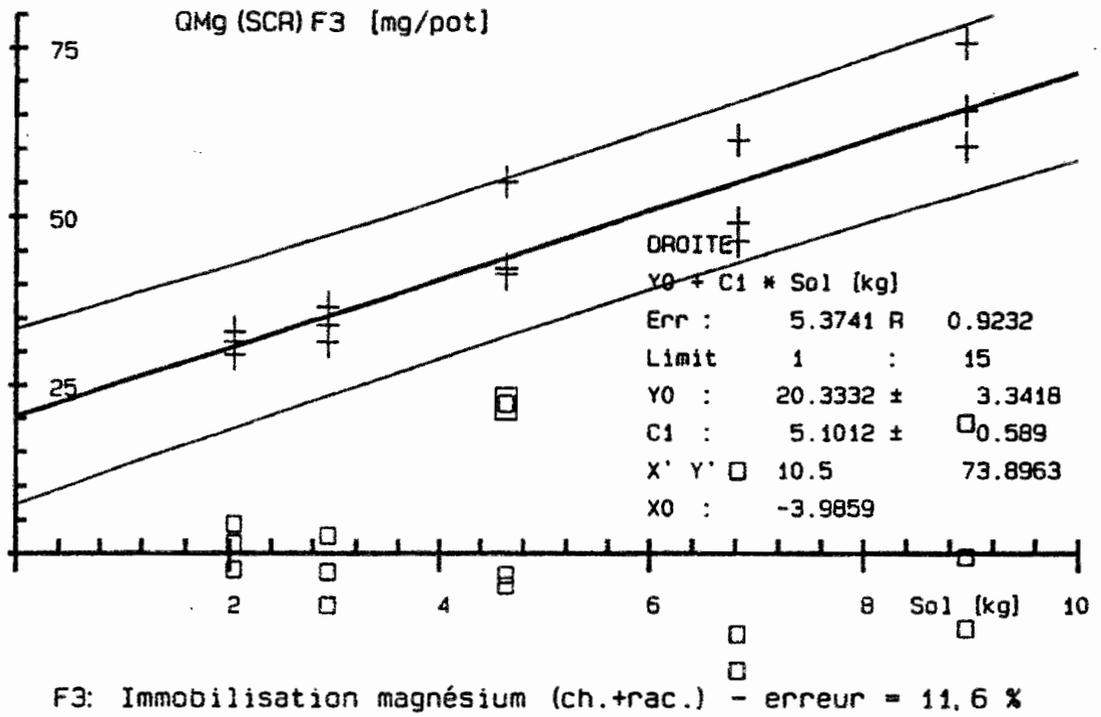


Figure 1: Fonction 'D' = Droite

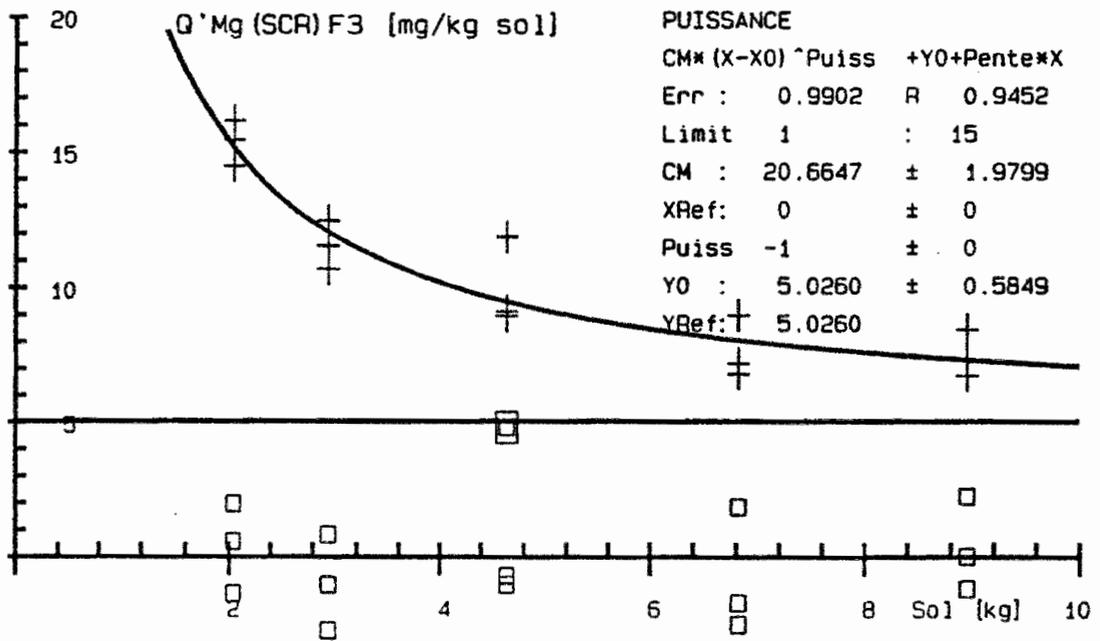
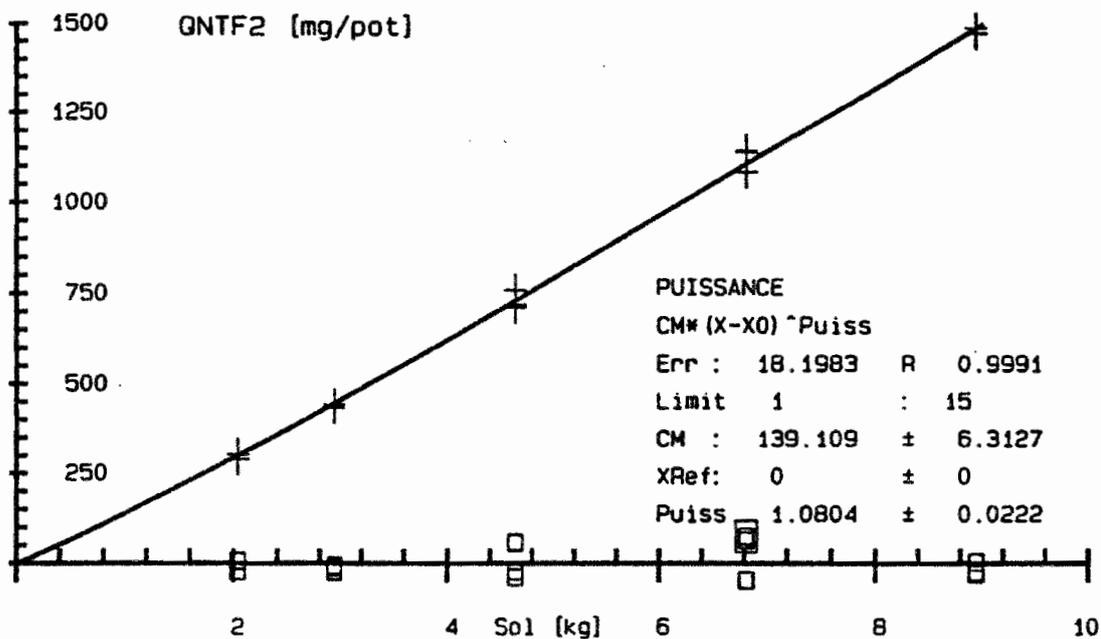
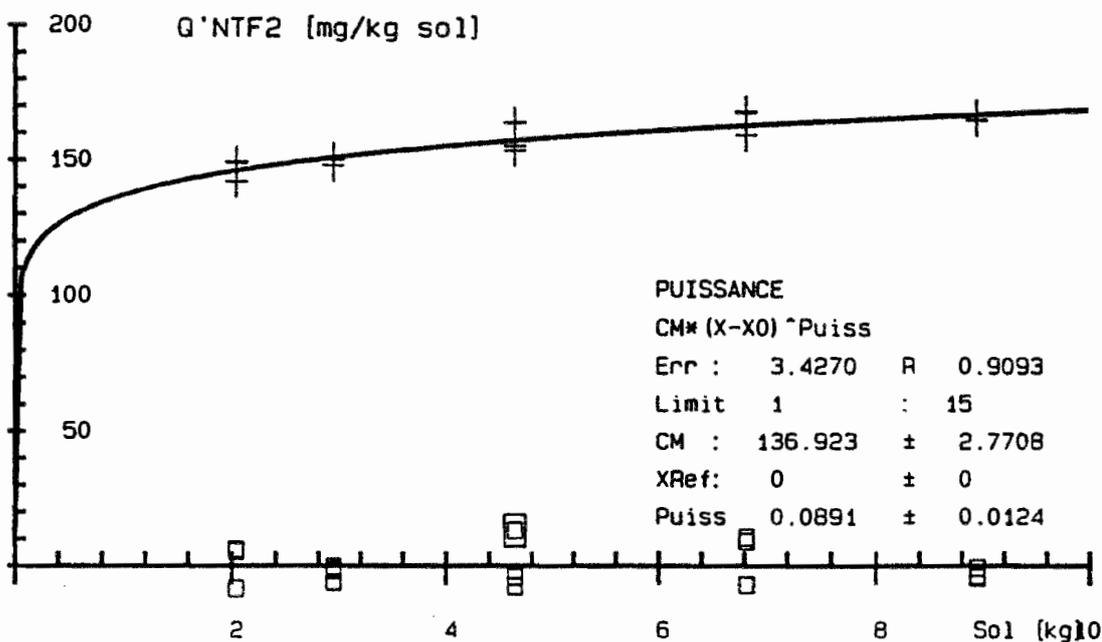


Figure 2: Fonction 'H' = Hyperbole



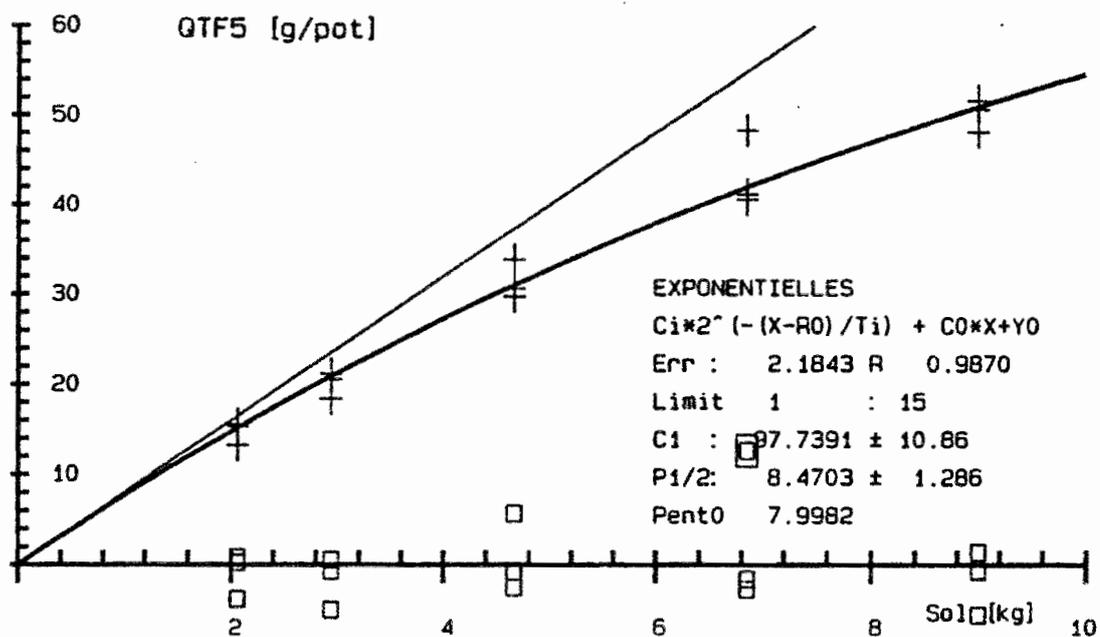
F2: Exportation azote (total plante) - erreur = 2.2 %

Figure 3: Fonction 'P>' = Puissance (positive: >0)



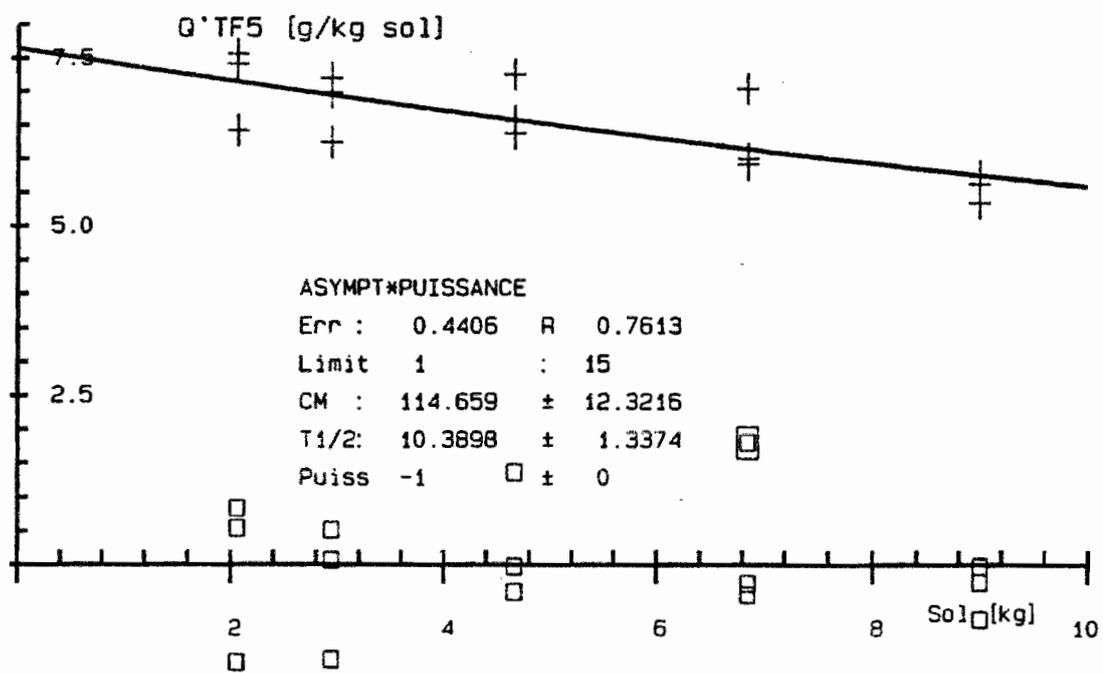
F2: Exportation azote/kg sol (total plante) - erreur = 2.2 %

Figure 4: Fonction 'P>' = Puissance (positive: >0)



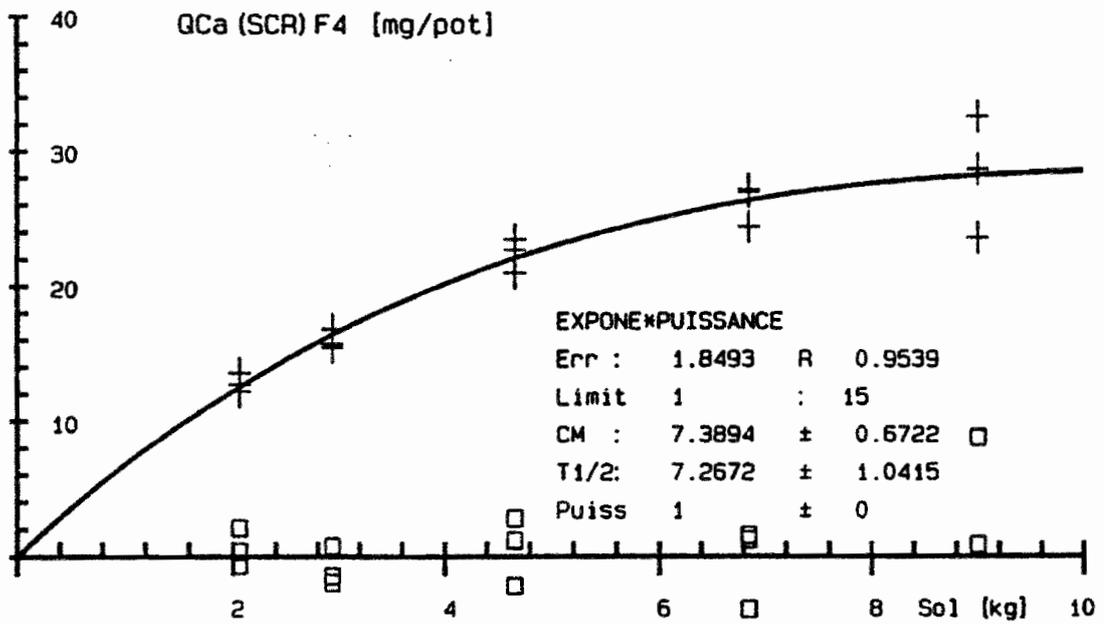
F5: Rendement (total plante) - erreur = 6,9 %

Figure 5: Fonction 'A' = Exponentielle asymptotique



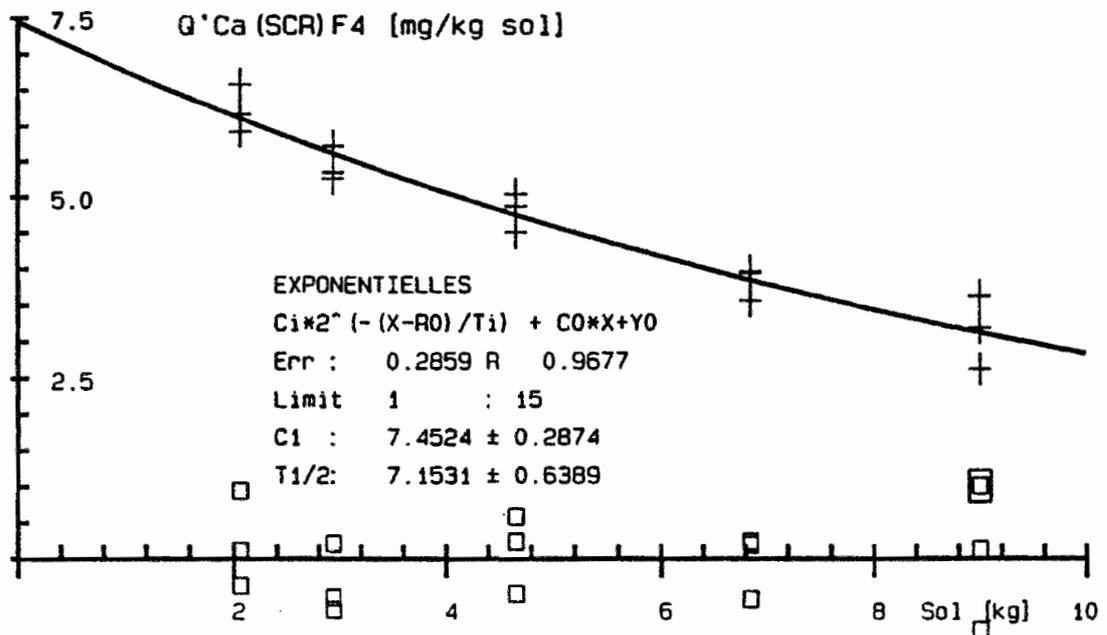
F5: Rendement/kg sol (total plante) - erreur = 6,8 %

Figure 6: Fonction 'AH' = Asymptote * Hyperbole



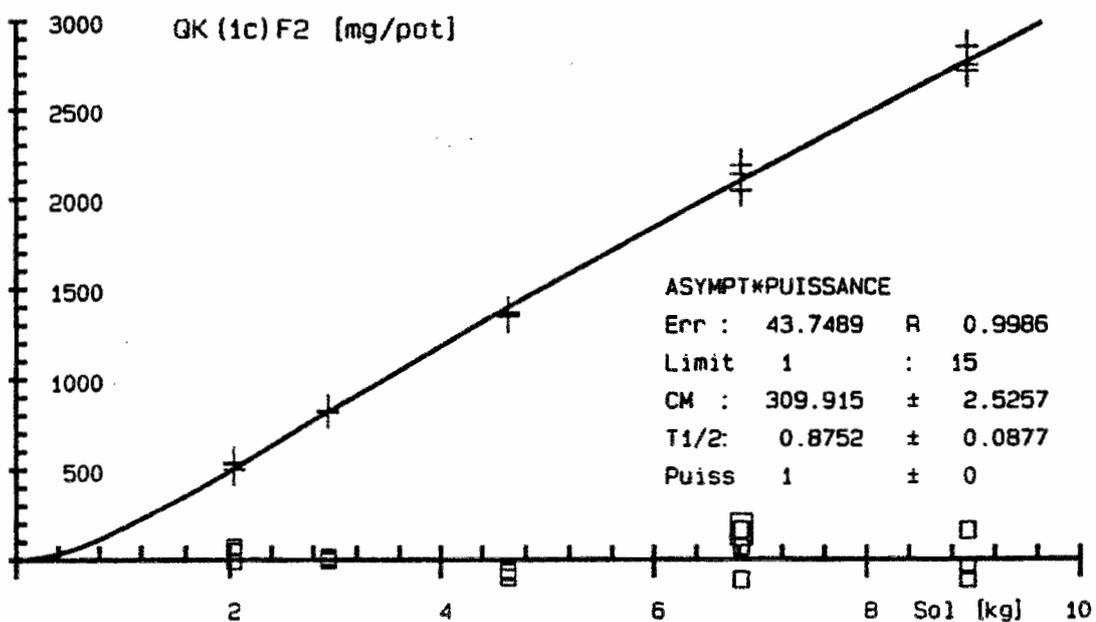
F4: Immobilisation calcium (ch. + rac.) - erreur = 8.8%

Figure 7: Fonction 'E1' = Exponentielle * Puissance¹



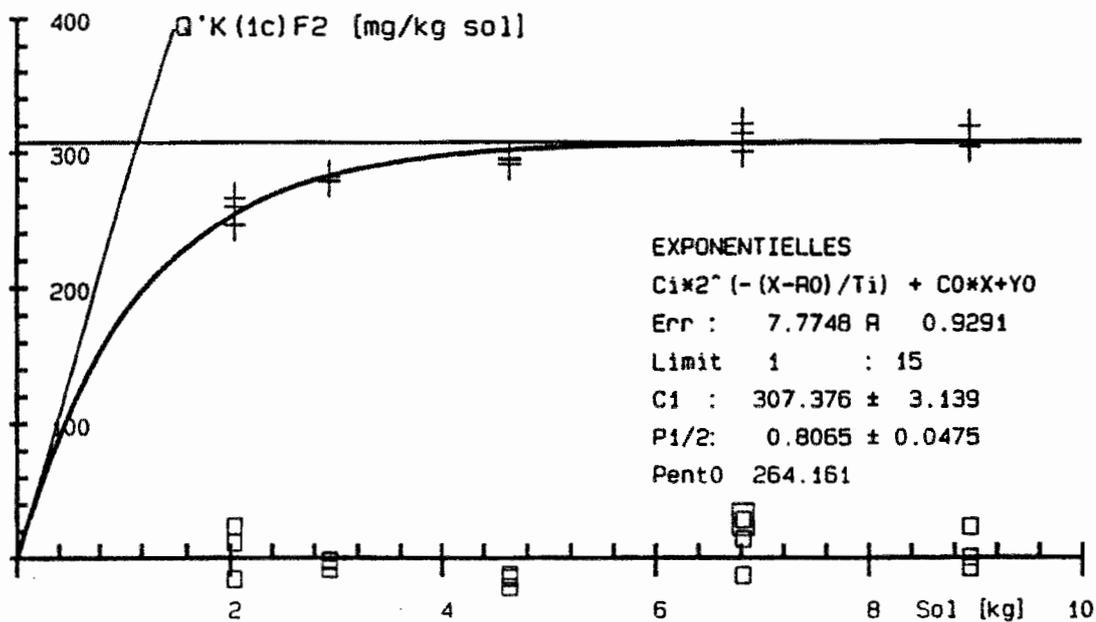
F4: Immobilisation calcium/kg sol (ch.+rac.) - erreur = 6.1%

Figure 8: Fonction 'E' = Exponentielle décroissante



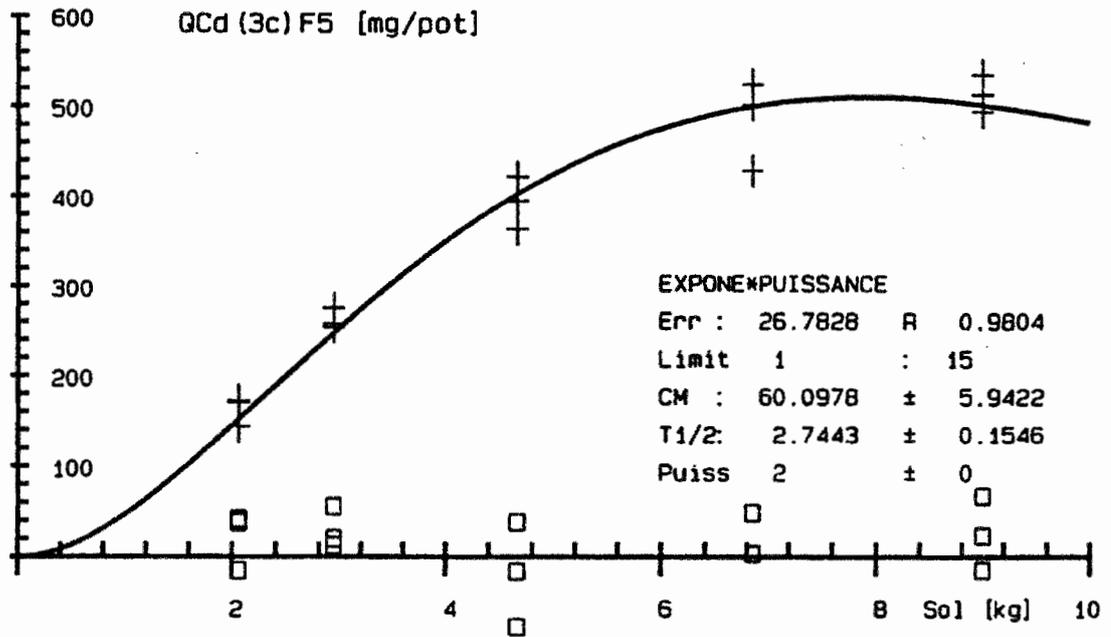
F2: Exportation potassium (1ère coupe) - erreur = 2,9 %

Figure 9: Fonction 'A1' = Asymptotique * Puissance¹



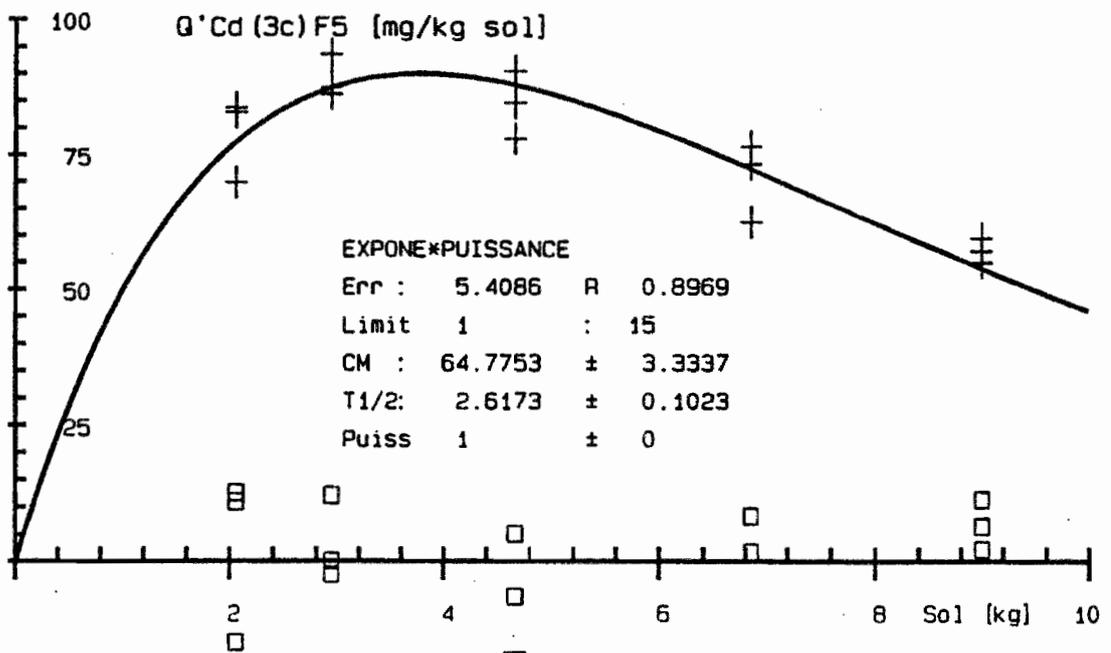
F2: Exportation potassium/kg sol (1ère coupe) - erreur = 2,7 %

Figure 10: Fonction 'A' = Exponentielle asymptotique



F5: Exportation cendres (3ème coupe) - erreur = 7.4 %

Figure 11: Fonction 'E2' = Exponentielle * Puissance²



F5: Exportation cendres/kg sol (3ème coupe) - erreur = 7,1 %

Figure 12: Fonction 'E1' = Exponentielle * Puissance¹

TABLEAU II – LES DIFFERENTES FONCTIONS MATHEMATQUES RETENUES

Fonctions pour Q			Fonctions pour Q'		
Fonction	Sigle	Formule (d'après figure)	Fonction	Sigle	Formule (d'après figure)
droite	D	$C_1 x + Y_0$	hyperbole	H	$CM x^{-1} + Y_0$
puissance	P	$CM x^P$	puissance (positive)	$P >$	$CM x^P$
			" (négative)	$P <$	$CM x^P$
exponentielle asymptotique	A	$C_1 \left(1 - \exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right)$	asymptote × hyperbole	AH	$CM \frac{\left(1 - \exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right)}{x}$
asymptotique × puissance	A ₁	$CM \left(1 - \exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right) \times x$	exponentielle asymptotique	A	$C_1 \left(1 - \exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right)$
exponentielle × puissance ¹	E ₁	$CM \left(\exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right) \times x$	exponentielle décroissante	E	$C_1 \left(\exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right)$
exponentielle × puissance ²	E ₂	$CM \left(\exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right) \times x^2$	exponentielle × puissance ¹	E ₁	$CM \left(\exp\left[-\frac{x \text{ Log } 2}{P 1/2}\right]\right) \times x$

x = poids de sol

2.7 COMPARAISON DE MODELES COUPLES

Les 9 modèles (D - H - P - A - AH - A₁ - E - E₁ - E₂) ont donc été appliqués systématiquement à l'ensemble des paramètres (plante, sol, percolats), et l'erreur absolue pour chacun des modèles a été ramenée à celle de la droite. Il a donc suffi de choisir les plus petits rapports, nous indiquant que l'erreur absolue était la plus faible, et ainsi, d'après ce critère, retenir les 2 meilleures fonctions ; ces fonctions, pour un même paramètre, sont comparées à celles des autres traitements, dans le but de pouvoir sélectionner, dans la mesure du possible, une seule fonction pour les 5 traitements d'une variable donnée.

Les deux meilleures fonctions ont été représentées graphiquement, afin de s'assurer que calculs et représentations graphiques concordent logiquement. Dans les deux cas, l'erreur relative (erreur absolue donnée par la fonction / moyenne des Q ou Q' pour les 5 poids de sol) a été estimée, dans le but d'accorder plus d'importance aux fonctions présentant une faible erreur (< à 10 %) qu'à celles présentant une erreur plus élevée (> 20 %).

Plus l'erreur relative est élevée, plus est incertaine la fonction sélectionnée ; à l'inverse, plus l'erreur relative est faible, plus le choix de la meilleure fonction est aisé.

Prenons deux exemples, se rapportant à l'exportation de l'azote à la 1^{ère} coupe :

- cas du traitement F₂ : erreur faible (< 5 %),
- cas du traitement F₄ : erreur forte (# 20 %),

le tableau suivant donne les valeurs du rapport :

erreur absolue pour une fonction / erreur absolue pour la droite

		"D"	"E"	"P"	"H"	"A"	"E ₁ "	"AH"	"A ₁ "	"E ₂ "
F ₂	QN	(20,63)	17,21	1,21	6,63	2,35	2,36	17,21	<u>0,97</u>	1,29
	Q'N	(5,51)	2,50	0,72	(0,59)	<u>0,65</u>	1,29	2,50	7,27	3,21
F ₄	QN	(19,63)	2,26	<u>1,00</u>	1,27	1,00	1,00	2,26	<u>1,00</u>	1,05
	Q'N	(2,89)	1,00	<u>1,00</u>	(1,00)	<u>1,00</u>	1,12	1,00	2,47	1,42

pour QN (exportation de l'azote par pot, à la 1^{ère} coupe) :

- dans le cas de F₂, les rapports vont de 0,97 à 17,21 ;

- dans le cas de F₄, les rapports vont de 1,00 à 2,26 ;

pour Q'N (exportation de l'azote par kg de sol, à la 1^{ère} coupe) :

- dans le cas de F₂, les rapports vont de 0,65 à 7,27 ;

- dans le cas de F₄, les rapports vont de 1,00 à 2,47.

Ceci montre que le choix des fonctions est beaucoup plus aisé pour F₂ que pour F₄ ; l'hyperbole n'a pas été retenue dans le cas de Q', puisque Q correspond à une droite, ne passant pas par l'origine, et nous avons admis par principe que les exportations des éléments devaient être représentées par des fonctions partant de l'origine ($x = 0$ et $y = 0$) en ce qui concerne les coupes. Pour le traitement F₂, le prélèvement de l'azote par la plante à la 1^{ère} coupe répond aux fonctions "A₁" (pour Q) et "A" (pour Q'), et pour le témoin F₄, aux fonctions "P_>" (pour Q) et "P_>" (pour Q').

Il est évident que les erreurs relatives estimées sur les teneurs se répercutent sur les exportations, auxquelles s'ajoutent les erreurs relatives calculées sur les rendements.

Prenons l'exemple du traitement F₄ (témoin) :

- l'erreur relative sur la production de chaumes (QCh) = 10,0 %,

- l'erreur relative sur l'immobilisation du phosphore par les chaumes (QPCh) = 26,3 %, car l'erreur relative sur la teneur en P des chaumes (TPCh) = 16,4 %,

- par contre, l'erreur relative sur l'immobilisation du Ca par les chaumes (QCaCh) = 6,6 %,

- l'erreur relative sur la teneur en Ca des chaumes (TCaCh) n'est que de 8,5 %, dans ce cas, les erreurs se sont compensées, en améliorant l'erreur sur les exportations de Ca.

Les erreurs relatives les plus faibles s'observent pour l'azote exporté, les plus fortes pour le sodium exporté, car il est faiblement exporté par la plante ; les exportations par les racines donnent également des erreurs élevées. Enfin, le traitement F₂ donne les meilleurs résultats, les erreurs sur les exportations totales de la plante sont souvent inférieures à 5 % ; le témoin F₄ donne les erreurs les plus élevées, dépassant souvent 20 %, dans ce cas, cela s'explique par les faibles exportations du témoin, les valeurs absolues étant beaucoup plus faibles que celles du traitement F₂, les erreurs sont plus élevées.

Il arrive que la représentation d'un modèle (exprimant par exemple, la teneur en tel élément en fonction des volumes croissants de sol) pour un traitement donné, soit très voisine de celle d'un modèle pour un autre traitement. Le test

d'homogénéité (SCHERRER B. -1984), nous permettra de savoir si ces 2 traitements sont analogues à 100 %, ou à un pourcentage moindre, pour la variable concernée.

III - RESULTATS

Dans cette étude, nous donnerons une large part aux données sur la plante, qui présentent un grand intérêt, eu égard à leur nombre. Pour chaque élément exporté, nous avons : 2025 données :

- 3 expressions (teneur, Q, Q'),
- * 9 regroupements de la production végétale (de la 1^{ère} coupe au total plante),
- * 5 traitements (F₁, F₂, F₃, F₄, F₅),
- * 5 volumes de sol (V₁, V₂, V₃, V₄, V₅),
- * 3 répétitions,

d'où $3 \cdot 9 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 3 = 2025$ données. Pour les 10 mesures principales (rendement et 9 éléments), nous avons au total = 20 250 données.

L'analyse d'une variable en fonction des volumes de sol conduit donc à :

$$3 \cdot 9 \cdot 5 = 135 \text{ études par élément.}$$

Les hauteurs des plants et les vitesses de croissance avant les 1^{ère} et 2^{ème} coupes seront rapidement examinées, puis seront passées systématiquement en revue les fonctions choisies pour :

- les rendements, ou production de matière sèche,
- les exportations, ou prélèvements par la plante des éléments : N, P, K, Ca, Mg, Na, SiO₂, cendres.

De plus, les points importants seront signalés, au niveau de la comparaison des traitements.

3.1 LES HAUTEURS ET LES VITESSES DE CROISSANCE

Les données se rapportant aux hauteurs mesurées au cours du développement de *Panicum*, et aux vitesses de croissance déduites de ces hauteurs se résument ainsi :

- avant la 1^{ère} coupe :

. la première mesure effectuée 15 jours après le semis montre que les hauteurs de la plante en fonction des volumes de sol répondent à des droites pour chacun des traitements. Les pentes de ces droites ne sont pas significatives pour F₁ et F₃, elles le sont pour F₂, F₄, et F₅ (plus les volumes de sol augmentent, plus les hauteurs sont importantes) ;

. pour les mesures suivantes (18^{ème}, 22^{ème}, 25^{ème}, 29^{ème}, 32^{ème}, et 36^{ème} jours), les variations des hauteurs en fonction des volumes de sol répondent à des

exponentielles "A", dont les asymptotes sont atteintes pour des volumes de plus en plus grands au fur et à mesure de la croissance; graphiquement, cela correspond à un redressement progressif des exponentielles, par rapport à l'axe des abscisses (figure 13);

la hauteur des plants au 36^{ème} jour (jour de la 1^{ère} coupe) est particulièrement intéressante (figure 14) :

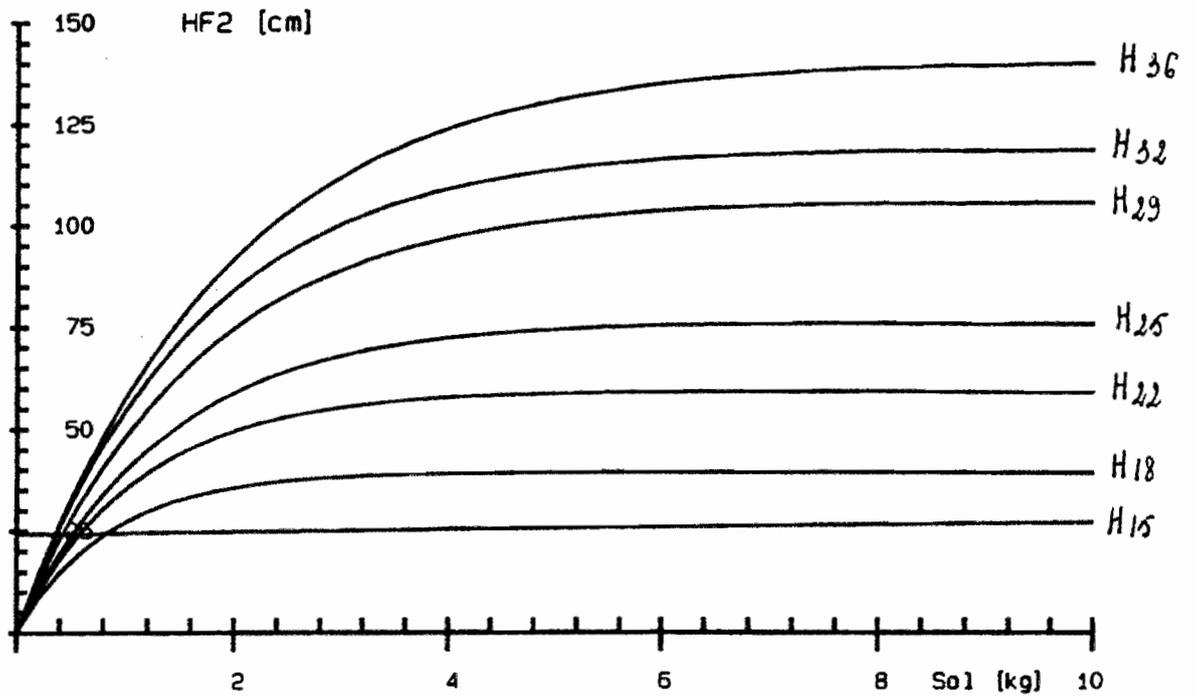
pour les pots V₅, la hauteur maximale donnée par l'exponentielle est atteinte : les plants mesurent environ 1,50 m dans le cas du traitement F₂. Si la croissance paraît atteindre un maximum, nous verrons par la suite qu'il n'en est pas du tout de même pour les rendements, également représentés par des exponentielles, et pour lesquels le rendement correspondant au volume V₅ est très éloigné de l'asymptote donnée par l'exponentielle. Les hauteurs atteintes par F₁ et F₃ présentent un test d'homogénéité de 67 %, alors que F₂ est différent de F₁ et F₃. Les hauteurs atteintes par les 2 témoins F₄ et F₅ ne présentent aucune similitude ;

toutes les vitesses de croissance en fonction des volumes de sol répondent également à des exponentielles. Pour les 5 traitements, les vitesses de croissance maximales sont atteintes entre les 25^{ème} et 29^{ème} jours : elle peut atteindre 7,5 cm/jour pour les plants des pots V₅ du traitement F₂ (figure 15), mais elle n'atteindra pas 4 cm/jour pour les plants des pots V₅ des 2 témoins (figure 16). Pour cette période (entre les 25^{ème} et 29^{ème} jours), F₁ et F₃ ont strictement les mêmes vitesses de croissance (le test d'homogénéité = 99 %). A partir du 29^{ème} jour et jusqu'au 36^{ème} jour, les vitesses de croissance diminuent : les maxima atteignent 4 cm/jour pour les traitements F₁, F₂, F₃, et moins de 3 cm/jour pour F₄ et F₅.

Nous avons souligné précédemment (THOMANN Ch. - 1988) l'importance du 27^{ème} jour après le semis dans la croissance de *Panicum*, période qui apparaissait comme déterminante pour la composition minérale de la plante.

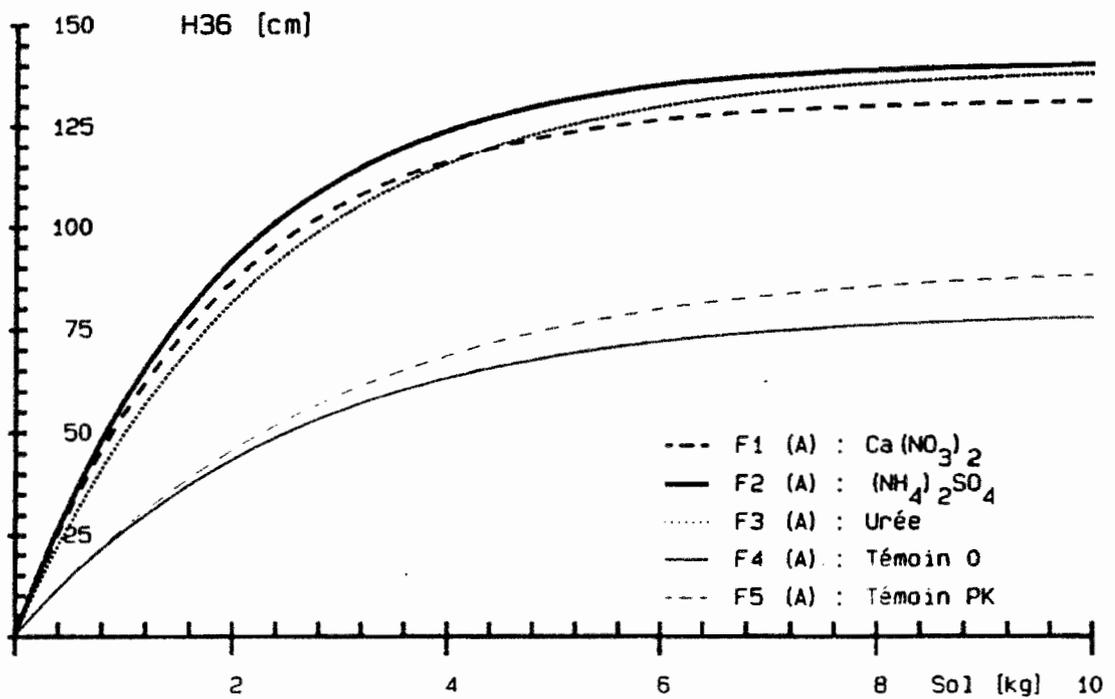
Signalons que dans le cas du pot V₁, et ceci pour les traitements F₁, F₃, F₄, F₅, il n'y a pas de croissance maximale au 27^{ème} jour, car toutes les vitesses de croissance diminuent avec le temps, comme si la plante était entravée dans son développement et limitée dans sa nutrition, ne lui permettant pas de donner ce maximum de croissance pour cette période bien déterminée. Seul le traitement F₂ présente une vitesse de croissance maximale de 16 % supérieure à la moyenne des 3 vitesses de croissance précédant le 27^{ème} jour, alors que pour le pot V₅ cet accroissement de la vitesse atteint 50 %.

De plus, du fait que les plants des pots V₂ accusent un maximum des vitesses de croissance au 27^{ème} jour comme les volumes V₃, V₄ et V₅, on peut présumer que la plante, pour ce volume et pour chacun des traitements (mis à part F₅) en est à son même stade de développement que pour les volumes V₅, et que ce moindre



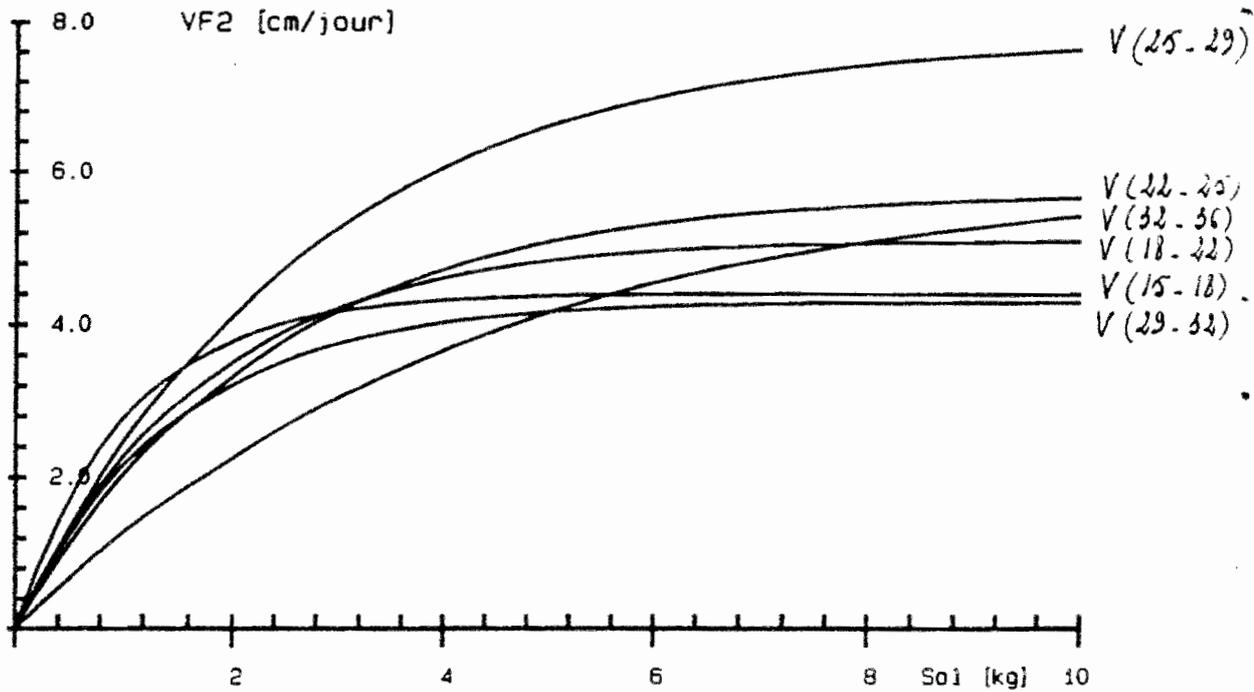
Hauteurs des plants (avant 1ère coupe): traitement F2

Figure 13



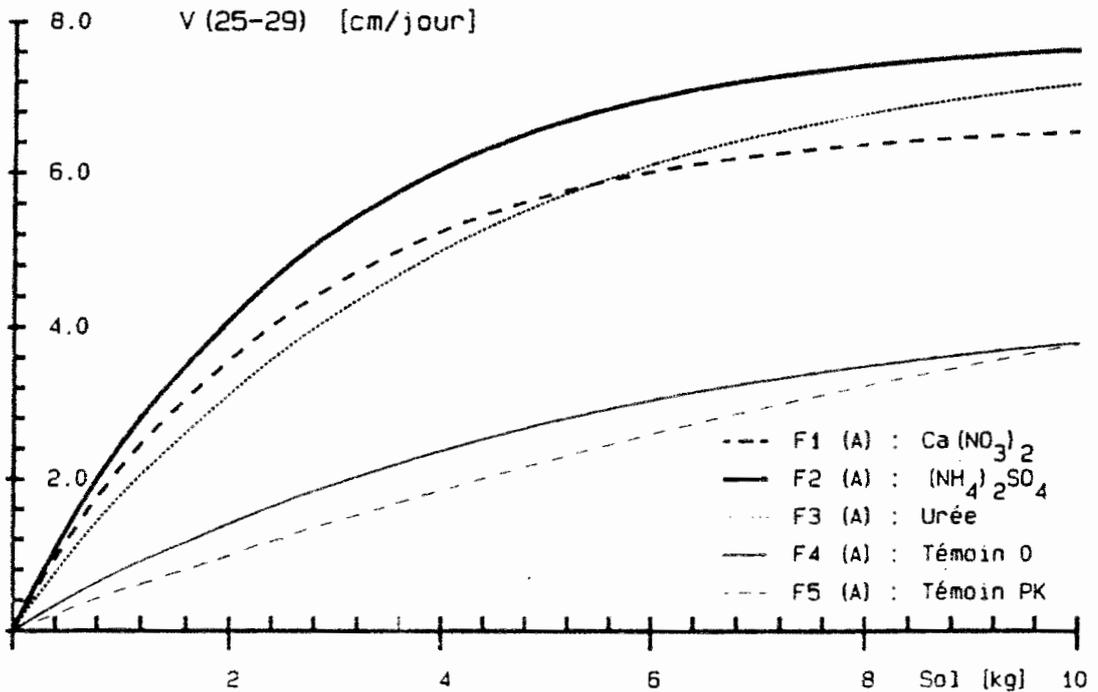
Hauteur des plants au 36ème jour (avant 1ère coupe)

Figure 14



Vitesses de croissance (avant 1ère coupe): traitement F2

Figure 15



Vitesses de croissance: du 25ème au 29ème jours

Figure 16

développement ne correspond pas à un "retard" dans la croissance, puisque les vitesses de croissance diminuent également à partir du 27^{ème} jour.

Enfin, dans le cas des 2 témoins F_4 et F_5 , seul F_4 présente ce maximum des vitesses de croissance au 27^{ème} jour : les variations de la croissance de la plante dans le sol non amendé, au cours du premier cycle de culture, sont identiques, toutes proportions gardées, à celle de la plante dans le sol avec fumure. Pour F_5 , les vitesses de croissance ne font que diminuer avec le temps, avec une baisse plus prononcée à partir du 27^{ème} jour : l'absence d'azote facilement disponible par rapport au P apporté ne permet pas à la plante d'avoir cette accélération des vitesses de croissance jusqu' au 27^{ème} jour;

- avant la 2^{ème} coupe :

Les variations des hauteurs en fonction des volumes de sol sont représentées par des exponentielles pour chacun des traitements :

au 7^{ème} jour après la 1^{ère} coupe, il n'y a aucune différence entre les 5 traitements; au 14^{ème} jour, les courbes représentant F_4 et F_5 sont nettement en deçà des courbes représentant F_1 , F_2 , F_3 . Au 28^{ème} jour (avant la 2^{ème} coupe), on peut estimer que lorsqu'il y a eu apport NPK, les plants n'atteignent pas en hauteur la moitié de ce qu'ils étaient avant la 1^{ère} coupe, mais ils dépassent la moitié dans le cas de F_4 et F_5 , ces rapports étant valables pour tous les volumes de sol.

Les vitesses de croissance se caractérisent également par des exponentielles, mais dans ce cas, les vitesses de croissance ne font que diminuer du 7^{ème} au 28^{ème} jours, et au 28^{ème} jour elles sont très faibles (0,6 cm/jour), et du même ordre de grandeur pour les 5 traitements. Entre les 7^{ème} et 21^{ème} jours, les vitesses de croissance étaient plus importantes pour F_1 , F_2 , F_3 que pour F_4 et F_5 .

Donc, en fin de croissance, avant la 2^{ème} coupe (28^{ème} jour), sans un nouvel apport d'engrais, la plante tend à pousser uniformément, indépendamment du traitement subi avant la 1^{ère} coupe, et même les différences entre volumes tendent à s'estomper ; ceci n'apparaissait pas pour les hauteurs, qui représentent des mesures cumulées.

3.2 LES RENDEMENTS

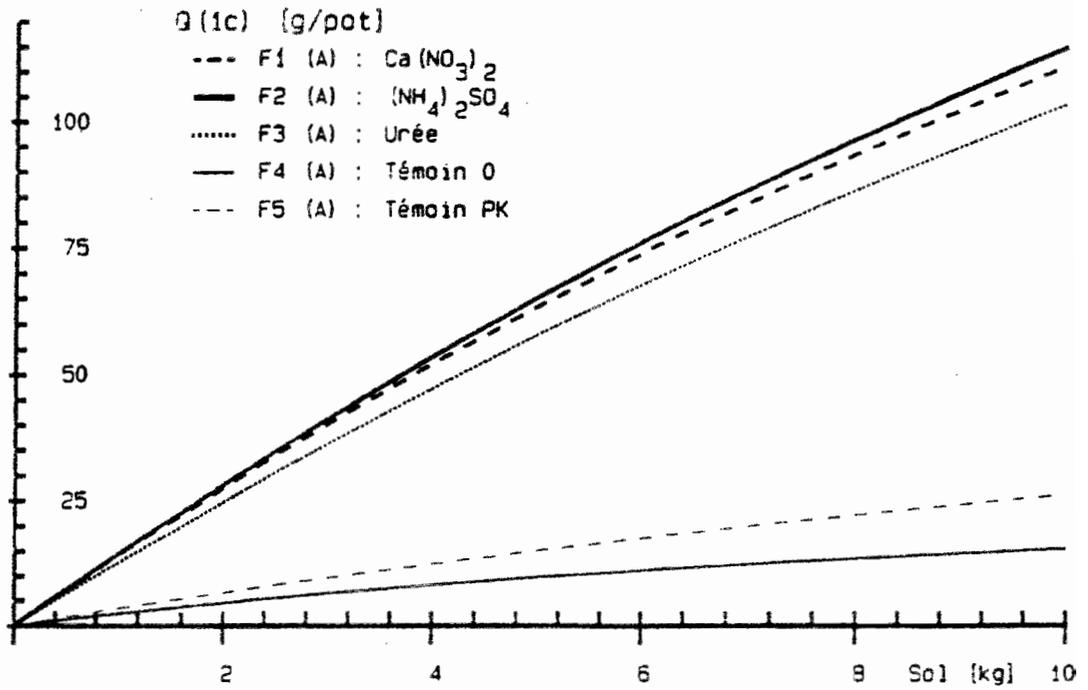
Les résultats expérimentaux de la production de matière sèche par *Panicum* sont donnés dans le tableau III.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 17 à 34.

TABLEAU III - PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

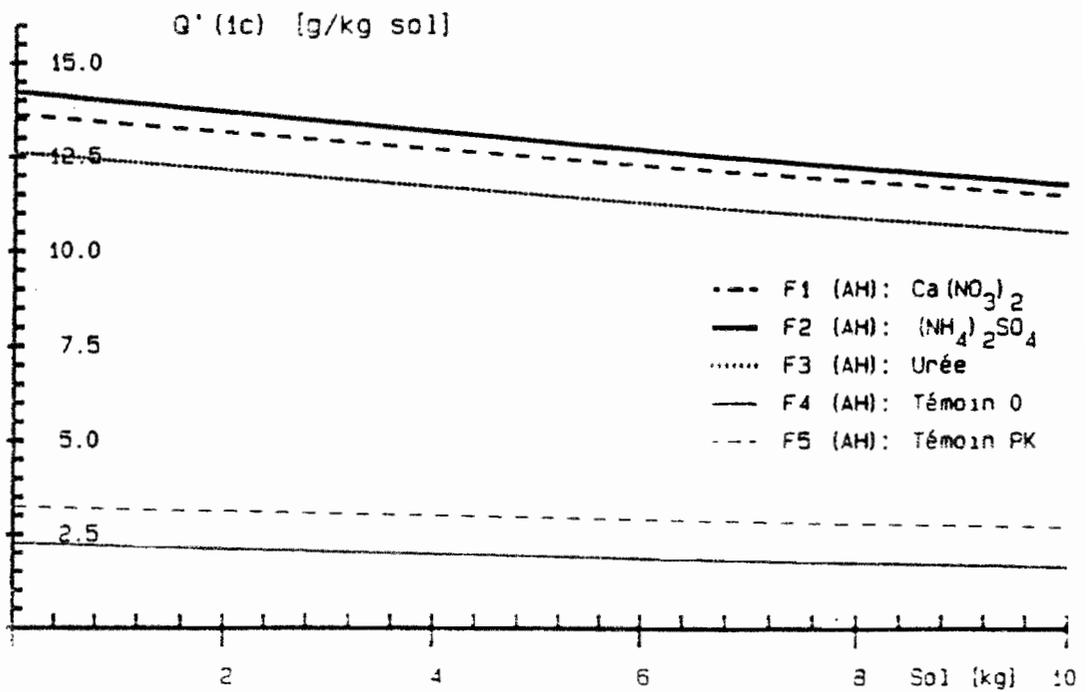
(Q = g.m.s. par pot ; Q' = g.m.s. par kg de sol)

F - V	1ère coupe		2ème coupe		3ème coupe		2ème + 3ème coupes		1ère + 2ème + 3ème coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	25,82	12,66	5,14	2,52	2,32	1,14	7,45	3,65	33,27	16,31	3,77	1,85	8,90	4,37	12,68	6,21	45,95	22,52
	V ₂	39,01	13,27	7,14	2,43	3,09	1,05	10,23	3,48	49,24	16,75	4,44	1,51	9,04	3,08	13,48	4,59	62,72	21,33
	V ₃	58,40	12,59	9,08	1,96	5,27	1,14	14,35	3,09	72,74	15,68	6,51	1,40	10,85	2,34	17,37	3,74	90,11	19,42
	V ₄	86,68	12,71	10,41	1,53	5,85	0,86	16,26	2,38	102,94	15,09	7,39	1,08	11,13	1,63	18,52	2,72	121,45	17,81
	V ₅	99,69	11,14	13,37	1,49	6,65	0,74	20,01	2,24	119,70	13,37	10,08	1,13	11,21	1,25	21,29	2,38	140,99	15,75
F ₂	V ₁	27,00	13,23	5,31	2,61	2,28	1,12	7,59	3,72	34,59	16,95	3,27	1,61	8,23	4,04	11,51	5,64	46,09	22,60
	V ₂	40,73	13,86	7,16	2,44	2,64	0,90	9,80	3,33	50,53	17,19	4,08	1,39	9,63	3,28	13,71	4,66	64,24	21,85
	V ₃	59,86	12,90	9,57	2,06	4,38	0,94	13,94	3,00	73,80	15,91	5,24	1,13	12,99	2,80	18,23	3,93	92,03	19,83
	V ₄	88,45	12,97	11,58	1,70	5,89	0,86	17,47	2,56	105,92	15,53	7,42	1,09	12,89	1,89	20,32	2,98	126,23	18,51
	V ₅	103,64	11,58	15,01	1,68	8,45	0,94	23,46	2,62	127,10	14,20	11,32	1,27	17,41	1,95	28,73	3,21	155,82	17,41
F ₃	V ₁	24,90	12,21	5,03	2,47	2,51	1,23	7,54	3,69	32,44	15,90	3,54	1,73	7,13	3,50	10,67	5,23	43,10	21,13
	V ₂	33,83	11,51	6,40	2,18	3,02	1,03	9,41	3,20	43,24	14,71	4,83	1,64	7,89	2,68	12,72	4,33	55,96	19,04
	V ₃	55,96	12,06	8,62	1,86	4,73	1,02	13,35	2,88	69,31	14,94	6,34	1,37	9,32	2,01	15,65	3,37	84,96	18,31
	V ₄	75,73	11,10	11,01	1,61	5,50	0,81	16,50	2,42	92,23	13,52	7,73	1,13	9,16	1,34	16,89	2,48	109,12	16,00
	V ₅	94,27	10,53	9,26	1,03	5,75	0,64	15,01	1,68	109,28	12,21	9,67	1,08	10,76	1,20	20,44	2,28	129,71	14,49
F ₄	V ₁	4,33	2,10	1,89	0,92	1,34	0,65	3,23	1,57	7,56	3,67	1,49	0,72	3,48	1,69	4,97	2,41	12,53	6,08
	V ₂	5,50	1,87	2,69	0,92	1,91	0,65	4,61	1,57	10,10	3,44	1,97	0,67	4,16	1,42	6,13	2,08	16,23	5,52
	V ₃	10,37	2,23	4,32	0,93	2,90	0,62	7,22	1,55	17,58	3,77	2,91	0,62	5,84	1,25	8,74	1,88	26,33	5,65
	V ₄	12,49	1,82	6,00	0,88	3,50	0,51	9,50	1,39	21,99	3,21	3,55	0,52	6,00	0,88	9,55	1,39	31,54	4,61
	V ₅	14,18	1,58	6,48	0,72	2,87	0,32	9,35	1,04	23,53	2,62	3,93	0,44	6,00	0,67	9,93	1,10	33,46	3,72
F ₅	V ₁	6,35	3,08	1,95	0,95	1,44	0,70	3,38	1,64	9,74	4,73	1,80	0,87	3,16	1,53	4,96	2,41	14,69	7,13
	V ₂	8,84	3,01	2,79	0,95	2,12	0,72	4,91	1,67	13,76	4,68	2,30	0,78	3,95	1,35	6,26	2,13	20,01	6,81
	V ₃	14,07	3,02	4,56	0,98	3,33	0,71	7,89	1,69	21,96	4,71	3,50	0,75	5,90	1,27	9,40	2,02	31,36	6,73
	V ₄	20,99	3,06	5,82	0,85	4,15	0,61	9,97	1,46	30,96	4,52	4,44	0,65	7,90	1,15	12,33	1,80	43,29	6,32
	V ₅	23,35	2,59	6,92	0,77	4,90	0,54	11,82	1,31	35,17	3,91	5,77	0,64	9,17	1,02	14,94	1,66	50,11	5,57



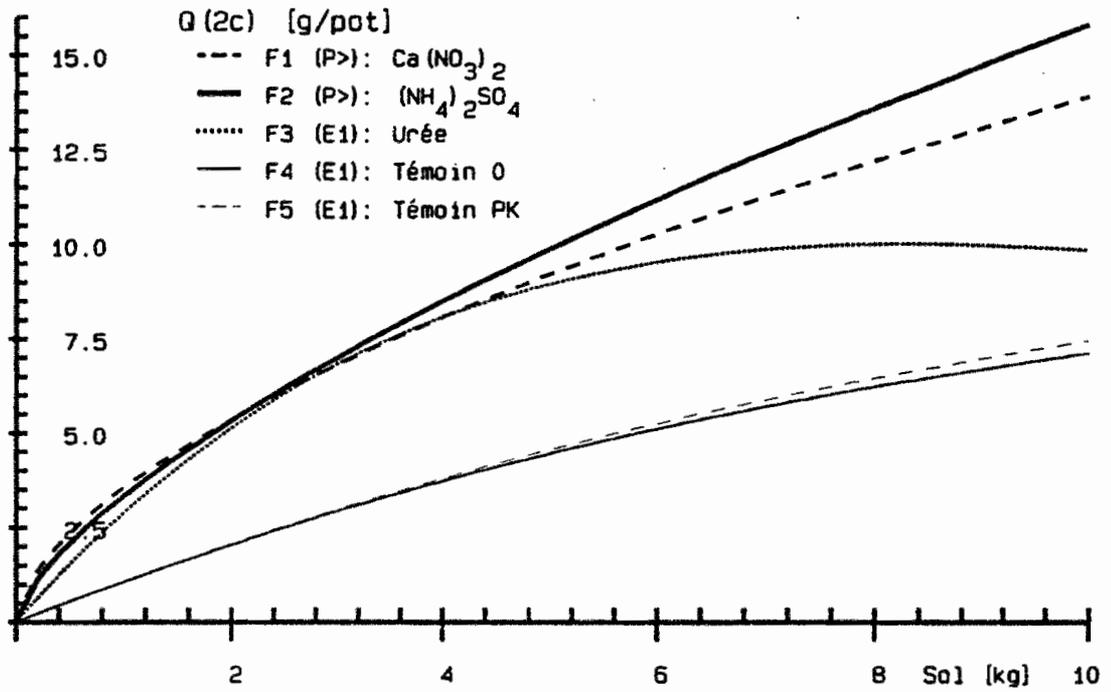
Rendement: 1ère coupe

Figure 17



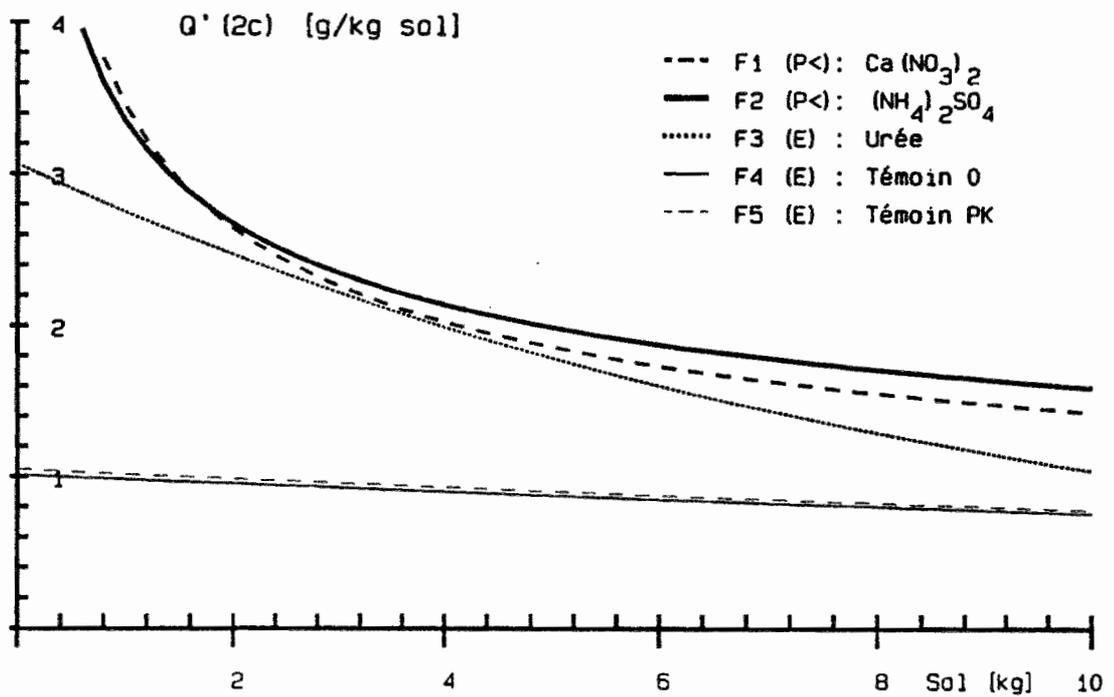
Rendement/kg sol: 1ère coupe

Figure 18



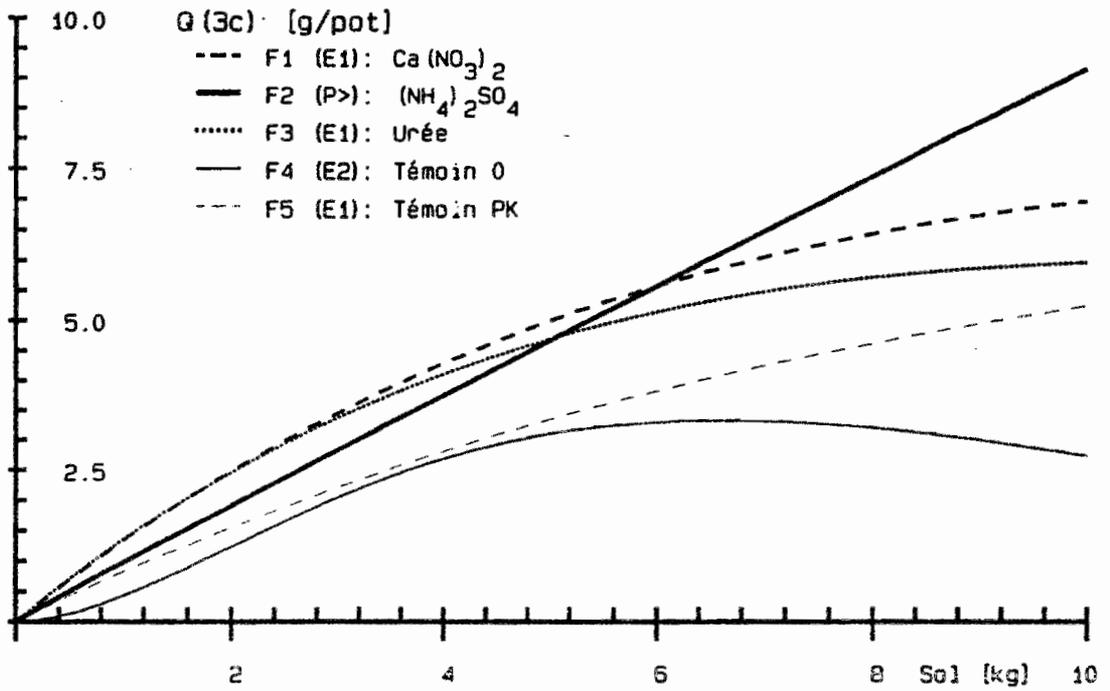
Rendement: 2ème coupe

Figure 19

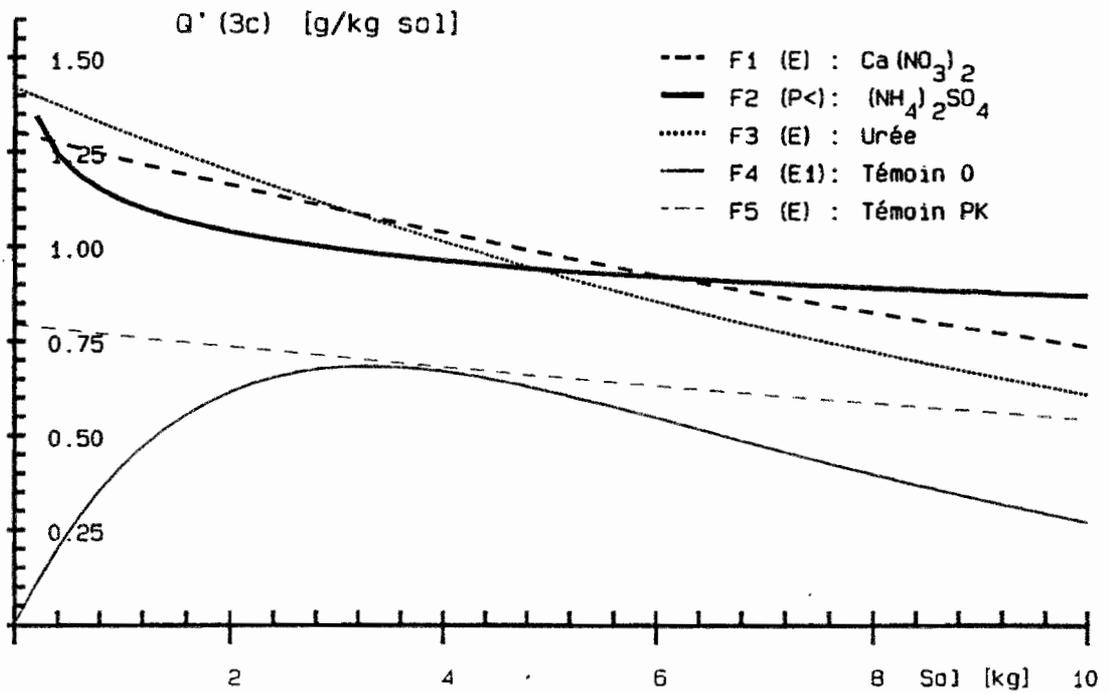


Rendement/kg sol: 2ème coupe

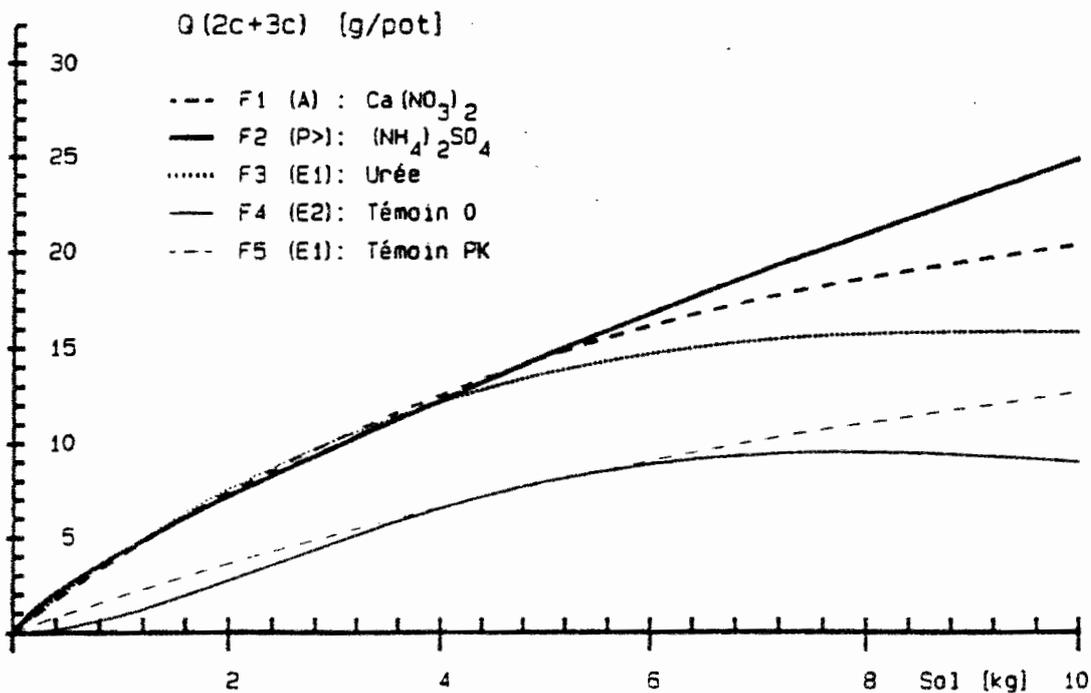
Figure 20



Rendement: 3ème coupe
Figure 21

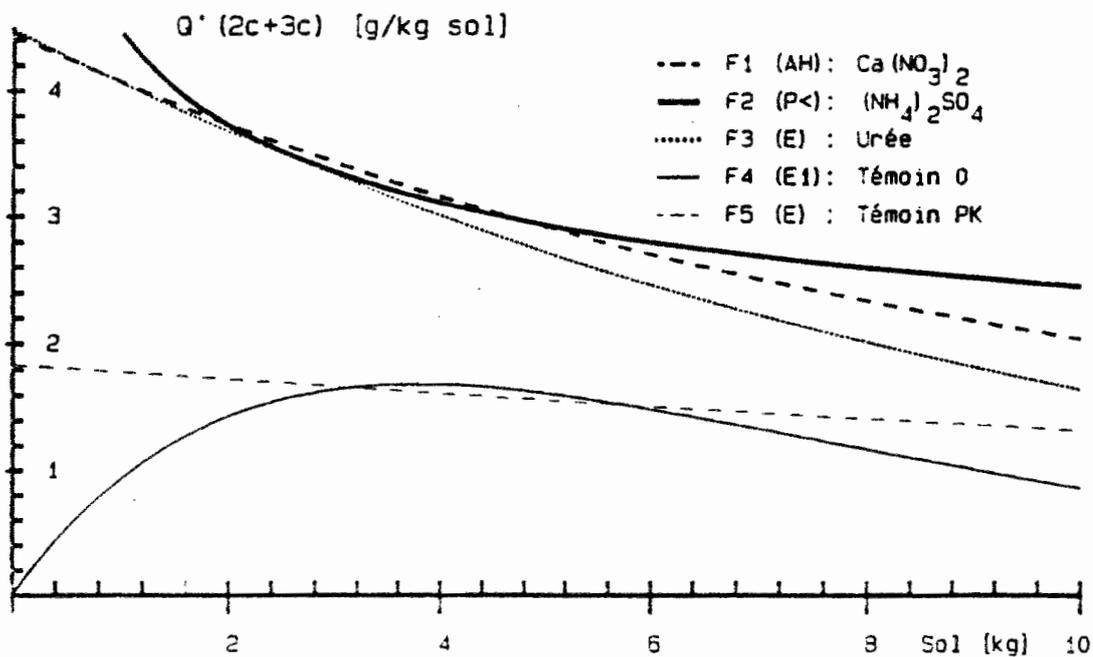


Rendement/kg sol: 3ème coupe
Figure 22



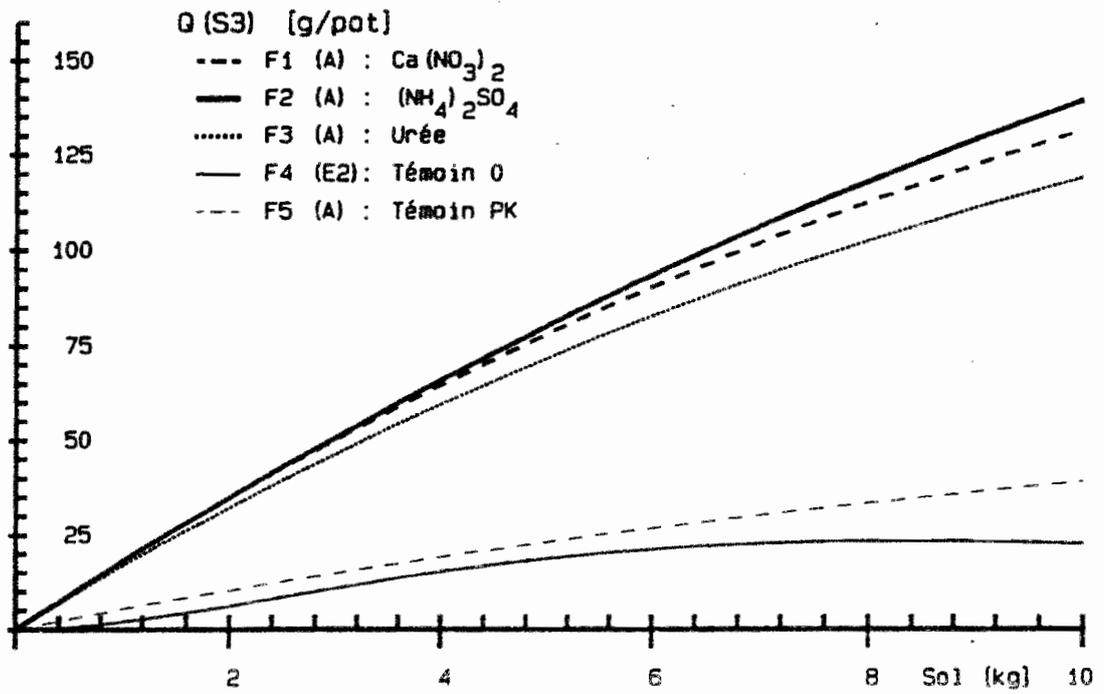
Rendement: 2ème + 3ème coupes

Figure 23



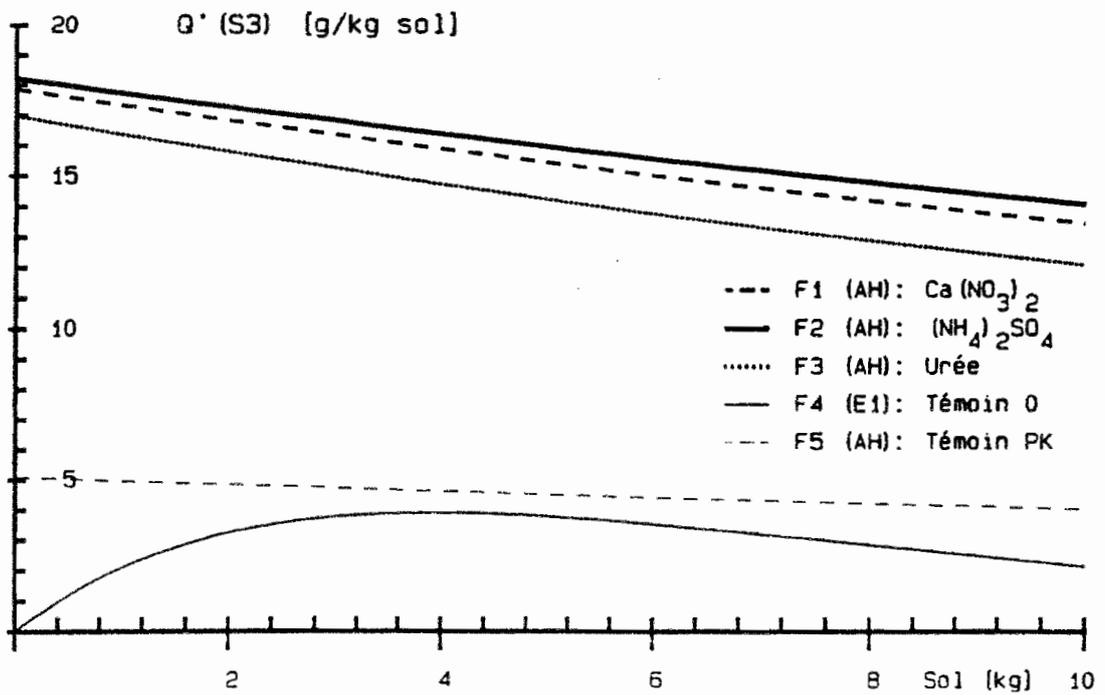
Rendement/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 24



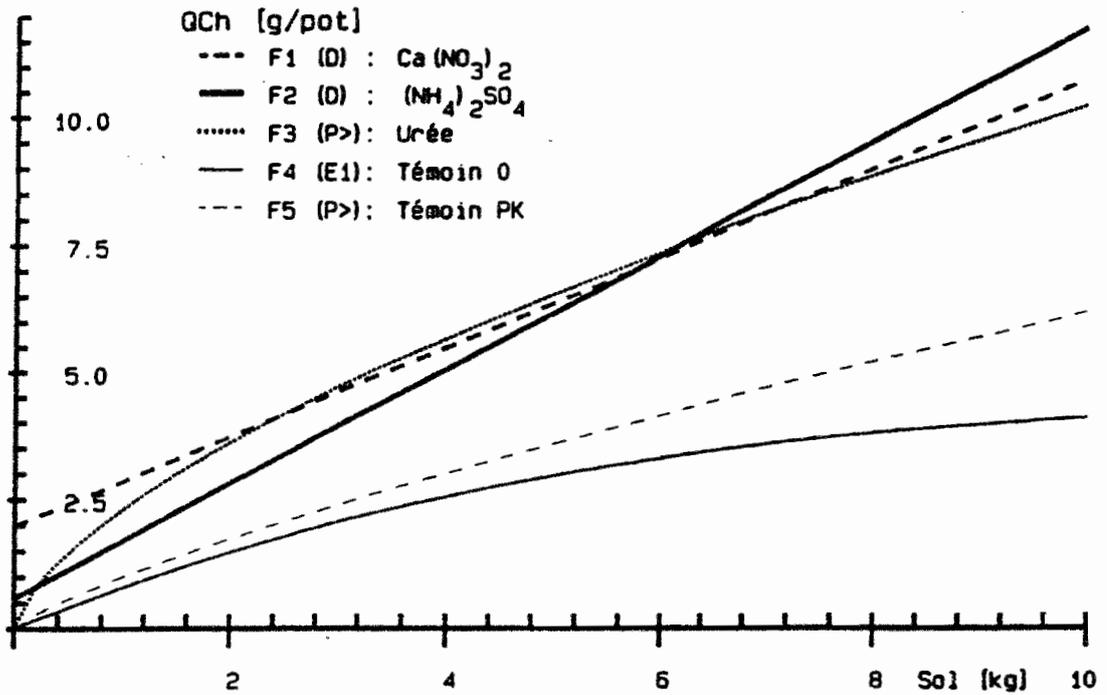
Rendement: 3 coupes (S3)

Figure 25



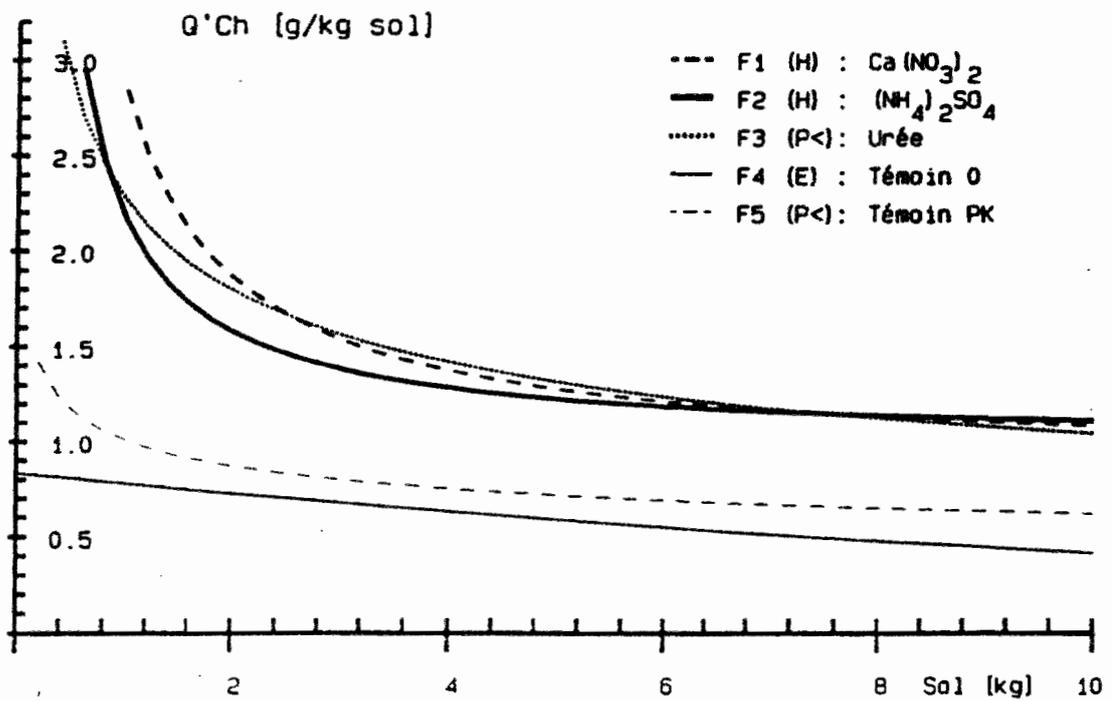
Rendement/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 26



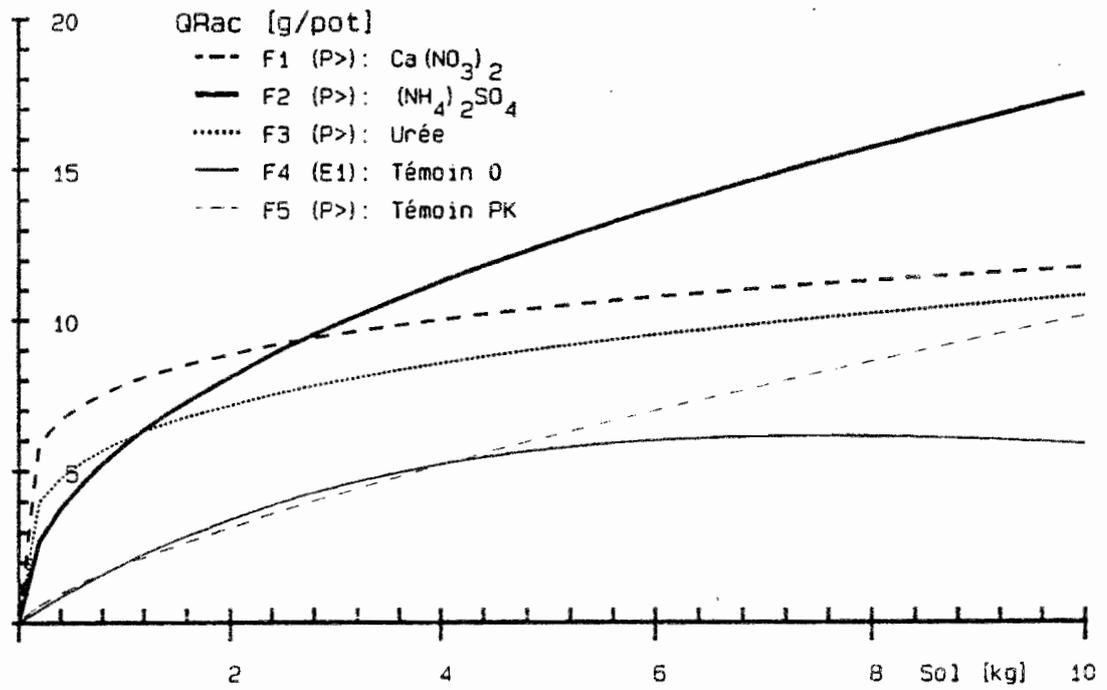
Rendement: chaumes

Figure 27



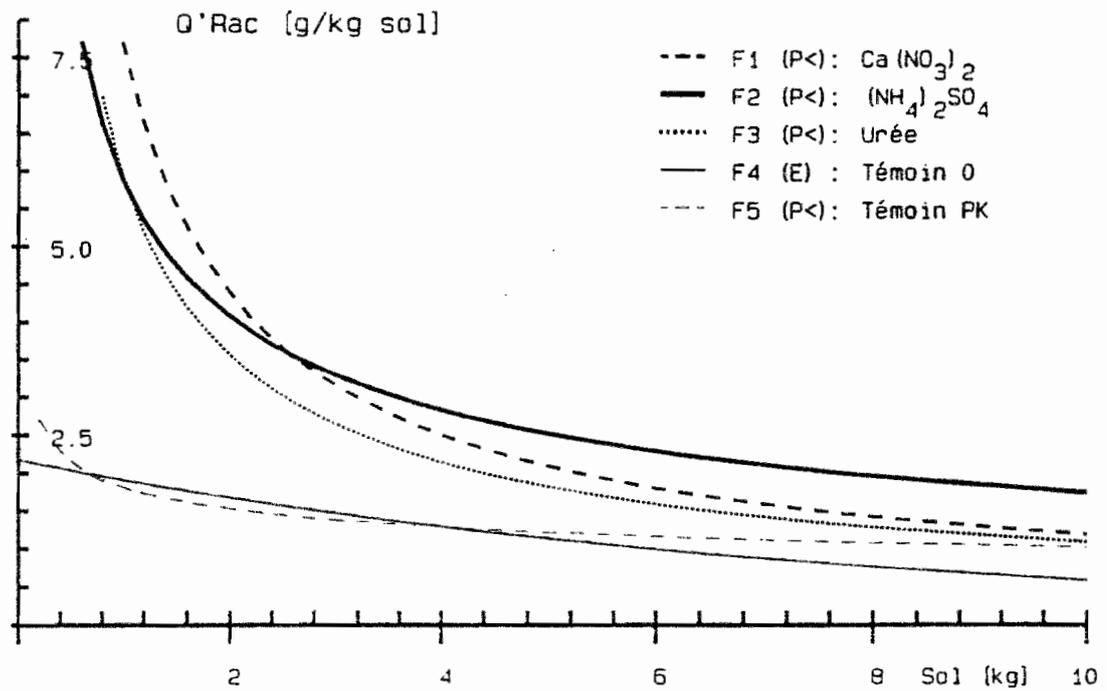
Rendement/kg sol: chaumes

Figure 28



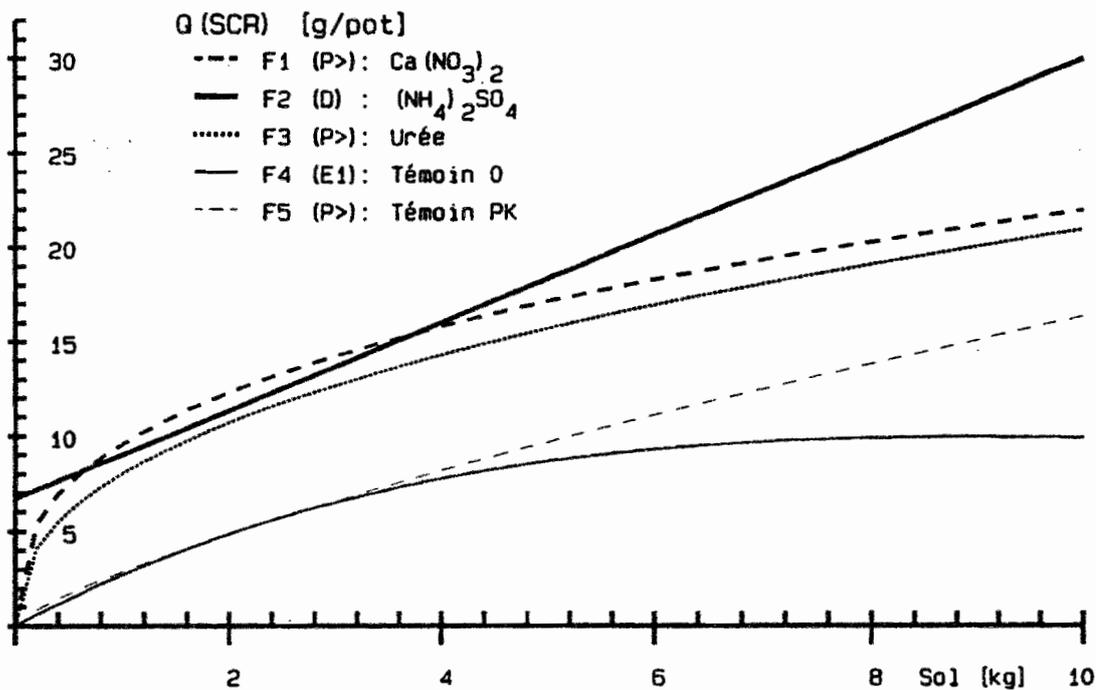
Rendement: racines

Figure 29



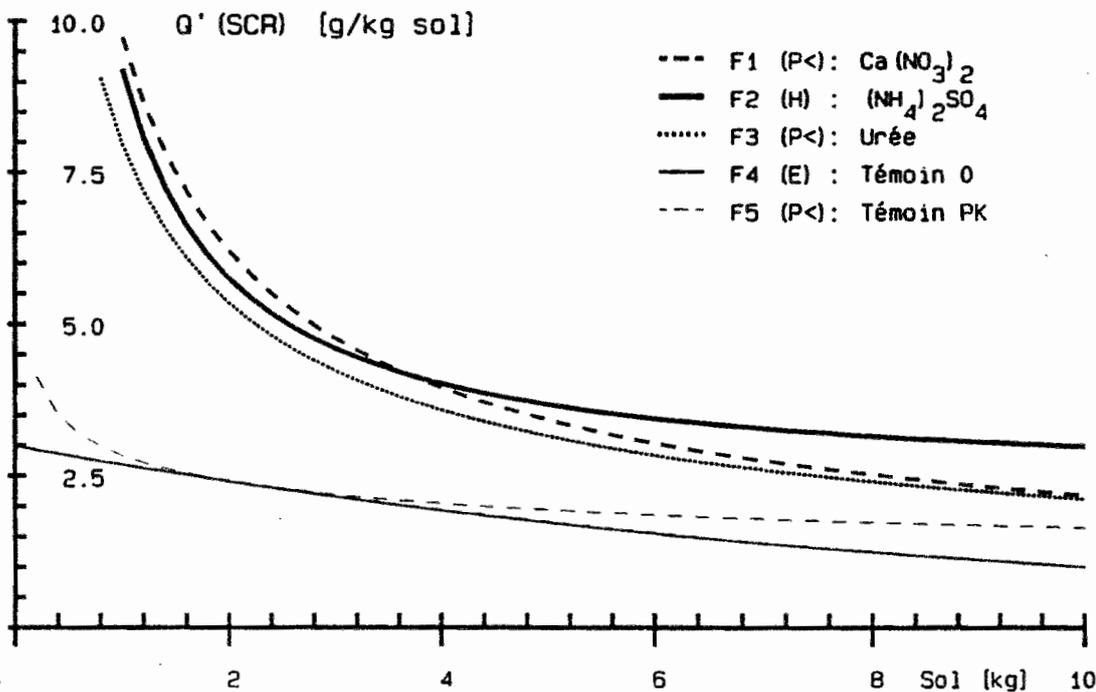
Rendement/kg sol: racines

Figure 30



Rendement: chaumes + racines (SCR)

Figure 31



Rendement/kg sol: chaumes + racines (SCR)

Figure 32

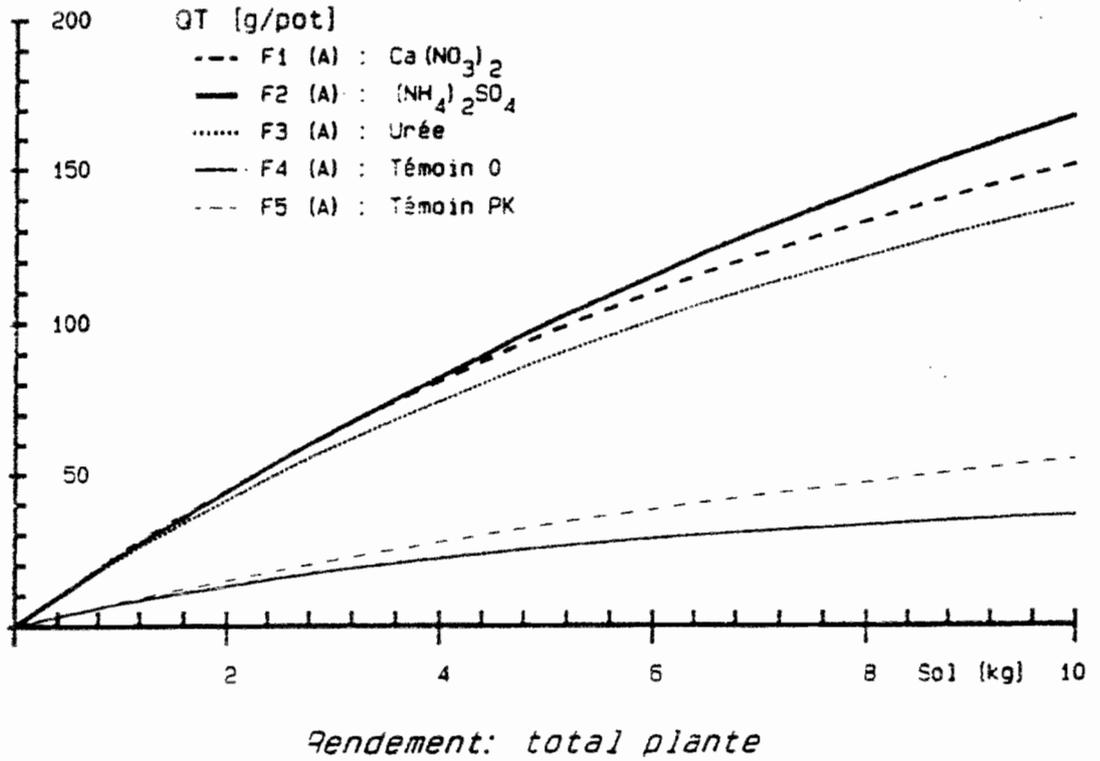


Figure 33

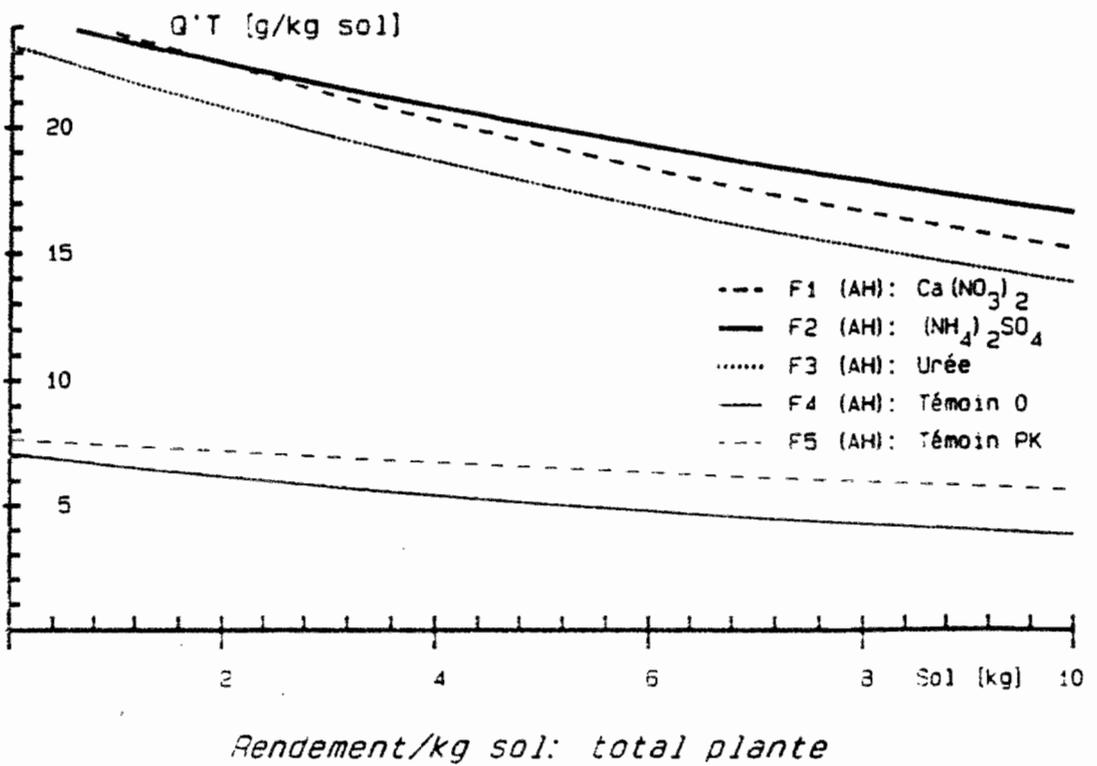


Figure 34

Pour mémoire, nous rappellerons les principales données concernant les traitements :

F_1 , F_2 , F_3 ont reçu un apport NPK, qui se différencie par la nature de l'apport azoté :

- pour $F_1 = N$ est apporté sous forme de nitrate de calcium,
- pour $F_2 = N$ est apporté sous forme de sulfate d' ammonium,
- pour $F_3 = N$ est apporté sous forme d' urée,

F_4 est le témoin, qui n' a reçu aucun apport d' engrais,

F_5 est le témoin qui a reçu P et K, mais pas d' apport azoté.

Nous retiendrons que les fonctions " $E_1 - E$ " et " $A - AH$ " sont les mieux représentées pour les productions de matière sèche des 1^{ère}, 2^{ème}, et 3^{ème} coupes, ainsi que pour les rendements totaux (3 coupes + chaumes + racines), la fonction " P " apparaissant dès la 2^{ème} coupe pour F_2 (figures 19 et 20), et la fonction " E_2 " à la 3^{ème} coupe pour F_4 (figures 21 et 22).

Nous choisirons de préférence la fonction " A " pour Q, et donc la fonction " AH " pour Q', c'est-à-dire que la 1^{ère} coupe - la plus importante en production - se caractérise :

- pour Q (figure 17) : par une augmentation en fonction des volumes de sol, cette augmentation n'est pas proportionnelle aux volumes de sol, puisqu'elle aboutit à un palier asymptotique, caractéristique de la fonction exponentielle-asymptote (" A "). Dans les conditions de l'expérimentation, la production atteindrait un maximum, au delà des volumes de sol testés ;

- pour Q' (figure 18) : la production exprimée par kg de sol répond à la fonction asymptote * hyperbole (" AH "), c'est-à-dire que la production par kg de sol diminue quand les volumes de sol augmentent : V_1 produit donc plus de "tiges + feuilles" par unité de volume que V_5 , les rapports V_1 / V_5 sont les suivants pour chacun des traitements :

$$F_1 = 1,13 ; \quad F_2 = 1,14 ; \quad F_3 = 1,14 ; \quad F_4 = 1,25 ; \quad F_5 = 1,13 ;$$

mais, si ces rapports sont très voisins, indiquant que la courbure des fonctions " AH " est la même, les valeurs absolues sont très différentes, puisque la production moyenne à la 1^{ère} coupe des tiges + feuilles des 3 traitements F_1 , F_2 , F_3 est 6,5 fois supérieure à celle du témoin F_4 ; pour la matière sèche totale, ce rapport n'est que de 3,8 car le témoin produit proportionnellement plus aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes, ainsi que pour les racines.

Précisons que la pente des courbes (inclinaison de la courbe par rapport à l'axe des abscisses) caractérisées par la fonction " AH " de la 1^{ère} coupe, est significative pour les traitements F_1 , F_2 , F_3 , mais ne l'est pas pour F_4 et F_5 ; on en

déduit, qu'en l'absence d'engrais azoté, la production végétale des témoins est proportionnelle au volume de sol exploité.

La fonction "puissance" qui apparaît numériquement meilleure que la fonction "A" pour F_1 et F_2 à la 2^{ème} coupe (figure 19), indique simplement que les courbures sont différentes pour ces deux fonctions, mais la fonction puissance ne paraît pas valable au delà des volumes de sol testés, car alors la production continuerait de croître indéfiniment avec l'augmentation des volumes de sol.

Par contre, l'apparition des fonctions " $E_2 - E_1$ " pour F_4 à la 3^{ème} coupe (figures 21 et 22) indique que la production par pot pour le volume V_4 est supérieure à celle du volume V_5 ; le calcul montre qu'il ne s'agit pas d'une consommation excessive des principaux éléments du sol (N - P - K) pour V_5 par rapport à V_4 dans le cas des 2 premières coupes, mais d'une production de racines moindre pour V_5 par rapport à V_4 , d'où une alimentation de la plante moindre, qui entraîne un moins bon développement : la courbe représentée par la fonction " E_2 " a son maximum près de V_4 , et V_5 a une valeur inférieure :

production végétale du témoin F_4 à la 3 ^{ème} coupe :	
d' après la fonction " E_2 "	donnée par les chiffres expérimentaux
$V_4 = 3,31$ g	3,50 g
$V_5 = 2,98$ g	2,87 g.

Nous retrouvons les fonctions "A - AH" caractérisant le rendement cumulé des 3 coupes pour les traitements F_1 , F_2 , F_3 , F_5 , mais pour le témoin F_4 , ce rendement cumulé répond aux fonctions " $E_2 - E_1$ " (figures 25 et 26). La pente de la fonction "AH" représentative du Q' de ces trois coupes est significative pour F_1 , F_2 , F_3 , elle ne l'est pas pour F_5 , c'est-à-dire que dans ce cas la production végétale exprimée par kg de sol est indépendante du volume de sol, elle est donc identique pour tous les volumes.

Les fonctions représentant la production de chaumes sont variées : "D - H" pour F_1 et F_2 , " $P_> - P_<$ " pour F_3 et F_5 , et " $E_1 - E$ " pour F_4 . Mais pour les 5 traitements, la production de chaumes par kg de sol diminue toujours quand les volumes de sol augmentent. Signalons que les traitements F_1 et F_3 présentent la même production de chaumes, le test d'homogénéité atteint 100 % (figures 27 et 28).

La production des racines répond aux fonctions "P_> - P_<" pour F₁, F₂, F₃, F₅, et aux fonctions "E₁ - E" pour F₄ (figures 29 et 30). Cette production par unité de volume correspondant donc à la densité racinaire, se caractérise pour les 5 traitements par des courbes assez incurvées, indiquant que la production par kg de sol pour V₁ est très supérieure à celle de V₅, les rapports de ces productions sont les suivants :

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
fonction	"P _{<} "	"P _{<} "	"P _{<} "	"E"	"P _{<} "
V ₁ / V ₅	3,32	2,19	2,97	2,47	1,45

La plante a donc développé 2 à 3 fois plus de racines par kg de sol dans les petits pots que dans les grands pots, et l'exploitation du sol a été significativement plus importante pour V₁ que pour V₅ ; nous verrons par la suite que ceci a son importance quant à la consommation des éléments, suivant que ceux-ci proviennent des engrais ou du sol.

Le tableau ci-dessous montre que si F₂ a produit en moyenne pour les 3 coupes (S₃) 5,5 fois plus de tiges + feuilles que F₄, par contre la production des racines (recueillies après la 3^{ème} coupe) n'est en moyenne que 2,6 fois supérieure à celle du témoin. Le témoin F₄ a donc dû émettre proportionnellement 2 fois plus de racines que F₂ pour son développement, les éléments du sol dont il avait besoin étant plus difficiles à prélever que les éléments solubles provenant en grande partie des engrais dont disposait F₂ :

S ₃ F ₂ V ₁	S ₃ F ₄ V ₁	F ₂ / F ₄	RacF ₂ V ₁	RacF ₄ V ₁	F ₂ / F ₄
17,23 g	3,29 g	<u>5,24</u>	4,08 g	1,66 g	<u>2,46</u>
S ₃ F ₂ V ₅	S ₃ F ₄ V ₅	F ₂ / F ₄	RacF ₂ V ₅	RacF ₄ V ₅	F ₂ / F ₄
14,37 g	2,48 g	<u>5,80</u>	1,84 g	0,67 g	<u>2,74</u>

(les productions S₃ et Rac sont exprimées en g par kg de sol)

Au total, la production végétale (tiges + feuilles + chaumes + racines) des 5 traitements répond aux fonctions "A - AH" (figures 33 et 34), les asymptotes des fonctions "A", se situant au delà de 10 kg de sol, c'est-à-dire au delà des volumes

testés dans cette expérimentation. La fonction "AH" nous montre que dans tous les cas la production végétale par unité de volume (ou par kg de sol) diminue quand les volumes de sol augmentent. Il n'y a donc pas proportionnalité de la production végétale, entre les différents volumes de sol, pour chacun des traitements.

3.3 LES EXPORTATIONS D'AZOTE TOTAL

Les résultats expérimentaux du prélèvement de l'azote par *Panicum* sont donnés dans le tableau IV.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 35 à 52.

Les fonctions "A₁ - A" (pour F₁, F₂) et "P - P" (pour F₃, F₄, F₅) caractérisent les exportations d'azote total de la 1^{ère} coupe (figures 35 et 36).

Les fonctions "A₁" et "P_>" (pour Q = exportations par pot) montrent que plus les volumes de sol augmentent, plus l'exportation est importante : les pourcentages d'azote prélevé (N_{eng.} + N_{sol} pour F₁, F₂, F₃, N_{sol} pour F₄ et F₅) augmentent avec les volumes de sol, comme le montrent les chiffres suivants pour F₂ et F₄ :

	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
F ₂	6,32 %	7,41 %	8,37 %	8,76 %	8,86 %
F ₄	1,14 %	1,15 %	1,17 %	1,18 %	1,19 %

Il semble évident que la représentation asymptote * puissance ("A₁") n'est valable que dans la limite des 9 kg de sol testés, et qu'au delà la courbe pourrait évoluer en sigmoïde.

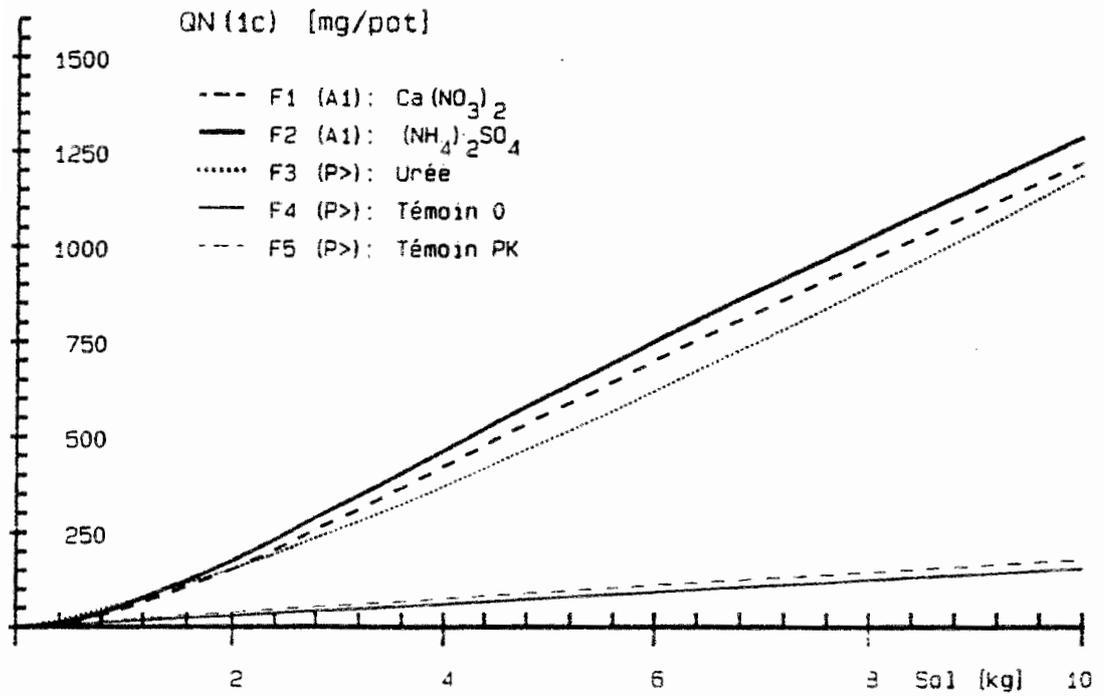
Notons que les teneurs en azote des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe, représentées par des droites ou des puissances, augmentent avec les volumes de sol :

- très fortement pour F₁, F₂, F₃,
- moyennement pour F₄,
- très faiblement pour F₅,

TABLEAU IV – PRELEVEMENT DE L'AZOTE PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

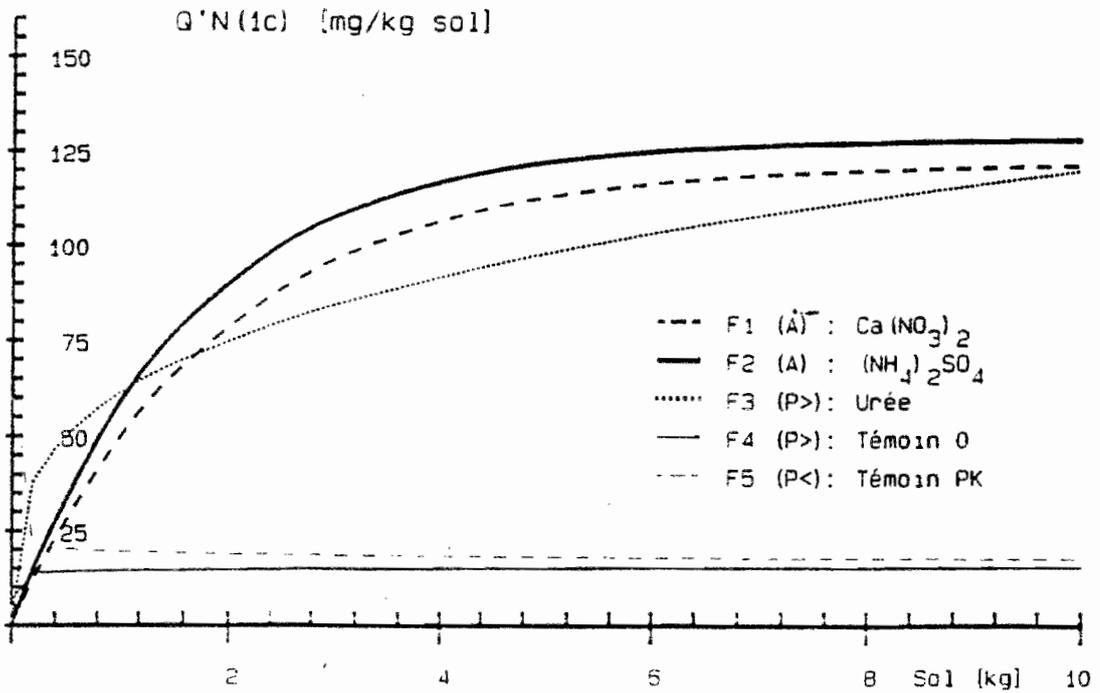
(Q = mg N par pot ; Q' = mg N par kg de sol)

	1ère coupe		2ème coupe		3ème coupe		2ème +3ème coupes		1ère + 2ème + 3ème coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	165,5	81,1	30,5	14,9	17,6	8,6	48,0	23,5	213,5	104,7	12,5	6,2	52,8	25,9	65,4	32,0	278,9	136,7
	V ₂	282,2	96,0	45,0	15,3	23,4	8,0	68,4	23,3	350,7	119,3	16,4	5,6	51,3	17,5	67,7	23,0	418,3	142,3
	V ₃	485,9	104,7	57,2	12,3	38,8	8,4	96,0	20,7	581,8	125,4	31,9	6,9	59,2	12,8	91,1	19,6	672,9	145,0
	V ₄	830,8	121,8	68,3	10,0	41,6	6,1	109,9	16,1	940,7	137,9	43,6	6,4	64,9	9,5	108,6	15,9	1049,2	153,8
	V ₅	1077,6	120,4	83,9	9,4	47,3	5,3	131,2	14,7	1208,8	135,1	61,4	6,9	80,7	9,0	142,1	15,9	1350,9	150,9
F ₂	V ₁	190,2	93,2	31,5	15,4	17,4	8,5	48,9	23,9	239,1	117,2	12,2	6,0	47,4	23,3	59,6	29,2	298,7	146,4
	V ₂	311,0	105,8	43,6	14,8	19,0	6,5	62,5	21,3	373,5	127,0	16,3	5,5	49,3	16,8	65,6	22,3	439,1	149,4
	V ₃	536,6	115,6	60,2	13,0	30,7	6,6	90,9	19,6	627,5	135,2	26,7	5,8	75,3	16,2	102,0	22,0	729,4	157,2
	V ₄	882,6	129,4	76,4	11,2	40,2	5,9	116,6	17,1	999,2	146,5	40,4	5,9	82,6	12,1	123,0	18,0	1122,2	164,5
	V ₅	1142,4	127,6	100,2	11,2	57,9	6,5	158,1	17,7	1300,5	145,3	64,3	7,2	111,5	12,5	175,8	19,6	1476,3	164,9
F ₃	V ₁	158,8	77,8	29,5	14,5	19,0	9,3	48,5	23,8	207,3	101,6	11,7	5,7	42,6	20,9	54,3	26,6	261,6	128,2
	V ₂	231,9	78,9	39,6	13,5	21,5	7,3	61,1	20,8	292,9	99,6	15,7	5,4	41,7	14,2	57,5	19,6	350,4	119,2
	V ₃	447,5	96,4	55,5	12,0	35,1	7,6	90,6	19,6	538,1	116,0	27,8	6,0	56,7	12,2	84,5	18,2	622,6	134,2
	V ₄	751,7	110,2	70,1	10,3	40,8	6,0	111,0	16,3	862,7	126,5	39,9	5,9	54,5	8,0	94,4	13,8	957,1	140,3
	V ₅	1018,0	113,7	62,8	7,0	41,4	4,6	104,2	11,6	1122,2	125,4	57,8	6,5	77,9	8,7	135,7	15,2	1257,9	140,5
F ₄	V ₁	31,2	15,1	10,8	5,2	7,6	3,7	18,4	8,9	49,6	24,1	6,0	2,9	22,3	10,8	28,3	13,8	77,9	37,8
	V ₂	40,5	13,8	19,1	6,5	13,6	4,6	32,7	11,1	73,1	24,9	6,7	2,3	23,5	8,0	30,2	10,3	103,4	35,2
	V ₃	76,9	16,5	30,0	6,4	20,1	4,3	50,1	10,7	127,0	27,3	10,5	2,3	31,4	6,7	41,9	9,0	168,9	36,2
	V ₄	97,8	14,3	42,3	6,2	24,8	3,6	67,0	9,8	164,8	24,1	15,6	2,3	32,7	4,8	48,3	7,0	213,1	31,1
	V ₅	141,1	15,7	44,8	5,0	20,0	2,2	64,7	7,2	205,9	22,9	16,2	1,8	38,2	4,2	54,4	6,0	260,3	28,9
F ₅	V ₁	39,6	19,2	13,3	6,4	9,8	4,7	23,1	11,1	62,6	30,4	6,7	3,3	17,3	8,4	24,0	11,6	86,6	42,0
	V ₂	53,6	18,2	18,8	6,4	14,3	4,9	33,0	11,3	86,7	29,5	8,9	3,0	18,6	6,3	27,4	9,3	114,1	38,8
	V ₃	84,0	18,0	29,5	6,3	21,5	4,6	50,9	10,9	135,0	29,0	13,0	2,8	29,8	6,4	42,8	9,2	177,8	38,1
	V ₄	123,7	18,1	37,9	5,5	27,1	4,0	65,0	9,5	188,7	27,5	16,6	2,4	39,2	5,7	55,7	8,1	244,4	35,7
	V ₅	160,0	17,8	44,6	5,0	31,8	3,5	76,4	8,5	236,4	26,3	24,0	2,7	46,9	5,2	70,9	7,9	307,3	34,1



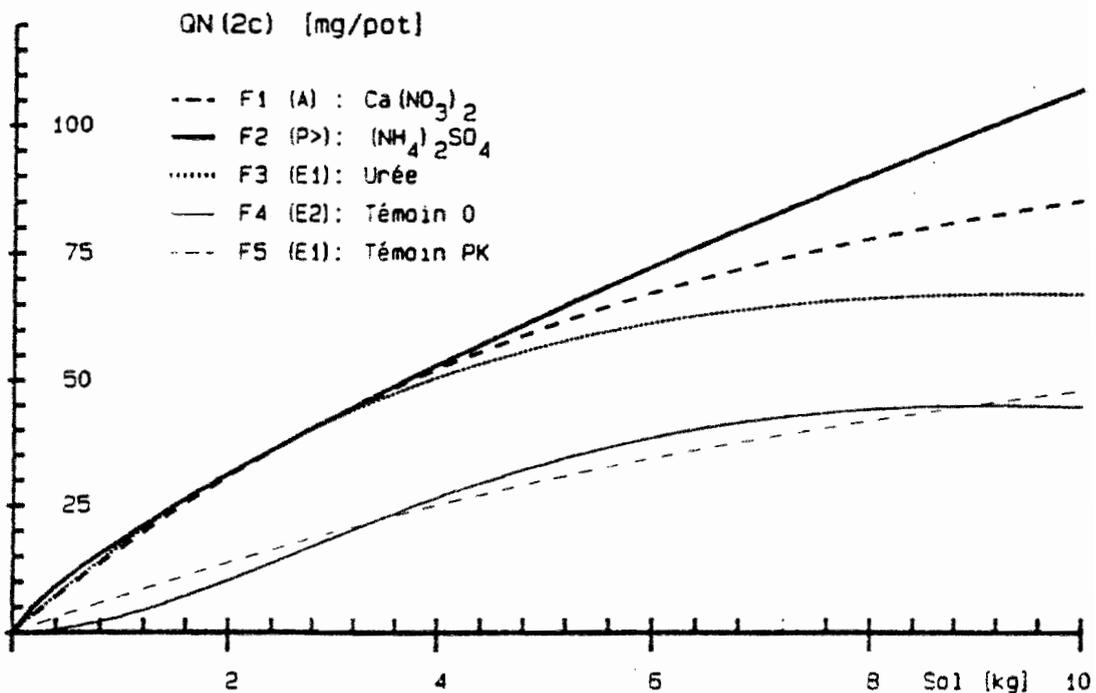
Exportation azote: 1ère coupe

Figure 35



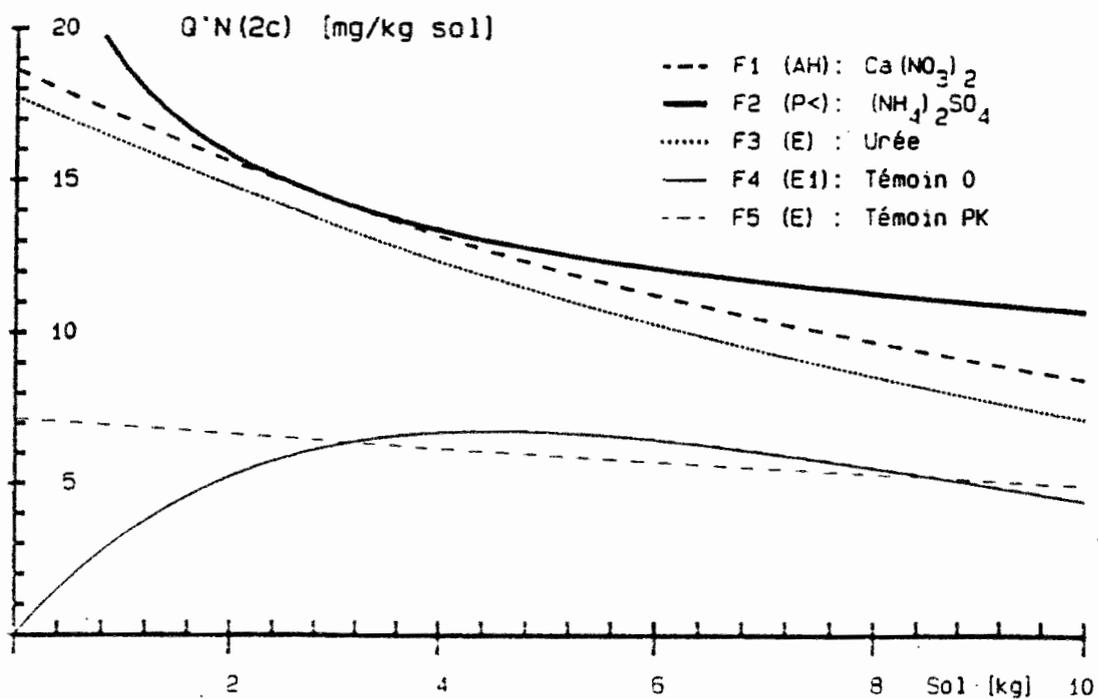
Exportation azote/kg sol: 1ère coupe

Figure 36



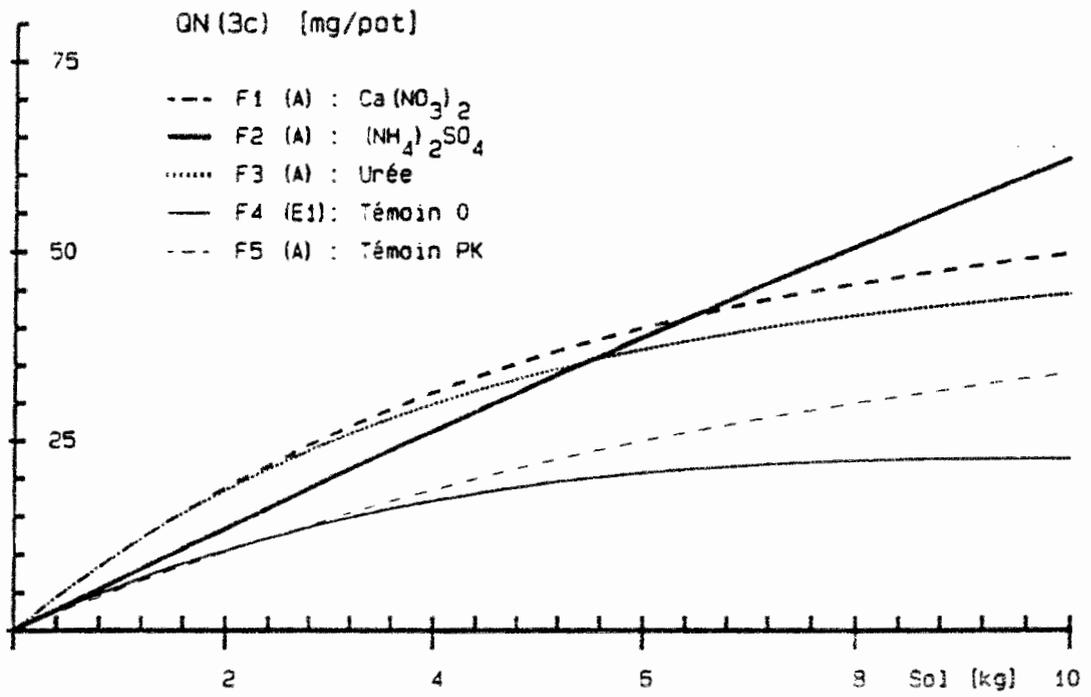
Exportation azote: 2ème coupe

Figure 37



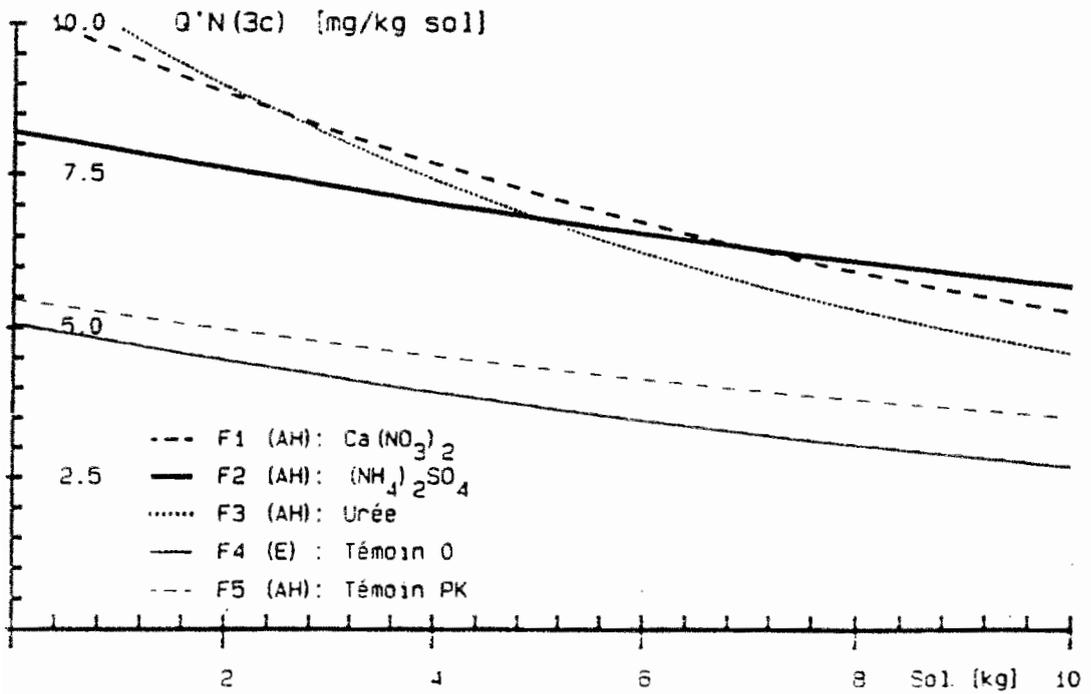
Exportation azote/kg sol: 2ème coupe

Figure 38



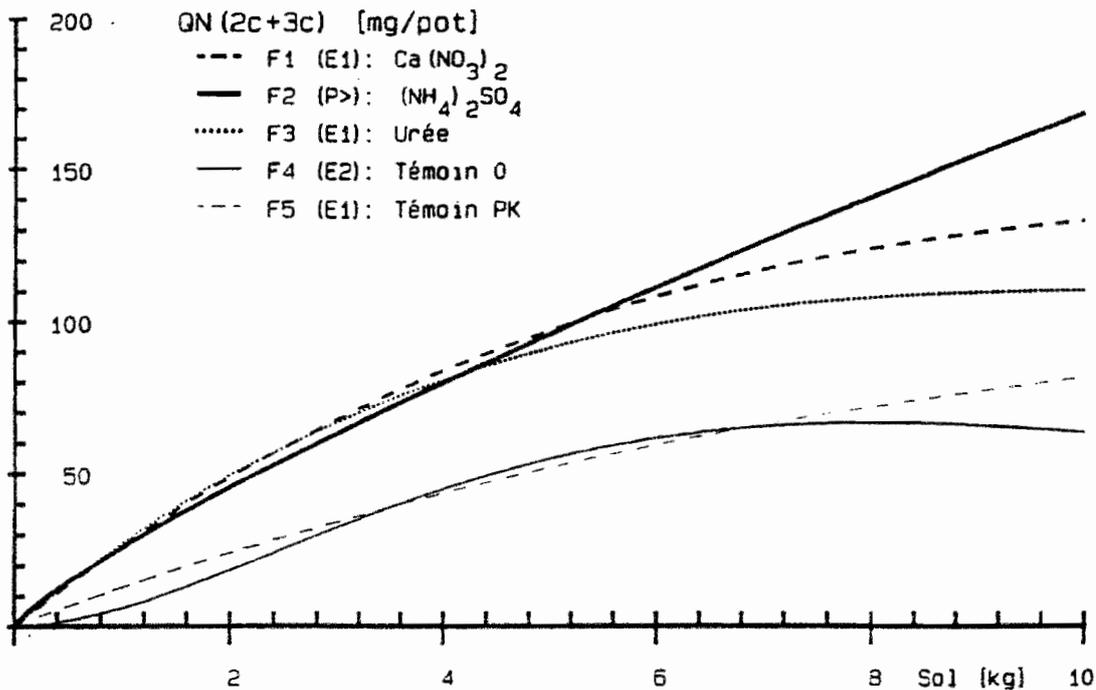
Exportation azote: 3ème coupe

Figure 39



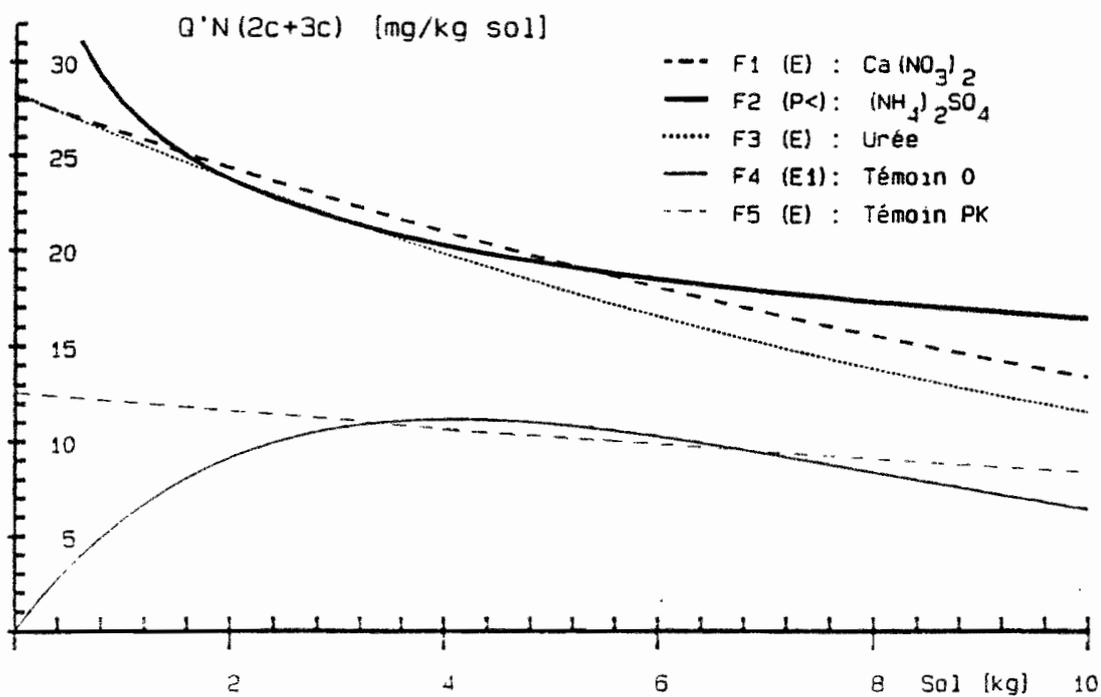
Exportation azote/kg sol: 3ème coupe

Figure 40



Exportation azote: 2ème + 3ème coupes

Figure 41



Exportation azote/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 42

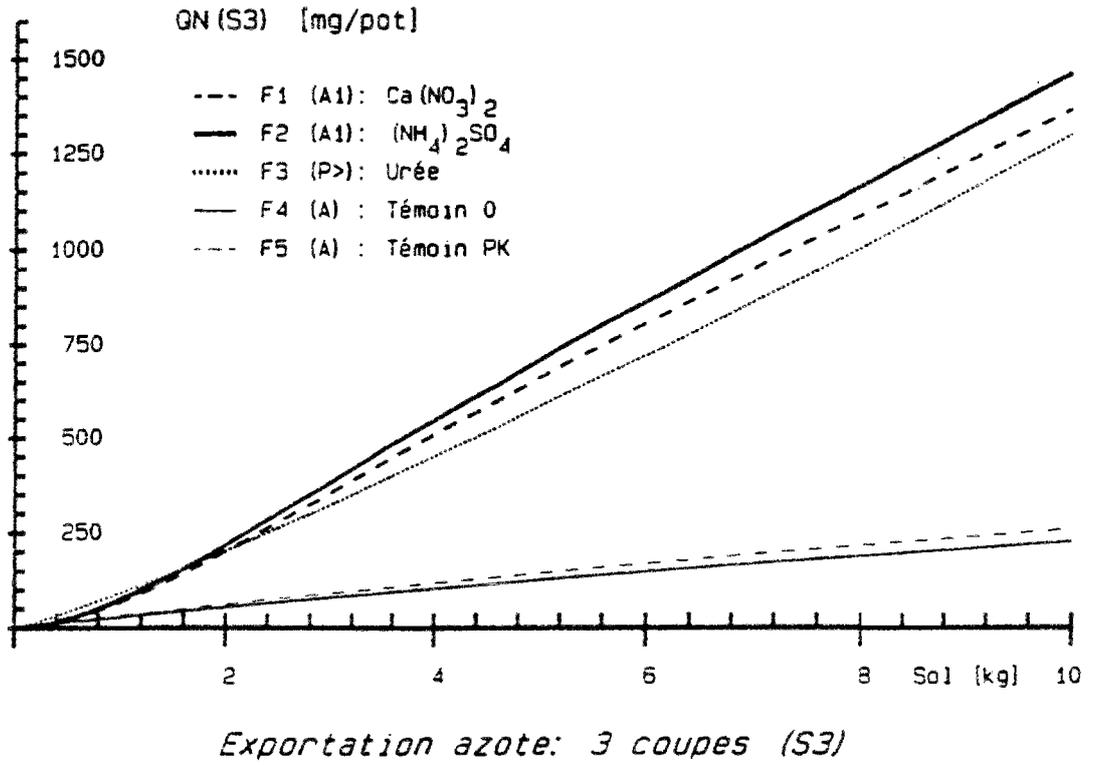


Figure 43

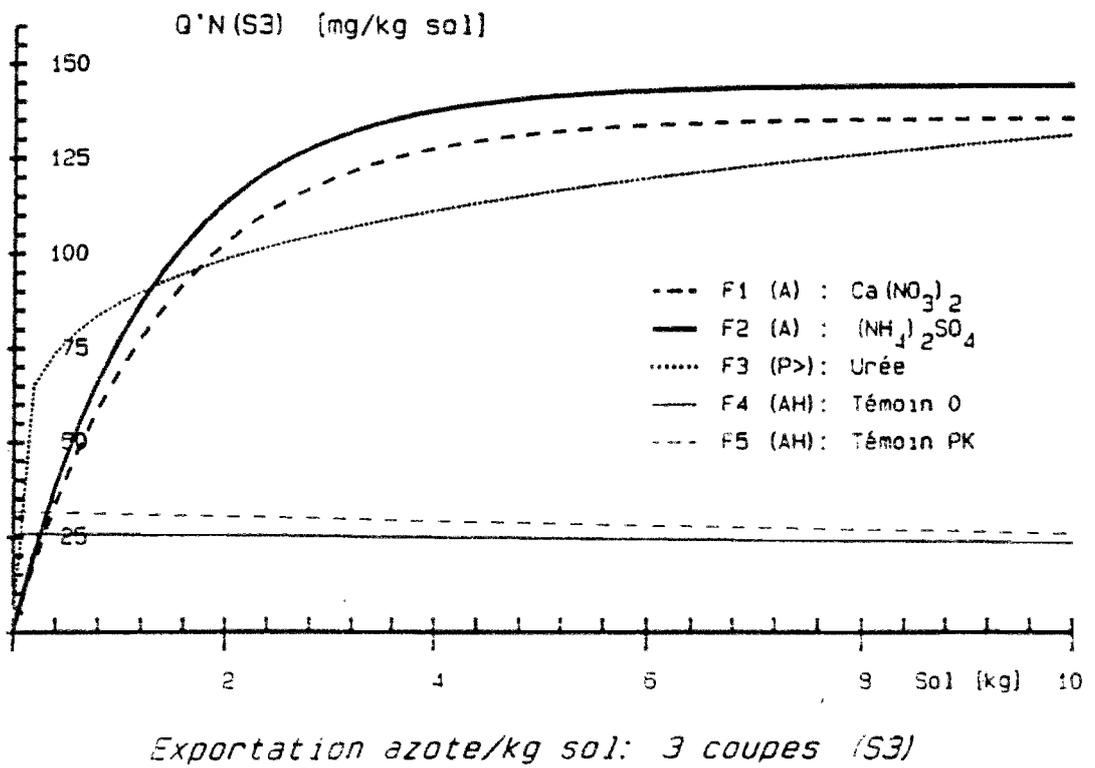
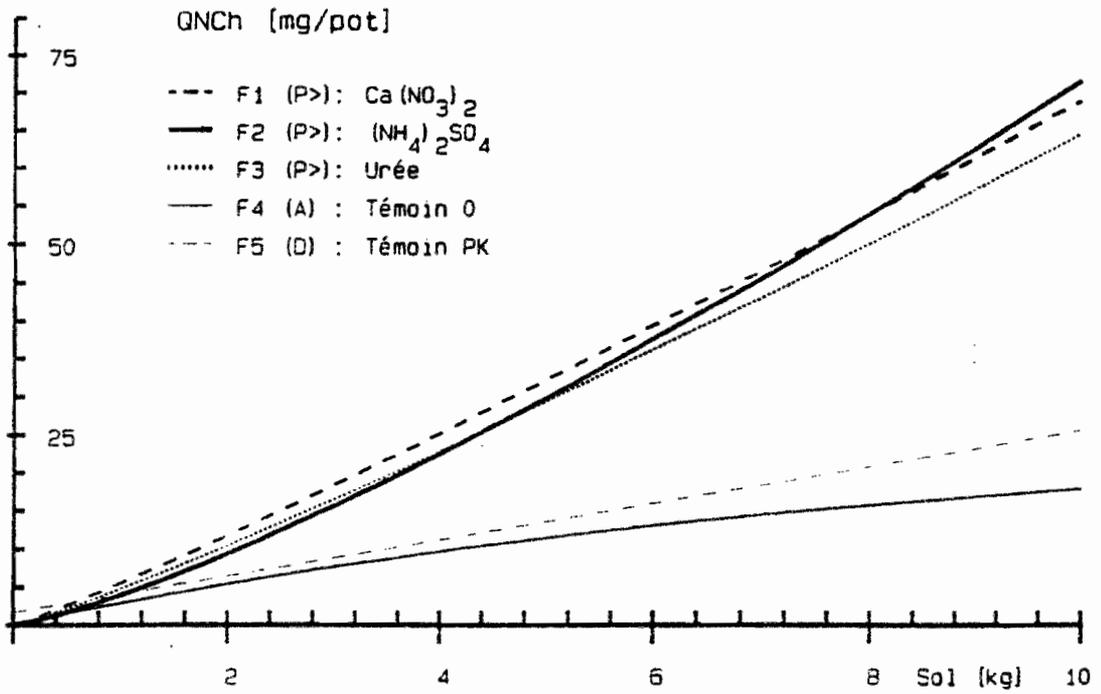
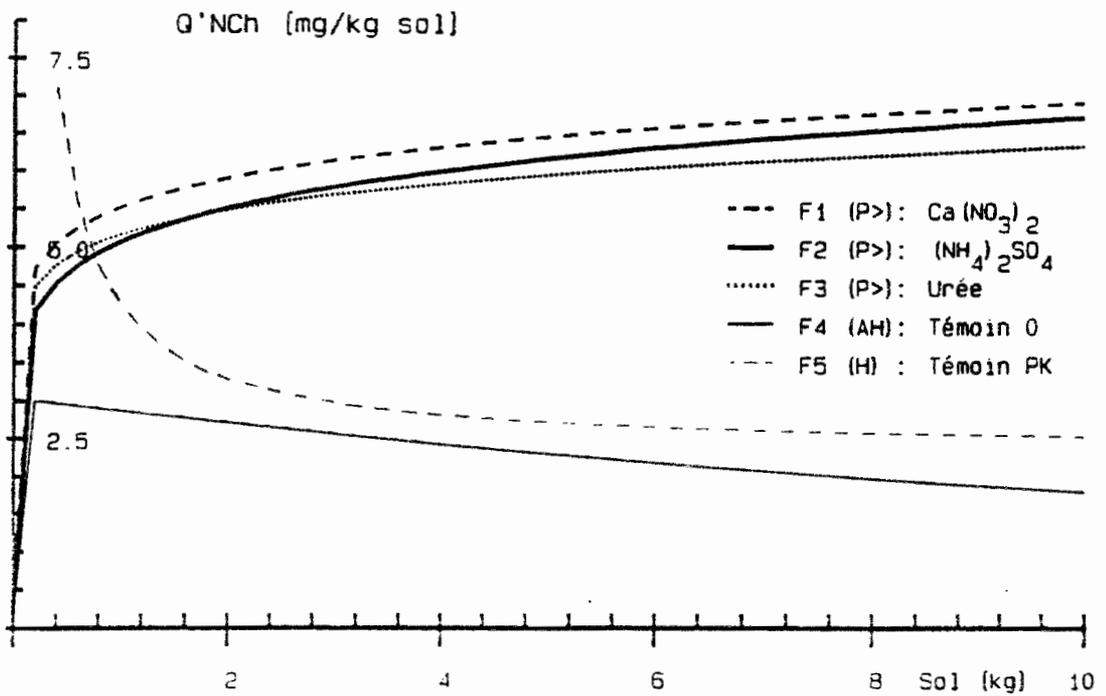


Figure 44



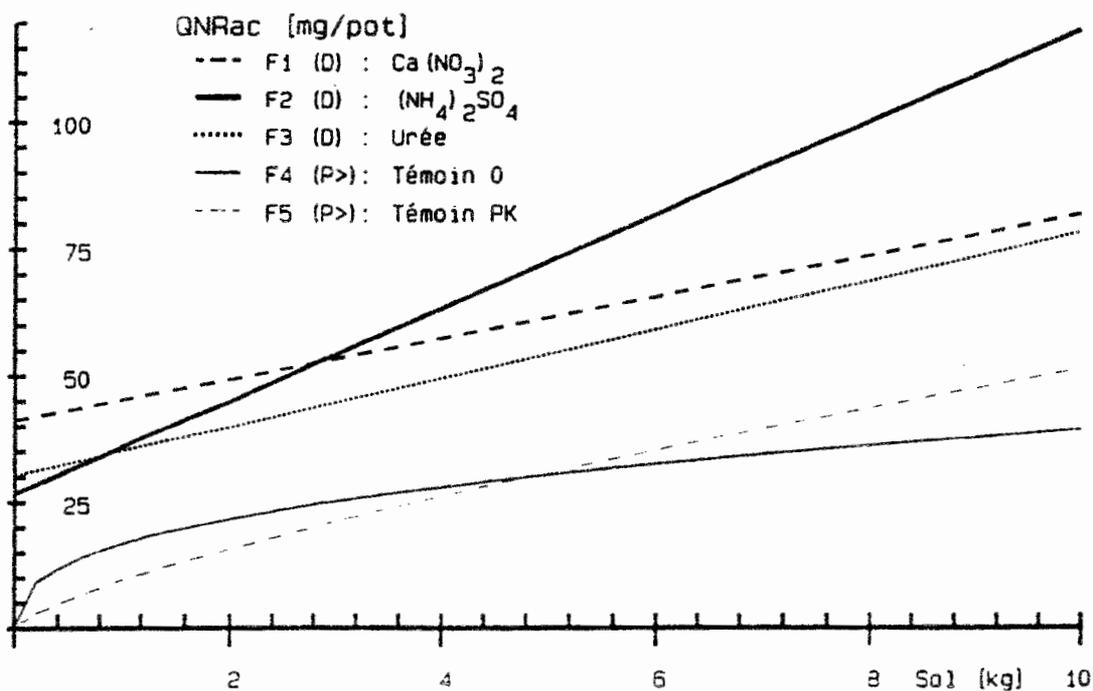
Immobilisation azote: chaumes

Figure 45



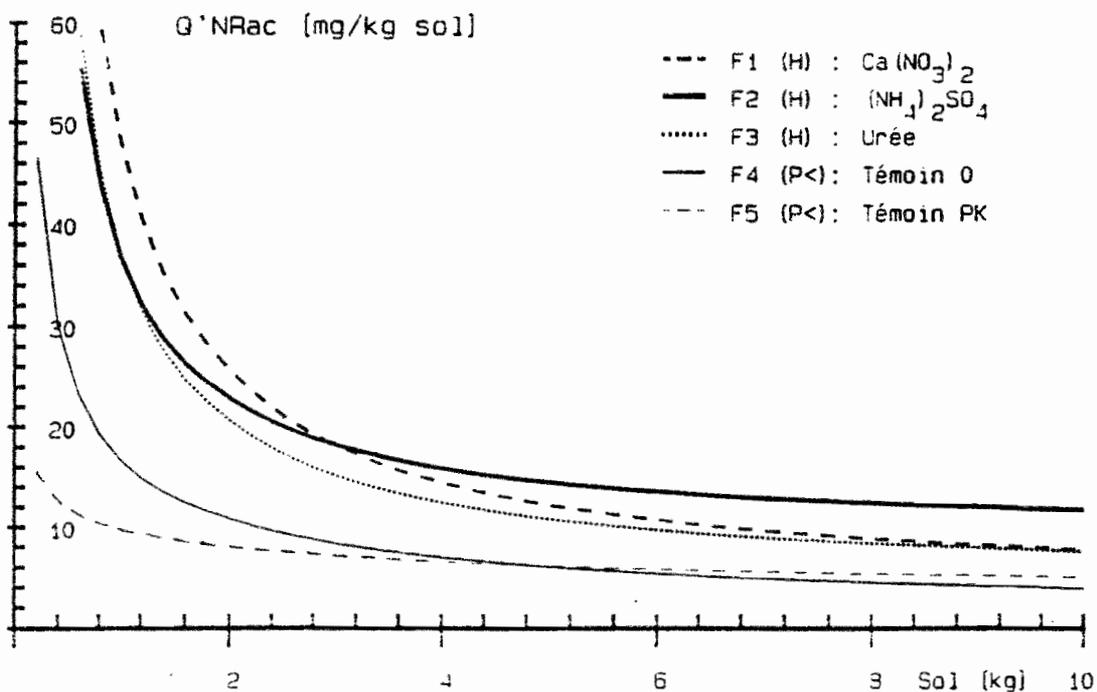
Immobilisation azote/kg sol: chaumes

Figure 46



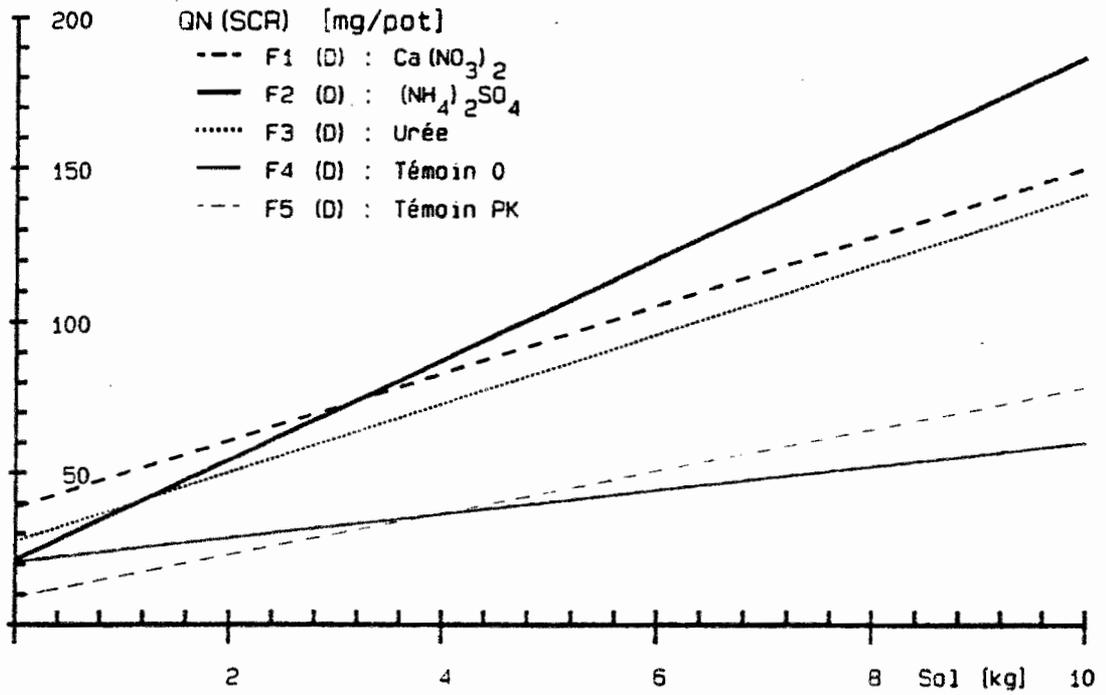
Immobilisation azote: racines

Figure 47



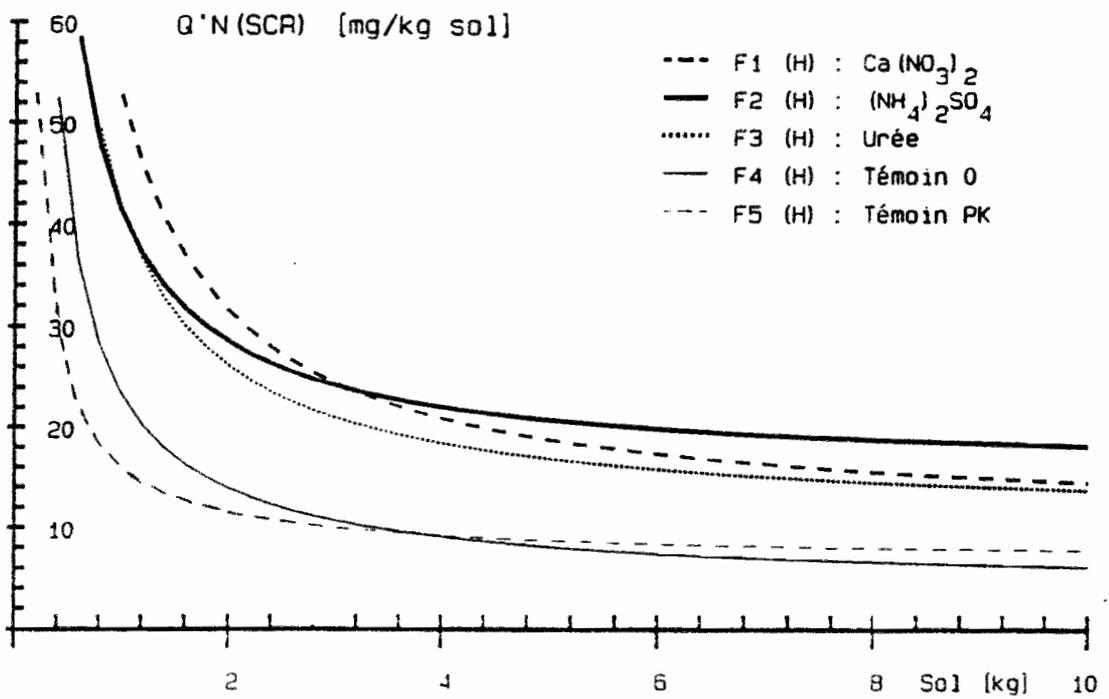
Immobilisation azote/kg sol: racines

Figure 48



Immobilisation azote: chaumes + racines (SCR)

Figure 49



Immobilisation azote/kg sol: chaumes + racines (SCR)

Figure 50

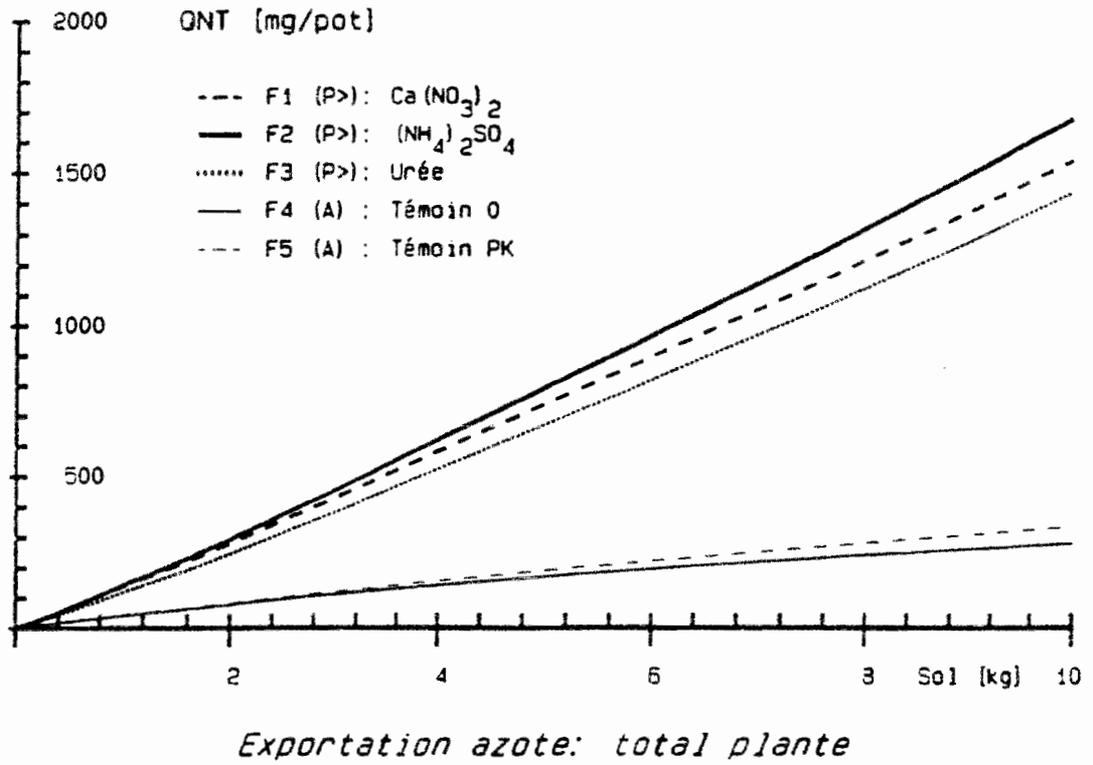


Figure 51

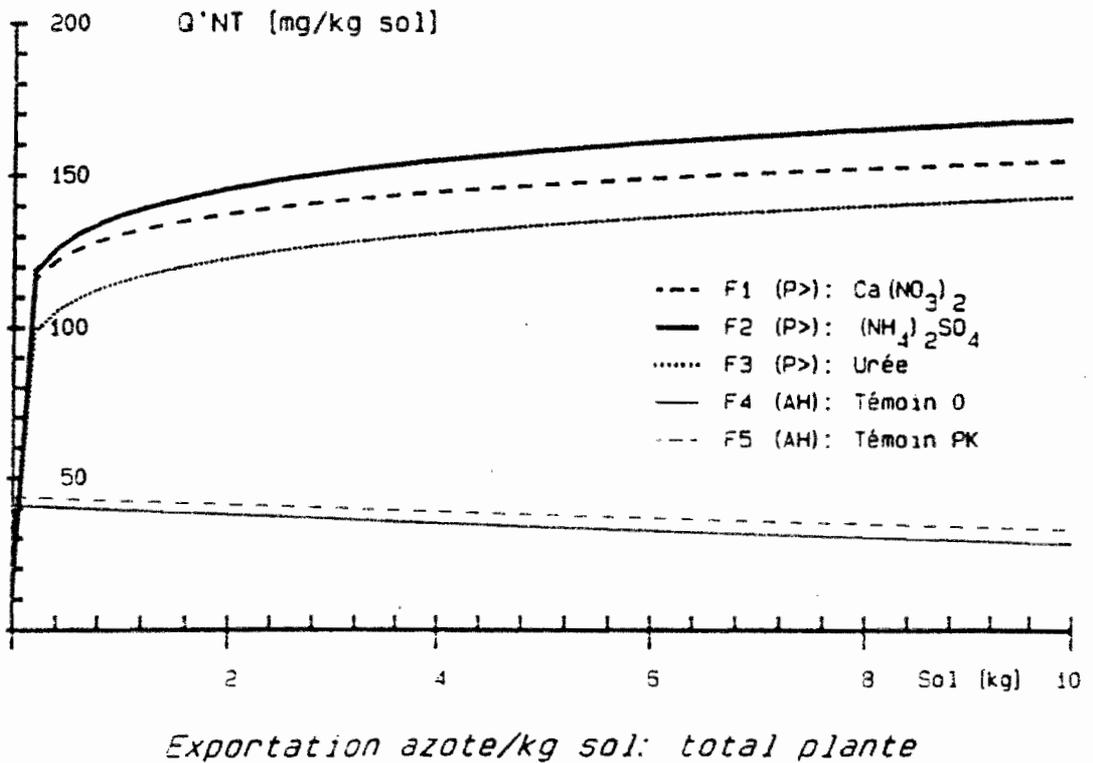


Figure 52

comme l'indique la ligne TN ($V_5 - V_1$) du tableau ci-dessous :

teneurs %	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
TNV ₁	0,643	0,705	0,638	0,721	0,628
TNV ₅	1,083	1,108	1,087	0,983	0,681
TN ($V_5 - V_1$)	0,440	0,403	0,449	0,262	0,053
TN moy.	0,848	0,894	0,842	0,794	0,621

Dans une étude précédente (THOMANN Ch. -1988), nous avons observé que l'apport "phosphore" avait un effet négatif sur la teneur en N de la matière sèche à la 1^{ère} coupe : ce qui explique que le témoin F₅ ayant reçu un apport phosphaté, a des teneurs en N inférieures à celles de F₄.

Il est néanmoins remarquable que la teneur moyenne en azote de la 1^{ère} coupe, dans le cas du témoin F₄, soit inférieure de moins de 8 % à la teneur moyenne des 3 traitements ayant reçu l'engrais azoté. On peut donc en déduire que **dans le cas des 3 traitements F₁, F₂, F₃, ayant reçu un apport important d'engrais azoté (représentant 11,7 % de N total du sol), il n'y a pas eu de surconsommation d'azote par la plante.** D'autre part, dans le cas de F₄, la production végétale très inférieure à celle de F₁, F₂, F₃, ne serait pas due à une difficulté à prélever l'azote du sol, mais en partie à un déficit phosphorique.

L'exportation de l'azote pour l'ensemble **2^{ème} + 3^{ème} coupes** répond aux fonctions "E₁ - E" - meilleures que "A - AH" pour F₁, F₃, F₅ - et à la fonction "P_> - P_<" pour F₂, car les teneurs n'augmentant que faiblement avec les volumes de sol pour la 2^{ème} coupe, et diminuant pour la 3^{ème} coupe, les fonctions représentatives des rendements sont alors prédominantes. Pour F₄, les fonctions "E₂ - E₁" s'imposent comme étant les meilleures, indiquant que les exportations d'azote du pot V₅ sont inférieures à celles du pot V₄ (figures 41 et 42).

L'azote exporté par les 3 coupes (figures 43 et 44) est représenté, comme à la 1^{ère} coupe, par les fonctions "A₁ - A" pour F₁ et F₂, et par "P_> - P_>" pour F₃ ; les fonctions "A" et "P_>" représentatives de Q'N montrent bien que pour cet élément, la plante a prélevé d'autant plus d'azote par unité de volume que le volume du pot était plus important. Dans le chapitre concernant le bilan de l'azote, nous verrons que cet azote prélevé est à 70 % en moyenne de l'azote en provenance de l'engrais.

Pour les 2 témoins, F_4 et F_5 , l'azote, qui ne peut provenir que du sol, se caractérise par les fonctions "A - AH"; la pente des courbes "AH" est significative pour F_5 (plus le volume de sol augmente, moins la plante prélève d'azote par kg de sol), et non significative pour F_4 : la plante prélève la même quantité d'azote, indépendamment des volumes de sol.

Les immobilisations d'azote par les chaumes + racines (figures 49 et 50) se caractérisent pour les 5 traitements par des droites pour Q, et des hyperboles pour Q', ces dernières faisant apparaître une grande différence entre V_1 et V_5 , V_1 immobilisant beaucoup plus d'azote par kg de sol par les chaumes + racines que V_5 . Signalons que le test d'homogénéité donne 100 % entre les teneurs en N des racines des traitements F_2 et F_4 ce qui tend à démontrer une fois de plus que le **faible développement végétal du témoin F_4 n'est pas imputable à un problème de prélèvement de l'azote du sol**. Le test d'homogénéité donne également 100 % pour les Q'N représentés par des hyperboles, de F_4 et F_5 : les 2 témoins immobilisent par kg de sol la même quantité d'azote du sol dans les chaumes + racines.

Quant aux **exportations totales en N** (figures 51 et 52), l'allure des courbes des traitements F_1 , F_2 , F_3 est identique à celle de la 1^{ère} coupe, mais dans ce cas, la fonction " $P_>$ " apparaît meilleure que la fonction " A_1 ", car pour les petits volumes V_1 et V_2 la meilleure exportation des 2^{ème} et 3^{ème} coupes, des chaumes et des racines a compensé la moins bonne exportation de la 1^{ère} coupe, caractérisée par une courbure en creux spécifique de la fonction " A_1 ".

Les témoins F_4 et F_5 répondent aux fonctions "A - AH" montrant par là aussi que l'azote exporté pour les petits volumes de sol (V_1 et V_2) au cours des 2^{ème} et 3^{ème} coupes, et par les chaumes et les racines, est proportionnellement plus élevé que l'azote exporté pour les volumes plus importants, V_4 et V_5 en particulier, d'où la réponse pour le total plante à une fonction différente de celle de la 1^{ère} coupe.

Ces courbes concernant l' azote, nous montrent la différence d'absorption par la plante entre les ions NH_4^+ , NO_3^- et l' urée. Dès la 1^{ère} coupe, on observe que l'ion NH_4^+ a été mieux prélevé que l'ion NO_3^- , ceci confirme les observations de HAGEMAN (HAGEMAN R.H. -1982) selon lesquelles les jeunes plants absorbent plus facilement NH_4 que NO_3 . Au total, l'azote en provenance du sulfate d'ammonium est mieux exporté que l' azote en provenance du nitrate de calcium.

Quant à l' urée, elle est toujours (sauf pour les petits volumes de la 3^{ème} coupe) moins bien prélevée que les ions NH_4^+ et NO_3^- ; ceci est en accord avec les observations de HARPER (HARPER J.E. - 1982).

3.4 LES EXPORTATIONS DE PHOSPHORE

Les résultats expérimentaux du prélèvement du phosphore par "*Panicum*" sont donnés dans le tableau V.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 53 à 70.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les prélèvements du P par la plante, exprimés en pourcentage du P total du sol + P engrais sont toujours supérieurs à ceux de l'azote, car les sols tropicaux renferment peu de P par rapport à l'azote, et ces différences entre N et P vont du simple au double pour le volume V_1 .

Nous retrouvons dans le cas de F_1 , F_2 , F_5 à la 1^{ère} coupe (figures 53 et 54), les fonctions observées pour les rendements, à savoir les fonctions "A - AH" ; pour F_3 l'exportation du P répond mieux aux fonctions " $P_{>} - P_{>}$ ", quant à F_4 , les fonctions " $E_2 - E_1$ " apparaissent dès la 1^{ère} coupe. Les fonctions " E_2 " pour Q et " E_1 " pour Q' indiqueraient que le prélèvement de l'élément par la plante serait soumis à un facteur limitant.

Les teneurs en phosphore de la matière sèche de la 1^{ère} coupe sont croissantes de V_1 à V_5 pour F_1 , F_2 , F_3 , mais pour F_1 et F_2 , elles n'augmentent en moyenne que de 11 % de V_1 à V_5 : cette faible augmentation en fonction des volumes fait que l'on retrouve les mêmes fonctions que pour les rendements. La teneur de F_3 augmente de V_1 à V_5 de 27 % : dans ce cas, on ne retrouve pas la fonction "A" pour l'exportation, mais la fonction " $P_{>}$ ", avec une puissance > 1 .

On observe que les Q'P de F_1 , F_2 , F_3 ont une pente non significative, indiquant qu'à la 1^{ère} coupe, pour chacun des 3 traitements, les quantités de P prélevé par kg de sol sont identiques pour chaque volume de sol.

Pour F_4 et F_5 , les teneurs diminuent en fonction des volumes ; cette diminution de plus de 45 % entre V_1 et V_5 pourrait expliquer que dès la 1^{ère} coupe, l'exportation de P se caractérise par la fonction " E_2 " pour F_4 , qui présente un maximum à 6,2 kg, c'est-à-dire que les volumes V_4 et V_5 sont en deçà de ce maximum, et V_5 exporte moins de P que V_4 .

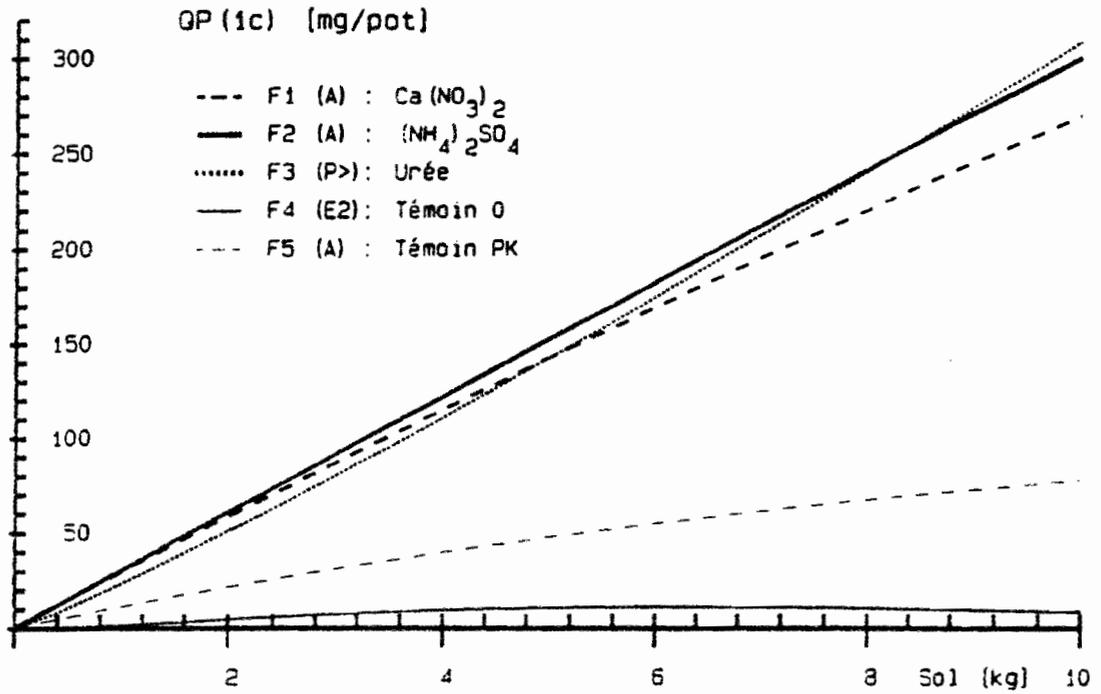
Les teneurs en P du témoin F_4 à la 1^{ère} coupe sont moins de la moitié de celles de F_1 , F_2 , F_3 , et moins du tiers de celles de F_5 : **le phosphore du sol apparaît donc comme très peu assimilable.**

Dans le cas du témoin, l'azote du sol est régulièrement prélevé par la plante à la 1^{ère} coupe indépendamment du volume de sol, alors que le phosphore, moins mobile que N, ne peut être assimilé que si la densité racinaire est suffisante.

TABLEAU V - PRELEVEMENT DU PHOSPHORE PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

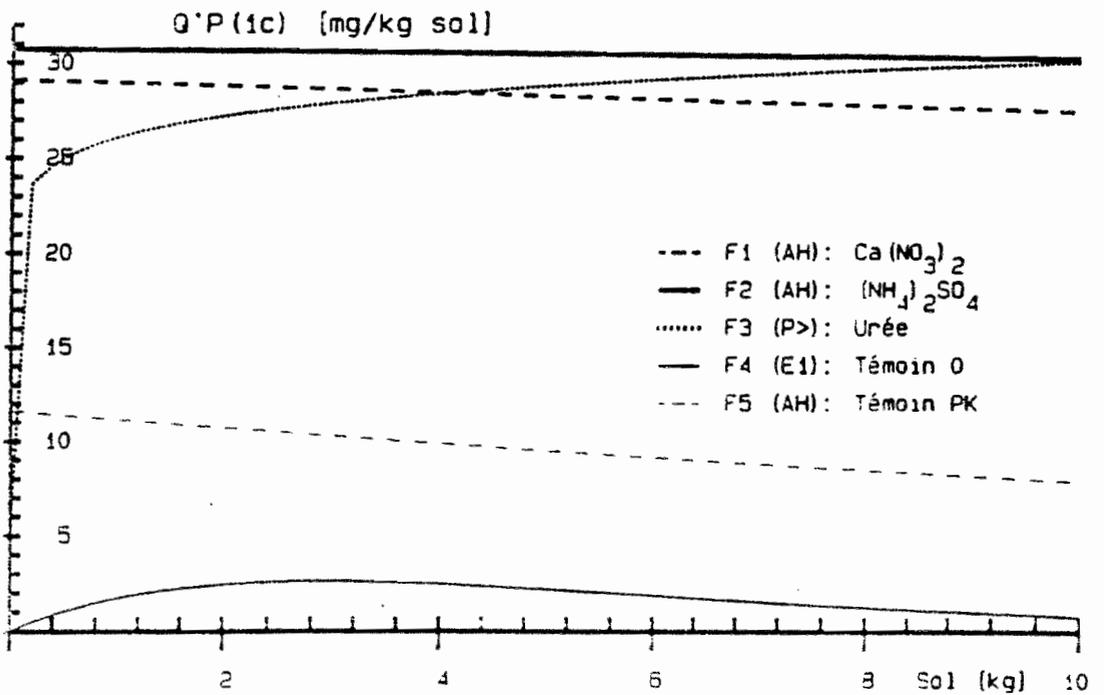
(Q = mg P par pot ; Q' = mg P par kg de sol)

	1ère coupe		2ème coupe		3ème coupe		2ème +3ème coupes		1ère + 2ème + 3ème coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	58,6	28,7	12,0	5,9	5,0	2,4	16,9	8,3	75,6	37,1	7,6	3,7	4,1	2,0	11,8	5,8	87,4	42,8
	V ₂	85,8	29,2	19,5	6,6	8,5	2,9	28,0	9,5	113,8	38,7	10,3	3,5	3,6	1,2	13,9	4,7	127,8	43,5
	V ₃	121,5	26,2	24,3	5,2	10,9	2,3	35,1	7,5	156,7	33,8	13,0	2,8	4,2	0,9	17,2	3,7	173,8	37,5
	V ₄	208,0	30,5	32,7	4,8	13,8	2,0	46,5	6,8	254,4	37,3	16,6	2,4	4,5	0,7	21,0	3,1	275,4	40,4
	V ₅	236,9	26,5	31,4	3,5	10,3	1,1	41,7	4,6	278,6	31,1	18,2	2,0	5,7	0,6	23,9	2,7	302,6	33,8
F ₂	V ₁	62,2	30,5	13,9	6,8	5,7	2,8	19,6	9,6	81,7	40,1	7,7	3,8	3,4	1,7	11,2	5,5	92,9	45,5
	V ₂	90,3	30,7	20,7	7,0	8,4	2,9	29,1	9,9	119,4	40,6	11,0	3,7	3,7	1,3	14,7	5,0	134,0	45,6
	V ₃	140,7	30,3	29,4	6,3	13,6	2,9	43,0	9,2	183,6	39,6	14,1	3,0	4,8	1,0	18,9	4,1	202,5	43,6
	V ₄	209,3	30,7	32,2	4,7	16,2	2,4	48,4	7,1	257,7	37,8	18,3	2,7	5,2	0,8	23,5	3,4	281,1	41,2
	V ₅	268,6	30,0	41,8	4,7	20,4	2,3	62,2	7,0	330,8	37,0	27,2	3,0	7,2	0,8	34,4	3,8	365,2	40,8
F ₃	V ₁	58,8	28,8	11,9	5,8	5,4	2,6	17,3	8,4	76,1	37,3	8,5	4,2	2,9	1,4	11,4	5,6	87,5	42,9
	V ₂	77,8	26,4	16,9	5,7	7,8	2,7	24,7	8,4	102,5	34,9	11,4	3,9	3,0	1,0	14,5	4,9	117,0	39,8
	V ₃	127,5	27,5	23,2	5,0	10,2	2,2	33,3	7,2	160,8	34,7	13,3	2,9	3,6	0,8	16,9	3,6	177,8	38,3
	V ₄	200,0	29,3	32,0	4,7	13,2	1,9	45,3	6,5	245,2	36,0	18,8	2,8	3,6	0,5	22,3	3,3	267,5	39,2
	V ₅	274,5	30,7	25,2	2,8	10,9	1,2	36,2	4,0	310,7	34,7	21,9	2,4	5,2	0,6	27,1	3,0	337,8	37,7
F ₄	V ₁	5,5	2,7	3,1	1,5	2,2	1,1	5,4	2,6	10,9	5,3	1,7	0,8	1,4	0,7	3,1	1,5	14,0	6,8
	V ₂	7,2	2,4	4,8	1,6	3,5	1,2	8,3	2,8	15,5	5,3	2,6	0,9	1,7	0,6	4,3	1,5	19,7	6,7
	V ₃	10,3	2,2	6,7	1,4	4,5	1,0	11,1	2,4	21,5	4,6	2,7	0,6	2,1	0,5	4,9	1,0	26,3	5,6
	V ₄	10,8	1,6	8,0	1,2	4,6	0,7	12,6	1,9	23,4	3,4	2,4	0,4	2,0	0,3	4,4	0,6	27,8	4,1
	V ₅	9,9	1,1	6,3	0,7	2,8	0,3	9,0	1,0	19,0	2,1	2,0	0,2	2,1	0,2	4,2	0,5	23,1	2,6
F ₅	V ₁	21,5	10,4	7,0	3,4	5,1	2,5	12,2	5,9	33,7	16,3	7,4	3,6	1,8	0,9	9,2	4,5	42,9	20,8
	V ₂	30,9	10,5	10,4	3,6	7,9	2,7	18,3	6,3	49,2	16,7	9,4	3,2	1,8	0,6	11,2	3,8	60,4	20,5
	V ₃	44,9	9,6	14,5	3,1	10,5	2,2	25,0	5,4	69,8	15,0	11,1	2,4	2,6	0,6	13,7	2,9	83,5	17,9
	V ₄	61,3	8,9	19,7	2,9	14,0	2,0	33,7	4,9	95,0	13,9	13,4	2,0	3,4	0,5	16,8	2,5	111,8	16,3
	V ₅	72,0	8,0	20,4	2,3	14,1	1,6	34,5	3,9	106,5	11,8	16,3	1,8	4,3	0,5	20,6	2,3	127,1	14,1



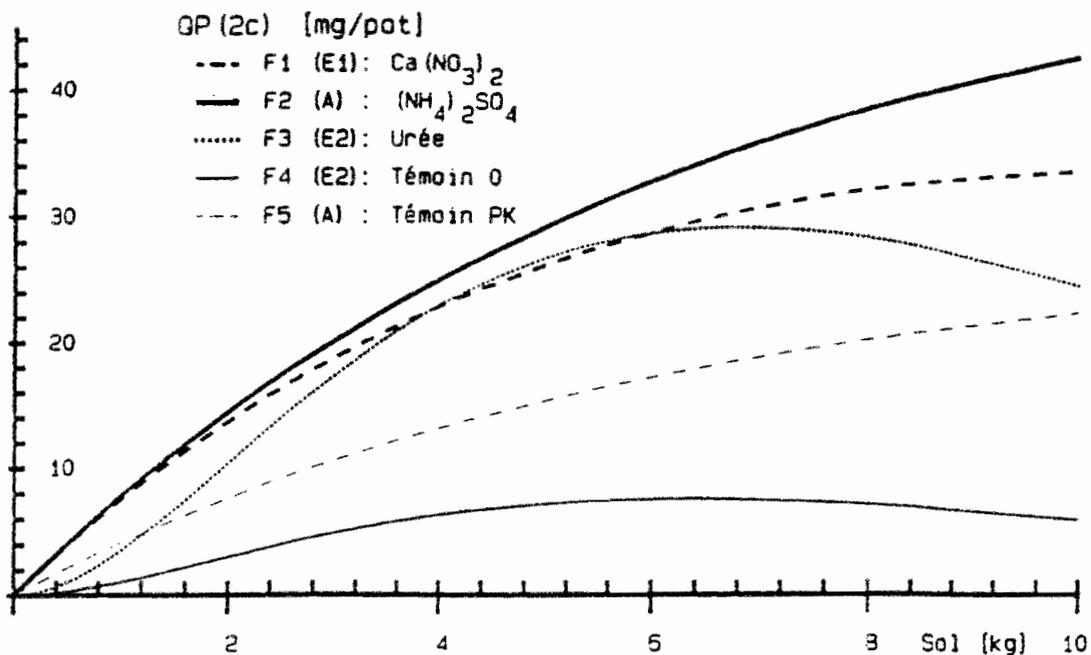
Exportation phosphore: 1ère coupe

Figure 53



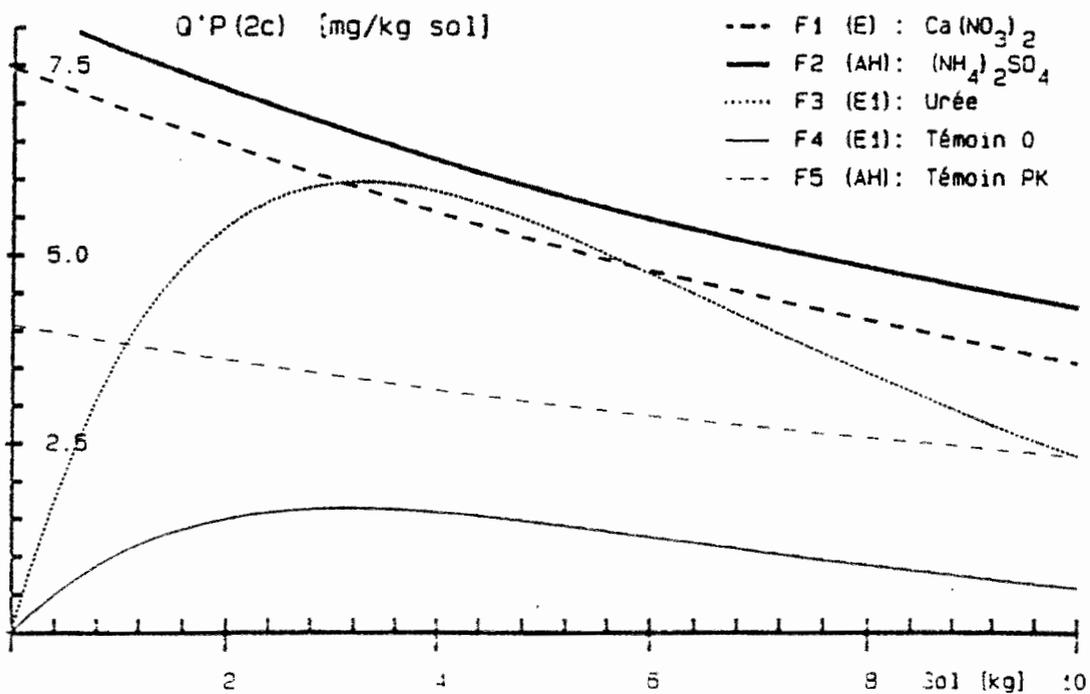
Exportation phosphore/kg sol: 1ère coupe

Figure 54



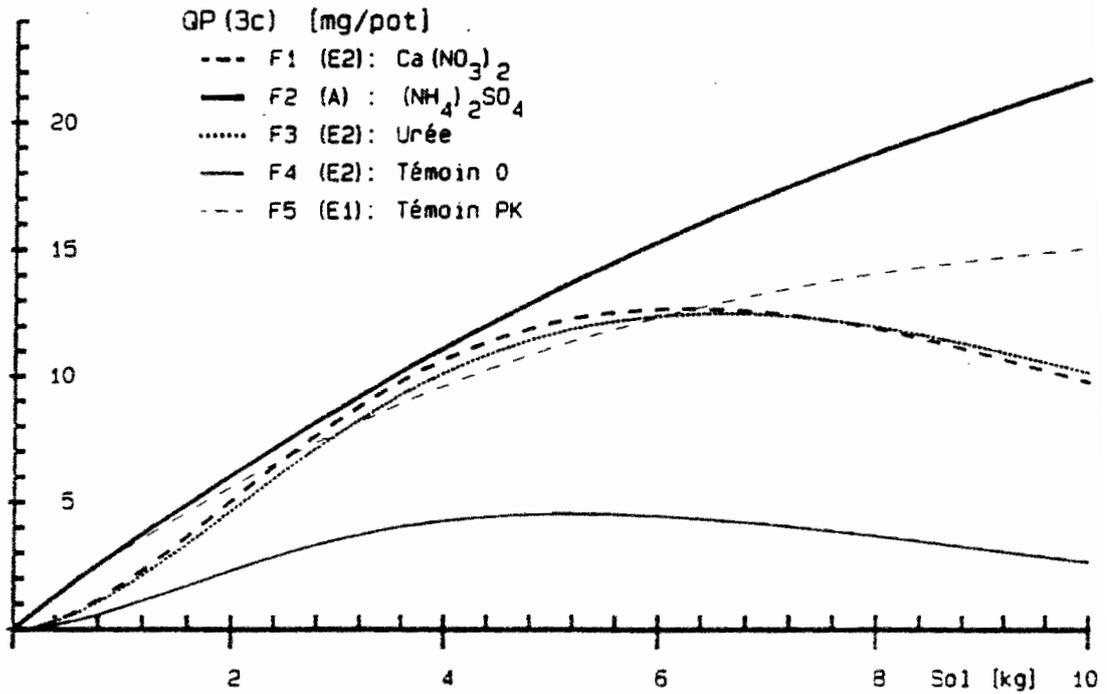
Exportation phosphore: 2ème coupe

Figure 55



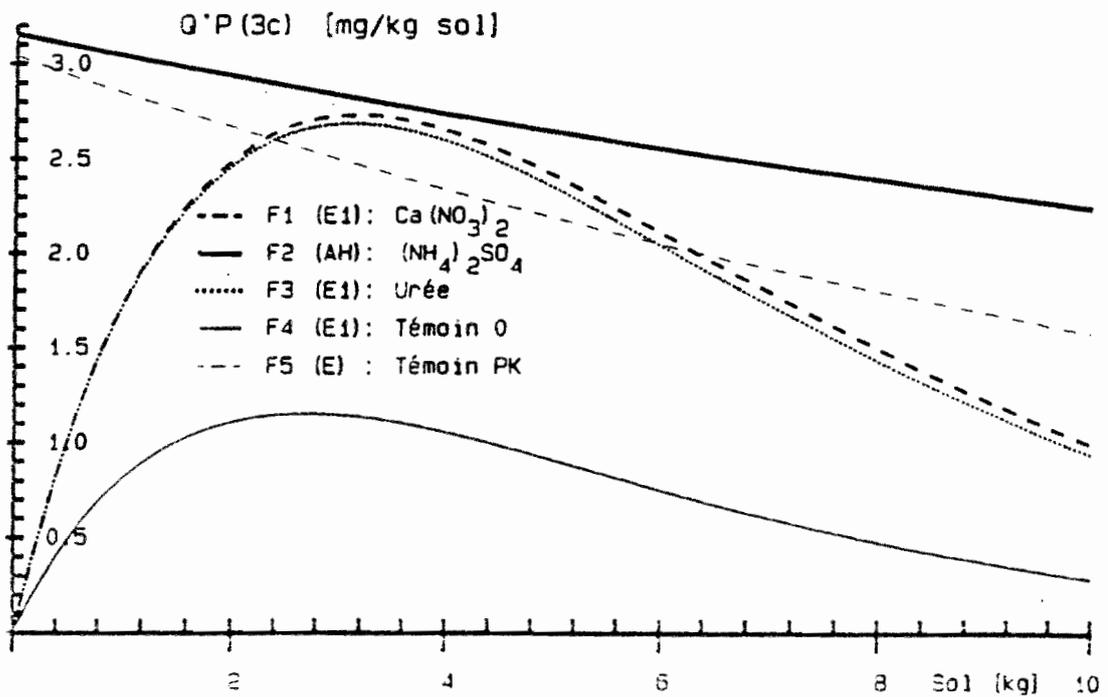
Exportation phosphore/kg sol: 2ème coupe

Figure 56



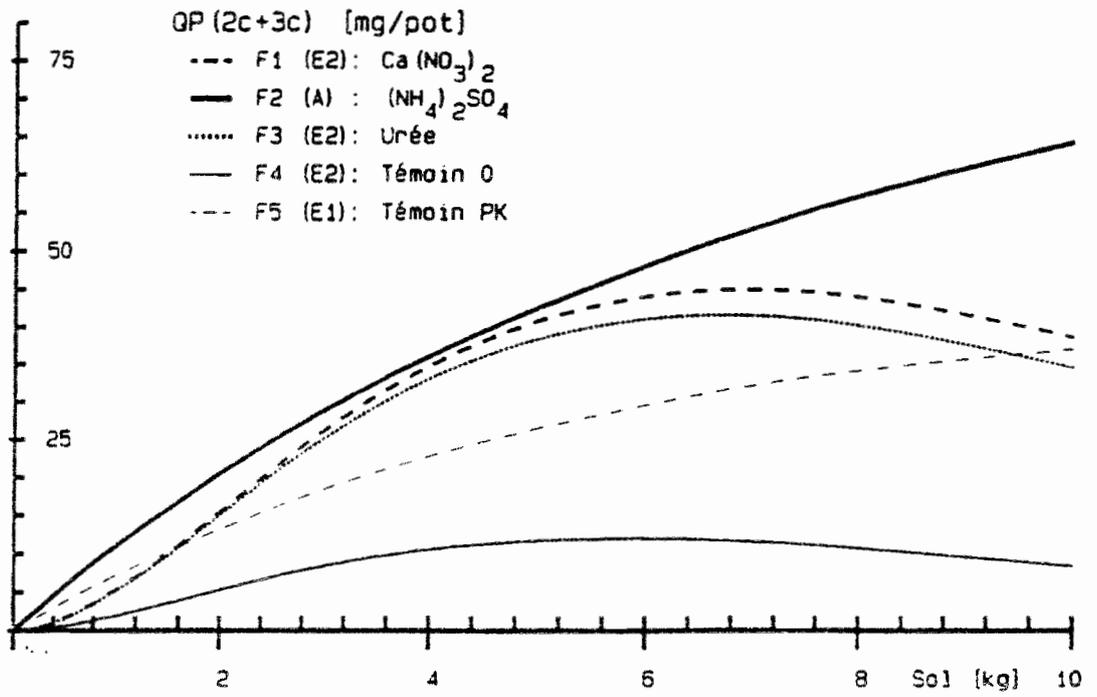
Exportation phosphore: 3ème coupe

Figure 57



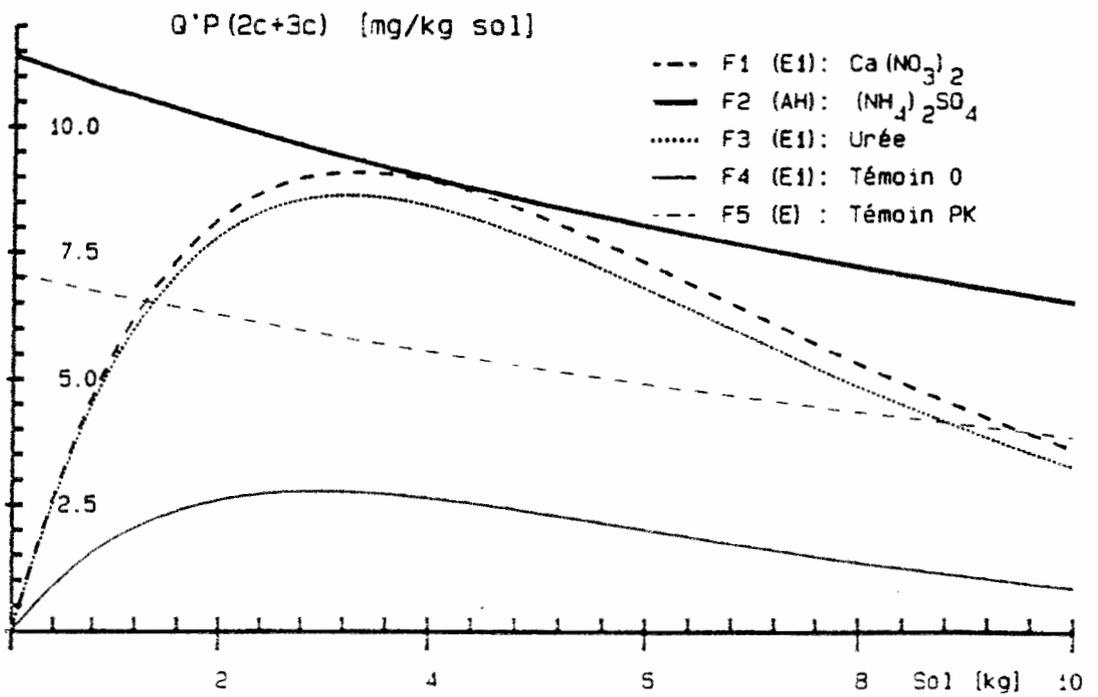
Exportation phosphore/kg sol: 3ème coupe

Figure 58



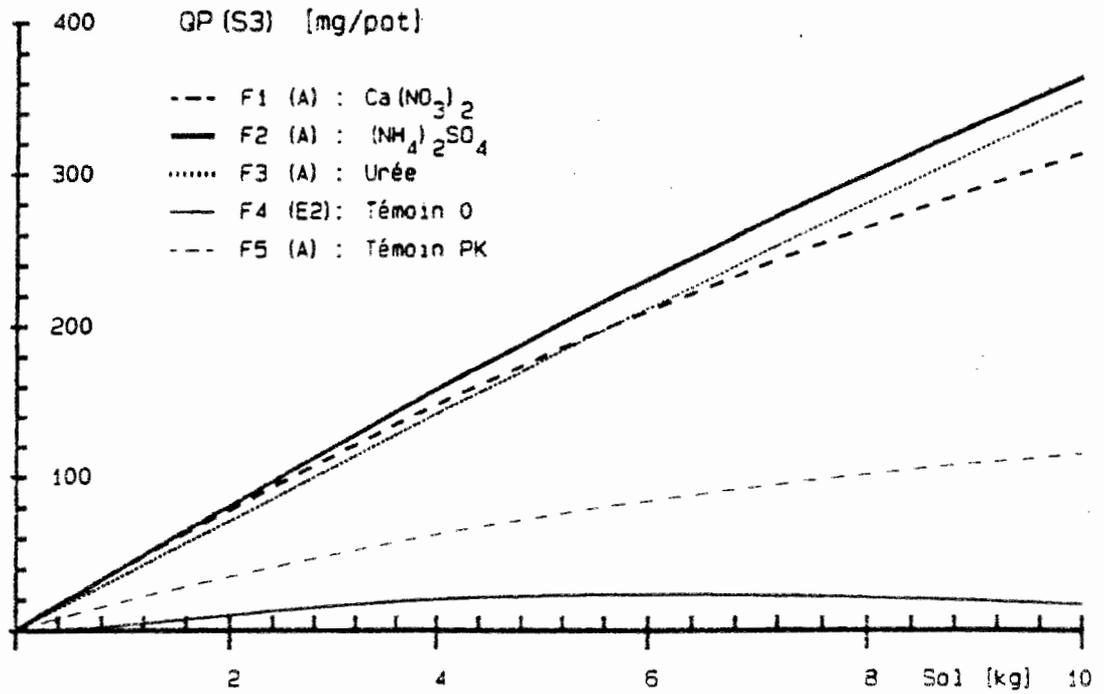
Exportation phosphore: 2ème + 3ème coupes

Figure 59



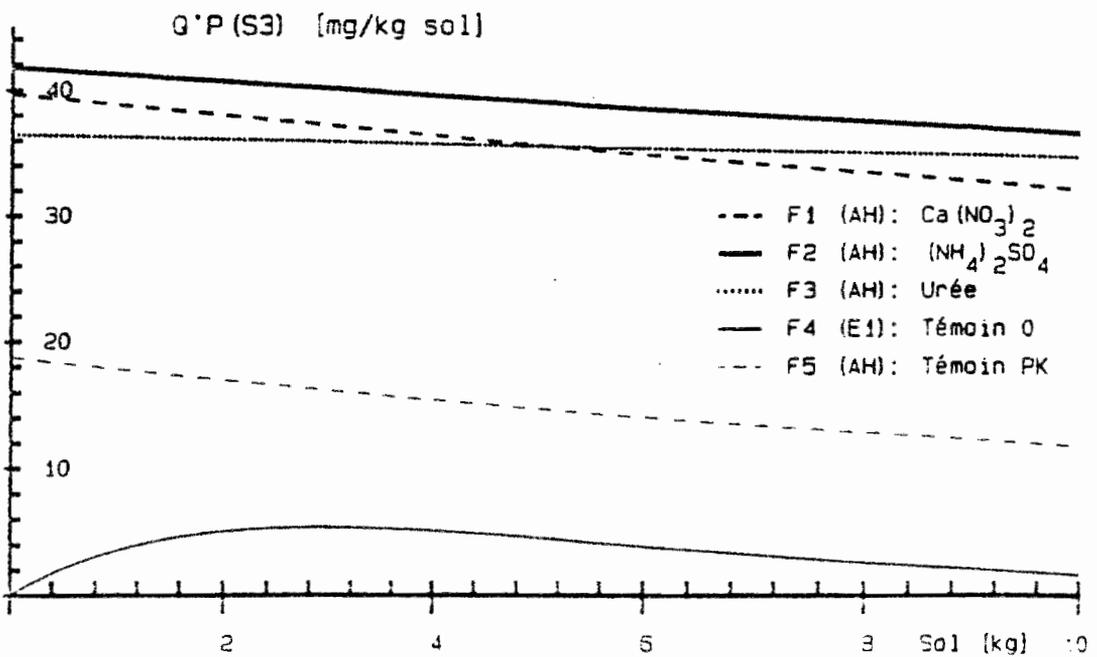
Exportation phosphore/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 60



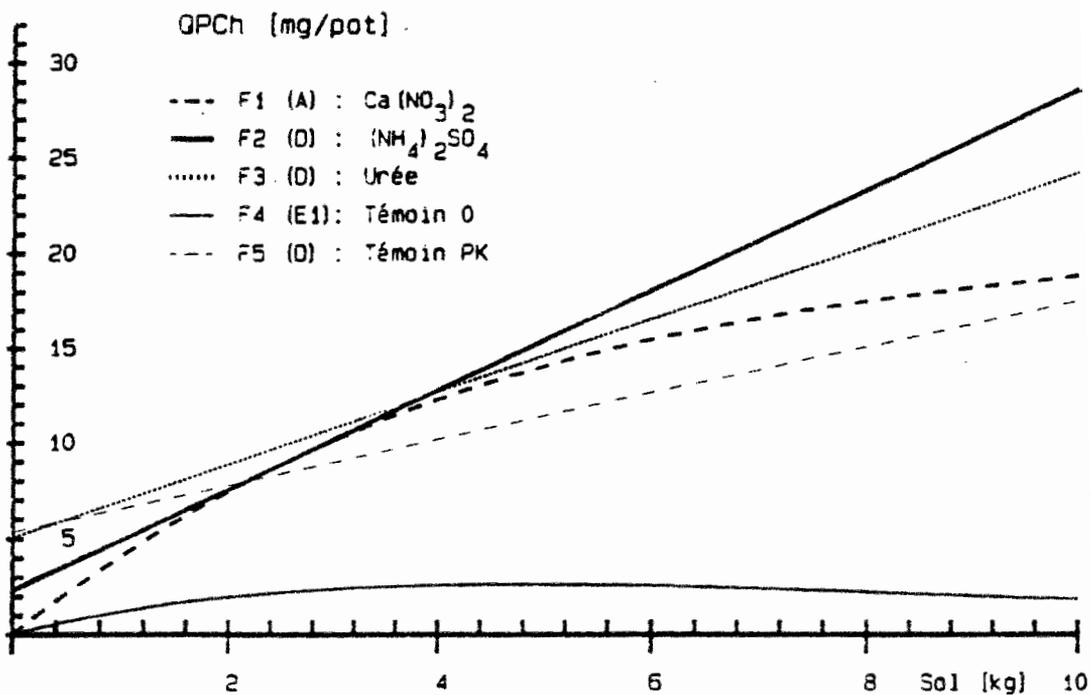
Exportation phosphore: 3 coupes (S3)

Figure 61



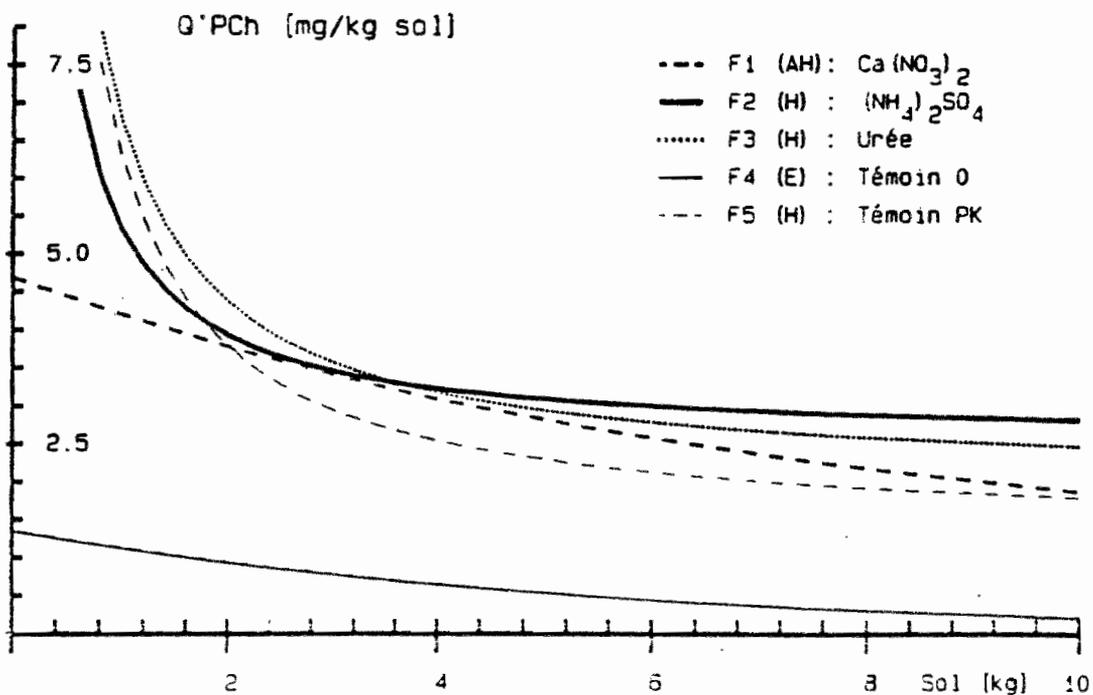
Exportation phosphore/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 62



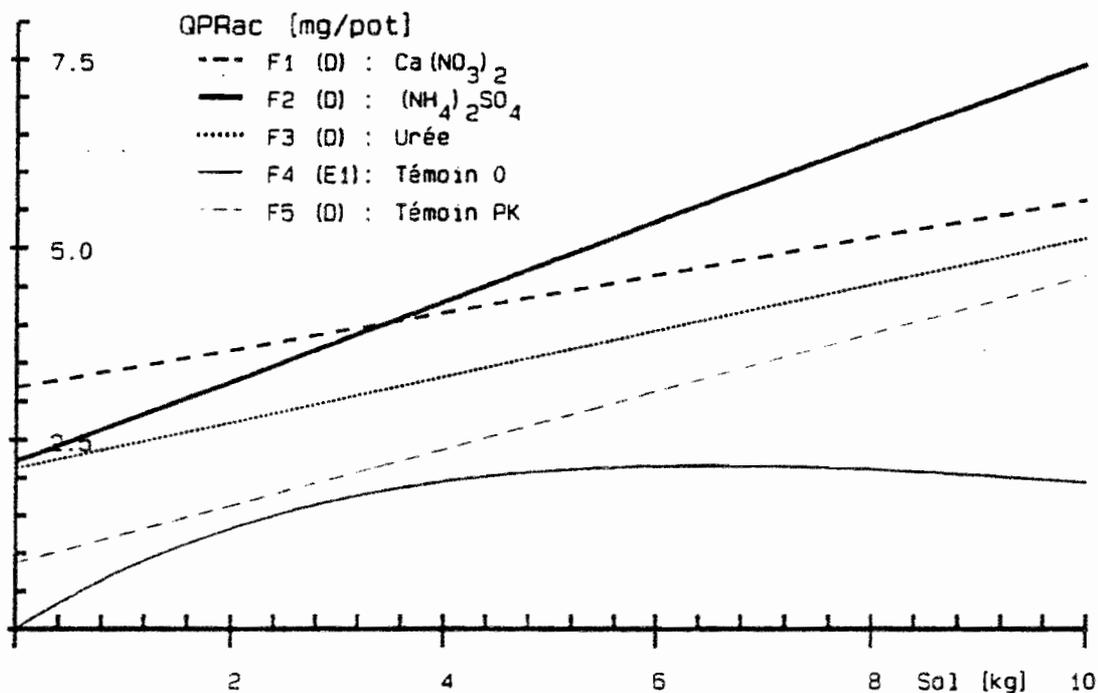
Immobilisation phosphore: chaumes

Figure 63



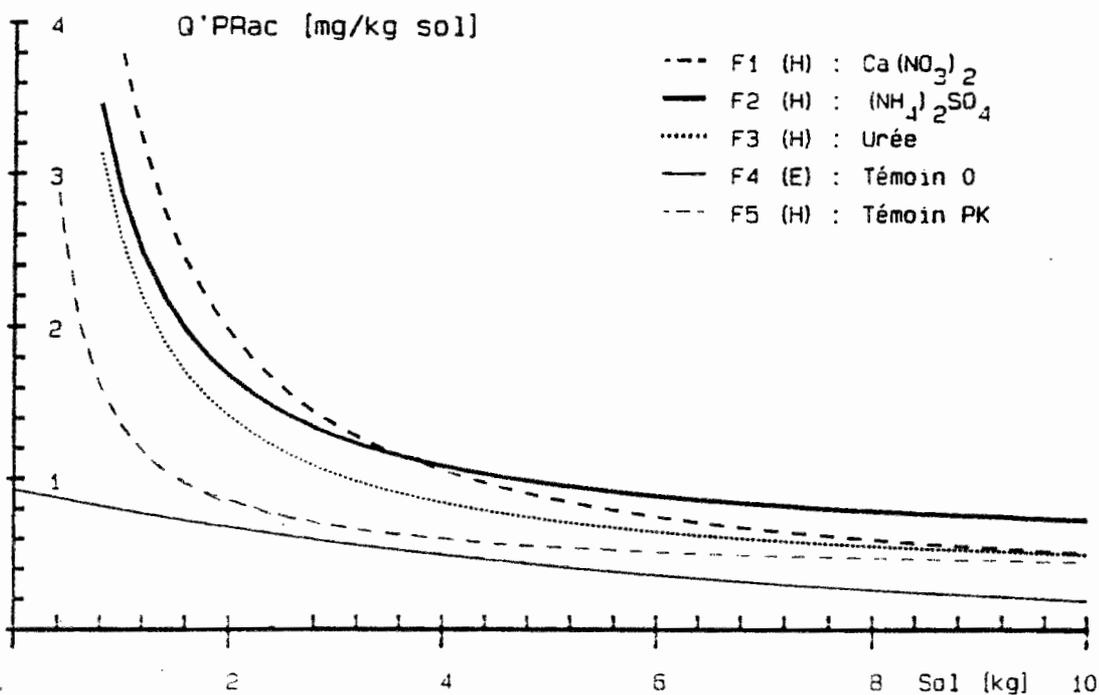
Immobilisation phosphore/kg sol: chaumes

Figure 64



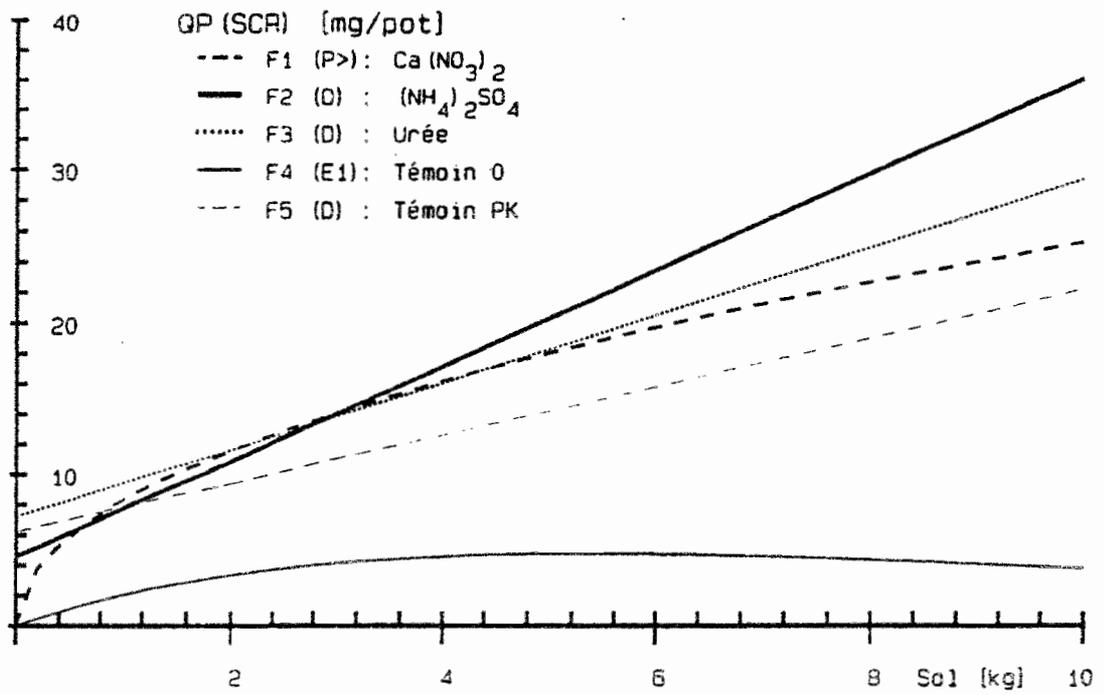
Immobilisation phosphore: racines

Figure 65



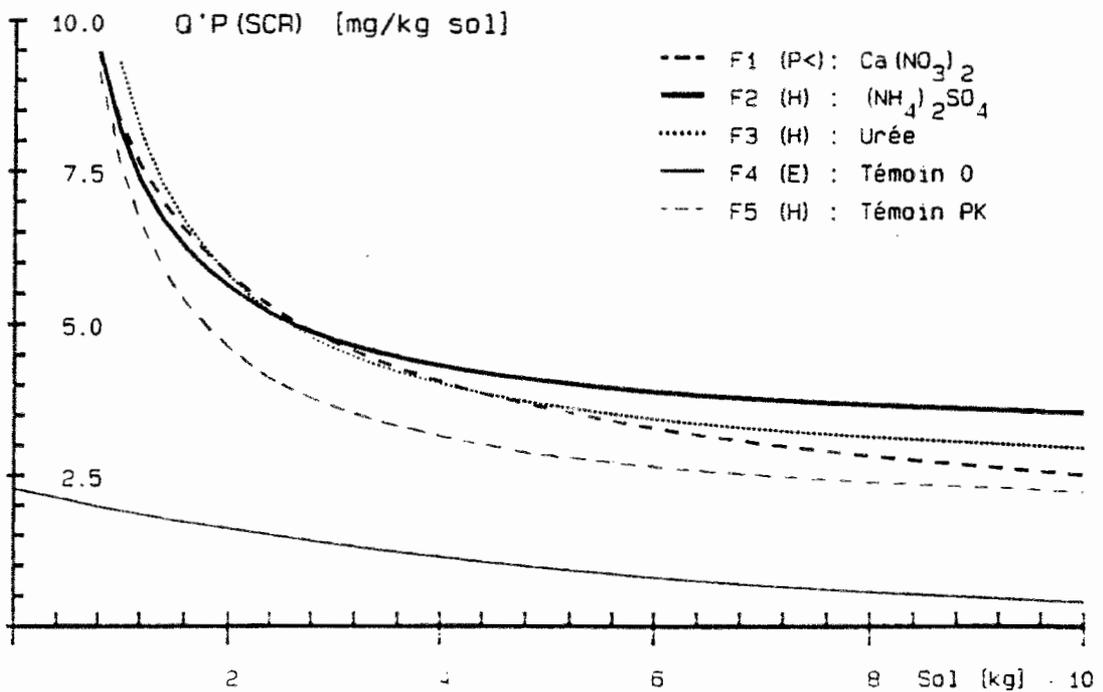
Immobilisation phosphore/kg sol: racines

Figure 66



Immobilisation phosphore: chaumes + racines (SCR)

Figure 67



Immobilisation phosphore/kg sol: chaumes+racines (SCR)

Figure 68

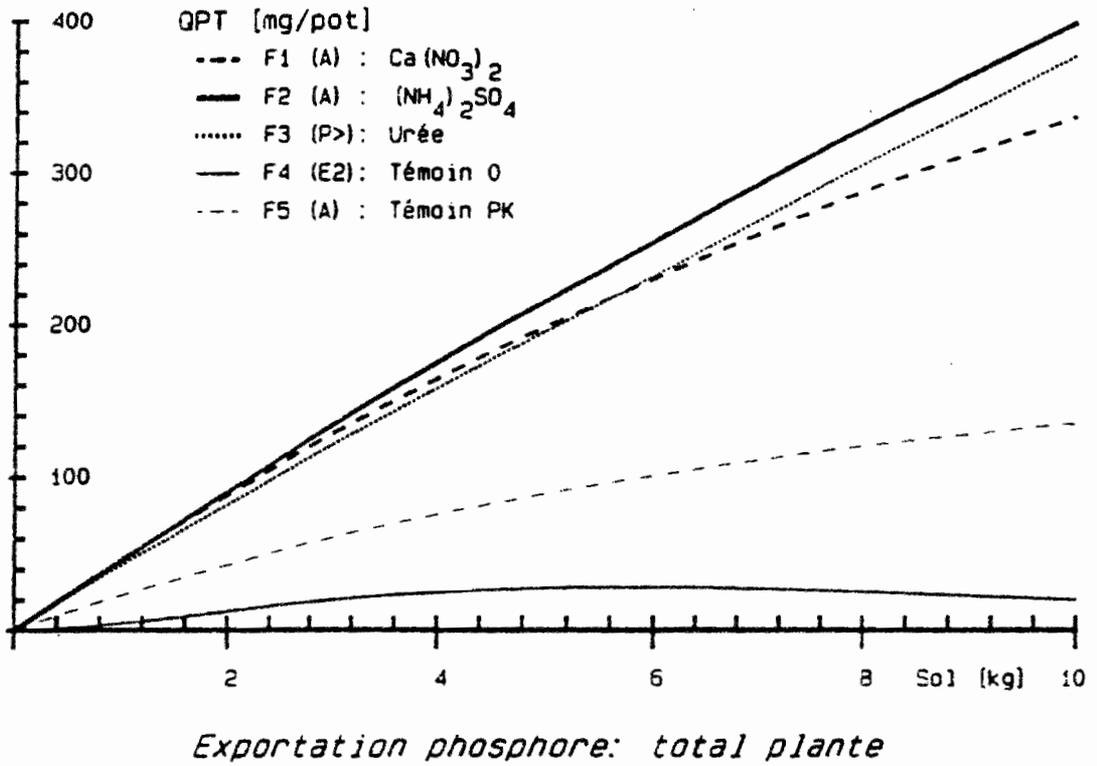


Figure 69

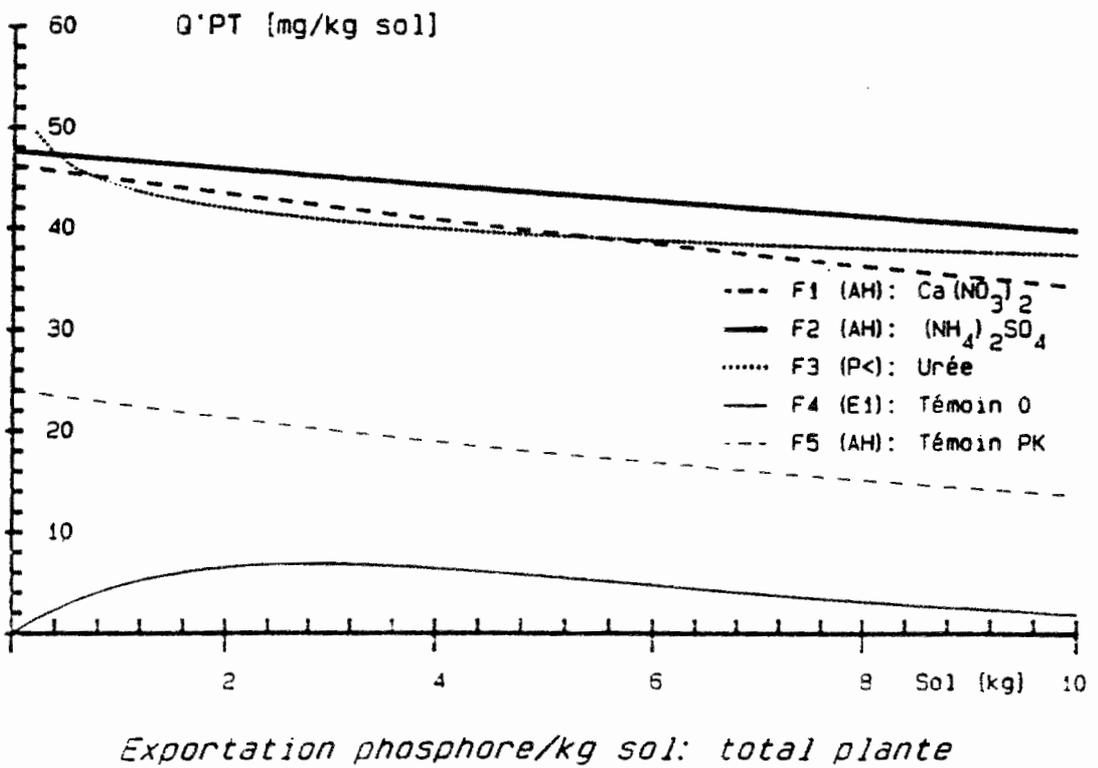


Figure 70

Pour la somme 2^{ème} + 3^{ème} coupes (figures 59 et 60), l'exportation du P est caractérisée par les fonctions "E₂ - E₁" pour les traitements F₁, F₃ et F₄, F₂ conserve les fonctions "A - AH" de la 1^{ère} coupe et pour F₅, les fonctions "E₁ - E" sont meilleures que "A - AH". Malgré des teneurs croissantes en P de V₁ à V₅ pour F₁ et F₃ à la 2^{ème} coupe, la fonction "E₂" est bien représentée pour les exportations de P, car dans ce cas, les exponentielles-asymptote ("A") caractérisant les rendements montrent que l'asymptote est très proche de la limite des 9 kg, et l'augmentation de la teneur entre V₄ et V₅ n'est pas suffisante pour compenser le palier asymptotique, d'où l'infléchissement pour les grands volumes de sol de la courbe "E₂". La fonction "E₂" n'apparaît pas aux exportations de P à la 2^{ème} coupe pour F₂ et F₅, car dans ces 2 cas, les courbes "A" relatives aux rendements ont leur palier asymptotique très au delà des 9 kg (= V₅), V₄ se distingue alors très nettement de V₅, et les exportations de P conservent les fonctions "A".

La somme des 3 coupes (figures 61 et 62) reflète comme toujours les fonctions représentatives de la 1^{ère} coupe, du fait de son importance par rapport aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes. Signalons que les Q'P des 3 coupes indiquent que F₁ et F₃ (homogènes à 100 %) présentent toujours des pentes non significatives, c'est-à-dire que le P a été prélevé, au niveau des pots, proportionnellement aux volumes de sol. Pour F₂, F₄, F₅, les pentes des Q'P sont significatives et décroissantes, indiquant que plus les volumes de sol augmentent, plus la quantité de P prélevé par kg de sol diminue.

On retrouve pour les chaumes + racines (figures 67 et 68) les fonctions "D - H", excepté pour F₄, qui conserve les fonctions "E₁ - E" des rendements, et F₁ les fonctions "P_> - P_<".

Notons que le P est nettement plus important dans les chaumes que dans les racines, et qu'inversement l'azote est mieux stocké dans les racines que dans les chaumes, comme nous le montre le tableau suivant :

chaumes - racines	F ₁ - F ₂ - F ₃	F ₄	F ₅
QP Ch. / QP Rac.	3,1	1,3	4,3
QN Rac. / QN Ch.	2,4	2,9	2,3

Au total (figures 69 et 70), les fonctions représentées à la 1^{ère} coupe se retrouvent pour les exportations totales de P, soit "A - AH" pour F₁, F₂, F₅, "P_> - P_<" pour F₃, et "E₂ - E₁" pour F₄, ces dernières ne se retrouveront dans le total des exportations que dans le cas du potassium. Bien que les erreurs relatives soient élevées (= 20 % pour QP), cette fonction nous montre que la graminée a des difficultés à prélever le P du vertisol, quand les conditions n'ont pas provoqué un développement particulièrement dense des racines. Dans le cas du témoin F₄, les exportations totales maximales de P se produiraient pour un pot de 5,8 kg de sol, alors que pour l'azote, l'asymptote de la fonction "A" serait atteinte pour 30 kg environ.

Notons que le traitement F₂ (avec un apport de sulfate d'ammonium) exporte plus de P que les traitements F₁ et F₃; ceci confirme le fait que l'ammonium favorise le prélèvement du P par la plante par rapport au nitrate. (BARBER S.A. - 1982).

3.5 LES EXPORTATIONS DE POTASSIUM

Un rappel des principaux rôles du potassium dans la plante nous permettra de mieux comprendre l'importance de cet élément, reconnu comme "maître - cation" (MARTIN-PREVEL P. - 1984) :

- sa mobilité fonctionnelle lui permet de jouer un rôle d'activateur général du métabolisme (rôle dans la balance acido-basique, et dans l'hydratation des colloïdes) ;

- il améliore la balance hydrique (en limitant la transpiration) et la balance hydrocarbonée ;

- il active plus ou moins presque toutes les enzymes in vivo, et favorise la synthèse des composés polymérisés. Il est un facteur essentiel de la mise en oeuvre de l'énergie dans la plante et intervient comme élément valorisateur des hautes intensités lumineuses ;

- enfin, il joue un rôle dans l'activation du transfert des métabolites, et dans les divisions cellulaires.

Les résultats expérimentaux du prélèvement du potassium par *Panicum* sont donnés dans le tableau VI.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 71 à 88.

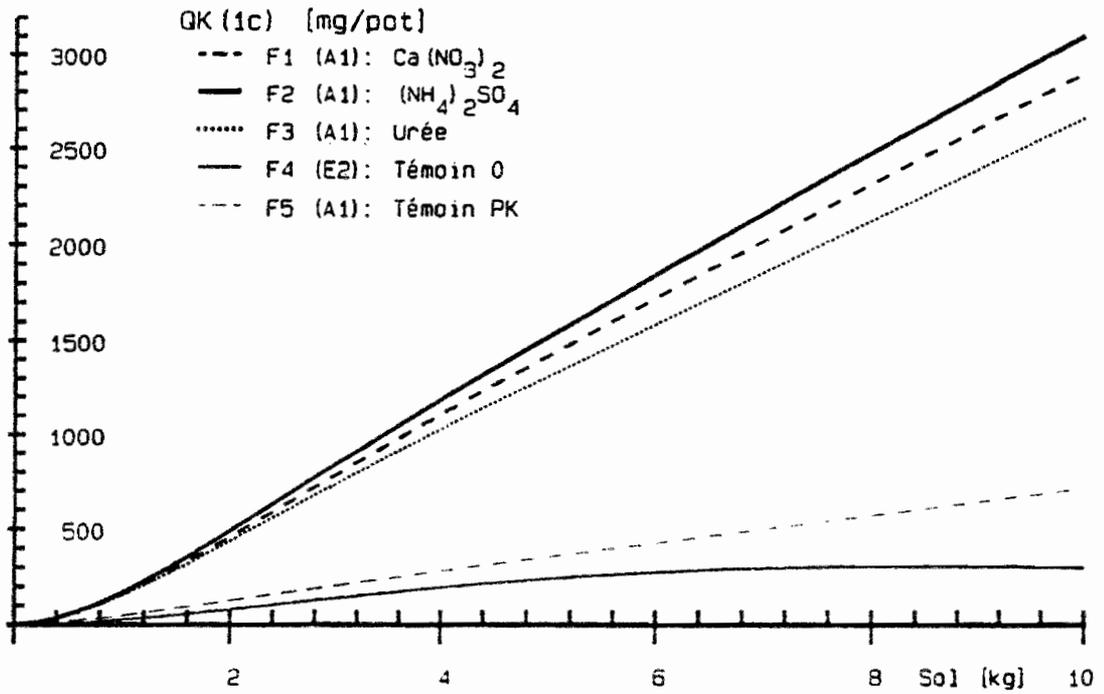
Le potassium est un élément très soluble, particulièrement apprécié par la graminée *Panicum*, et dont la consommation peut paraître aberrante.

Les fonctions relevées pour les exportations de K sont très proches de celles rencontrées pour les exportations d'azote total.

TABLEAU VI - PRELEVEMENT DU POTASSIUM PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

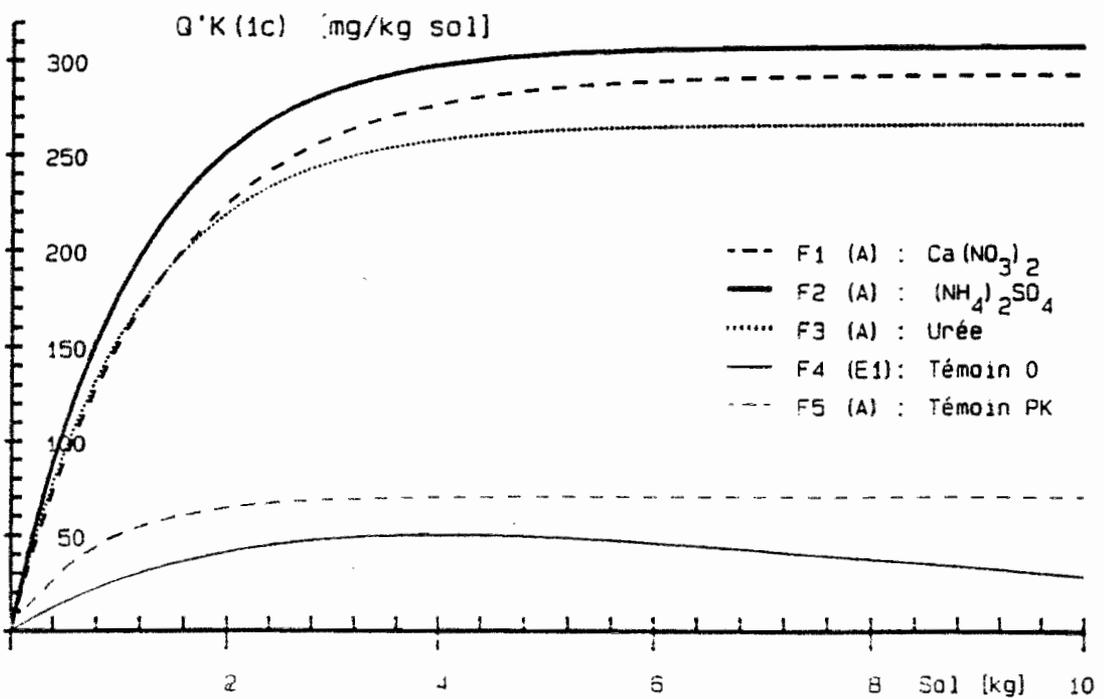
(Q = mg K par pot ; Q' = mg K par kg de sol)

Traitemts Volums	1 ^{ère} coupe		2 ^{ème} coupe		3 ^{ème} coupe		2 ^{ème} +3 ^{ème} coupes		1 ^{ère} + 2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	469,4	230,1	72,9	35,7	23,4	11,5	96,3	47,2	565,8	277,3	42,4	20,8	7,7	3,8	50,1	24,6	615,9	301,9
	V ₂	741,3	252,1	109,2	37,1	34,2	11,6	143,4	48,8	884,6	300,9	64,1	21,8	8,1	2,8	72,2	24,6	956,9	325,5
	V ₃	1302,7	280,7	137,2	29,6	45,4	9,8	182,6	39,4	1485,3	320,1	98,8	21,3	5,5	1,2	104,3	22,5	1589,5	342,6
	V ₄	2108,9	309,2	206,7	30,3	65,8	9,6	272,5	40,0	2381,3	349,2	128,8	18,9	6,5	1,0	135,4	19,8	2516,7	369,0
	V ₅	2490,1	278,2	257,3	28,8	79,0	8,8	336,3	37,6	2826,4	315,8	185,5	20,7	8,3	0,9	193,8	21,6	3020,2	337,5
F ₂	V ₁	524,8	257,2	82,0	40,2	23,5	11,5	105,5	51,7	630,3	309,0	29,2	14,3	7,9	3,9	37,1	18,2	667,4	327,2
	V ₂	825,3	280,7	109,1	37,1	30,0	10,2	139,1	47,3	964,4	328,0	42,8	14,6	8,9	3,0	51,7	17,6	1016,1	345,6
	V ₃	1361,8	293,5	165,2	35,6	47,3	10,2	212,6	45,8	1574,3	339,3	55,8	12,0	7,0	1,5	62,8	13,5	1637,1	352,8
	V ₄	2123,6	311,4	206,0	30,2	65,0	9,5	271,0	39,7	2394,6	351,1	90,9	13,3	6,6	1,0	97,5	14,3	2492,1	365,4
	V ₅	2772,5	309,8	269,7	30,1	89,5	10,0	359,2	40,1	3131,7	349,9	190,8	21,3	8,1	0,9	199,0	22,2	3330,7	372,1
F ₃	V ₁	458,6	224,8	73,9	36,2	23,3	11,4	97,2	47,6	555,8	272,5	46,7	22,9	3,9	1,9	50,6	24,8	606,4	297,2
	V ₂	705,3	239,9	98,3	33,4	33,4	11,4	131,7	44,8	837,0	284,7	80,2	27,3	5,9	2,0	86,1	29,3	923,1	314,0
	V ₃	1202,0	259,1	138,8	29,9	42,4	9,1	181,3	39,0	1383,3	298,1	95,0	20,5	5,2	1,1	100,2	21,6	1483,5	319,7
	V ₄	1878,0	275,4	206,8	30,3	65,4	9,6	272,2	39,9	2150,3	315,3	152,7	22,4	5,8	0,8	158,5	23,2	2308,8	338,5
	V ₅	2327,9	260,1	180,2	20,1	67,1	7,5	247,3	27,6	2575,2	287,7	190,5	21,3	7,7	0,9	198,1	22,1	2773,3	309,9
F ₄	V ₁	95,7	46,5	30,6	14,8	21,7	10,6	52,3	25,4	148,0	71,9	26,9	13,0	3,5	1,7	30,4	14,7	178,4	86,6
	V ₂	127,4	43,3	45,3	15,4	32,1	10,9	77,4	26,3	204,8	69,7	36,6	12,4	3,7	1,3	40,3	13,7	245,1	83,4
	V ₃	232,2	49,8	70,1	15,0	47,0	10,1	117,0	25,1	349,3	75,0	46,4	10,0	4,9	1,1	51,4	11,0	400,6	86,0
	V ₄	283,8	41,4	101,5	14,8	59,6	8,7	161,1	23,5	444,9	64,9	51,5	7,5	4,1	0,6	55,6	8,1	500,5	73,1
	V ₅	311,2	34,6	96,3	10,7	43,0	4,8	139,2	15,5	450,4	50,0	49,7	5,5	3,6	0,4	53,3	5,9	503,7	56,0
F ₅	V ₁	135,8	65,9	32,7	15,9	24,1	11,7	56,8	27,6	192,7	93,5	33,5	16,3	3,7	1,8	37,3	18,1	229,9	111,6
	V ₂	192,4	65,4	48,8	16,6	37,0	12,6	85,7	29,2	278,1	94,6	41,3	14,1	4,5	1,5	45,8	15,6	323,9	110,2
	V ₃	324,8	69,7	78,8	16,9	57,3	12,3	136,1	29,2	460,9	98,9	55,8	12,0	6,2	1,3	62,0	13,3	522,9	112,2
	V ₄	497,1	72,6	110,8	16,2	78,9	11,5	189,6	27,7	686,7	100,2	72,2	10,5	8,4	1,2	80,5	11,8	767,2	112,0
	V ₅	633,2	70,4	123,3	13,7	86,5	9,6	209,7	23,3	842,9	93,7	107,7	12,0	10,6	1,2	118,3	13,1	961,2	106,8



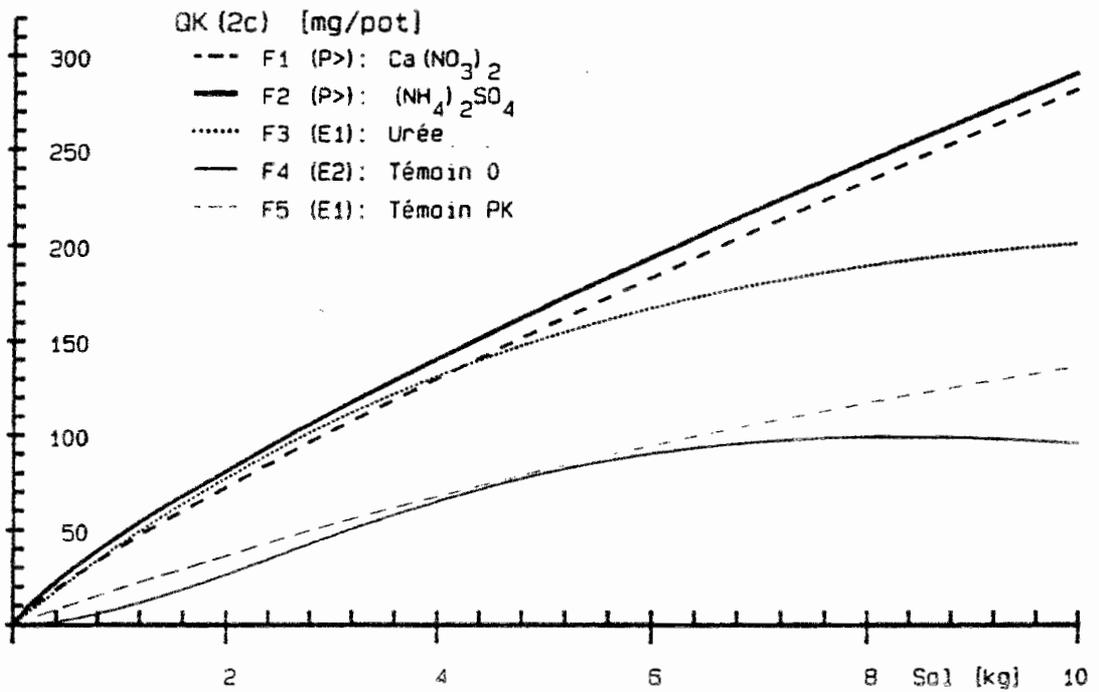
Exportation potassium: 1ère coupe

Figure 71



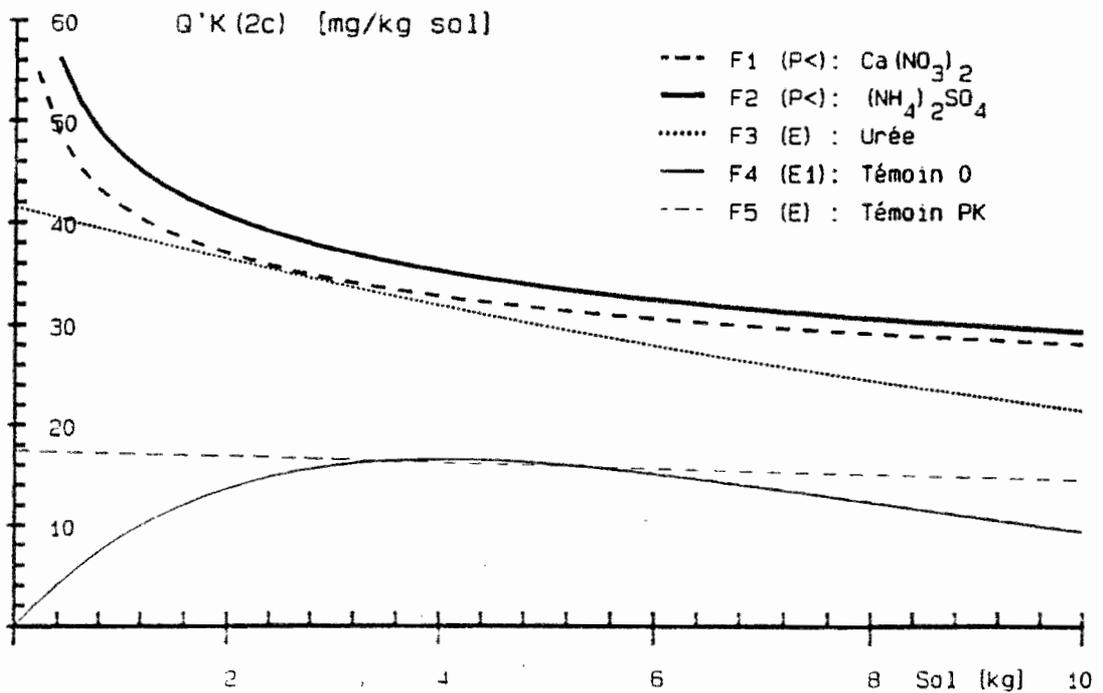
Exportation potassium/kg sol: 1ère coupe

Figure 72



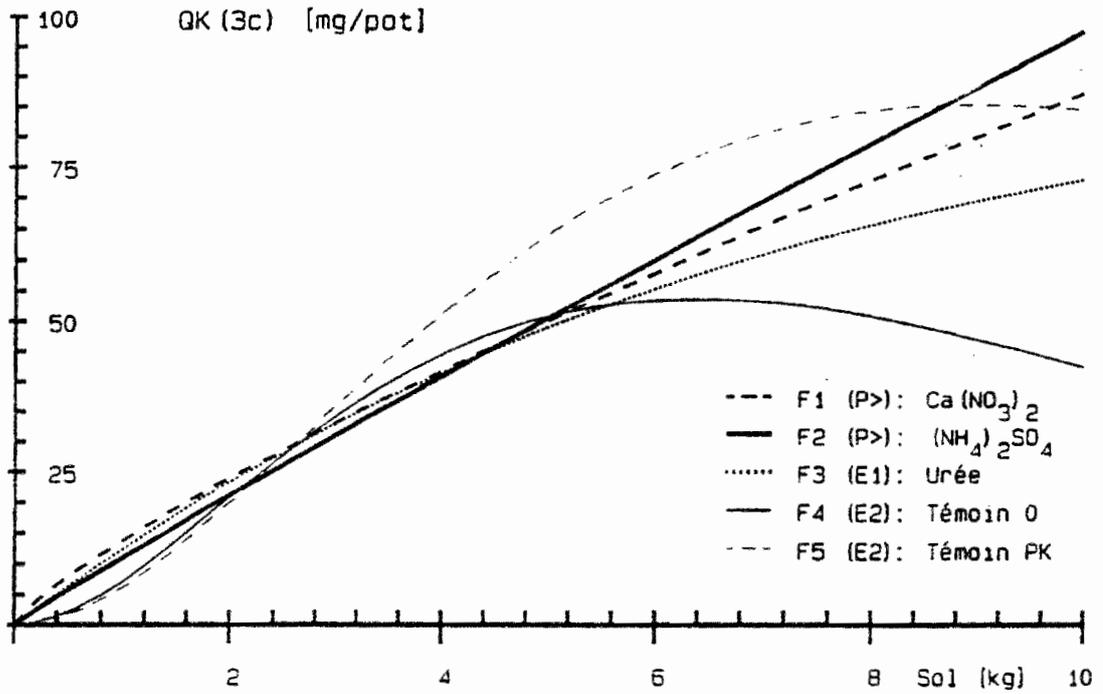
Exportation potassium: 2ème coupe

Figure 73



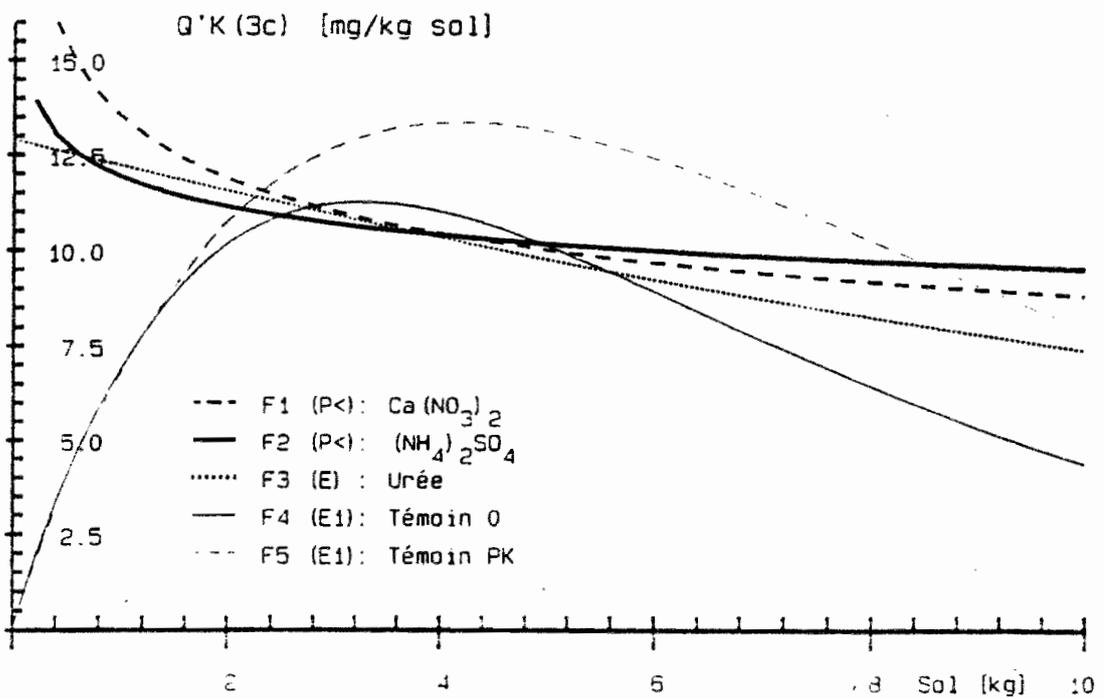
Exportation potassium/kg sol: 2ème coupe

Figure 74



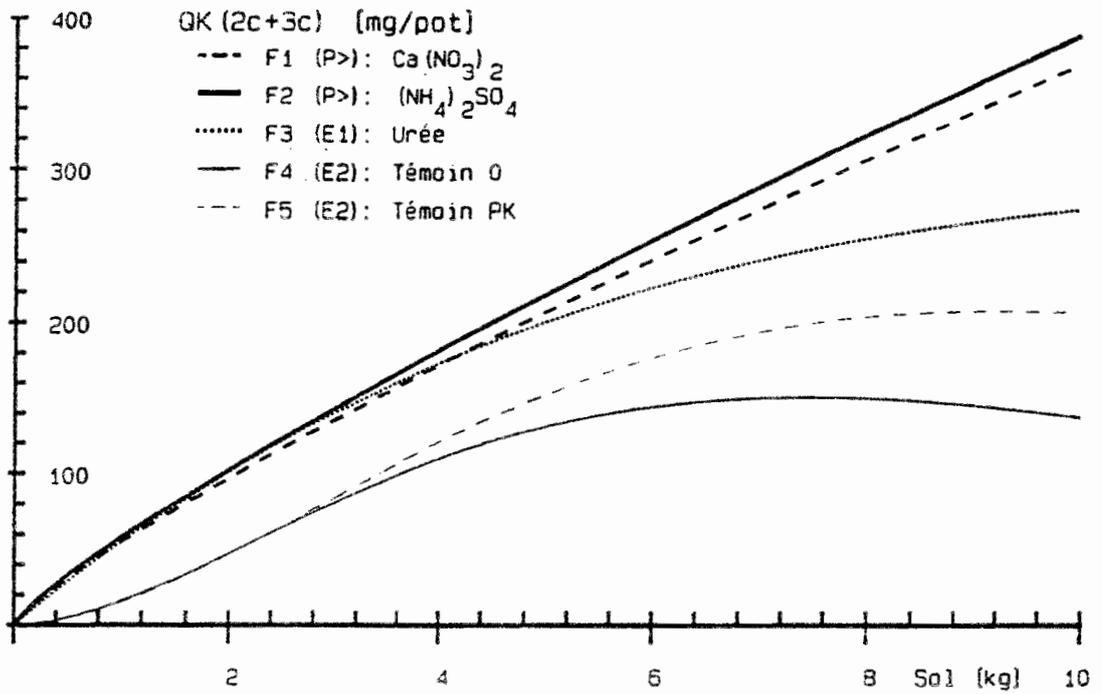
Exportation potassium: 3ème coupe

Figure 75



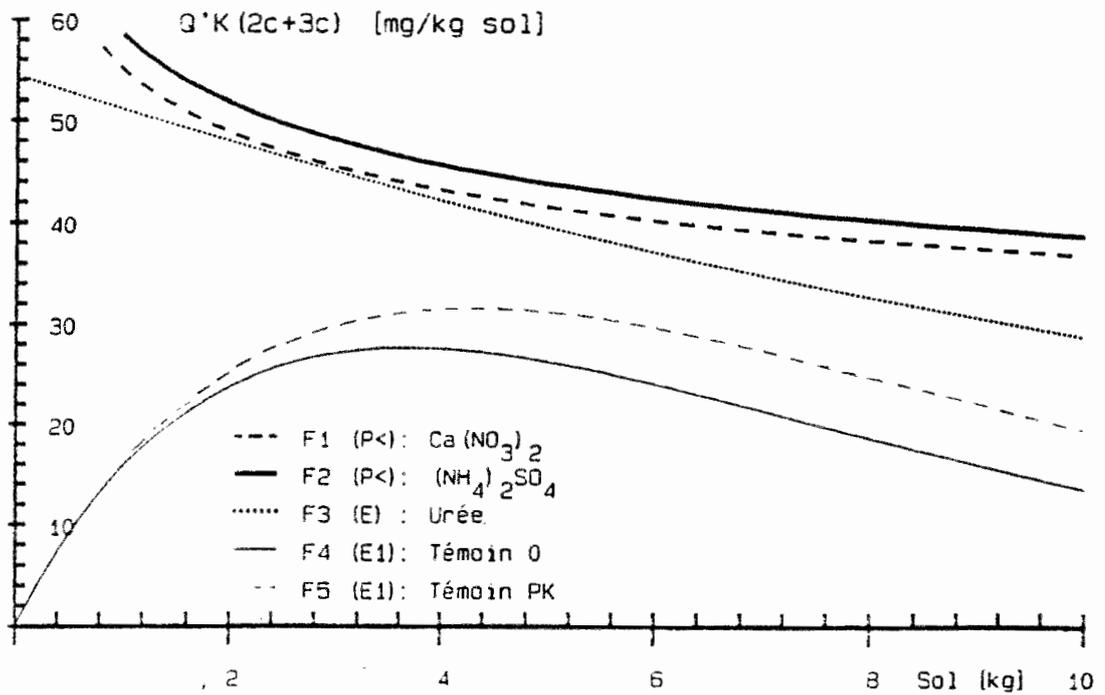
Exportation potassium/kg sol: 3ème coupe

Figure 76



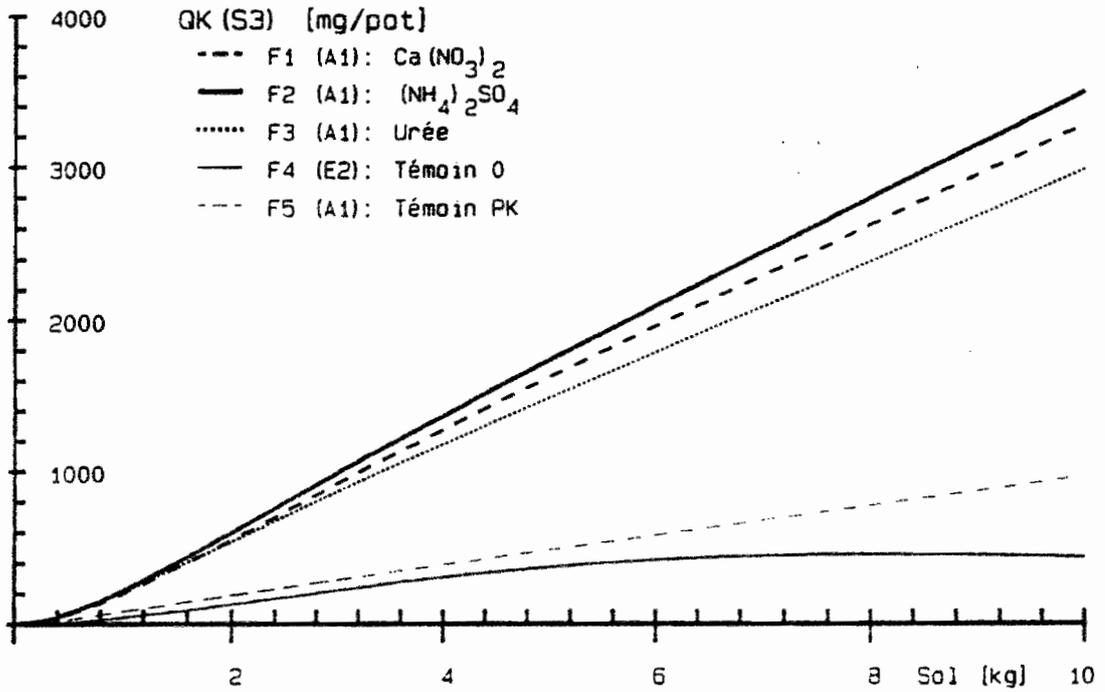
Exportation potassium: 2ème + 3ème coupes

Figure 77



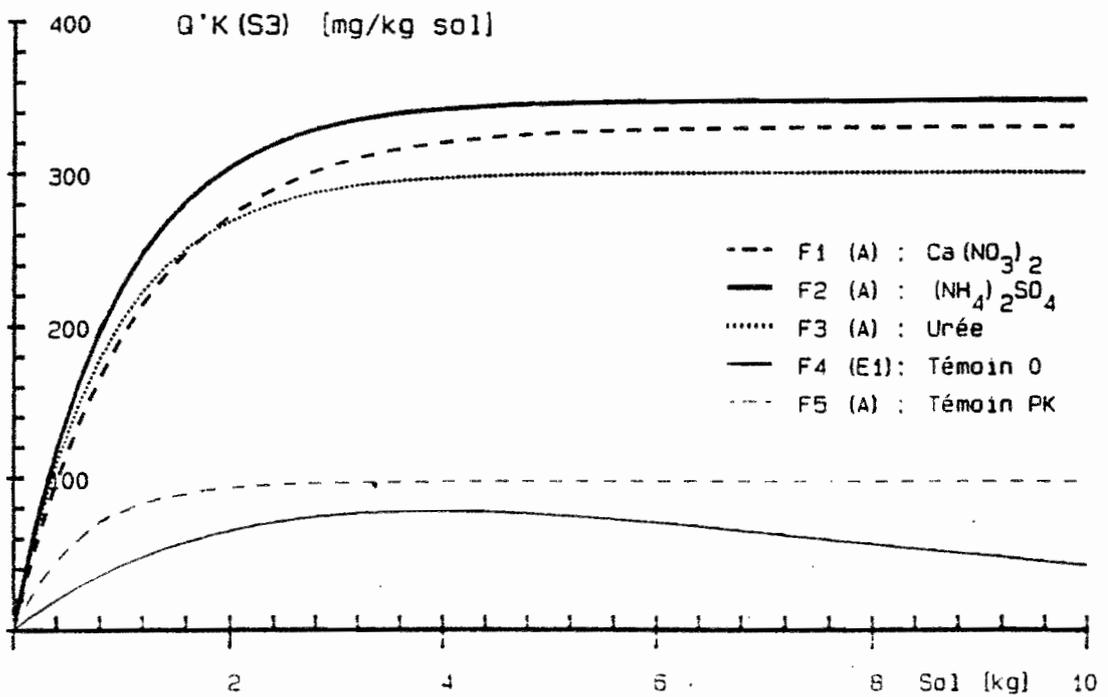
Exportation potassium/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 78



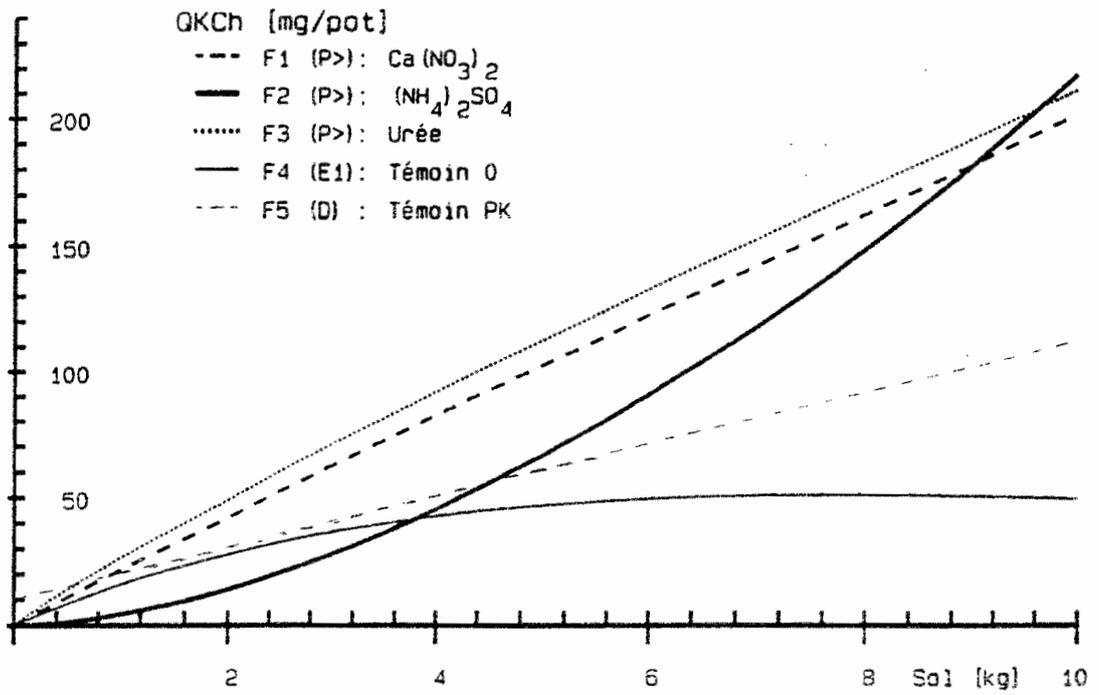
Exportation potassium: 3 coupes (S3)

Figure 79



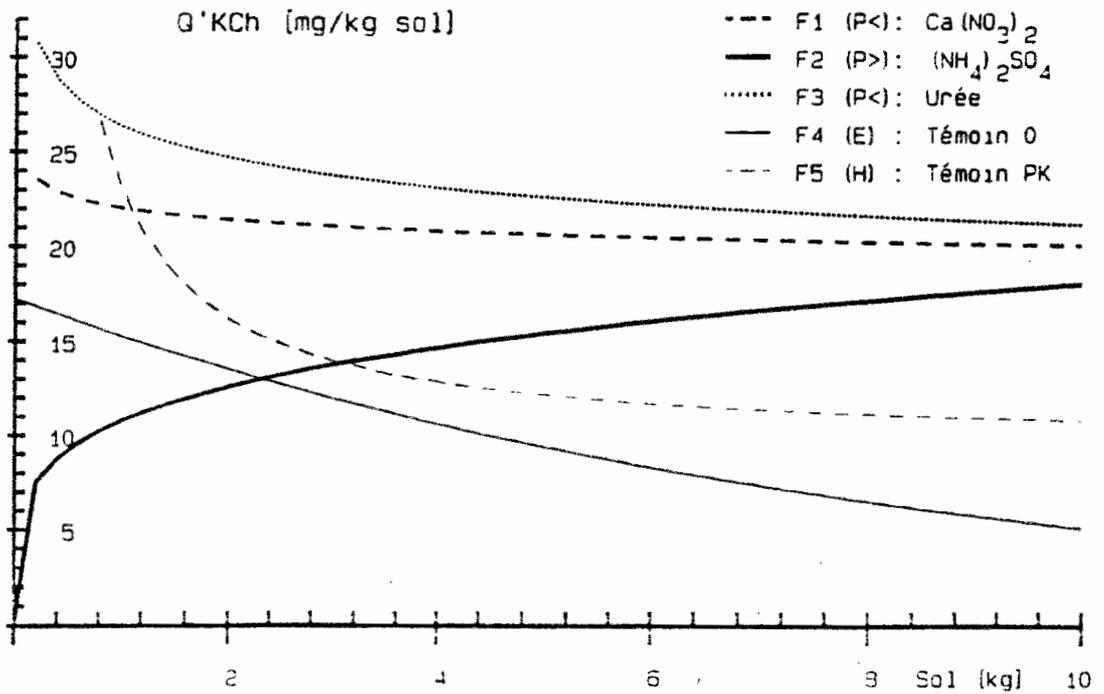
Exportation potassium/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 80



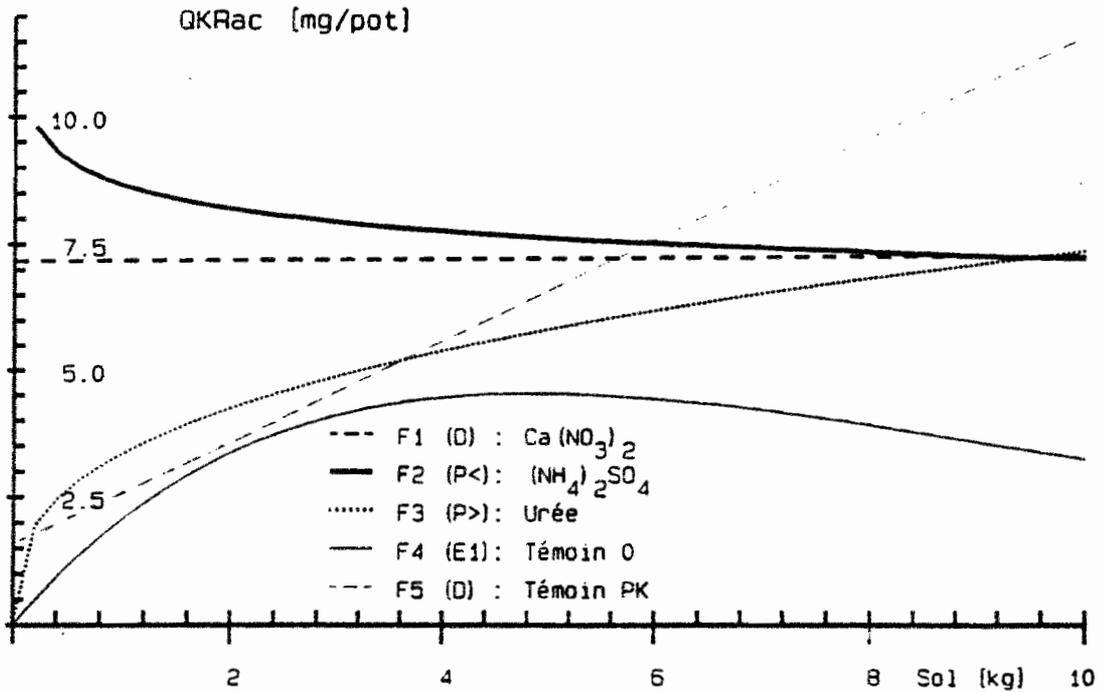
Immobilisation potassium: chaumes

Figure 81



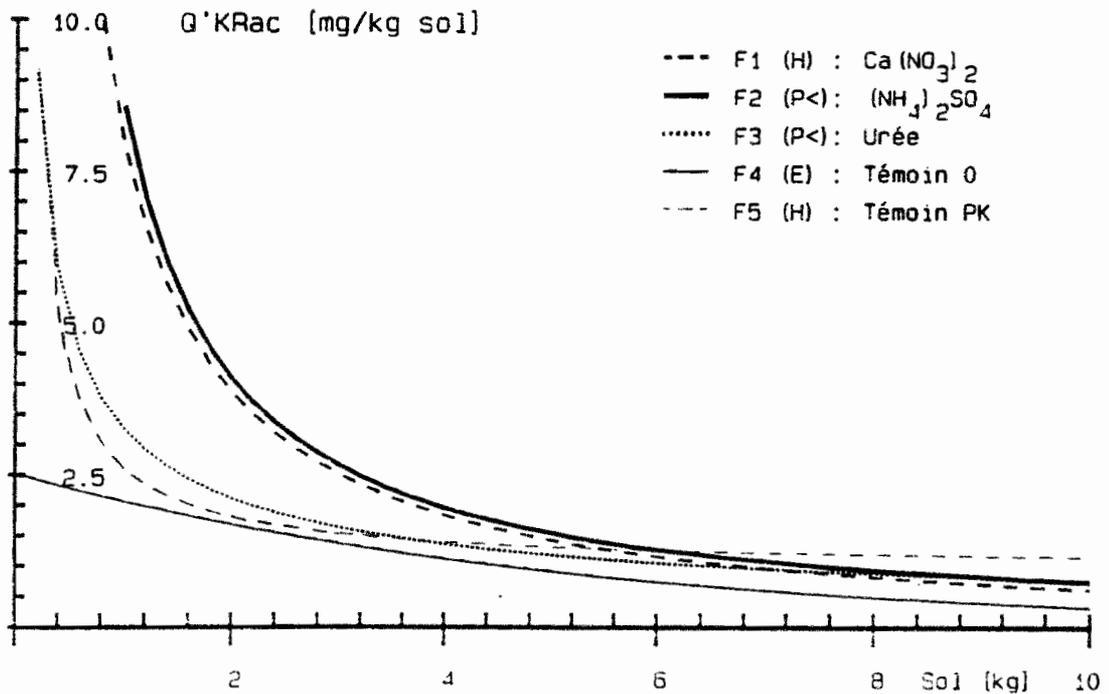
Immobilisation potassium/kg sol: chaumes

Figure 82



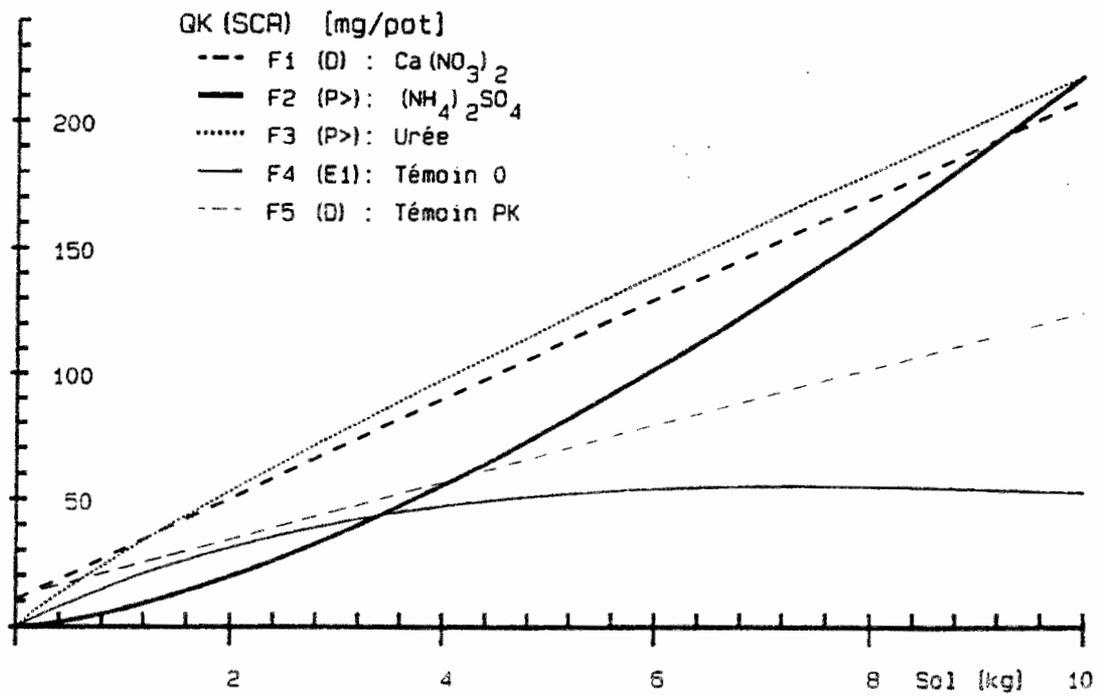
Immobilisation potassium: racines

Figure 83



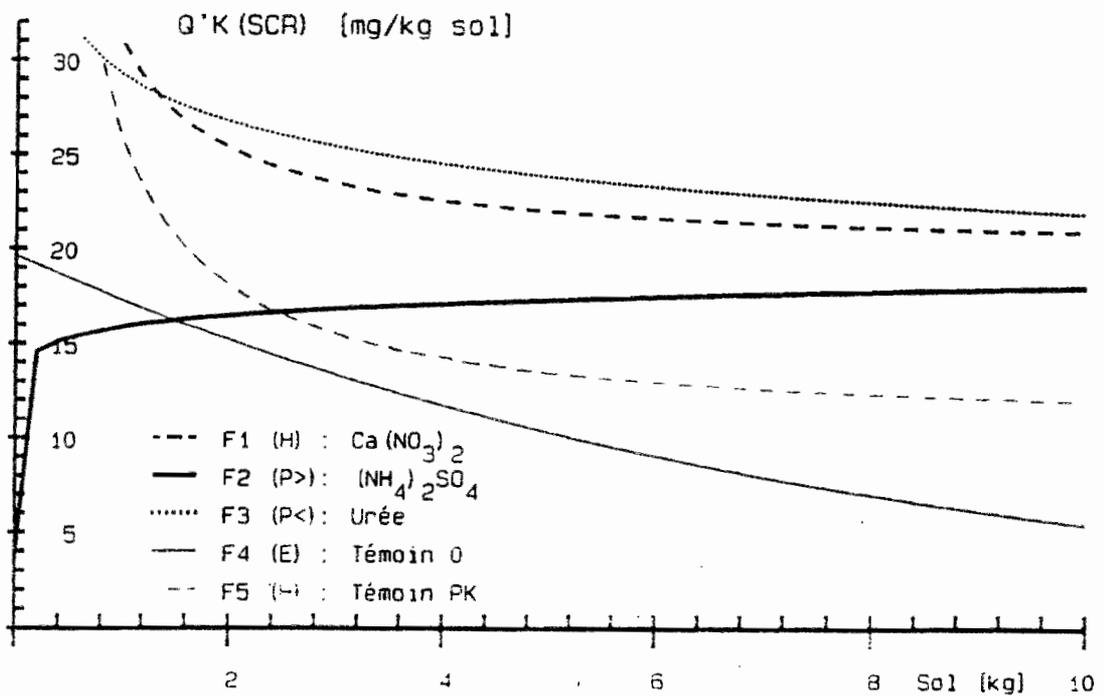
Immobilisation potassium/kg sol: racines

Figure 84



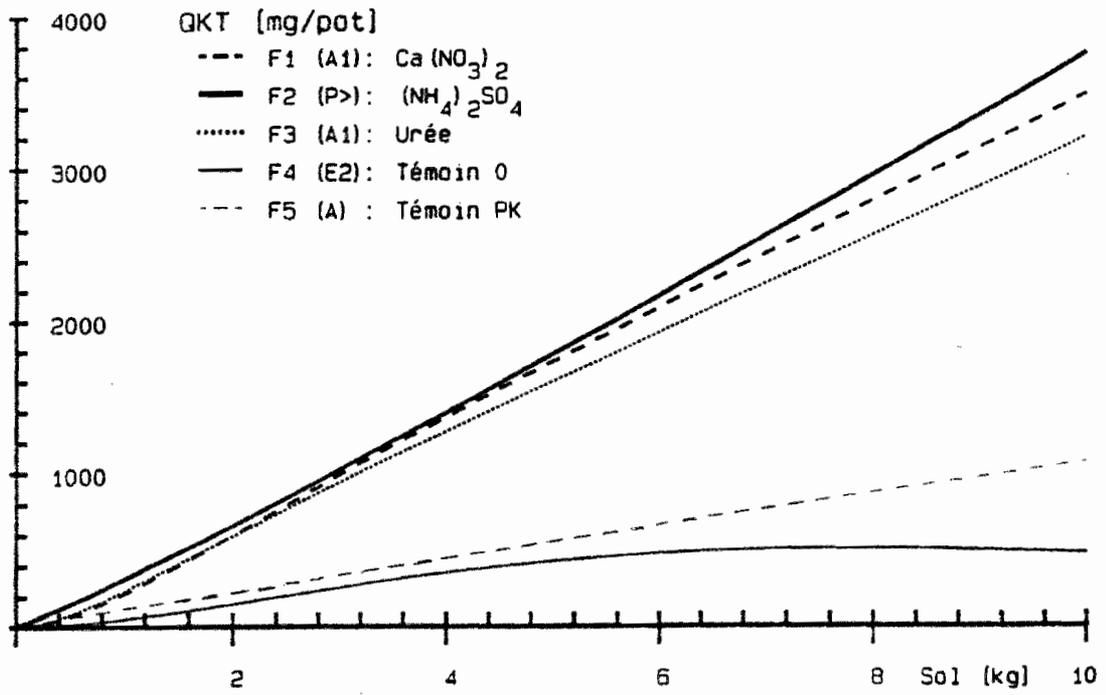
Immobilisation potassium: chaumes + racines (SCR)

Figure 85



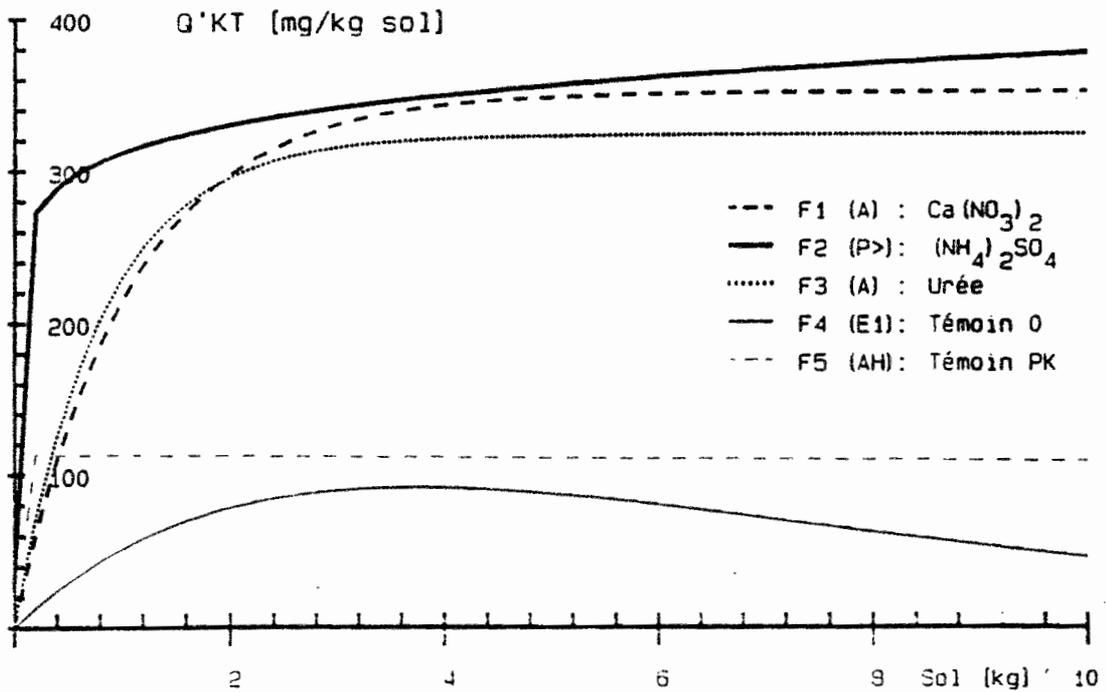
Immobilisation potassium/kg sol: chaumes+racines (SCR)

Figure 86



Exportation potassium: total plante

Figure 87



Exportation potassium/kg sol: total plante

Figure 88

Pour la 1^{ère} coupe (figures 71 et 72), nous retrouvons les fonctions "A₁ - A" pour F₁, F₂, F₃, F₅, alors que pour F₄, les fonctions "E₂ - E₁" apparaissent dès la 1^{ère} coupe comme dans le cas du phosphore (avec toutefois un certain décalage, l'amorce de la décroissance de la courbe "E₂" ne s'effectuant qu'à partir de 8,5 kg de sol pour K, alors qu'elle s'effectuait à partir de 6 kg pour P). A la 1^{ère} coupe, nous constatons que les teneurs en K des "tiges + feuilles" des traitements F₁, F₂, F₃, F₅ sont très voisines, et augmentent d'environ 33 % de V₁ à V₅ : ceci explique que les exportations en K soient représentées par les fonctions "A₁ - A". Comme dans le cas de l'azote, le témoin F₄ a une teneur moyenne en K égale à celle des autres traitements, mais ici les 4 traitements ont reçu un engrais potassique ; la différence avec F₁, F₂, F₃, F₅, apparaît dans la variation en fonction des volumes de sol : pour F₄, la teneur est identique de V₁ à V₅, la droite la représentant est donc parallèle à l'axe des abscisses, c'est pourquoi la fonction "E₂" est représentative des exportations de K dès la 1^{ère} coupe, car les teneurs de V₄ et V₅ sont quasiment identiques.

Précisons que les teneurs en K dans le cas du témoin F₄ se maintiennent égales à celles des autres traitements pour les 2^{ème} et 3^{ème} coupes, les chaumes et les racines : mais les droites les représentant sont toujours légèrement décroissantes de V₁ à V₅.

Le fait que le témoin F₄ ait les mêmes teneurs que le témoin F₅ ayant reçu l'engrais potassique nous montre l'extrême disponibilité et mobilité du K du sol, qui paraît se comporter comme celui d'un engrais potassique, alors que pour le phosphore, nous avons observé un décalage très important entre le prélèvement du P du sol par la plante, et celui en provenance des engrais.

Pour les 2^{ème} + 3^{ème} coupes (figures 77 et 78), et bien que les teneurs en K des tiges et feuilles augmentent avec les volumes de sol pour F₁, F₂, F₃ et F₅, les Q' sont représentés par des fonctions décroissantes (au fur et à mesure que les volumes de sol augmentent) : la fonction "P_<" pour F₁, F₂, la fonction "E" pour F₃ et la fonction "E₁" pour F₄ et F₅. Ceci s'explique par le fait que les fonctions "A" représentatives des rendements sont très courbes (avec l'asymptote proche de V₅) et l'augmentation des teneurs en fonction des volumes peu importante. Pour F₄, on remarque que la fonction "E₁" représentant le rendement de la somme 2^{ème} + 3^{ème} coupes, présente le même maximum à 3,8 kg que la fonction "E₁" représentant l'exportation du K aux 2^{ème} + 3^{ème} coupes. Dans le cas de F₅, malgré l'apport de K, le manque d'azote a fortement entravé le prélèvement du K.

Le potassium exporté par *Panicum* par les **3 coupes** (figures 79 et 80) répond aux mêmes fonctions que l'exportation du K à la 1^{ère} coupe :

"A₁ - A" pour F₁, F₂, F₃, F₅, et "E₂ - E₁" pour F₄, mais si pour F₁ et F₂, la fonction "A" rend compte d'une augmentation du K exporté par kg de sol quand les volumes de sol augmentent, cela n'est plus vrai pour F₃ : dans ce cas, ainsi que pour F₅, la quantité de K exporté par unité de volume, peut être considérée comme identique pour tous les volumes de sol ; par contre, celle du témoin F₄ diminue quand les volumes de sol augmentent.

Il est évident que dans toutes ces interprétations, les différentes fonctions ne doivent être prises en compte qu'à partir de 2 kg de sol, premier volume de sol représentatif de la série testée des 5 volumes. C'est pourquoi, même une fonction "A" caractérisant des Q' peut avoir une pente non significative (à partir de 2 kg de sol).

Les racines ne contiennent pour ainsi dire pas de K, aussi les erreurs relatives dépassent-elles souvent 50 % ; mais les chaumes immobilisent le K, et cette quantité est voisine de celle exportée par la moyenne de la somme 2^{ème} + 3^{ème} coupes. Les fonctions représentatives de l'immobilisation du K dans les chaumes sont assez disparates (figures 81 et 82): les fonctions puissance "P_> - P_<" se retrouvent souvent (pour F₁, F₂, F₃), mais aussi les fonctions "D - H" pour F₅, et les fonctions "E₁ - E" pour F₄, car pour F₄ les teneurs diminuent fortement de V₁ à V₅. Seul le traitement F₂ présente une augmentation de l'immobilisation du K par kg de sol par les chaumes au fur et à mesure que les volumes de sol augmentent. Pour F₁ et F₃, ces immobilisations ne varient pas avec les volumes de sol, mais pour les 2 témoins F₄ et F₅, elles diminuent quand les volumes de sol augmentent.

Au total, nous retrouvons presque les mêmes fonctions qu'à la 1^{ère} coupe (figures 87 et 88):

- les fonctions "A₁ - A" pour F₁ et F₃, mais aussi "P_> - P_>" pour F₂, nous indiquant que le K est très facilement exporté, d'autant plus que les volumes de sol sont plus importants ;

- les fonctions "E₂ - E₁" pour F₄ : nous montrant au contraire qu'il y a une limite au prélèvement du K du sol par la plante, surtout pour les volumes de sol les plus importants ; l'estimation d'une teneur moyenne en K de la plante, montre que les teneurs varient très peu avec les volumes de sol ;

- les fonctions "A - AH" apparaissent comme les meilleures pour F₅, malgré l'apport important de K, son prélèvement et son exportation sont très limités par manque d'azote.

Pour les traitements F_3 et F_5 , les courbes représentant les Q' n' ont pas une pente significative, autrement dit, le potassium total exporté par kg de sol ne varie pas avec les volumes de sol.

Nous pouvons estimer la consommation de potassium du sol, en comparant les traitements F_2 , F_4 et F_5 , sachant que l'apport potassique par l'engrais a été de 200 mg K par kg de sol, et que le potassium échangeable de ce vertisol est de 6,9 meq %, soit 270 mg K par kg de sol.

Le tableau suivant nous montre le pourcentage du K du sol prélevé, en estimant que le K de l'engrais a été entièrement "utilisé" avant celui du sol, dans le cas de F_2 . Ces pourcentages concernent les exportations de K de la 1^{ère} coupe, et les exportations totales de K. Les pourcentages concernant F_5 représenteront le K de l'engrais.

K % prélevé par la plante

	K prélevé	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
1 ^{ère} coupe						
$F_2 A$	sol	20,1	30,8	37,8	39,6	39,8
$F_4 E_1$	sol	15,5	17,8	18,4	15,8	12,2
$F_5 A$	engrais	32,3	34,2	35,1	35,2	35,2
Total plante						
$F_2 P_2$	sol	48,6	52,3	57,1	61,3	64,3
$F_4 E_1$	sol	29,4	33,1	33,0	26,9	19,9
$F_5 AH$	engrais	56,0	55,8	55,4	54,9	54,4

A la 1^{ère} coupe, dans le cas de F_2 , non seulement la plante a "utilisé" tout le K de l'engrais, mais elle a déjà prélevé près de 40 % du K échangeable du sol, pour les volumes de sol les plus importants. On peut estimer que l'apport d'engrais potassique en présence d'engrais azoté a fortement stimulé le prélèvement du K du sol, peut-on parler dans ce cas de "consommation de luxe" ? alors que les teneurs en K de F_2 ne dépassent celles de F_4 que pour les volumes V_3 , V_4 , V_5 .

Dans le cas du témoin F_4 , le maximum prélevé n'atteint pas 20 % ; quant à F_5 , qui a reçu de l'engrais potassique, il n'utilise au mieux que 35 % de cet engrais à la 1^{ère} coupe.

Au total, F_2 prélève de 49 % pour V_1 à 64 % pour V_5 du K éch. du sol, F_4 prélève au maximum 33 % pour $V_2 - V_3$, et au maximum 20 % pour V_5 . Au total, F_5 n'aura prélevé en moyenne que 55 % de l'engrais potassique.

Au maximum, F_2V_5 aura exporté 4,4 meq de K éch. sur les 6,9 présents dans le sol, alors que F_2V_1 aura exporté au maximum 3,8 meq de N sur les 92 meq présents dans le sol. La grande mobilité et assimilabilité du K du sol semble indéniable, en comparaison de celle de l'azote du sol.

Dans le cas du traitement F_2 , les exportations du K du sol croissent quand les volumes de sol augmentent, mais les exportations de l'azote du sol diminuent quand les volumes de sol augmentent ; par contre, les exportations de l'azote-engrais augmentent fortement avec les volumes de sol.

Cette surconsommation est en partie attribuable à deux des rôles signalés en début de chapitre :

- cet essai en serre a été réalisé en pleine saison chaude, d'où une consommation en K pour lutter contre la transpiration,

- et d'autre part la très forte insolation augmente le besoin interne en K, "car le végétal est appelé à exploiter une quantité supérieure d'énergie radiante" (MARTIN-PREVEL P. - 1984).

Le K a la caractéristique de s'exporter fortement par les tiges et feuilles de *Panicum*, et de s'immobiliser très peu dans les chaumes (6 à 7 % par rapport au total), et encore moins dans les racines.

Dès la 1^{ère} coupe, une partie du K du sol est déjà utilisée par la plante pour les grands volumes de sol, sans que des variations de teneurs apparaissent, ce qui fait dire que le K de l'engrais et celui du sol ont la même mobilité et assimilabilité, puisqu' apparemment les réactions de la plante sont identiques pour l'un et pour l'autre.

Exprimée par rapport à l'exportation totale de K, l'importance de l'apport azoté sur cette exportation se chiffre ainsi dans le cas de F_2 ($Q'TKF_2 - Q'TKF_5$) :

$$V_1 = 65,8 \% \quad V_2 = 67,3 \% \quad V_3 = 68,7 \% \quad V_4 = 69,9 \% \quad V_5 = 70,9 \%$$

L'apport azoté pourrait être considéré comme responsable des exportations et immobilisations du K pour plus des 2/3 (de 66 à 71 % suivant les volumes de sol) pour le traitement F_2 .

3.6 LES EXPORTATIONS DE CALCIUM

Afin de mieux suivre le prélèvement du calcium par la plante, rappelons quelques notions de base (MARTIN-PREVEL P. - 1984) :

- le calcium dans la plante est extrêmement peu mobile, il ne se déplace que dans le sens ascendant ; son absorption et ses mouvements sont foncièrement passifs ;

- il a un rôle antitoxique (entre autre à l'égard de K), mais surtout il a un rôle plastique dans la formation des parois cellulaires ;

- il est également nécessaire à l'élasticité des jeunes cellules, c'est pourquoi sa carence se manifeste sur les organes jeunes ;

- il intervient aussi pour le fonctionnement d'un nombre croissant d'enzymes.

Le vertisol de Nouvelle-Calédonie testé a la particularité d'être "équilibré", c'est-à-dire que son taux de Ca éch. (39,7 meq %) est égal à celui du Mg éch. (36,0 meq %) ; de nombreux sols calédoniens peuvent avoir 5 à 10 fois plus de Mg que de Ca.

Le Ca exporté par la graminée ne provient que du sol dans le cas de F₂, F₃, F₄, F₅, mais pour F₁, il vient aussi en partie de l'engrais azoté apporté, le nitrate de Ca; le calcium ainsi apporté représente 2,65 % du Ca éch. du sol, soit un apport de 210,4 mg Ca par kg de sol.

Les résultats expérimentaux du prélèvement du calcium par *Panicum* sont donnés dans le tableau VII.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 89 à 106.

Les exportations de Ca par la 1^{ère} coupe (figures 89 et 90) représentent en moyenne pour chacun des traitements, le pourcentage suivant, par rapport au Ca total (exporté + immobilisé) :

$$F_1 = 65,0 \% \quad F_2 = 54,8 \% \quad F_3 = 62,0 \% \quad F_4 = 42,2 \% \quad F_5 = 44,8 \%$$

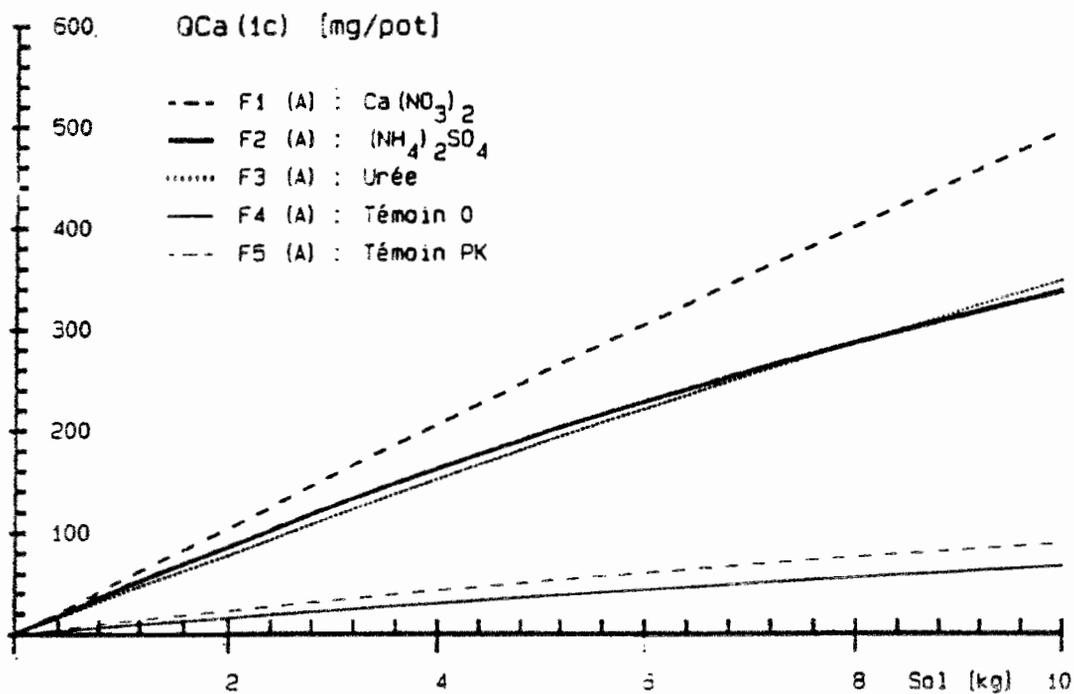
toutes ces valeurs sont inférieures à celles obtenues pour N et pour K, en particulier pour F₂, et même pour les témoins.

Ces exportations sont caractérisées par les mêmes fonctions que pour les rendements, à savoir "A - AH", car les teneurs sont le plus souvent représentées par des droites, très peu inclinées par rapport à l'axe des abscisses, c'est-à-dire que la teneur de V₁ n'est pas très différente de celle de V₅ (à 10 - 15 % près). Ceci explique que ce soit la fonction représentative des rendements qui prédomine pour ces exportations. Dans le cas de F₁, la fonction "A" est quasiment une droite, montrant que l'exportation du Ca est presque proportionnelle aux volumes de sol.

TABLEAU VII – PRELEVEMENT DU CALCIUM PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

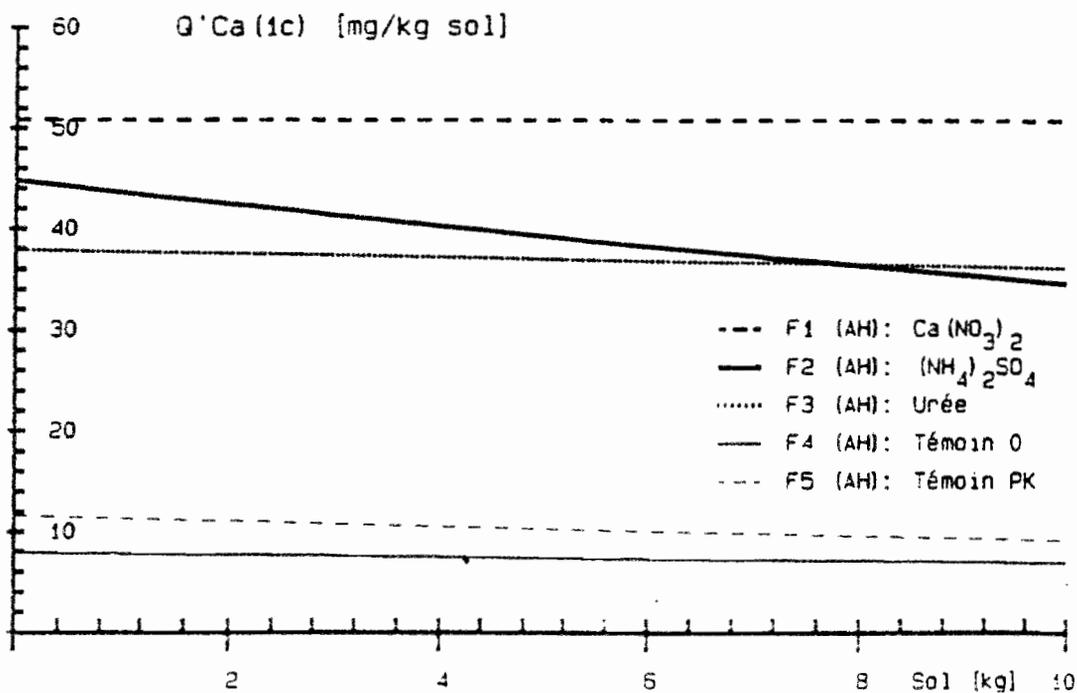
(Q = mg Ca par pot ; Q' = mg Ca par kg de sol)

	1 ^{ère} coupe		2 ^{ème} coupe		3 ^{ème} coupe		2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		1 ^{ère} + 2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	99,3	48,7	26,9	13,2	20,9	10,2	47,8	23,4	147,0	72,1	15,9	7,8	22,5	11,0	38,4	18,8	185,4	90,9
	V ₂	154,3	52,5	34,8	11,8	23,4	7,9	58,2	19,8	212,5	72,3	18,5	6,3	20,1	6,8	38,5	13,1	251,0	85,4
	V ₃	237,3	51,2	47,4	10,2	40,3	8,7	87,7	18,9	325,0	70,1	38,4	8,3	26,8	5,8	65,3	14,1	390,3	84,1
	V ₄	352,6	51,7	46,0	6,7	34,4	5,0	80,4	11,8	432,9	63,5	45,8	6,7	30,3	4,4	76,1	11,2	509,0	74,6
	V ₅	442,2	49,4	61,6	6,9	40,8	4,6	102,4	11,4	544,6	60,9	63,6	7,1	33,7	3,8	97,3	10,9	641,9	71,7
F ₂	V ₁	84,6	41,5	26,6	13,0	18,6	9,1	45,2	22,2	129,8	63,6	22,9	11,2	17,2	8,5	40,2	19,7	170,0	83,3
	V ₂	122,8	41,8	33,0	11,2	19,5	6,6	52,5	17,9	175,3	59,6	34,2	11,6	18,0	6,1	52,2	17,8	227,5	77,4
	V ₃	186,6	40,2	45,1	9,7	31,2	6,7	76,3	16,4	262,9	56,7	48,9	10,5	28,8	6,2	77,7	16,7	340,6	73,4
	V ₄	257,9	37,8	49,3	7,2	37,6	5,5	86,9	12,7	344,7	50,5	73,8	10,8	31,0	4,5	104,8	15,4	449,5	65,9
	V ₅	309,2	34,5	72,0	8,0	56,0	6,3	128,0	14,3	437,2	48,8	86,9	9,7	43,3	4,8	130,2	14,6	567,4	63,4
F ₃	V ₁	76,5	37,5	23,3	11,4	19,5	9,5	42,8	21,0	119,3	58,5	14,0	6,9	16,2	8,0	30,2	14,8	149,5	73,3
	V ₂	104,3	35,5	27,2	9,2	20,5	7,0	47,6	16,2	151,9	51,7	15,9	5,4	16,4	5,6	32,3	11,0	184,2	62,7
	V ₃	181,2	39,1	45,5	9,8	33,5	7,2	79,0	17,0	260,2	56,1	29,8	6,4	19,7	4,3	49,5	10,7	309,7	66,7
	V ₄	256,4	37,6	46,5	6,8	29,2	4,3	75,7	11,1	332,0	48,7	36,5	5,4	19,8	2,9	56,3	8,3	388,4	56,9
	V ₅	311,7	34,8	41,0	4,6	34,2	3,8	75,2	8,4	386,9	43,2	51,6	5,8	29,8	3,3	81,4	9,1	468,3	52,3
F ₄	V ₁	15,8	7,6	7,2	3,5	5,1	2,5	12,4	6,0	28,1	13,7	4,5	2,2	8,3	4,1	12,8	6,2	40,9	19,9
	V ₂	20,3	6,9	10,7	3,6	7,6	2,6	18,3	6,2	38,5	13,1	5,7	1,9	10,3	3,5	16,0	5,4	54,5	18,5
	V ₃	40,8	8,8	19,1	4,1	12,9	2,8	32,0	6,9	72,8	15,6	9,0	1,9	13,4	2,9	22,4	4,8	95,2	20,4
	V ₄	45,6	6,7	25,2	3,7	14,7	2,1	39,9	5,8	85,5	12,5	12,3	1,8	13,9	2,0	26,1	3,8	111,6	16,3
	V ₅	62,6	7,0	31,8	3,5	14,0	1,6	45,8	5,1	108,4	12,0	14,4	1,6	13,9	1,5	28,3	3,1	136,7	15,2
F ₅	V ₁	22,2	10,8	8,4	4,1	6,2	3,0	14,6	7,1	36,8	17,9	5,7	2,8	7,2	3,5	12,9	6,2	49,7	24,1
	V ₂	31,6	10,7	12,5	4,2	9,5	3,2	21,9	7,4	53,5	18,2	7,0	2,4	7,6	2,6	14,7	5,0	68,1	23,2
	V ₃	51,5	11,0	22,6	4,9	16,6	3,6	39,2	8,4	90,7	19,5	12,5	2,7	12,7	2,7	25,2	5,4	115,9	24,9
	V ₄	66,8	9,7	26,3	3,8	18,8	2,7	45,1	6,6	111,9	16,3	17,2	2,5	19,0	2,8	36,2	5,3	148,1	21,6
	V ₅	82,6	9,2	33,5	3,7	23,7	2,6	57,2	6,3	139,8	15,5	22,3	2,5	24,2	2,7	46,5	5,2	186,2	20,7



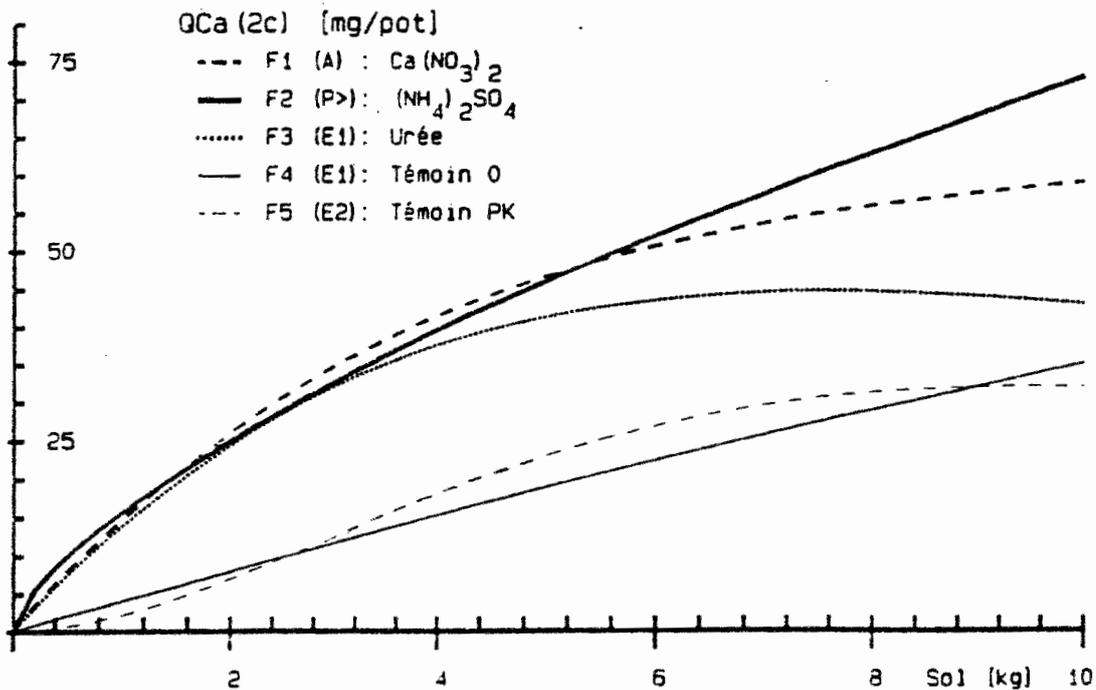
Exportation calcium: 1ère coupe

Figure 89



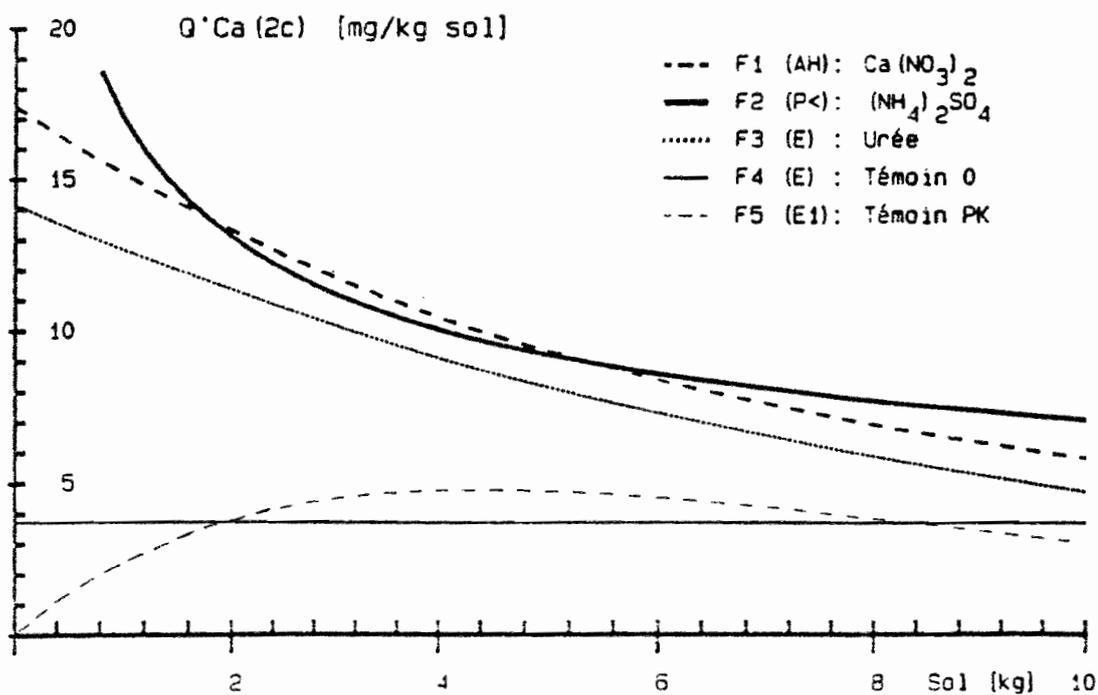
Exportation calcium/kg sol: 1ère coupe

Figure 90



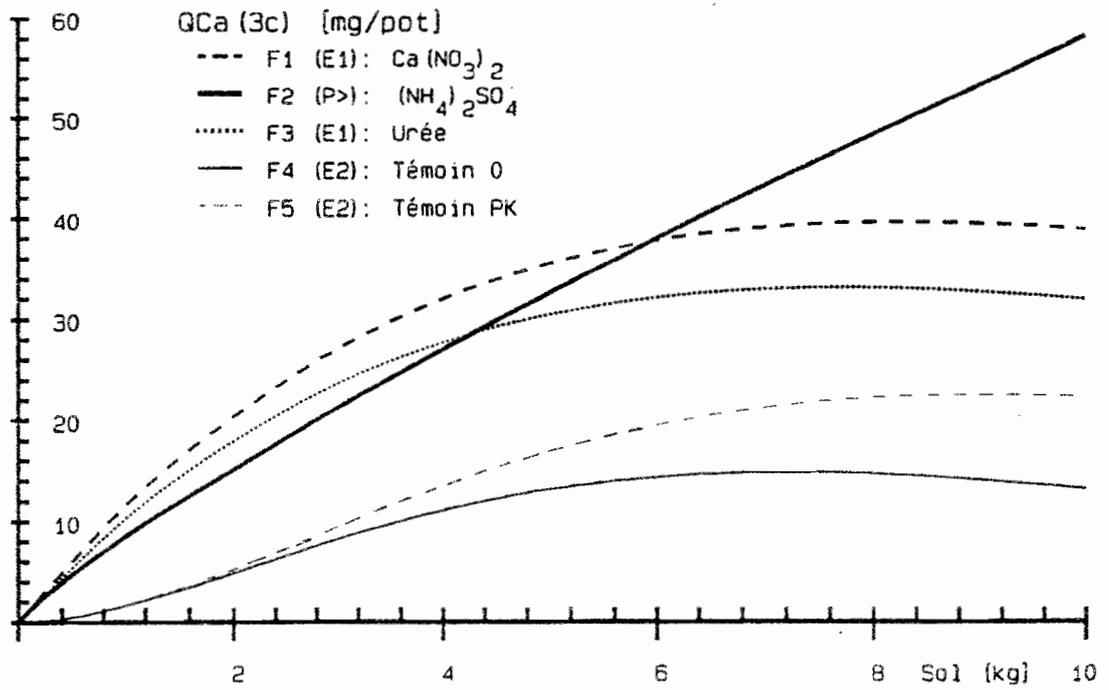
Exportation calcium: 2ème coupe

Figure 91



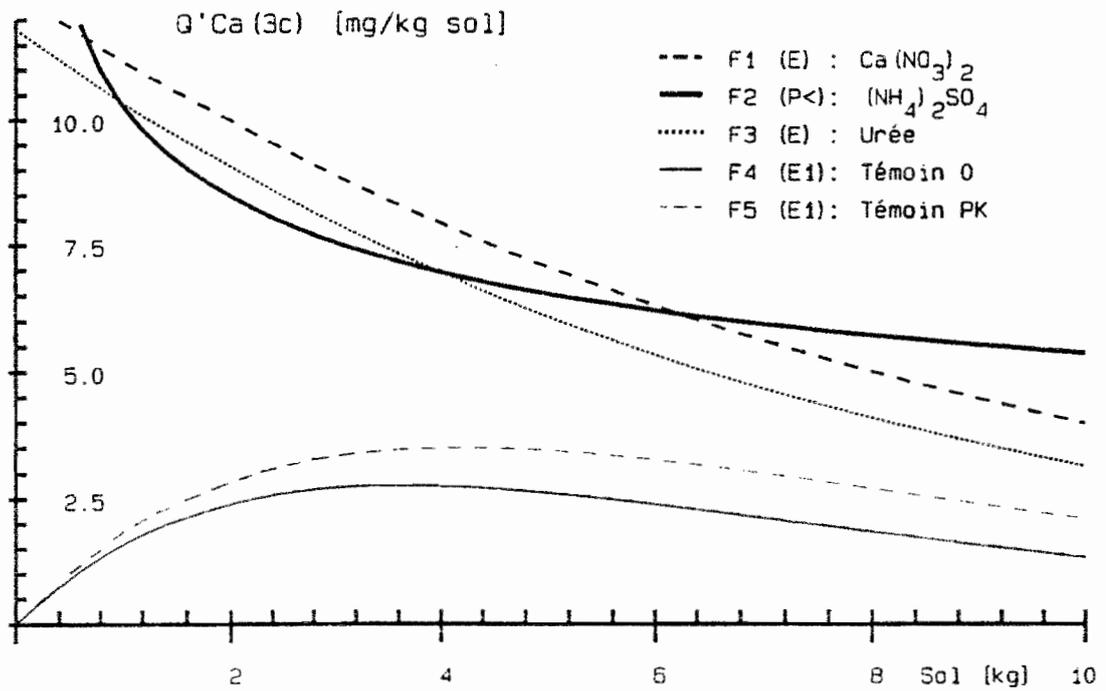
Exportation calcium/kg sol: 2ème coupe

Figure 92



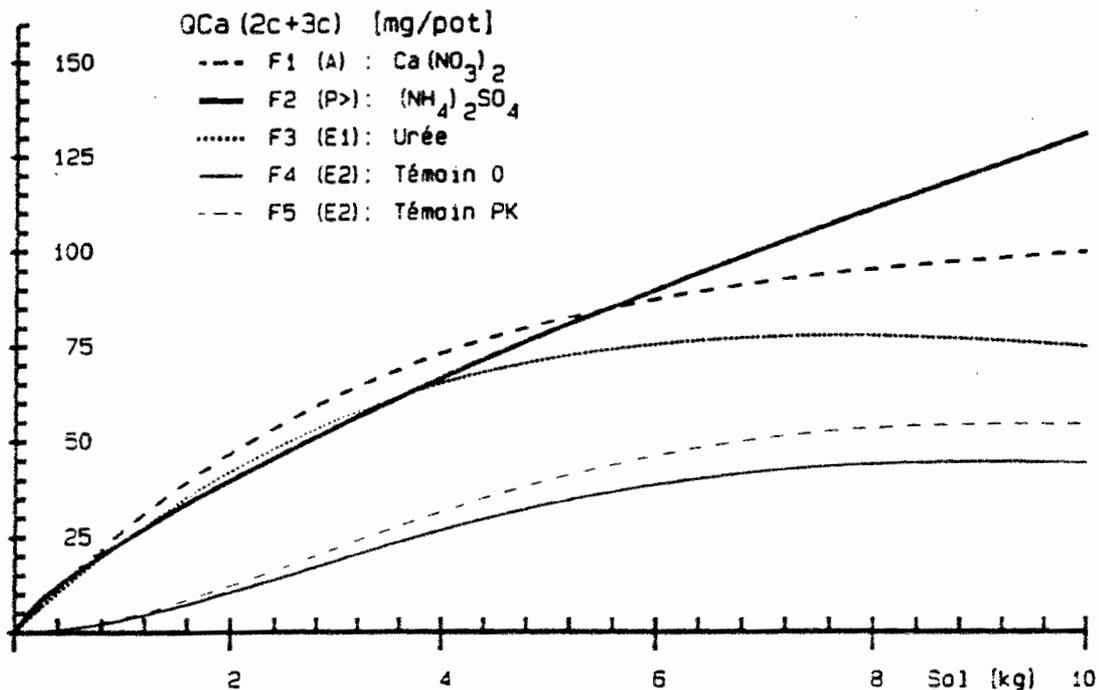
Exportation calcium: 3ème coupe

Figure 93



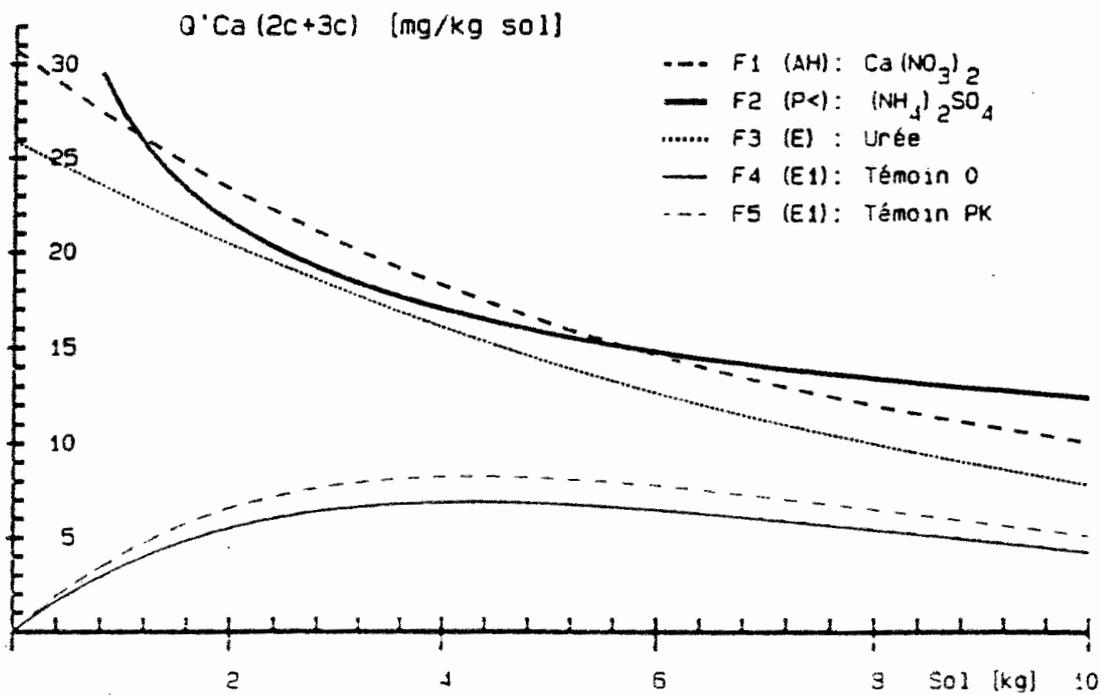
Exportation calcium/kg sol: 3ème coupe

Figure 94



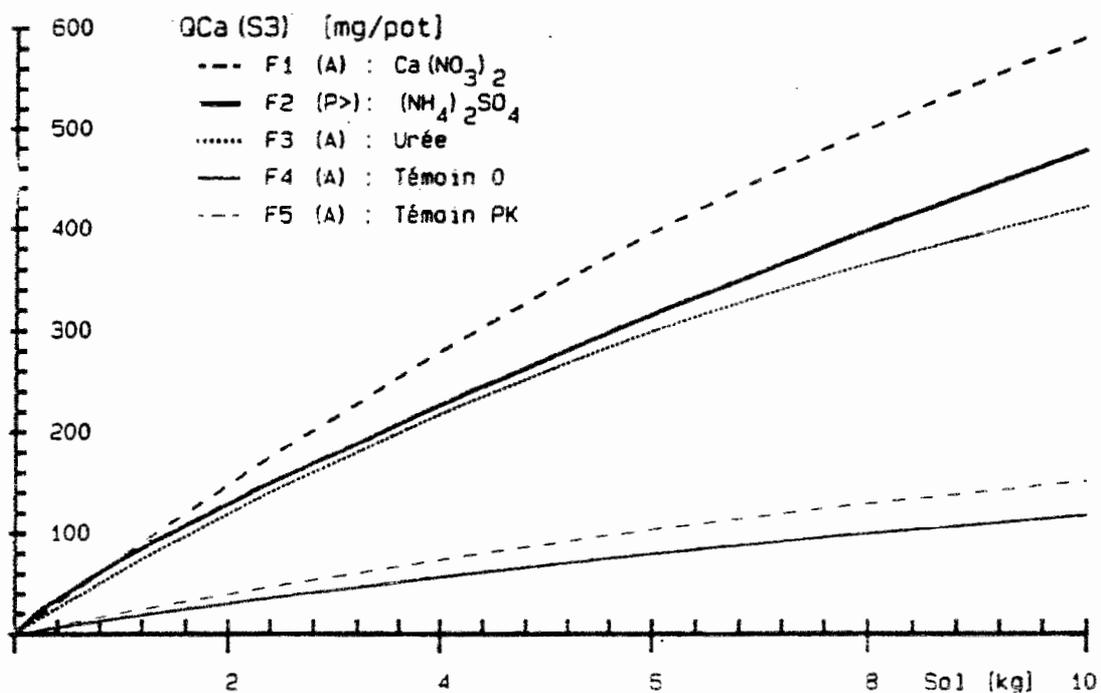
Exportation calcium: 2ème + 3ème coupes

Figure 95



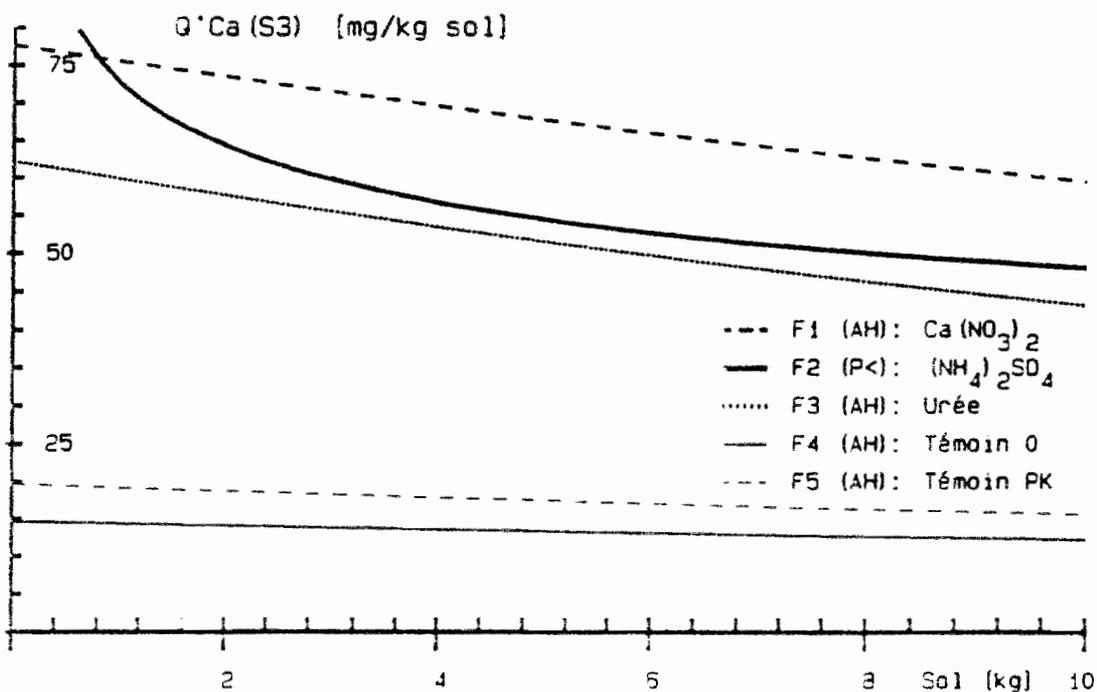
Exportation calcium/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 96



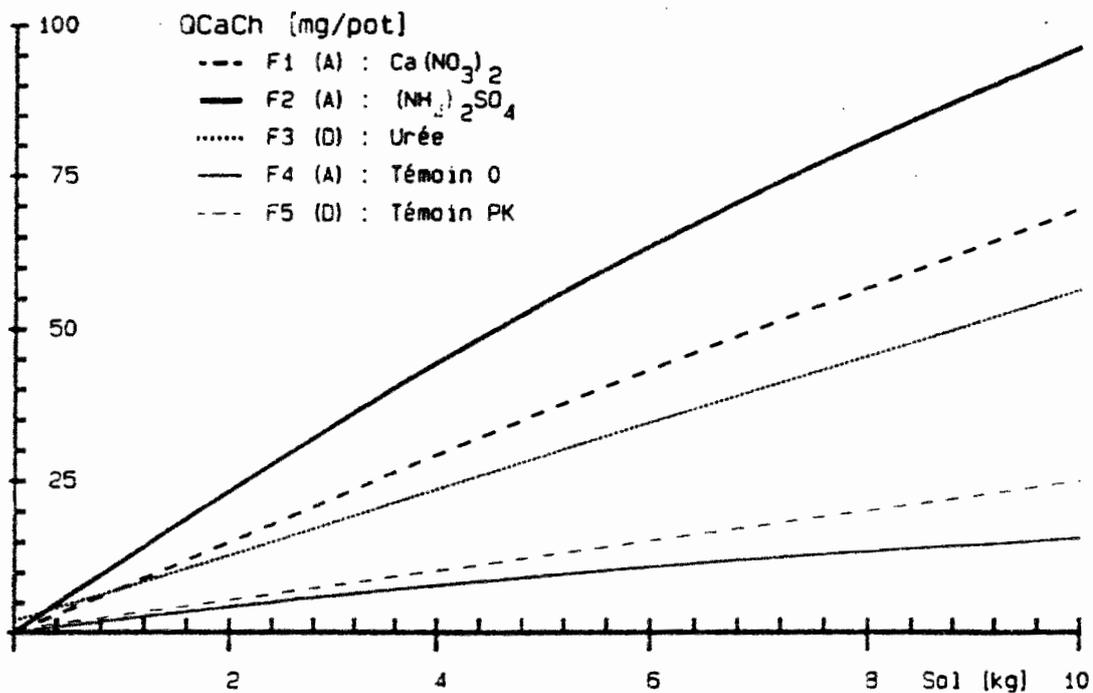
Exportation calcium: 3 coupes (S3)

Figure 97



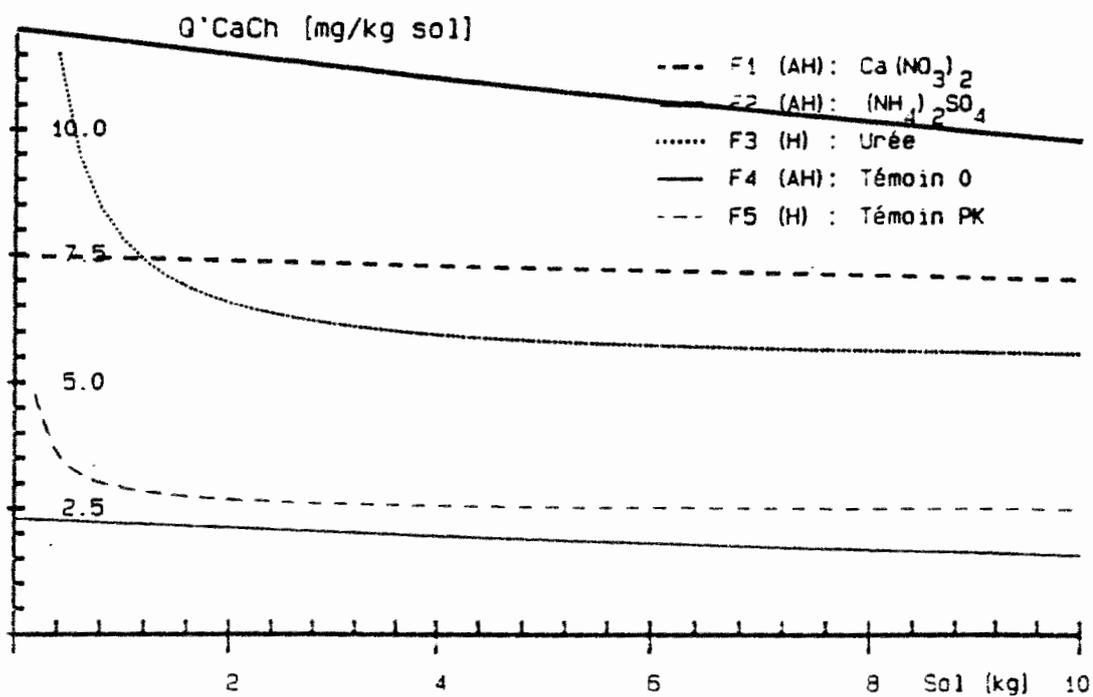
Exportation calcium/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 98



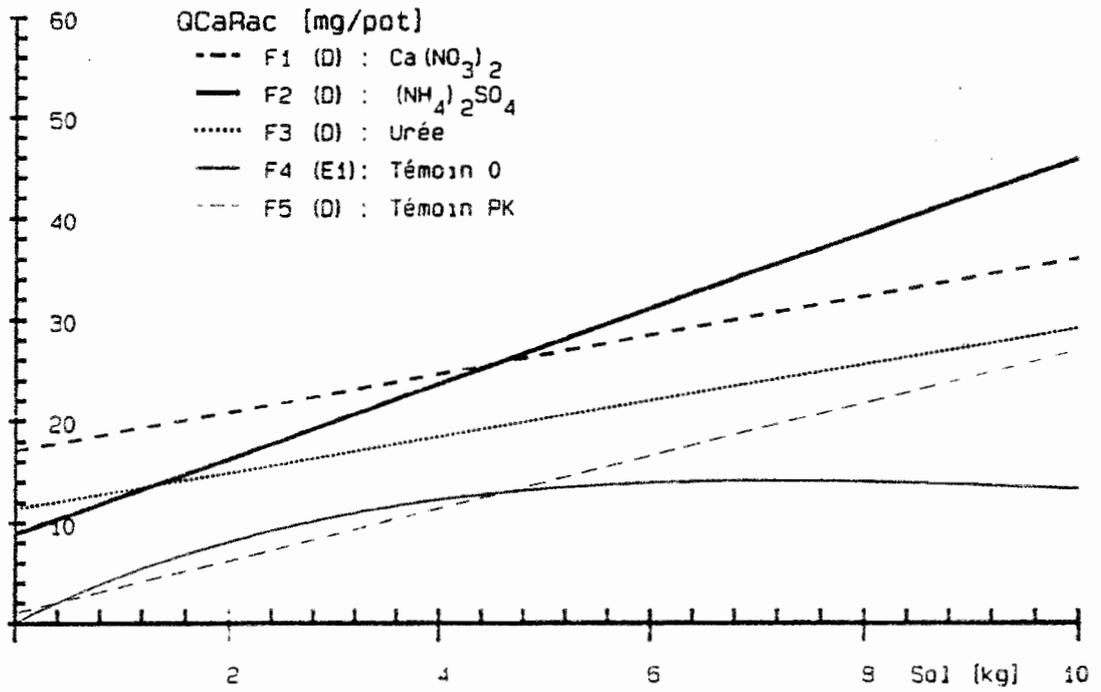
Immobilisation calcium: chaumes

Figure 99



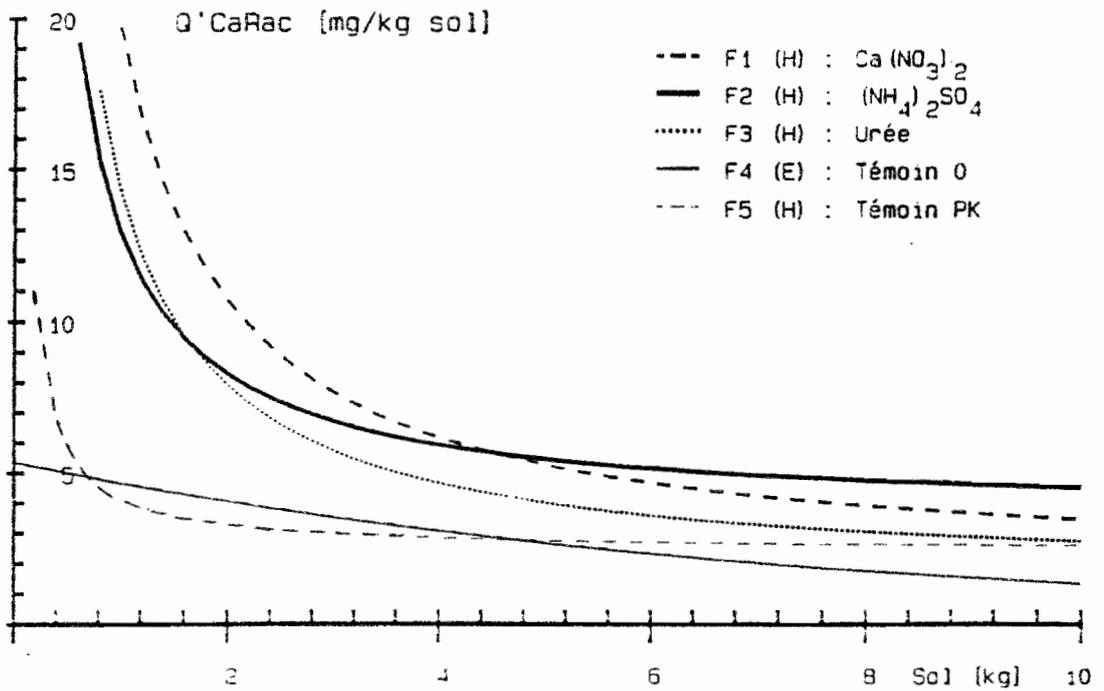
Immobilisation calcium/kg sol: chaumes

Figure 100



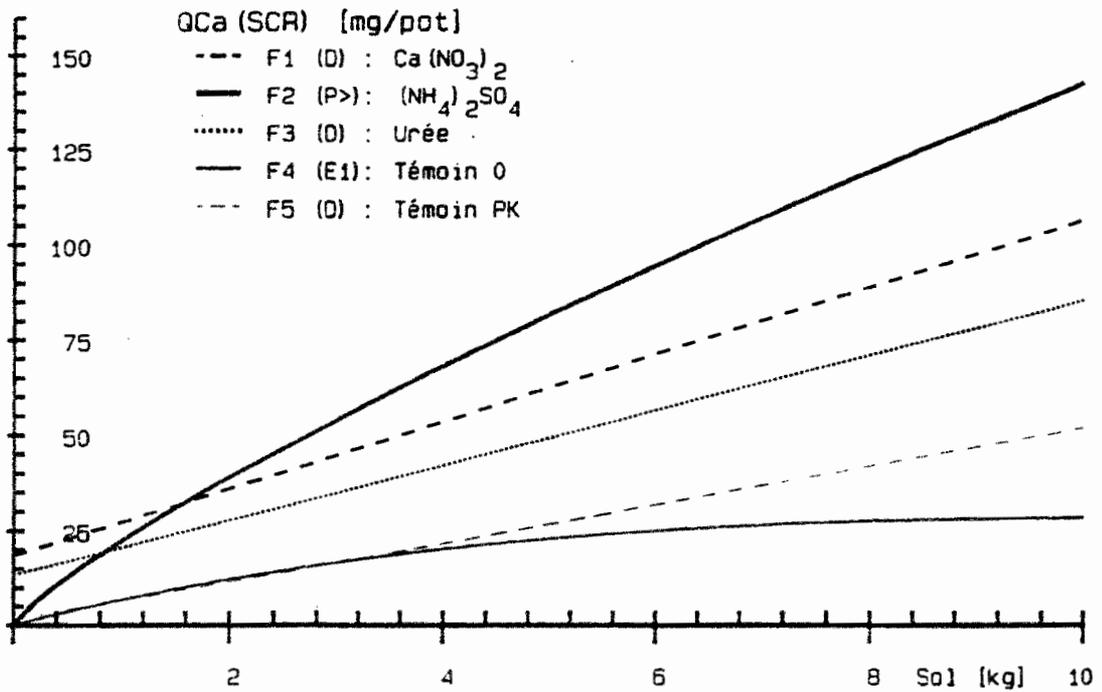
Immobilisation calcium: racines

Figure 101



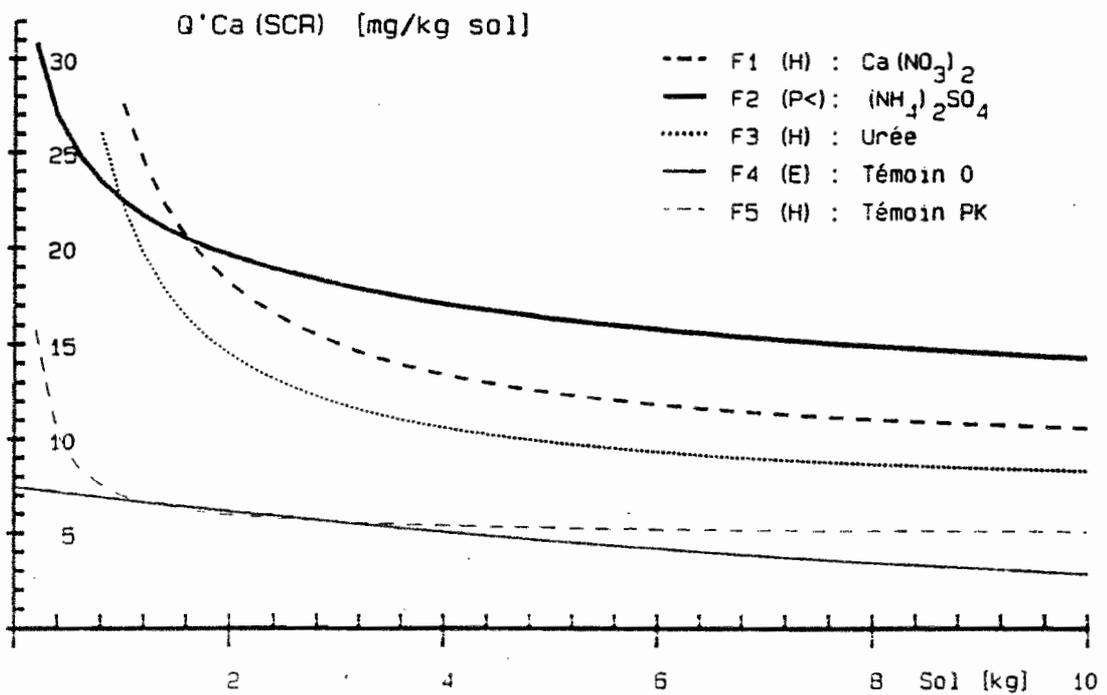
Immobilisation calcium/kg sol: racines

Figure 102



Immobilisation calcium: chaumes + racines

Figure 103



Immobilisation calcium/kg sol: chaumes + racines (SCR)

Figure 104

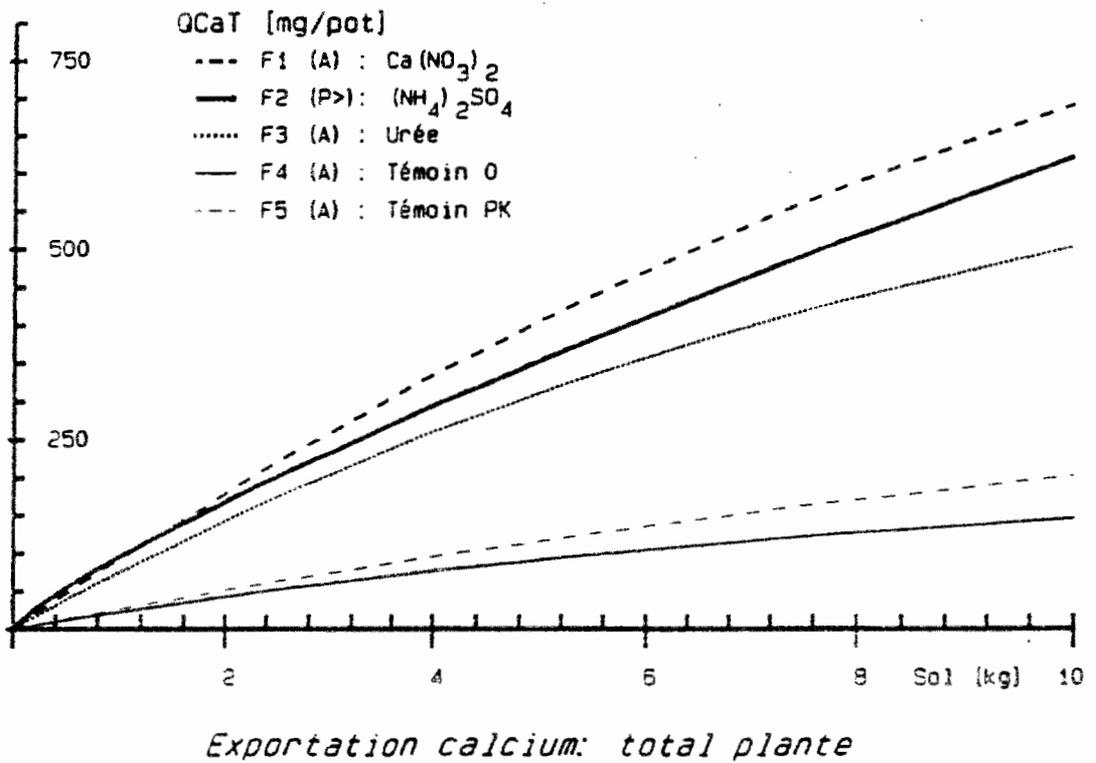


Figure 105

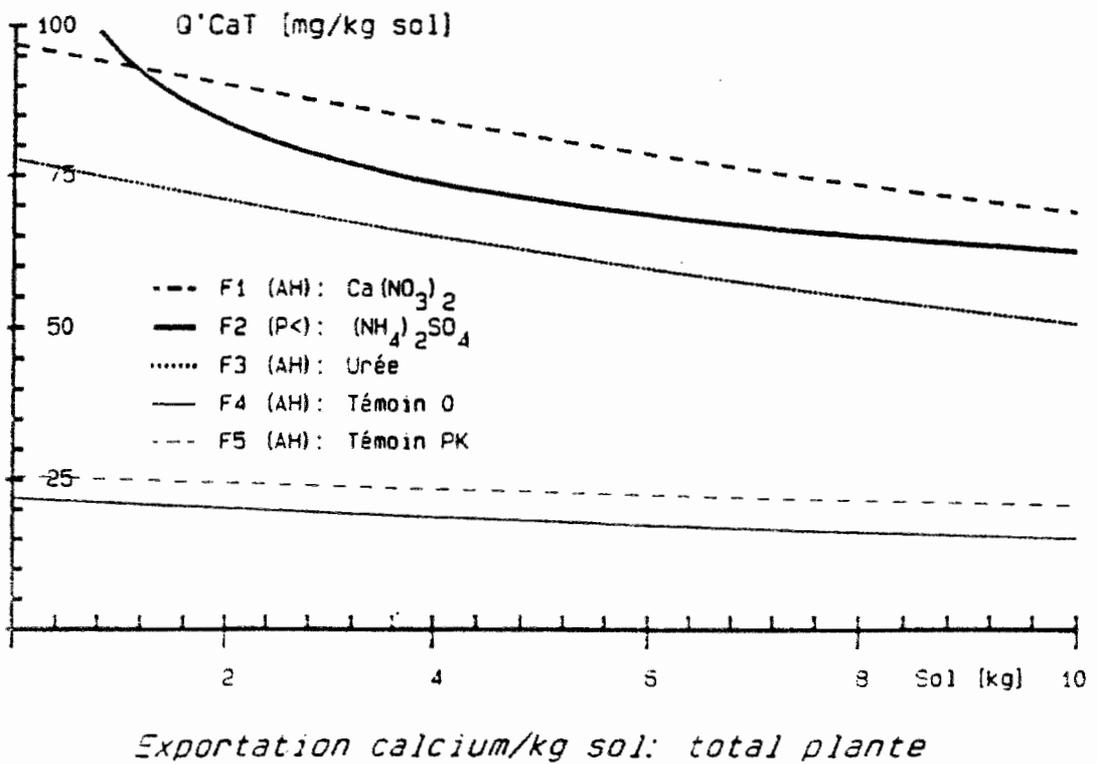


Figure 106

Les teneurs en Ca de la plante pour F₁ à la 1^{ère} coupe sont plus importantes que celles des autres traitements, les exportations sont donc plus importantes également : on en déduit que le Ca apporté par le nitrate de calcium est plus facilement assimilable que le Ca du sol. Si le Ca exporté ne provient que de l'engrais pour F₁, on peut estimer le pourcentage de l'engrais utilisé à la 1^{ère} coupe :

$$V_1 = 24,4 \% \quad V_2 = 24,2 \% \quad V_3 = 23,9 \% \quad V_4 = 23,6 \% \quad V_5 = 23,2 \%$$

Pour les 2^{ème} et 3^{ème} coupes, les teneurs des tiges et feuilles en Ca présentent quelques particularités :

- pour F₁, F₂, F₃ : les teneurs de la 2^{ème} coupe (0,44 à 0,52 %) sont plus élevées que celles de la 1^{ère} coupe, et celles de la 3^{ème} coupe encore supérieures à celles de la 2^{ème} coupe (0,55 à 0,85 %), dans ce cas elles diminuent fortement quand les volumes de sol augmentent.

Cette augmentation des teneurs avec les coupes, est à mettre en relation avec la forte diminution des teneurs en K, du fait de l'antagonisme cationique K - Ca :

à la 1^{ère} coupe, le K avait des teneurs importantes, ce qui a limité les teneurs en Ca,

à la 3^{ème} coupe, les teneurs en K ont baissé de moitié par rapport à la 1^{ère} coupe, alors que les teneurs en Ca ont presque doublé ;

- pour F₄ et F₅ : les 2^{ème} et 3^{ème} coupes ayant été regroupées (sauf pour les rendements), les teneurs les caractérisant sont également plus élevées que pour la 1^{ère} coupe, et ces teneurs, dans le cas de F₄ augmentent quand les volumes de sol augmentent.

Pour les 2^{ème} + 3^{ème} coupes (figures 95 et 96), si les fonctions "E₁ - E" ou "A - AH" dominant, dans le cas de F₂, les puissances "P_> - P_<" représentent mieux ces exportations, car pour ce traitement, V₅ se distingue bien de V₄. Pour F₄, les fonctions "E₂ - E₁" apparaissent, comme nous l'avons vu pour les autres éléments, mais ces fonctions sont représentées également pour F₅ : dans les 2 cas, le maximum de la fonction "E₂" se situe aux environs des 9 kg de sol.

Pour le total des 3 coupes (figures 97 et 98), c'est bien la fonction représentative de la 1^{ère} coupe qui prédomine : les fonctions "A - AH" sont aussi valables que les fonctions "E₁ - E", pour F₂ les fonctions "P_> - P_<" sont légèrement meilleures. Pour les 2 témoins F₄ et F₅, l'exportation du calcium par les 3 coupes, ramenée au kg de sol, est indépendante des volumes de sol, la pente des courbes "AH" n' étant pas significative.

Les immobilisations du Ca dans les racines (figures 101 et 102) seraient mieux représentées par des "D - H" que les immobilisations du Ca dans les chaumes (figures 99 et 100), qui répondent en majorité aux fonctions "A - AH".

Les teneurs en Ca des chaumes étant le double des teneurs en Ca des racines, mais les rendements étant plus importants pour les racines que pour les chaumes, l'immobilisation du Ca par les chaumes n'est pas très différente de celle des racines, si ce n'est dans l'allure des fonctions : l'hyperbole représentative du Q' des racines montre bien que V_1 immobilise beaucoup plus d'élément par kg de sol que V_5 , alors que la fonction "AH" du Q' des chaumes, montre que la différence entre V_1 et V_5 est beaucoup moins importante que pour les racines.

Signalons que les teneurs en Ca des chaumes du traitement F_2 sont nettement supérieures à celles des autres traitements (en moyenne 0,85 % pour F_2 , 0,54 % pour F_1 et 0,44 % pour F_3), alors que les teneurs en K des chaumes de F_2 étaient inférieures à celles des 4 autres traitements : ceci explique peut-être cela.

La somme chaumes + racines (figures 103 et 104) est représentée par "D - H" pour F_1 , F_3 , F_5 , elle est représentée par les puissances " $P_>$ - $P_<$ " pour F_2 , et par les fonctions "A - AH" pour F_4 . Seul le traitement F_5 immobilise par kg de sol la même quantité de Ca dans les chaumes + racines, pour les 5 volumes de sol.

L'exportation totale du Ca par la plante (figures 105 et 106) est représentée par les fonctions "A - AH" pour F_1 , F_3 , F_4 , F_5 , et par les fonctions " $P_>$ - $P_<$ " (meilleures que "A - AH") pour F_2 , indiquant qu'il n'y a pas proportionnalité entre les exportations des petits volumes de sol et celles des volumes plus importants. Pour cet élément du sol, la plante prélève plus de Ca par kg de sol pour les petits pots que pour les grands pots, le témoin F_5 mis à part ; les rapports V_1 / V_5 sont les suivants, concernant l'exportation totale du Ca :

$$F_1 = 1,27 \quad F_2 = 1,31 \quad F_3 = 1,34 \quad F_4 = 1,30$$

plus ce rapport est élevé, plus la différence est importante entre les exportations du Ca par unité de volume des petits pots et celles des grands pots.

Quelques remarques s'imposent quant aux exportations du Ca en fonction des traitements :

- le traitement F_1 exporte toujours plus de Ca que les traitements F_2 et F_3 , sauf dans le cas des chaumes. Le calcium du nitrate de Ca, apporté comme engrais azoté pour F_1 , est donc très soluble, et plus facilement assimilable que le Ca du sol : toutes les teneurs en Ca de F_1 (sauf celles des chaumes) sont supérieures à celles des 4 autres traitements ;

- si la solubilité de ce Ca est supérieure à celle du Ca éch. du sol, sa mobilité dans la plante est la même : il existe les mêmes différences dans les exportations au

niveau des différents volumes de sol que pour les exportations des traitements F₂ et F₃. Au fur et à mesure que la plante épuise les réserves (des engrais et du sol), la différence entre V₁ et V₅ s'accroît, la plante a tendance à exporter plus de Ca par kg de sol pour les petits volumes que pour les grands, donc elle a tendance à mieux puiser dans les réserves pour un pot de 2 kg plutôt que pour un pot de 9 kg. Nous avons vu qu'il n'en était pas de même pour N et K : l'épuisement des réserves se fait mieux pour les grands volumes que pour les petits volumes.

- nous avons souligné que la teneur en Ca des chaumes du traitement F₂ était particulièrement élevée, l'hypothèse suivante peut être formulée afin de fournir une explication. Il est bien connu que le calcium, élément très peu mobile dans la plante, ne se déplace que dans le sens ascendant, autrement dit, il a tendance à s'accumuler progressivement et irréversiblement au fur et à mesure du vieillissement des organes : tel est le cas des chaumes. Le potassium, au contraire, de par son extrême mobilité, a des teneurs décroissant avec l'âge des organes, car la déshydratation provoque immédiatement le départ du potassium. Dans le cas de la fumure F₂, lors de la consommation par la plante de l'ion NH₄⁺, les ions SO₄⁻ deviennent libres, et s'associent facilement au Ca et au Mg du sol, pour donner des sulfates solubles ; la plante prélèvera de préférence ces éléments solubles plutôt que les éléments échangeables du sol. D'où cette accumulation des ions Ca⁺⁺, mais aussi des ions Mg⁺⁺ dans cette partie un peu desséchée que sont les chaumes. Et par contrecoup, le potassium aura "délaissé" cette partie de la plante en plus grande proportion par rapport aux autres traitements ;

- les traitements F₁, F₂, F₃ exportent au total environ 4 fois plus de Ca que les témoins F₄ et F₅, il faut donc que la plante soit sollicitée par des engrais pour être capable de prélever le Ca éch. du sol dans de telles proportions, mais la présence d'un apport azoté est indispensable pour que ce prélèvement s'effectue dans de bonnes conditions ; l'étude précédente (THOMANN Ch. -1988) nous avait montré en effet une relation très étroite entre l'apport "N" et l'exportation du calcium, aussi bien à la 1^{ère} coupe, qu'aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes. Quand il n'y a pas d'apport azoté, le prélèvement du Ca par la plante ne se distingue pas qu'il y ait ou non apport P - K ;

- statistiquement, l'analyse de variance montre que les exportations de Ca par F₄ et par F₅ ne sont pas significativement différentes, bien que F₅ ait reçu un apport P - K ; de plus, il n'y aurait aucune différence significative entre les volumes de sol, dans le cas de F₅, c'est-à-dire que l'exportation du Ca serait proportionnelle aux volumes de sol : le Ca du sol serait prélevé de la même façon pour les petits pots que pour les grands pots, et ceci depuis la 1^{ère} coupe jusqu'au total plante. On en déduit que l'apport azoté a profondément modifié l'extraction du Ca éch. du sol par la plante.

3.7 LES EXPORTATIONS DE MAGNESIUM

Nous rappellerons brièvement les principaux rôles, et les principales propriétés du magnésium dans la plante (MARTIN-PREVEL P. - 1984).

Le magnésium, en plus de son rôle plastique dans la constitution de la molécule de chlorophylle (5 à 15 % du Mg total de la plante), "intervient comme cofacteur indispensable dans un grand nombre de réactions enzymatiques spécifiques - activateur privilégié de la plupart des ATPases". "Il stimule la nutrition phosphorée de la plante, et participe aux équilibres réciproques avec K et Ca".

"Ses réactions au sein du végétal sont intermédiaires entre celles de K et celles de Ca : ses sels sont moins solubles que les sels potassiques, et plus solubles que les sels calciques".

Les résultats expérimentaux du prélèvement du magnésium par *Panicum* sont donnés dans le tableau VIII.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 107 à 124.

Les sols de Nouvelle-Calédonie présentent, pour la plupart, un taux élevé de Mg, celui-ci provenant de la dégradation des péridotites.

Le vertisol dit équilibré de l'expérimentation renferme, nous l'avons vu, presque autant de Mg éch. que de Ca éch., mais il renferme 2 fois plus de Mg total que de Ca total : 45,63 meq % Ca, et 112,02 meq % Mg.

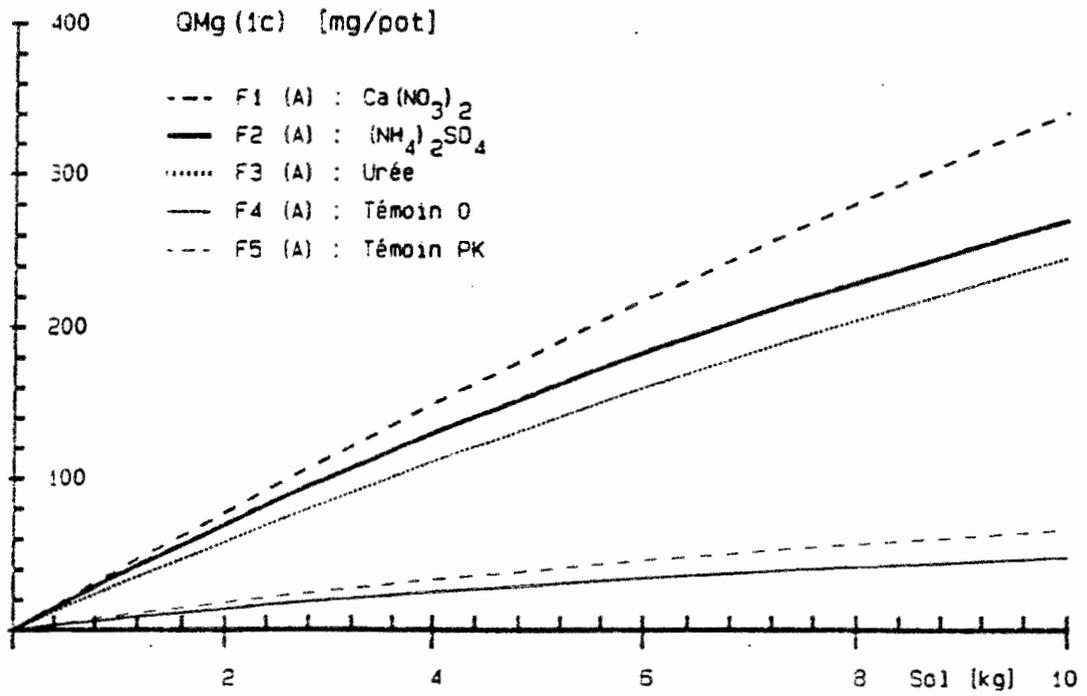
Le calcium et le magnésium du sol sont très semblables quant à leur disponibilité pour la plante, les fonctions représentées pour les exportations sont les mêmes à peu de chose près, les erreurs relatives seraient plutôt meilleures avec Mg qu'avec Ca.

Tout le Mg exporté et immobilisé par *Panicum* provient uniquement du sol, pour chacun des traitements. Cet élément, facilement assimilable par la graminée, peut donc nous montrer certains mécanismes qui s'avèreraient différents suivant les traitements. Il serait l'élément "vrai", révélateur, puisqu'il implique une relation directe entre la plante, et ce vertisol, à teneur élevée en Mg échangeable.

TABLEAU VIII – PRELEVEMENT DU MAGNESIUM PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

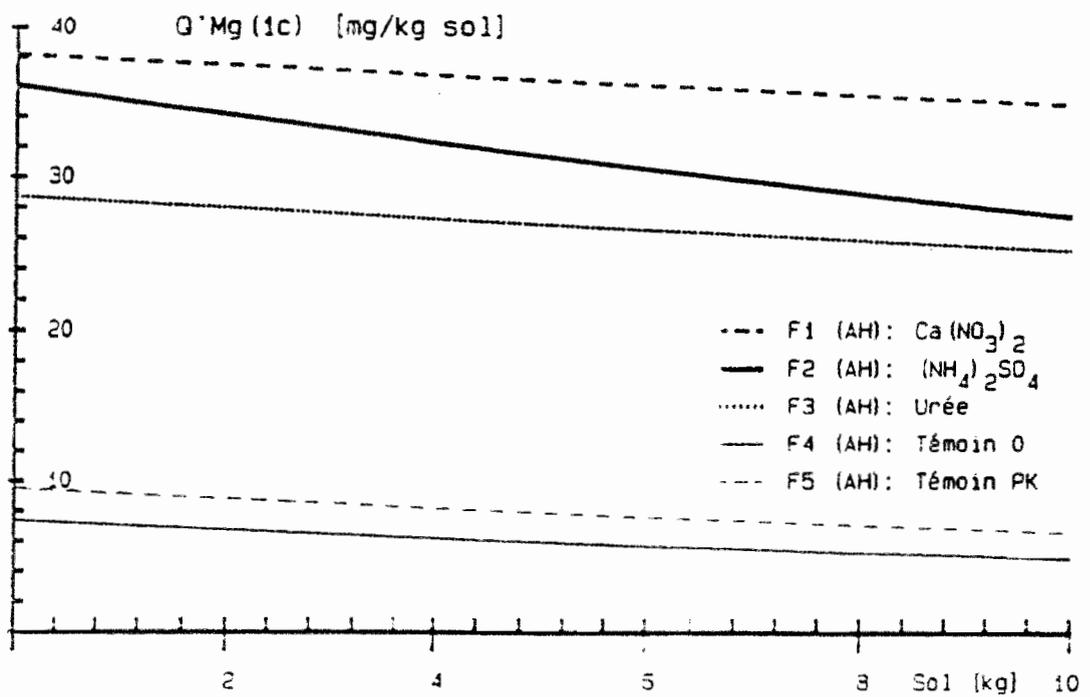
(Q = mg Mg par pot ; Q' = mg Mg par kg de sol)

F - V	1ère coupe		2ème coupe		3ème coupe		2ème +3ème coupes		1ère + 2ème + 3ème coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	72,4	35,5	18,5	9,1	11,2	5,5	29,7	14,6	102,1	50,0	19,0	9,3	21,0	10,3	40,0	19,6	142,1	69,7
	V ₂	115,3	39,2	25,5	8,7	14,0	4,8	39,4	13,4	154,7	52,6	23,5	8,0	17,6	6,0	41,1	14,0	195,8	66,6
	V ₃	168,2	36,3	34,2	7,4	23,0	5,0	57,2	12,3	225,5	48,6	38,4	8,3	20,0	4,3	58,4	12,6	283,9	61,2
	V ₄	251,5	36,9	37,4	5,5	21,9	3,2	59,4	8,7	310,8	45,6	43,3	6,3	21,3	3,1	64,5	9,5	375,4	55,0
	V ₅	305,5	34,1	40,1	4,5	22,6	2,5	62,7	7,0	368,1	41,1	60,0	6,7	25,2	2,8	85,2	9,5	453,4	50,7
F ₂	V ₁	67,5	33,1	19,9	9,8	11,6	5,7	31,6	15,5	99,1	48,6	26,0	12,8	16,5	8,1	42,5	20,8	141,6	69,4
	V ₂	99,7	33,9	24,8	8,5	13,4	4,6	38,3	13,0	138,0	46,9	38,3	13,0	16,5	5,6	54,8	18,6	192,8	65,6
	V ₃	149,6	32,2	36,3	7,8	23,3	5,0	59,6	12,9	209,3	45,1	51,2	11,0	27,2	5,9	78,3	16,9	287,6	62,0
	V ₄	203,4	29,8	38,5	5,7	26,6	3,9	65,1	9,5	268,5	39,4	73,7	10,8	28,8	4,2	102,5	15,0	371,1	54,4
	V ₅	248,0	27,7	54,3	6,1	36,0	4,0	90,2	10,1	338,2	37,8	76,8	8,6	42,2	4,7	119,0	13,3	457,3	51,1
F ₃	V ₁	57,8	28,3	16,8	8,2	11,5	5,6	28,2	13,8	86,0	42,2	17,0	8,3	14,3	7,0	31,3	15,3	117,4	57,5
	V ₂	76,6	26,1	19,6	6,7	12,9	4,4	32,5	11,0	109,1	37,1	20,7	7,0	13,3	4,5	34,0	11,6	143,1	48,7
	V ₃	130,1	28,0	30,7	6,6	20,3	4,4	51,1	11,0	181,2	39,0	29,6	6,4	16,7	3,6	46,4	10,0	227,5	49,0
	V ₄	186,0	27,3	33,0	4,8	19,8	2,9	52,8	7,7	238,8	35,0	36,6	5,4	15,7	2,3	52,3	7,7	291,1	42,7
	V ₅	219,7	24,5	27,4	3,1	19,4	2,2	46,8	5,2	266,5	29,8	45,0	5,0	22,2	2,5	67,3	7,5	333,7	37,3
F ₄	V ₁	14,0	6,8	7,1	3,5	5,1	2,5	12,2	5,9	26,2	12,7	7,7	3,7	12,0	5,8	19,7	9,6	45,9	22,3
	V ₂	17,7	6,0	10,7	3,6	7,6	2,6	18,3	6,2	35,9	12,2	9,9	3,4	11,2	3,8	21,1	7,2	57,0	19,4
	V ₃	31,5	6,8	17,4	3,7	11,7	2,5	29,0	6,2	60,5	13,0	15,2	3,3	14,6	3,1	29,8	6,4	90,3	19,4
	V ₄	35,2	5,1	21,7	3,2	12,6	1,8	34,4	5,0	69,5	10,2	16,9	2,5	12,3	1,8	29,2	4,3	98,8	14,4
	V ₅	45,5	5,1	26,0	2,9	11,4	1,3	37,3	4,1	82,9	9,2	20,0	2,2	12,7	1,4	32,7	3,6	115,6	12,8
F ₅	V ₁	17,9	8,7	7,8	3,8	5,7	2,8	13,5	6,6	31,4	15,2	9,4	4,6	7,3	3,5	16,7	8,1	48,1	23,4
	V ₂	25,0	8,5	11,8	4,0	8,9	3,0	20,8	7,0	45,8	15,6	12,5	4,3	8,0	2,7	20,6	7,0	66,3	22,6
	V ₃	38,0	8,2	18,0	3,9	13,1	2,8	31,0	6,7	69,0	14,8	18,3	3,9	11,4	2,4	29,7	6,4	98,7	21,2
	V ₄	50,0	7,3	22,1	3,2	15,8	2,3	37,9	5,5	87,9	12,8	24,1	3,5	15,6	2,3	39,7	5,8	127,6	18,6
	V ₅	61,2	6,8	23,6	2,6	16,6	1,8	40,2	4,4	101,4	11,3	27,8	3,1	20,3	2,3	48,2	5,4	149,5	16,6



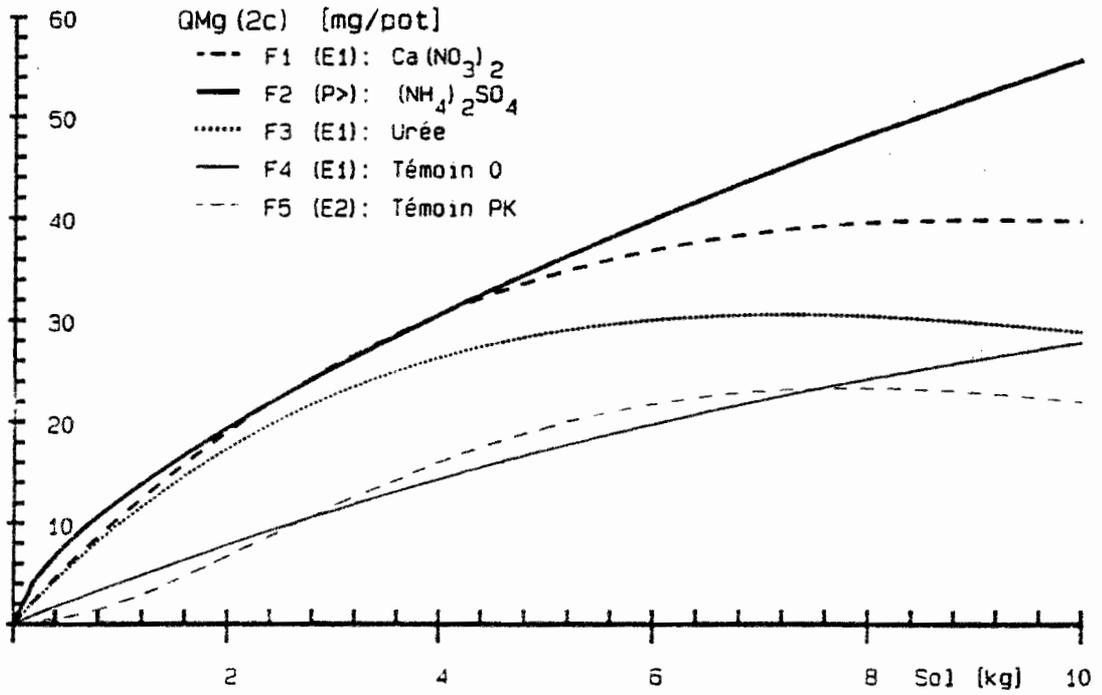
Exportation magnésium: 1ère coupe

Figure 107



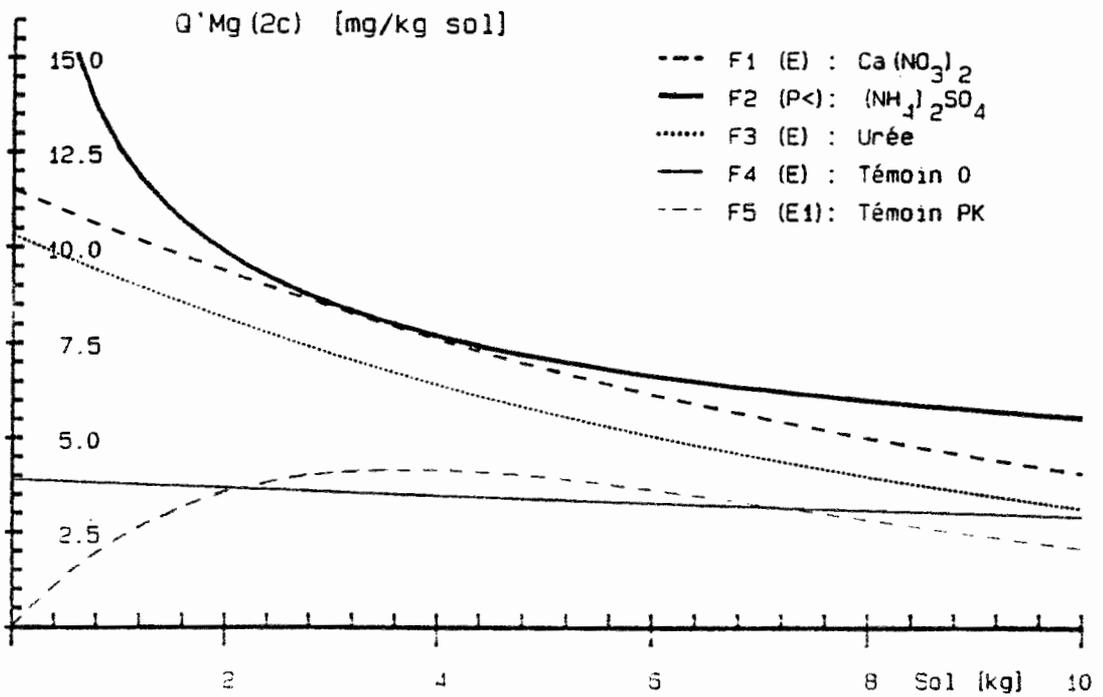
Exportation magnésium/kg sol: 1ère coupe

Figure 108



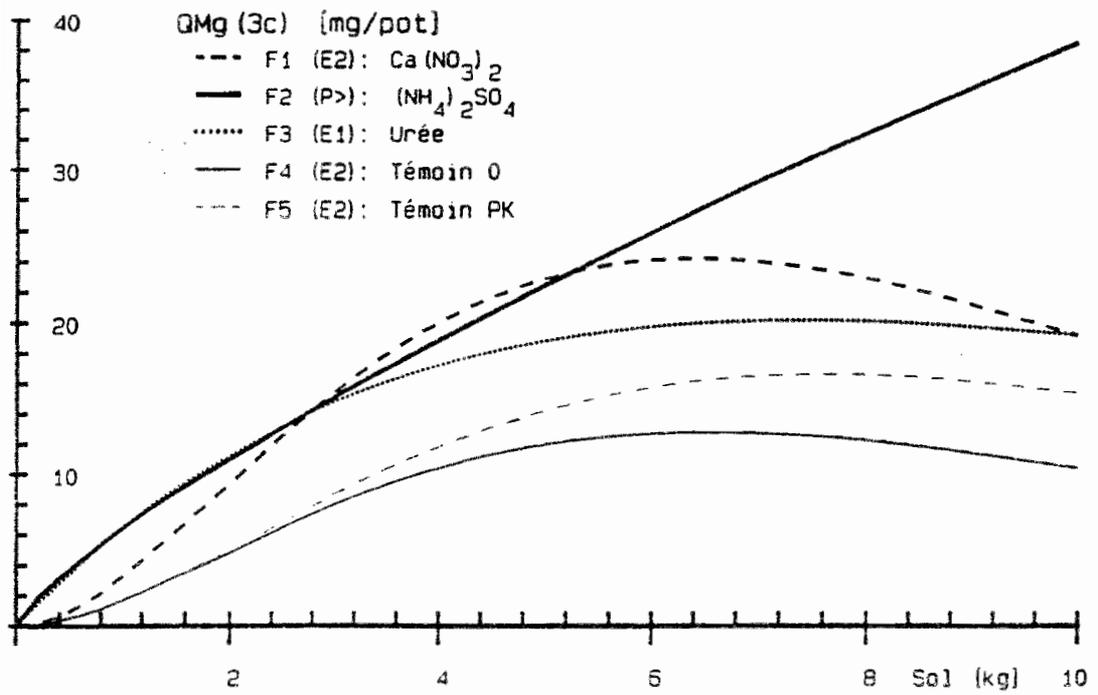
Exportation magnésium: 2ème coupe

Figure 109



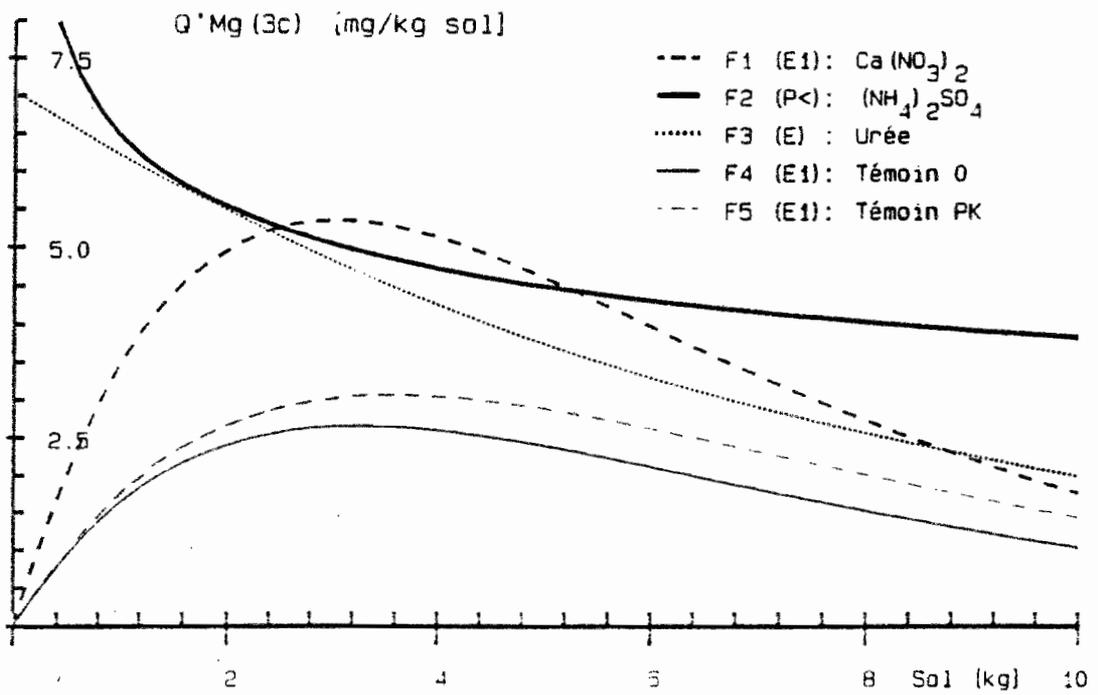
Exportation magnésium/kg sol: 2ème coupe

Figure 110



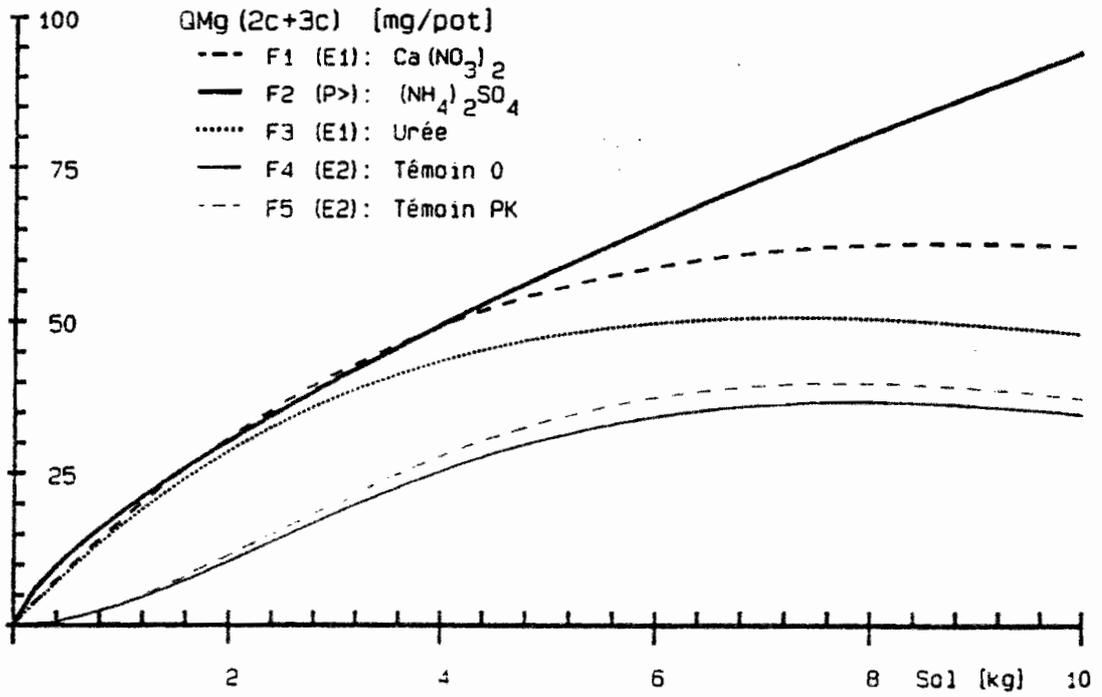
Exportation magnésium: 3ème coupe

Figure 111



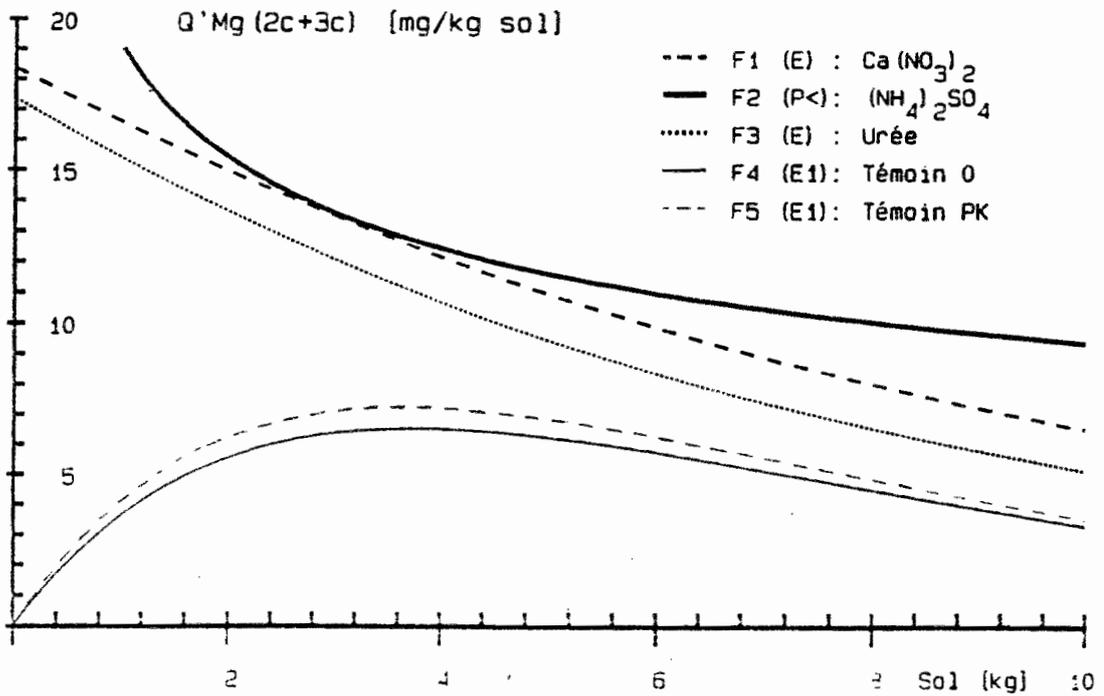
Exportation magnésium/kg sol: 3ème coupe

Figure 112



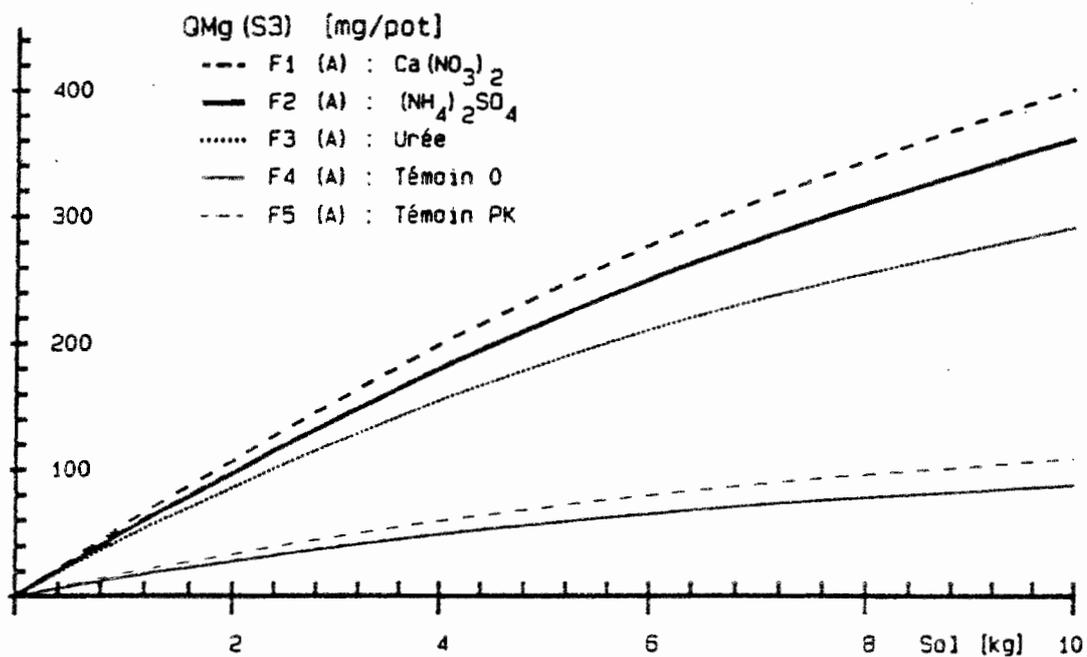
Exportation magnésium: 2ème + 3ème coupes

Figure 113



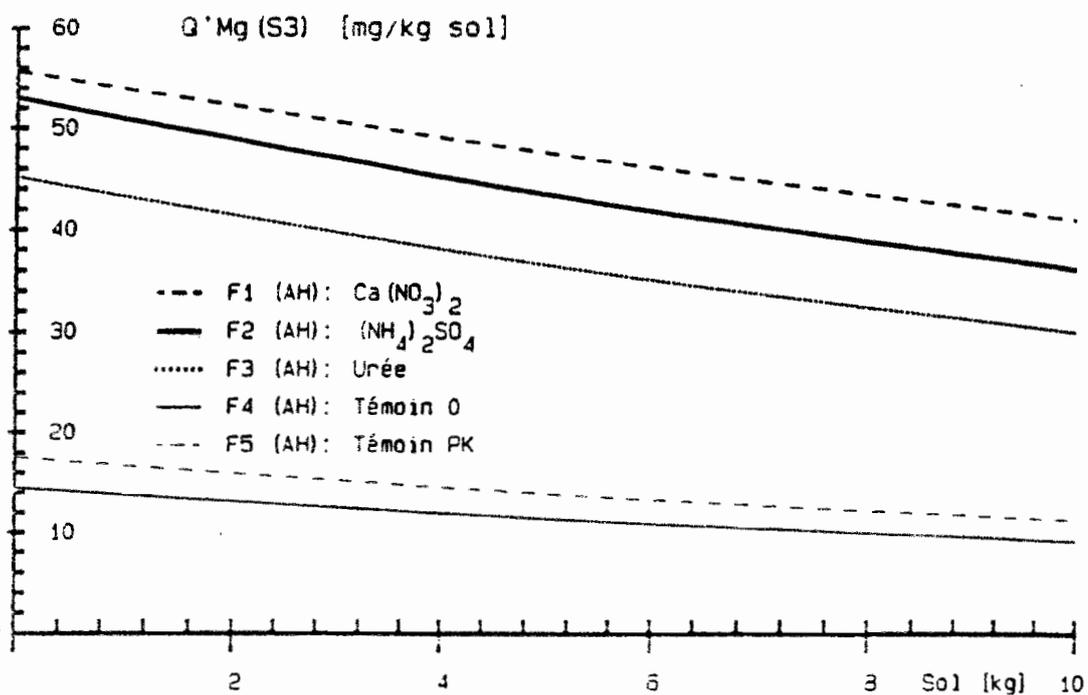
Exportation magnésium/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 114



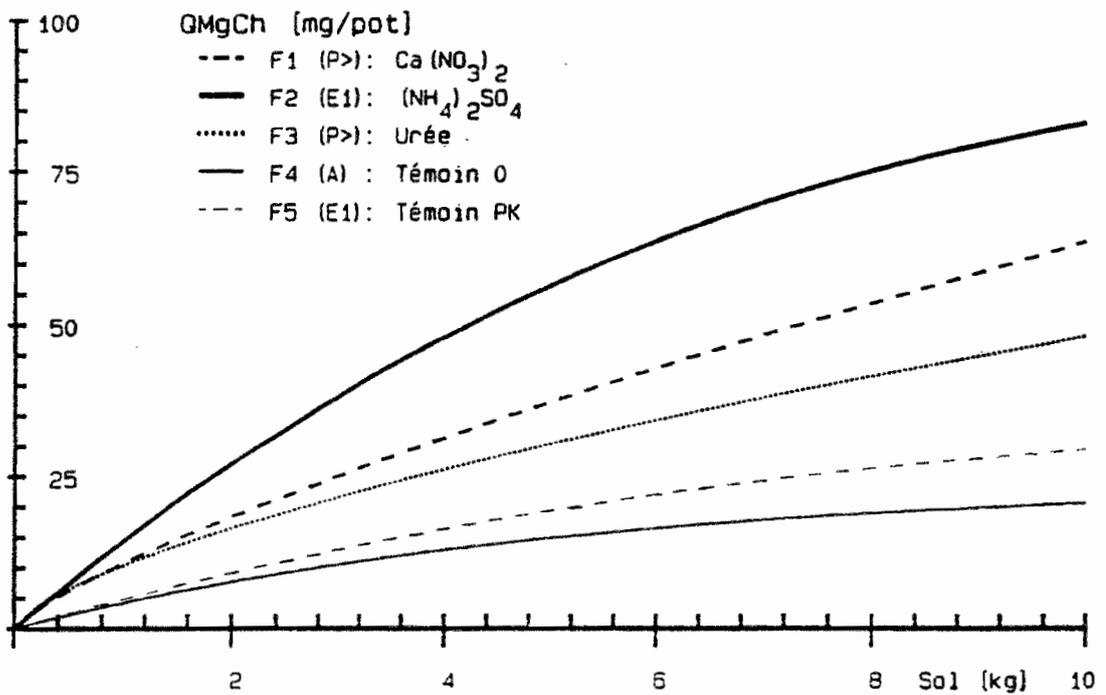
Exportation magnésium: 3 coupes (S3)

Figure 115



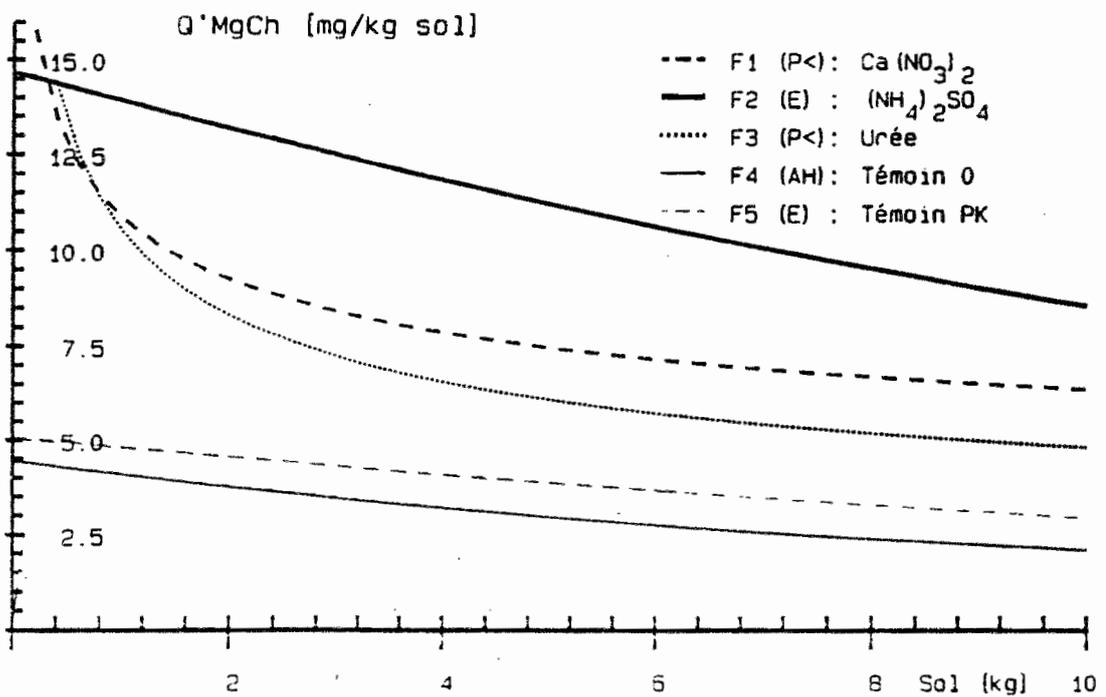
Exportation magnésium/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 116



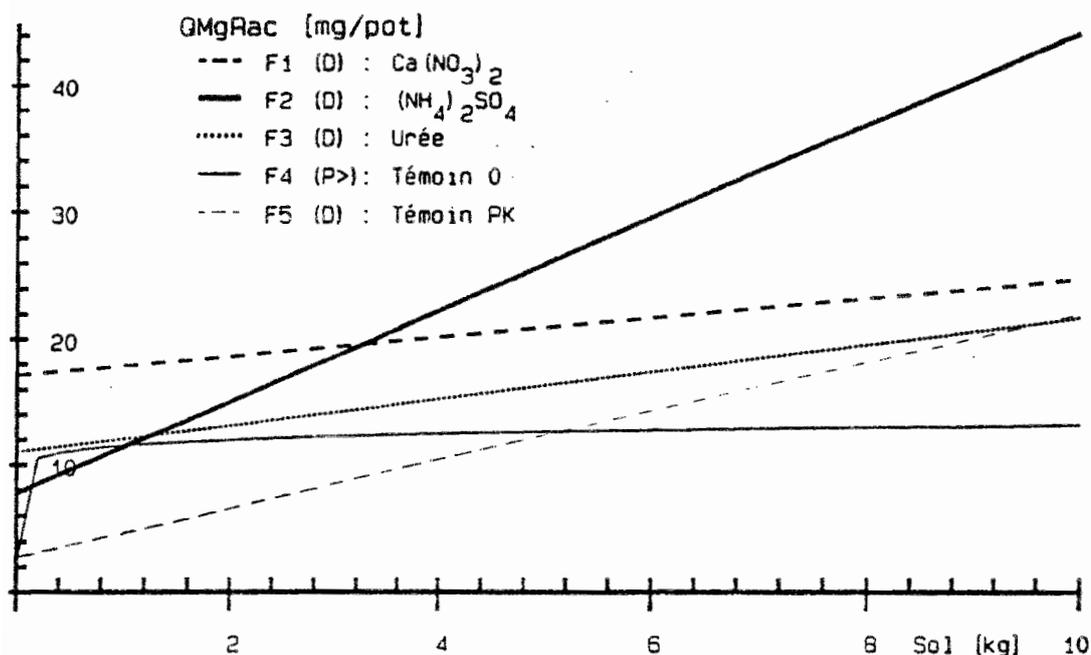
Immobilisation magnésium: chaumes

Figure 117



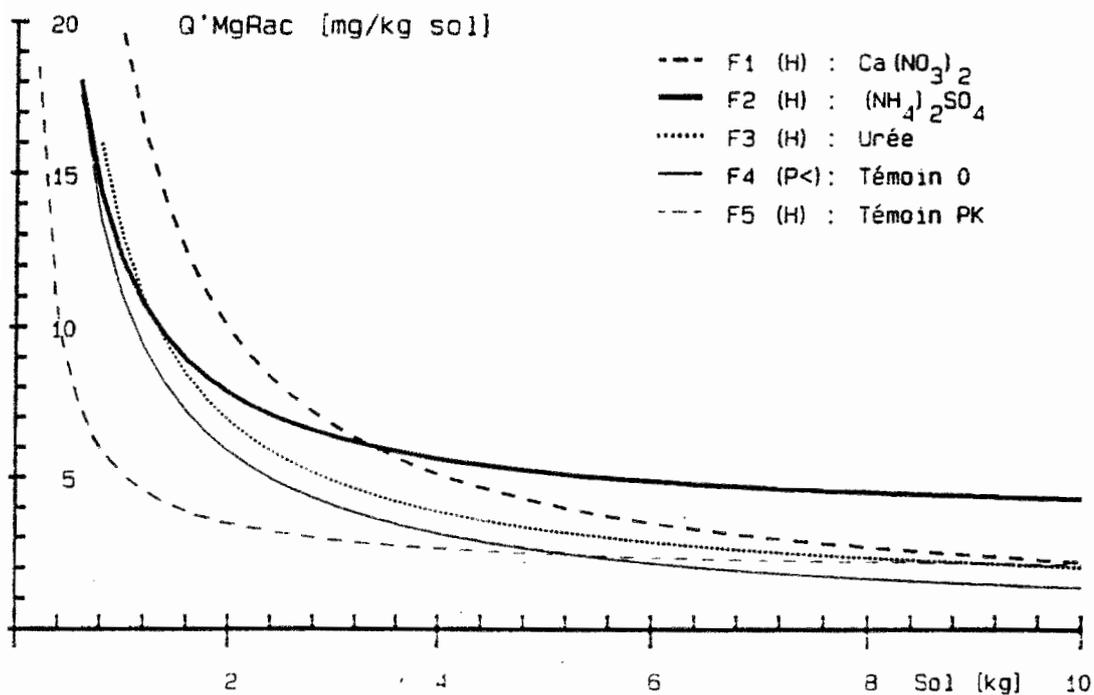
Immobilisation magnésium/kg sol: chaumes

Figure 118



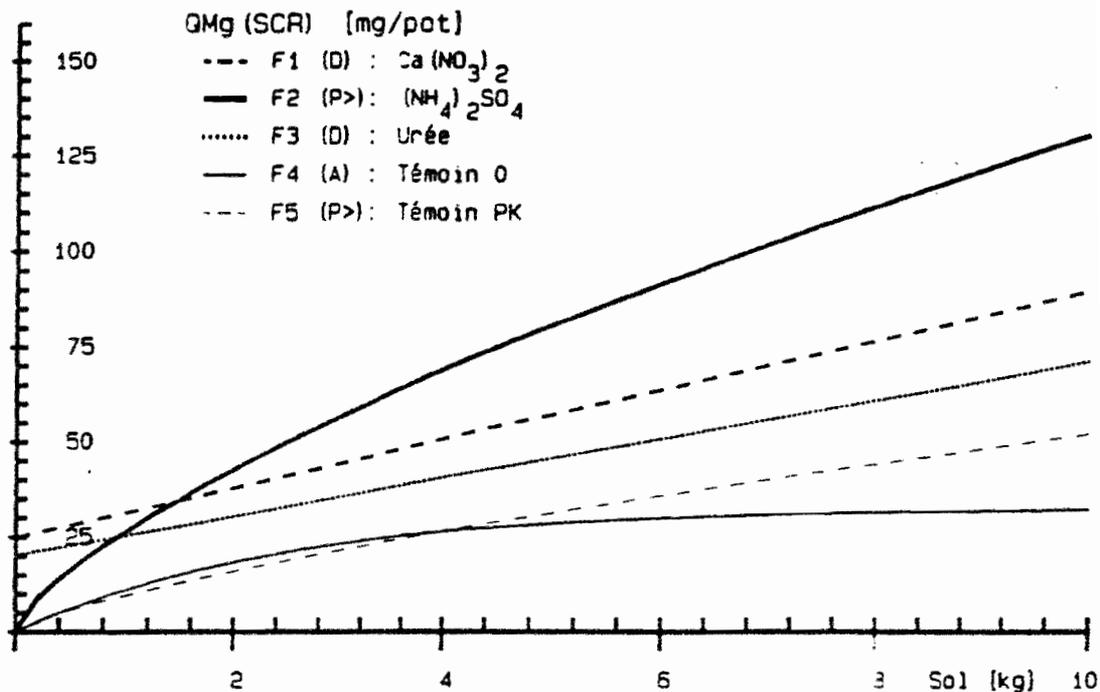
Immobilisation magnésium: racines

Figure 119



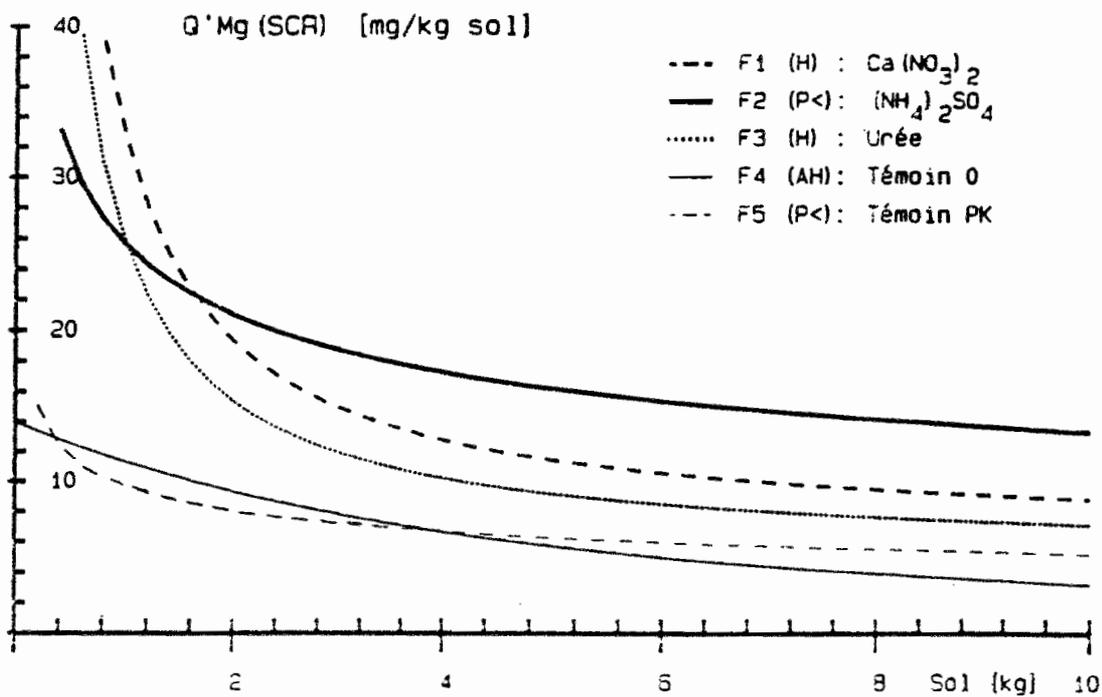
Immobilisation magnésium/kg sol: racines

Figure 120



Immobilisation magnésium: chaumes + racines (SCR)

Figure 121



Immobilisation magnésium/kg sol: chaumes+racines (SCR)

Figure 122

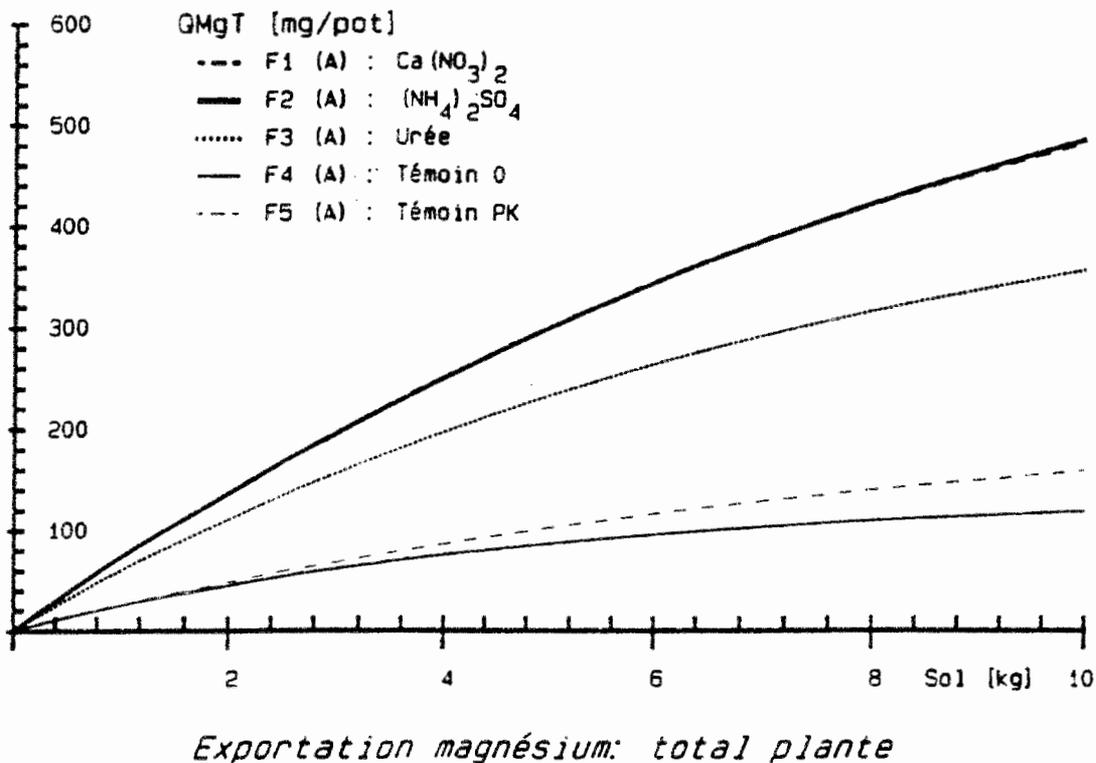


Figure 123

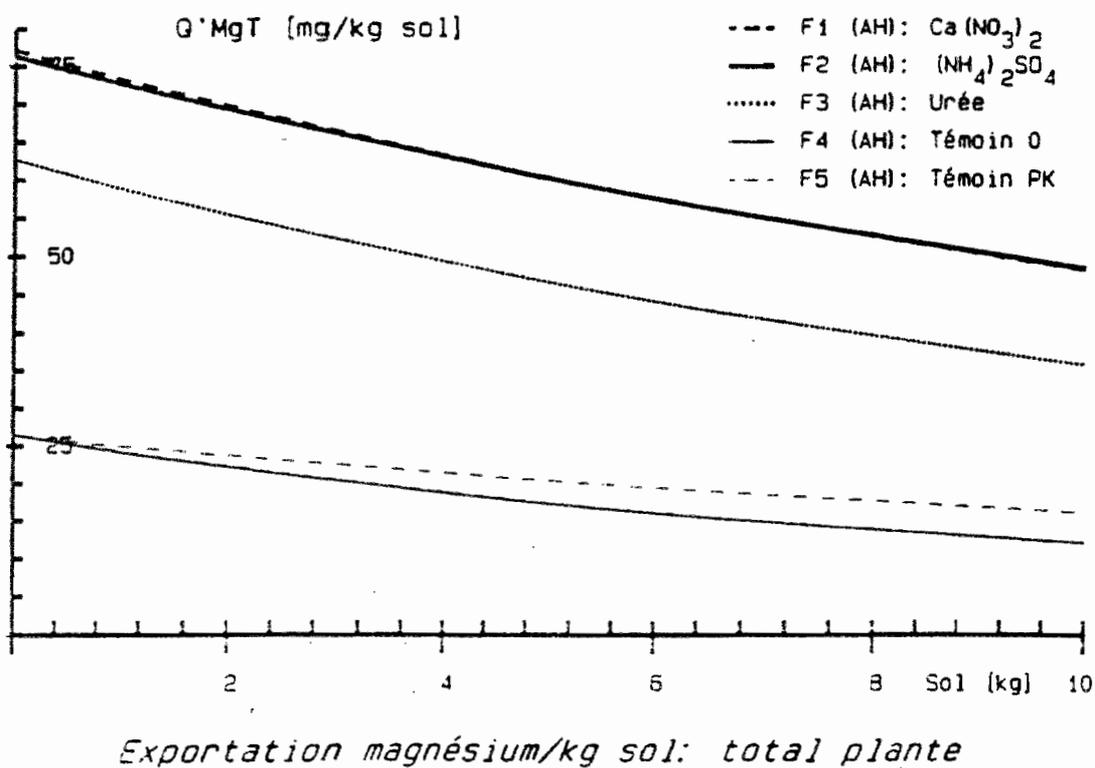


Figure 124

A la 1^{ère} coupe, Mg ayant la même évolution que Ca, les teneurs en Mg des tiges et feuilles de F₁ seront supérieures à celles de F₂ et F₃, mais dans le cas de Mg, la teneur moyenne de F₄ est supérieure à celle de F₁, ce qui montre la grande mobilité de ce cation du sol. Ces teneurs, représentées par des droites, ne présentent aucune pente significative, la teneur variant très peu d'un volume de sol à l'autre. Dans ce cas, nous retrouvons pour les exportations du Mg à la 1^{ère} coupe (figures 107 et 108) les mêmes fonctions "A - AH" que l'on avait trouvé pour les rendements ; mais les Q' (Mg exporté par kg de sol) ne présentent pas de différences significatives entre les volumes de sol pour les traitements F₁, F₃, F₄, F₅, c'est-à-dire que l'exportation de Mg par unité de volume est la même pour les petits pots comme pour les grands pots, autrement dit, vis-à-vis de Mg, la plante ne fait pas de différence suivant le volume de sol. Seul, le traitement F₂ montre des différences significatives entre les volumes de sol : plus le volume est petit, meilleur est le prélèvement de Mg par unité de volume ; nous avons fait la même observation pour Ca.

On peut estimer le pourcentage moyen de Mg échangeable du sol ayant été exporté à cette 1^{ère} coupe :

pour F₂ = 0,72 %,

pour F₄ = 0,14 %,

pour le Ca, nous avons respectivement 0,49 % et 0,09 %. L'utilisation du Mg du sol à la 1^{ère} coupe est donc plus importante que celle du Ca.

Les teneurs de la 2^{ème} coupe sont supérieures à celles de la 1^{ère} coupe, et les teneurs de la 3^{ème} coupe sont supérieures à celles de la 2^{ème} coupe, comme dans le cas du calcium. Les 2 témoins F₄ et F₅ ont des teneurs moyennes pour les 2^{ème} + 3^{ème} coupes aussi élevées que F₁, F₂, F₃ ; pour F₁, F₃, F₅, les pentes sont significativement décroissantes quand les volumes de sol augmentent.

Les fonctions représentatives des exportations de Mg aux 2^{ème} + 3^{ème} coupes (figures 113 et 114) sont toujours les fonctions "E₁ - E" pour F₁ et F₃, les fonctions "P_> - P_<" pour F₂, et l'apparition des fonctions "E₂ - E₁" pour F₄ et F₅ (le maximum de la fonction "E₂" se situant vers 7,8 kg, c'est-à-dire que l'exportation du volume V₅ est toujours moindre que celle du volume V₄).

Les exportations de Mg des 2^{ème} + 3^{ème} coupes se présentent de la même manière pour les 5 traitements : la quantité de Mg exportée par unité de volume diminue quand les volumes de sol augmentent, alors que pour Ca, les témoins F₄ et F₅ ne présentaient pas de variation avec les volumes de sol.

Les fonctions représentatives des exportations de Mg pour l'ensemble des 3 coupes (S₃) (figures 115 et 116) sont exactement les mêmes que celles observées

pour la 1^{ère} coupe : il s'agit des fonctions "A - AH", à cette différence près, comparativement à la 1^{ère} coupe, que toutes les fonctions "AH" exprimant l'exportation de Mg par unité de volume pour chacun des traitements, ont une pente significative, avec V_1 toujours supérieure à V_5 . Les teneurs (exprimant la teneur moyenne des 3 coupes) représentées par des droites, ne montrent cependant une pente décroissante significative que pour F_2 et F_5 . Précisons que le témoin F_4 a les teneurs les plus élevées des 5 traitements (11 % de plus que F_1 , 25 % de plus que F_2 , 33 % de plus que F_3) : ce témoin n'ayant pas reçu d'apport potassique, la concurrence des ions Ca et Mg avec les ions K ne joue pas ; le calcium et le magnésium du sol sont alors mieux prélevés, d'autant que le magnésium du sol est facilement accessible et assimilable.

L'action de l'engrais potassique, apporté en forte quantité, a sans doute limité les teneurs en Mg dans le cas des autres traitements : on connaît l'action négative d'un apport K sur les teneurs en Ca, Mg, Na (THOMANN Ch. - 1988).

Les courbes caractéristiques de ces exportations du Mg pour l'ensemble des 3 coupes, qu'il s'agisse de Q ou de Q', sont très distinctes les unes des autres pour F_1 , F_2 , F_3 , assez proches pour F_4 et F_5 . La nature de l'engrais azoté influe donc sur ce paramètre, nous montrant que le nitrate de Ca favorise l'exportation de Mg pour F_1 , mais le sulfate d'ammonium permet une exportation de Mg plus importante que l'urée ; quant aux témoins, qu'il y ait ou non apport P - K, cela modifie très peu l'exportation de Mg par unité de volume.

Les chaumes ont la particularité de présenter les teneurs en Mg les plus élevées, comparées à celles des 3 coupes et des racines, cela était vrai également pour le calcium ; la teneur de F_2 atteint 0,88 % en moyenne, soit 1,6 fois celle de F_1 . Comme nous l'avions supposé précédemment, l'apport de sulfate d'ammonium a nettement favorisé, au fur et à mesure de la libération des ions SO_4^- , l'assimilabilité de Ca et Mg, SO_4Mg étant très soluble (la teneur en Mg de F_2 à la 3^{ème} coupe était déjà supérieure à celles des autres traitements). Ces teneurs varient peu en fonction des volumes, sauf pour F_1 (la teneur répond à la fonction "A"). Les immobilisations du Mg dans les chaumes (figures 117 et 118) sont représentées par les fonctions " $P_> - P_<$ " pour F_1 et F_3 , et les fonctions " $E_1 - E$ " ou "A - AH" pour F_2 , F_4 , F_5 : dans ce dernier cas, les petits volumes de sol immobilisent toujours plus de Mg par unité de volume que les grands volumes de sol.

Nous retiendrons donc la forte immobilisation de Mg dans les chaumes, pour le traitement F_2 , soit en moyenne 44 % de plus que pour F_1 (avec Ca, elle était aussi élevée).

Comme pour le calcium, les teneurs en Mg des racines sont les plus faibles comparées à celles de chacune des 3 coupes et des chaumes, elles sont relativement homogènes, bien que F₄ présente les teneurs les plus élevées. Si les teneurs de F₁, F₃, F₅ présentent peu de variation en fonction des volumes de sol, les teneurs de F₂ croissent avec les volumes, celles de F₄ au contraire diminuent. Les immobilisations du Mg dans les racines (figures 119 et 120) répondent pour F₁, F₂, F₃, F₅ aux fonctions "D - H", et pour F₄ aux fonctions "P_> - P_<" montrant comme très souvent pour les racines, que Mg immobilisé par V₁ et par unité de volume est supérieur à Mg immobilisé par V₅, les rapports V₁ / V₅ des Q'MgRac sont les suivants :

$$F_1 = 4,84 ; \quad F_2 = 1,76 ; \quad F_3 = 3,12 ; \quad F_4 = 3,79 ; \quad F_5 = 1,58.$$

En moyenne, le traitement F₂ immobilise plus de Mg dans les racines que les autres traitements.

Le magnésium "immobilisé" par la plante dans les chaumes et les racines, après les coupes, représente 1/5 du Mg total (exporté + immobilisé) pour F₁ et F₃, plus du quart pour F₂, et près du tiers pour F₄ et F₅.

Les fonctions représentatives (figures 121 et 122) de ces immobilisations du Mg dans les chaumes + racines (SCR) sont "D - H" pour F₁, F₃, "P_> - P_<" pour F₂, F₅ et "A - AH" pour F₄ ; dans tous les cas, les volumes V₁ immobilisent plus de Mg par kg de sol que les volumes V₅.

Le traitement F₂ stocke beaucoup plus de Mg dans les chaumes et racines que les autres traitements, et ceci pour tous les volumes de sol. Quant au témoin F₄, du fait des teneurs élevées en Mg des chaumes et des racines, les immobilisations du Mg dans ces parties de la plante sont supérieures à celles du Ca, ce qui permet d'affirmer que **le Mg du sol est plus facilement assimilable que le Ca du sol.**

La teneur moyenne en Mg dans l'ensemble de la plante présente quelques particularités intéressantes à souligner :

- les teneurs moyennes du témoin F₄ sont les plus élevées des 5 traitements, ce n'était pas le cas pour Ca ; en l'absence de cations concurrentiels, le Mg du sol est très facilement accessible ;
- pour les 3 traitements F₁, F₂, F₃, on constate qu'il n'existe aucune variation de volume à volume : les teneurs moyennes peuvent être considérées comme identiques pour les 5 volumes de sol, on peut donc réellement parler d'une teneur moyenne de la plante pour chacun des traitements :

$$F_1 = 0,31 \% \quad F_2 = 0,30 \% \quad F_3 = 0,26 \%$$

De ce fait, les exportations totales de Mg (figures 123 et 124) répondent aux mêmes fonctions que celles des rendements, c'est-à-dire aux fonctions "A - AH". Notons que les 2 courbes ("A" et "AH") représentant F_1 et F_2 se superposent remarquablement : les 2 traitements ont exporté au total, pour chacun des volumes de sol, exactement le même taux de Mg ; comme si, compte tenu des volumes de sol et des apports d'engrais, il n'était pas possible à la plante d'exporter plus de Mg, puisqu'au cours du développement de la plante, F_1 et F_2 ont eu des comportements différents engendrant des exportations différentes de Mg, pour aboutir strictement au même total (en effet la moyenne des chiffres expérimentaux obtenue pour F_1 est de 290,09 mg par pot, celle pour F_2 , de 290,05 mg par pot, rappelons que la culture a duré 3 mois 1/2). Dans ce cas, il est intéressant de connaître le pourcentage de Mg éch. du sol prélevé par la plante :

$V_1 = 1,58 \%$; $V_2 = 1,52 \%$; $V_3 = 1,40 \%$; $V_4 = 1,27 \%$; $V_5 = 1,15 \%$
ces chiffres sont 1 fois 1/2 supérieurs à ceux du Ca.

Il ne fait aucun doute que l'apport azoté est indispensable au bon développement et donc à une bonne alimentation de la plante ; les exportations totales de Mg par F_1 et F_2 sont environ 3 fois supérieures à celles du témoin F_5 , et ce rapport est presque une constante pour les 5 volumes, ce qui pourrait signifier que les exportations de Mg sont proportionnelles à l'azote apporté. Les rapports Mg exporté par $F_1 - F_2$ / Mg exporté par F_5 sont les suivants :

$$V_1 = 2,85 \quad V_2 = 2,89 \quad V_3 = 2,92 \quad V_4 = 2,97 \quad V_5 = 3,02.$$

Dans l'étude précédente sur *Panicum*, nous avons précisé l'action très positive de l'apport azoté sur les exportations de Mg (THOMANN Ch. - 1988), et les excellentes corrélations entre les teneurs en N et les teneurs en Mg. L'exportation totale de Mg par unité de volume répondant à la fonction "AH" pour chacun des 5 traitements, il apparaît que dans tous les cas l'exportation par V_1 est supérieure à celle par V_5 , ce rapport est le suivant :

$$F_1 = 1,38 ; \quad F_2 = 1,37 ; \quad F_3 = 1,47 ; \quad F_4 = 1,71 ; \quad F_5 = 1,40 ;$$

tous ces rapports sont supérieurs à ceux obtenus pour Ca, notamment pour F_4 .

Compte-tenu des différences de densité racinaire entre les petits pots et les grands pots, on en déduit que Mg est plus facilement absorbé par les racines que Ca, d'autant mieux qu'il y a plus de racines, on peut en conclure à une plus grande mobilité de ce cation par rapport à Ca.

3.8 LES EXPORTATIONS DE SODIUM

Les graminées sont, en principe, indifférentes au sodium, c'est-à-dire qu'elles seraient plutôt tolérantes.

Le rôle du sodium semble très limité : "il n'est indispensable à aucune plante cultivée, bien que les propriétés de son atome soient très voisines de celles du potassium. Il pourrait avoir un effet bénéfique dans le cas où K est déficient, mais du fait qu'on le retrouve en assez fortes proportions dans les chaumes, cela voudrait dire qu'il a été refoulé après une migration aérienne, et dans ce cas, ne serait d'aucune utilité pour la plante." (MARTIN-PREVEL P. - 1984).

Les résultats expérimentaux du prélèvement du sodium par *Panicum* sont donnés dans le tableau IX.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 125 à 142.

Le vertisol de l'expérimentation renferme 0,91 meq % sous forme de sodium échangeable, et 1,54 meq % sous forme de sodium total. La plante a donc à sa disposition 210 mg Na échangeable par kg de sol, et le sodium prélevé par *Panicum* ne peut provenir que du sol.

C'est pour cet élément que nous obtenons les erreurs les plus élevées sur les teneurs et par conséquent sur les exportations, à cause des faibles teneurs en Na dans la plante ; le sodium, bien que très soluble, n'est prélevé au mieux qu'à 3 % du Na éch. du sol pour F_4 et à 18 % pour F_2 . Si pour Na^+ , sa vitesse de diffusion en milieu aqueux est très proche de celle de K^+ , par contre sa vitesse de franchissement des membranes le place en bon dernier après NH_4^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} .

Les teneurs du sol en Ca et Mg échangeables étant très importantes, Na sera faiblement absorbé, le sol renferme en effet 40 fois plus de Ca et Mg que de Na.

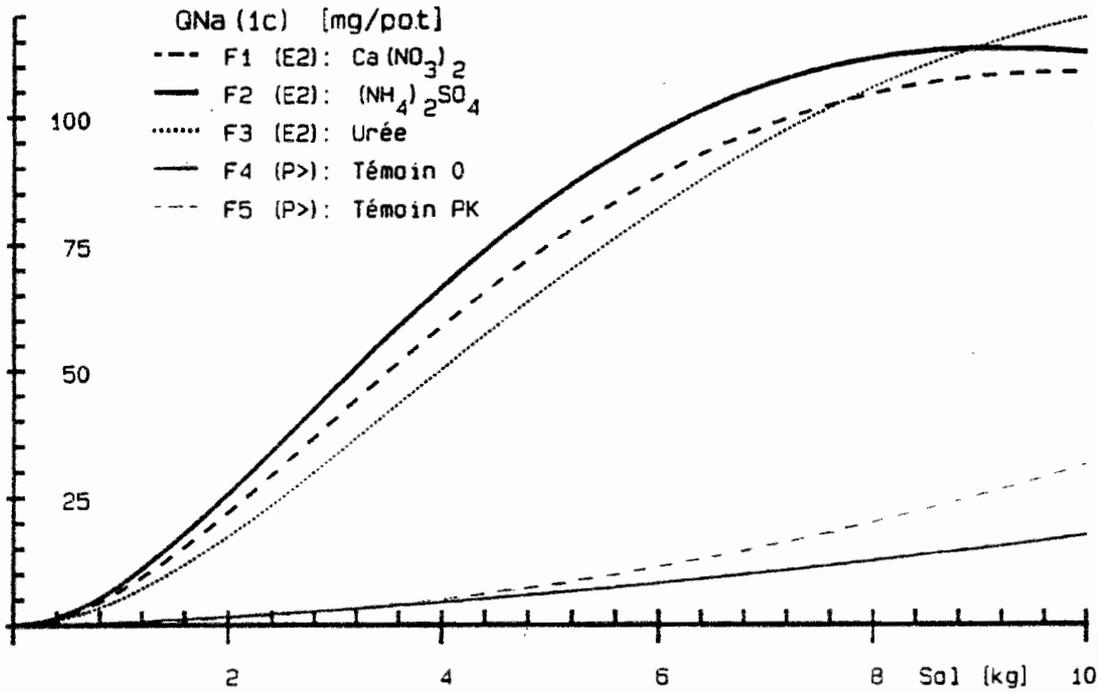
Les teneurs en Na de la 1^{ère} coupe ne dépassent pas la moyenne de 0,11 %, ce sont les plus faibles de tout l'ensemble ; leur évolution en fonction des volumes de sol ne répond pas forcément à une droite :

- pour F_1 , F_2 , F_3 : ces teneurs sont représentées par les fonctions "A" ou "E₁", ce qui engendre, au niveau des exportations, les fonctions "E₂ - E₁" (figures 125 et 126), nous indiquant que le maximum de Na exporté par kg de sol se situe avant les volumes V_4 et V_5 , ces volumes exportant beaucoup plus de potassium que les petits volumes, on peut supposer que l'antagonisme K - Na joue à ce niveau ;

TABLEAU IX – PRELEVEMENT DU SODIUM PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

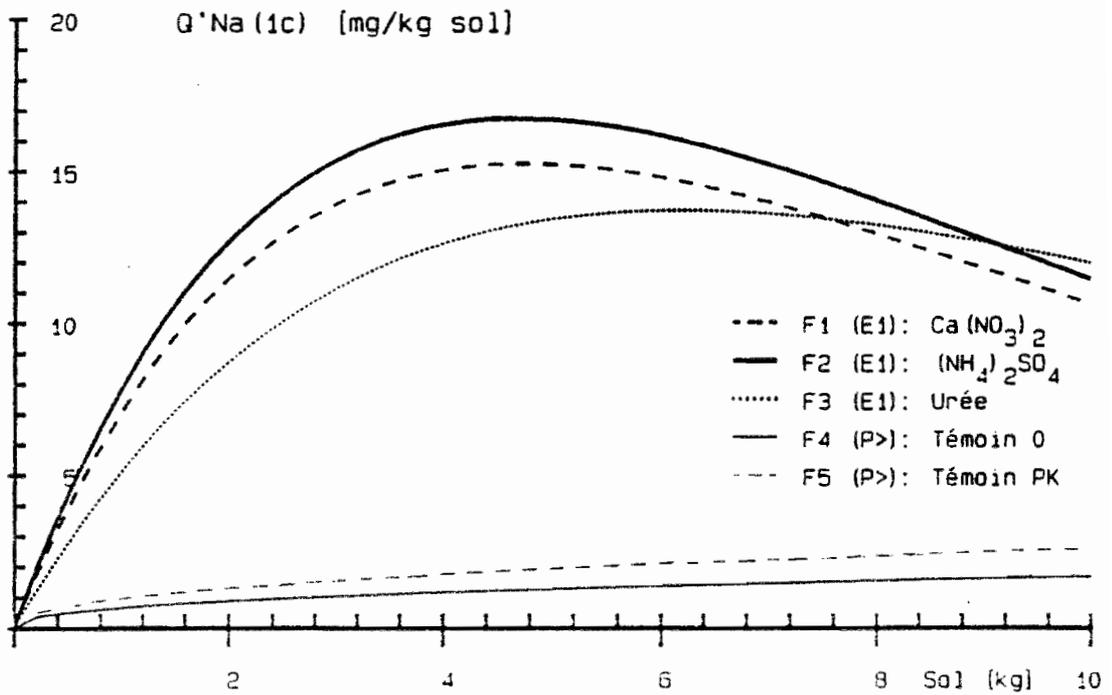
(Q = mg Na par pot ; Q' = mg Na par kg de sol)

	1ère coupe		2ème coupe		3ème coupe		2ème +3ème coupes		1ère + 2ème + 3ème coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	23,5	11,5	5,5	2,7	4,7	2,3	10,2	5,0	33,7	16,5	12,4	6,1	23,9	11,7	36,3	17,8	70,0	34,3
	V ₂	43,1	14,6	8,3	2,8	4,7	1,6	13,0	4,4	56,1	19,1	16,6	5,7	26,5	9,0	43,1	14,7	99,2	33,7
	V ₃	66,1	14,3	16,7	3,6	14,6	3,1	30,2	6,7	97,4	21,0	34,3	7,4	33,7	7,3	68,0	14,6	165,4	35,6
	V ₄	96,9	14,2	18,7	2,7	11,3	1,7	30,0	4,4	126,9	18,6	42,2	6,2	36,0	5,3	78,2	11,5	205,2	30,1
	V ₅	108,2	12,1	20,1	2,2	17,4	1,9	37,5	4,2	145,8	16,3	65,8	7,4	39,7	4,4	105,5	11,8	251,2	28,1
F ₂	V ₁	26,1	12,8	5,2	2,6	4,6	2,2	9,8	4,8	35,8	17,6	14,0	6,9	26,1	12,8	40,1	19,7	76,0	37,2
	V ₂	45,3	15,4	7,4	2,5	3,9	1,3	11,3	3,8	56,6	19,2	22,9	7,8	29,4	10,0	52,2	17,8	108,8	37,0
	V ₃	75,8	16,3	15,5	3,3	8,5	1,8	24,0	5,2	99,9	21,5	34,1	7,4	39,7	8,6	73,8	15,9	173,7	37,4
	V ₄	109,0	16,0	21,8	3,2	11,3	1,7	33,1	4,9	142,1	20,8	55,9	8,2	40,1	5,9	96,0	14,1	238,1	34,9
	V ₅	111,4	12,4	30,4	3,4	19,7	2,2	50,1	5,6	161,5	18,0	75,3	8,4	53,2	5,9	128,5	14,4	290,0	32,4
F ₃	V ₁	19,7	9,7	4,6	2,2	5,1	2,5	9,6	4,7	29,3	14,4	11,6	5,7	19,4	9,5	31,0	15,2	60,3	29,6
	V ₂	29,8	10,1	4,7	1,6	4,2	1,4	8,9	3,0	38,7	13,2	15,9	5,4	20,2	6,9	36,1	12,3	74,8	25,5
	V ₃	61,6	13,3	14,4	3,1	12,3	2,6	26,6	5,7	88,2	19,0	32,4	7,0	27,8	6,0	60,2	13,0	148,4	32,0
	V ₄	93,9	13,8	15,5	2,3	11,5	1,7	27,0	4,0	120,9	17,7	48,6	7,1	22,8	3,3	71,4	10,5	192,3	28,2
	V ₅	113,1	12,6	17,2	1,9	14,1	1,6	31,3	3,5	144,3	16,1	65,1	7,3	29,3	3,3	94,3	10,5	238,7	26,7
F ₄	V ₁	2,0	1,0	0,8	0,4	0,6	0,3	1,4	0,7	3,4	1,7	1,9	0,9	5,5	2,7	7,4	3,6	10,8	5,2
	V ₂	2,4	0,8	1,1	0,4	0,8	0,3	1,8	0,6	4,2	1,4	2,7	0,9	8,4	2,9	11,1	3,8	15,3	5,2
	V ₃	6,9	1,5	3,0	0,6	2,0	0,4	5,1	1,1	11,9	2,6	5,4	1,2	9,9	2,1	15,3	3,3	27,2	5,8
	V ₄	8,2	1,2	5,3	0,8	3,1	0,5	8,4	1,2	16,6	2,4	9,8	1,4	14,5	2,1	24,3	3,5	40,9	6,0
	V ₅	15,5	1,7	8,0	0,9	3,5	0,4	11,6	1,3	27,0	3,0	15,0	1,7	14,0	1,6	29,0	3,2	56,0	6,2
F ₅	V ₁	3,2	1,5	1,0	0,5	0,8	0,4	1,8	0,9	5,0	2,4	2,8	1,3	8,5	4,2	11,3	5,5	16,3	7,9
	V ₂	4,4	1,5	1,1	0,4	0,8	0,3	2,0	0,7	6,4	2,2	2,9	1,0	9,2	3,1	12,1	4,1	18,5	6,3
	V ₃	8,4	1,8	3,5	0,7	2,6	0,6	6,1	1,3	14,5	3,1	7,5	1,6	15,0	3,2	22,5	4,8	37,0	7,9
	V ₄	10,5	1,5	3,9	0,6	2,8	0,4	6,6	1,0	17,1	2,5	9,7	1,4	20,2	3,0	29,9	4,4	47,0	6,9
	V ₅	26,7	3,0	7,4	0,8	5,3	0,6	12,6	1,4	39,3	4,4	18,2	2,0	27,8	3,1	46,0	5,1	85,3	9,5



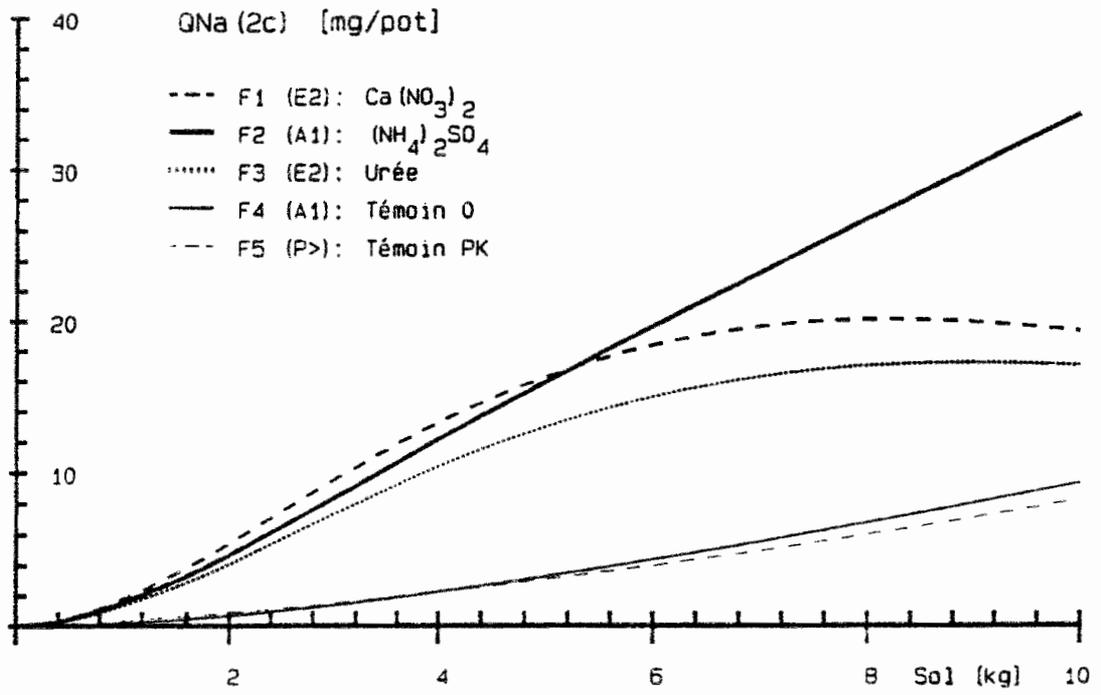
Exportation sodium: 1ère coupe

Figure 125



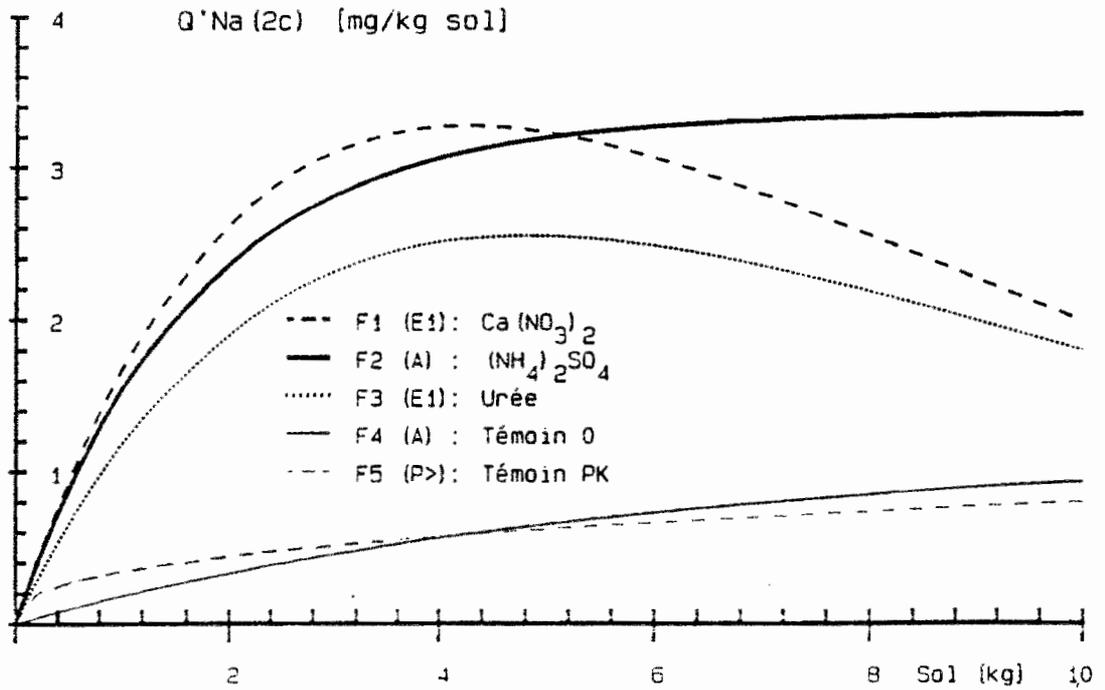
Exportation sodium/kg sol: 1ère coupe

Figure 126



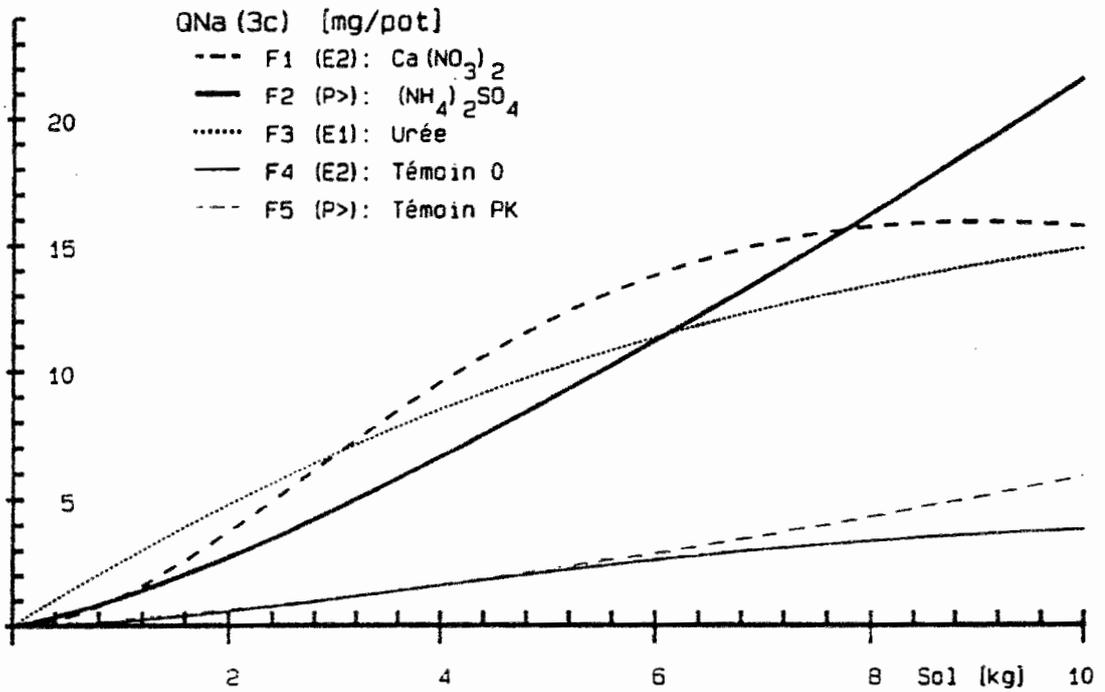
Exportation sodium: 2ème coupe

Figure 127



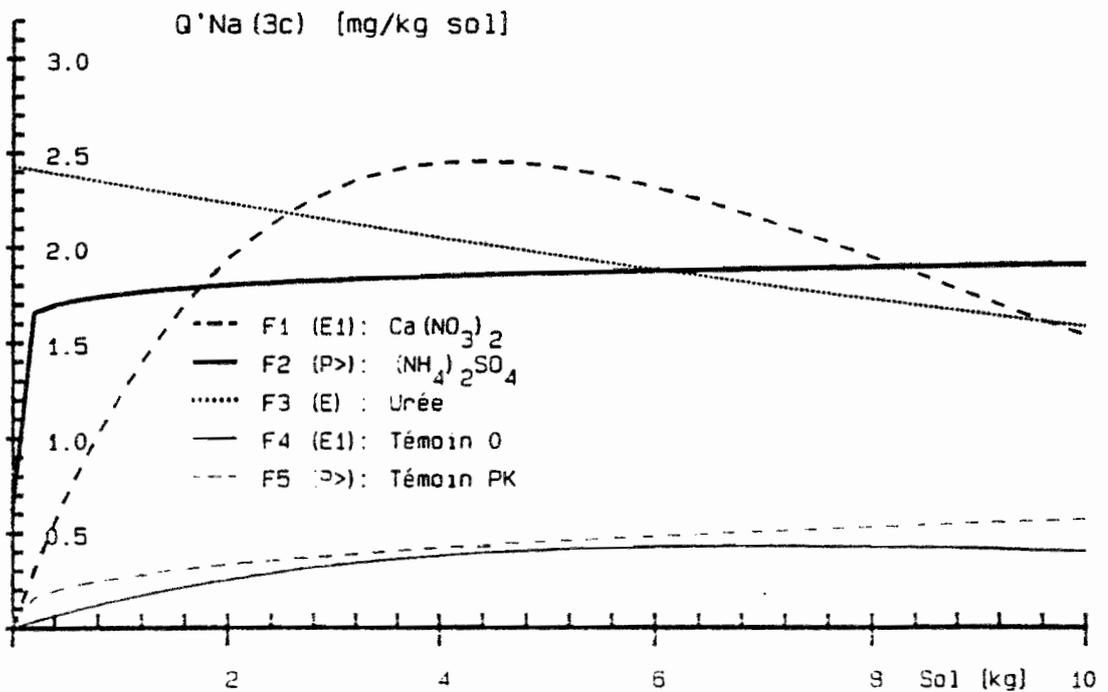
Exportation sodium/kg sol: 2ème coupe

Figure 128



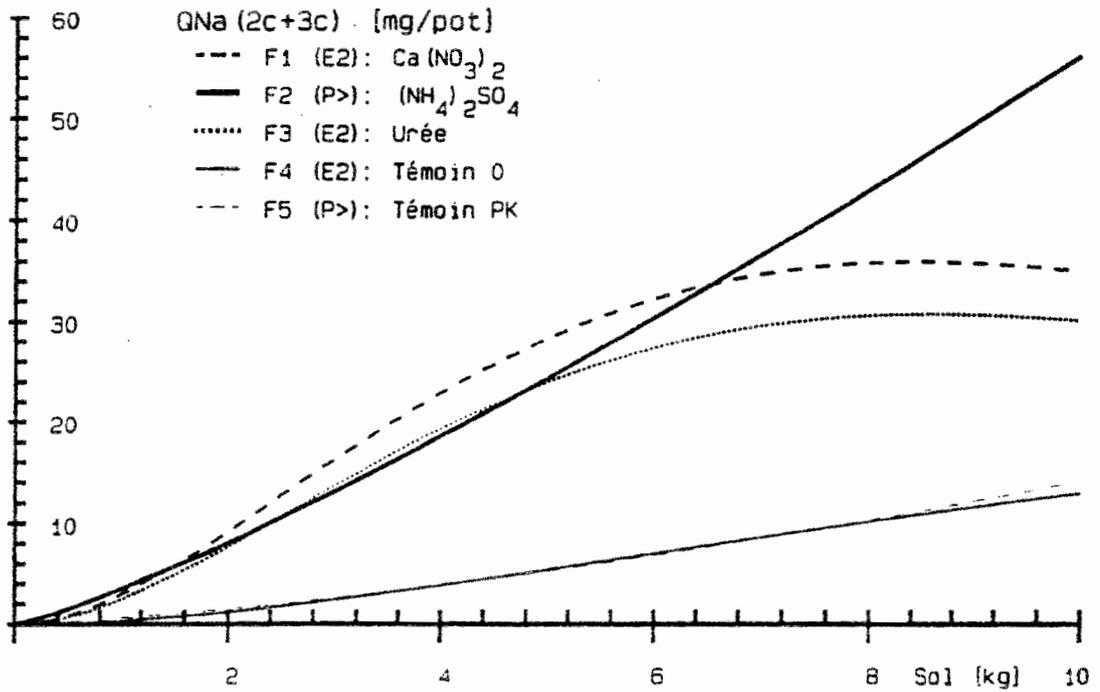
Exportation sodium: 3ème coupe

Figure 129



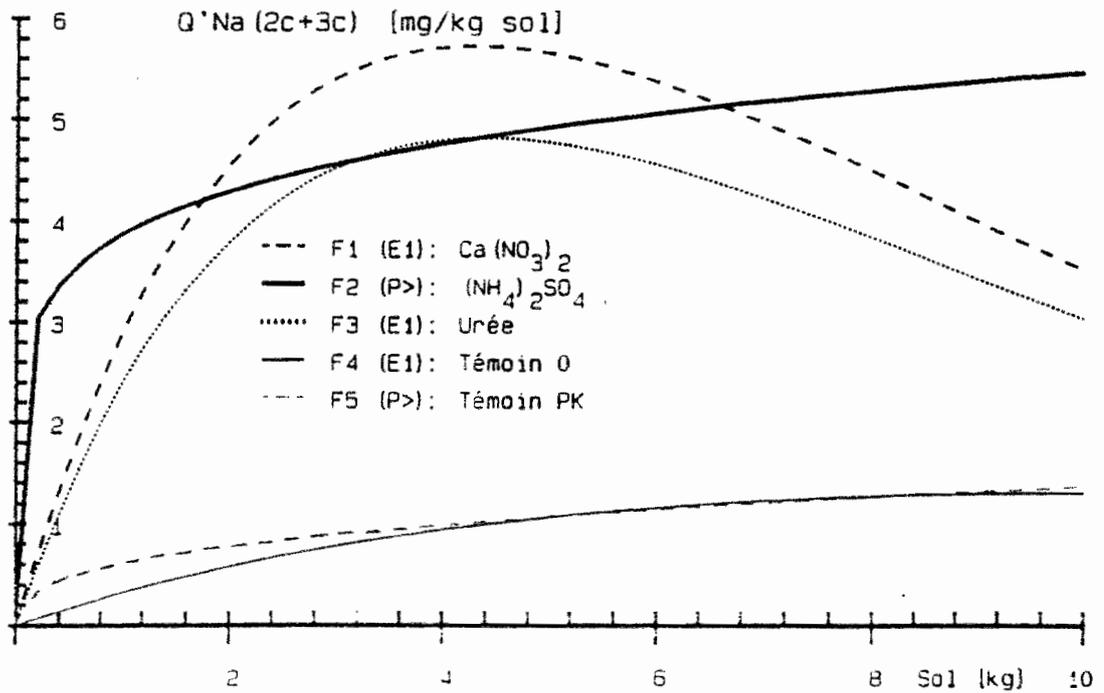
Exportation sodium/kg sol: 3ème coupe

Figure 130



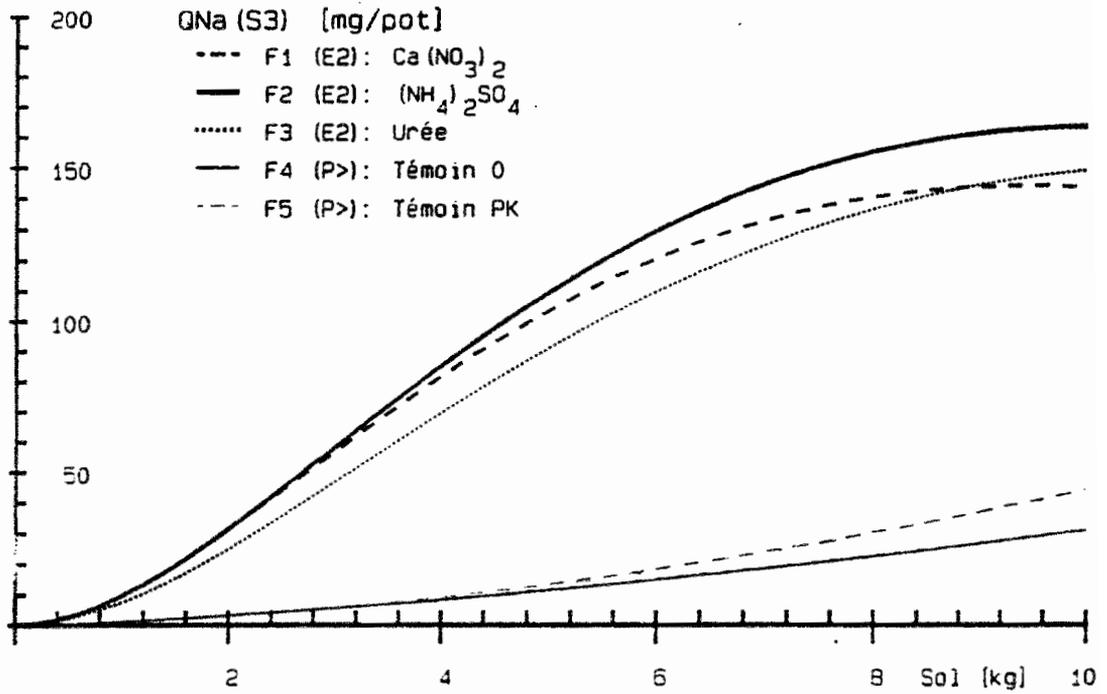
Exportation sodium: 2ème + 3ème coupes

Figure 131



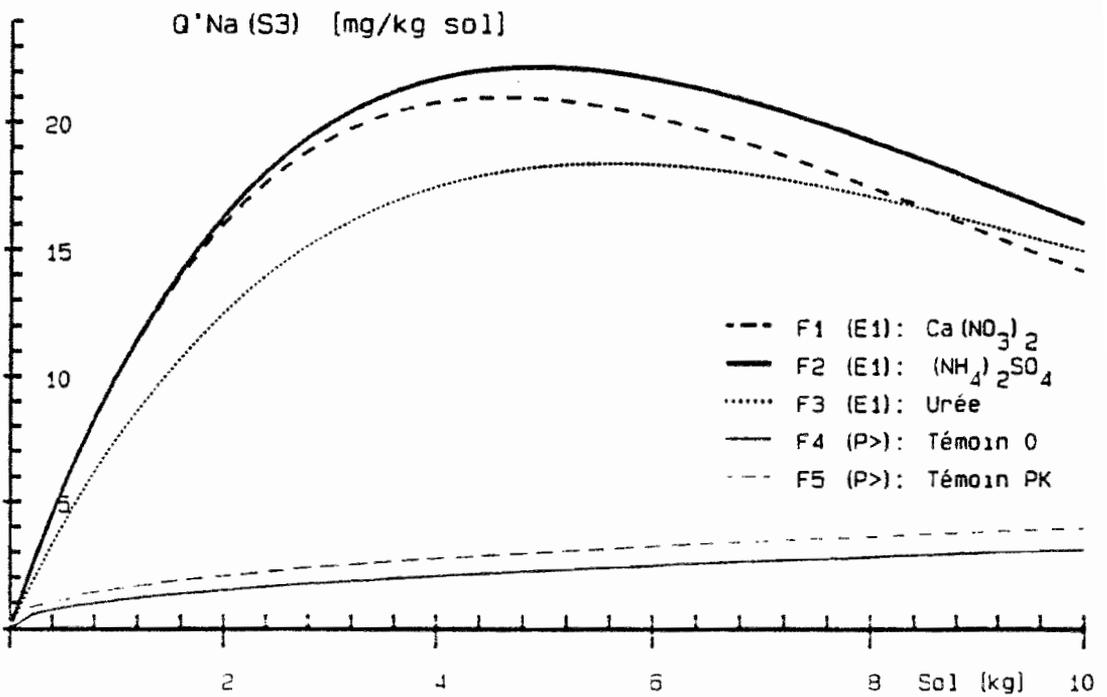
Exportation sodium/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 132



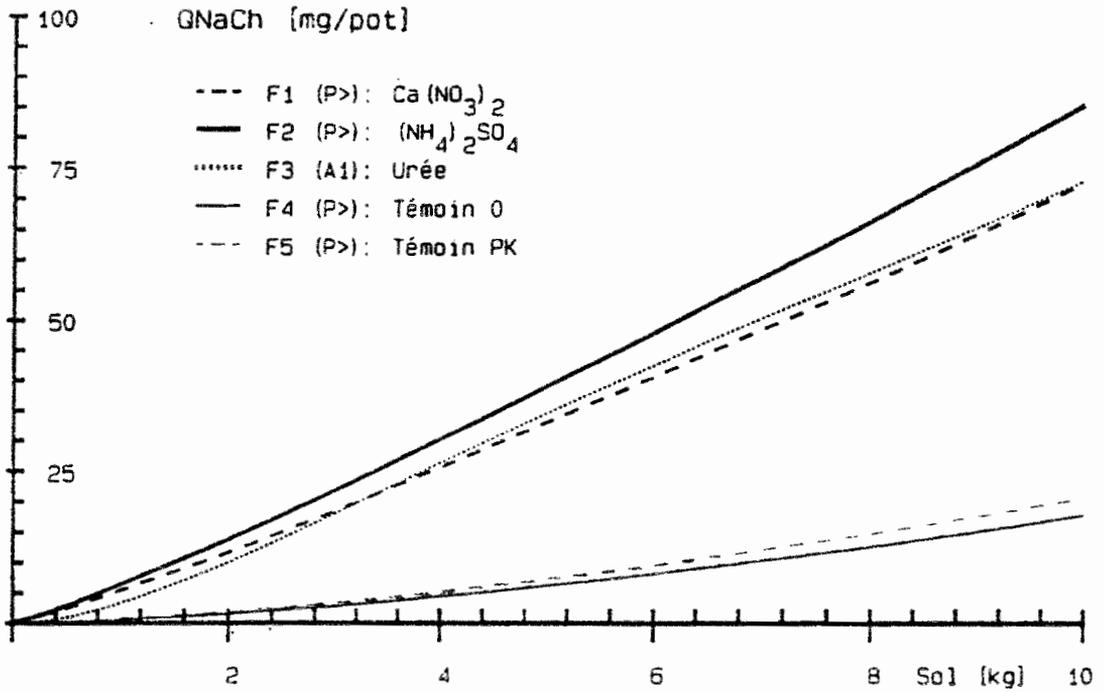
Exportation sodium: 3 coupes (S3)

Figure 133



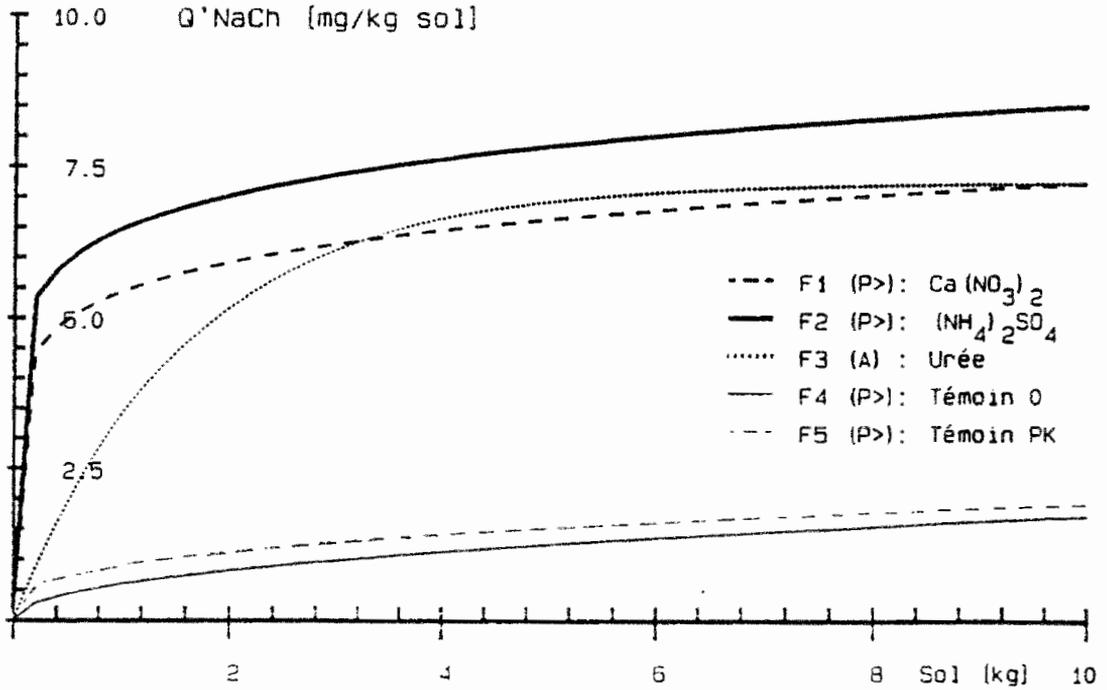
Exportation sodium/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 134



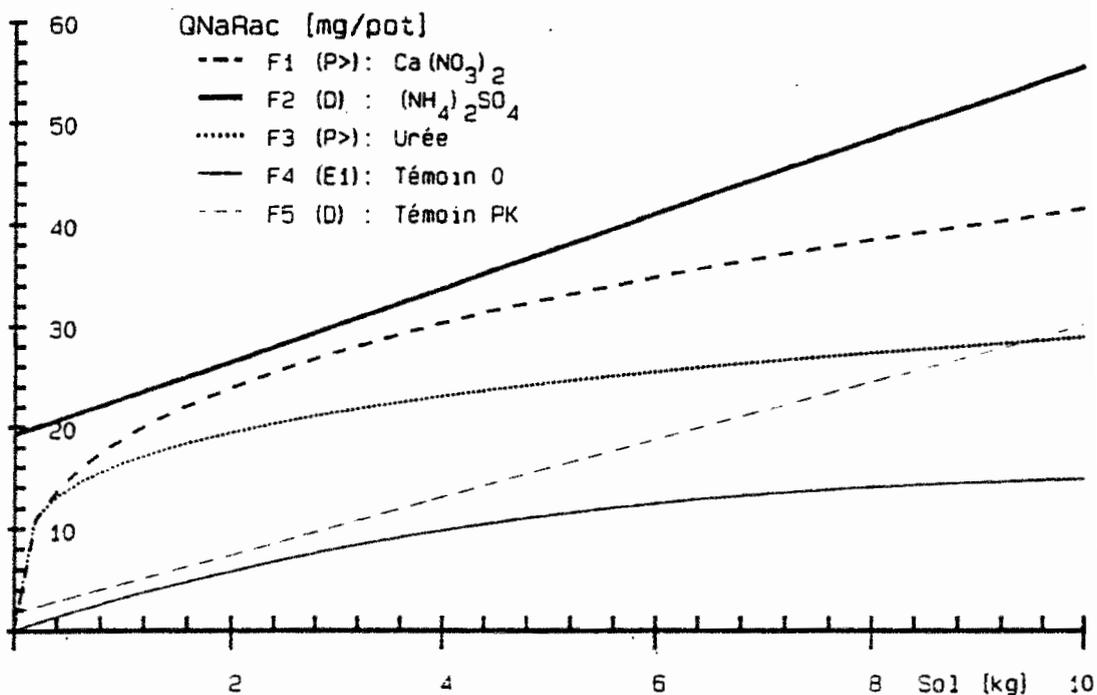
Immobilisation sodium: chaumes

Figure 135



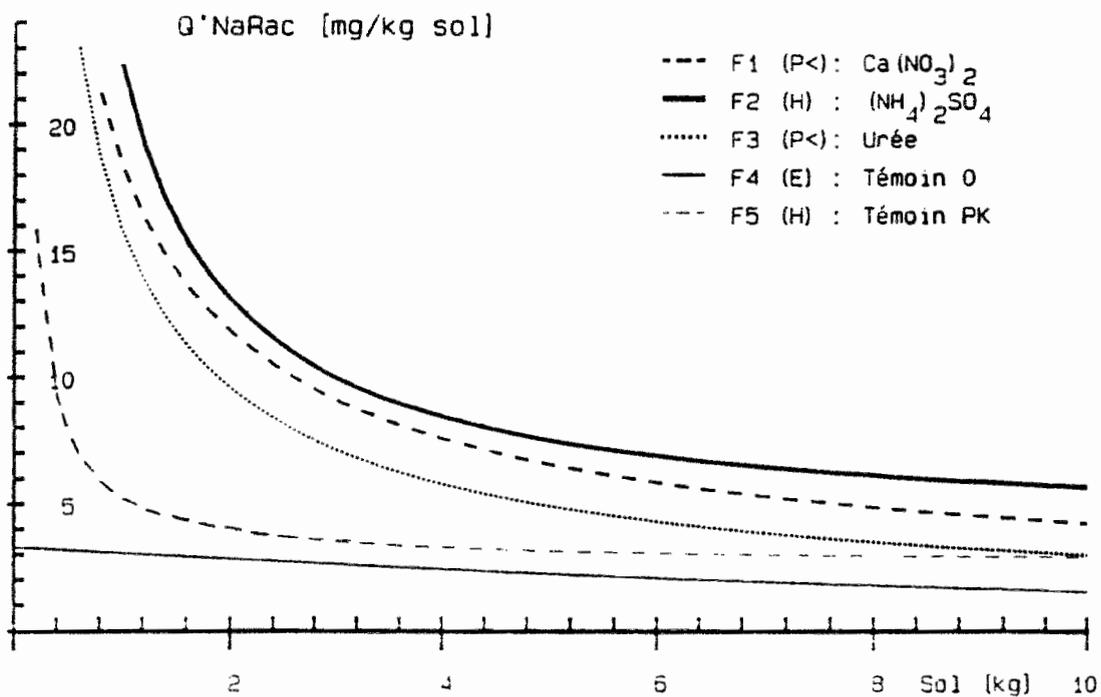
Immobilisation sodium/kg sol: chaumes

Figure 136



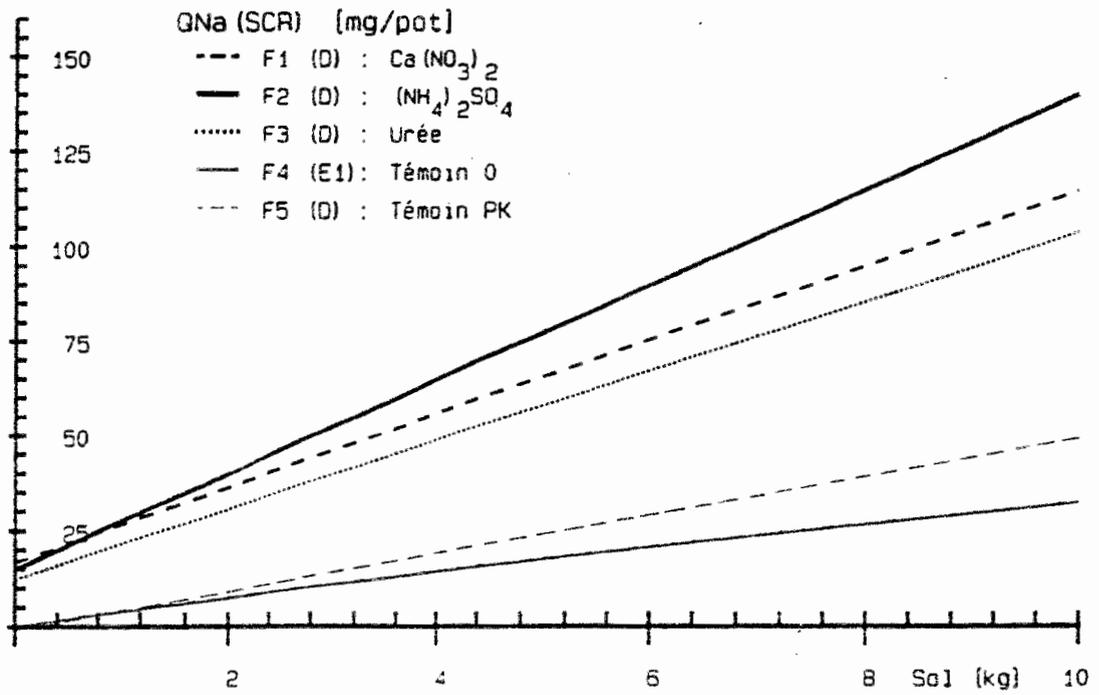
Immobilisation sodium: racines

Figure 137



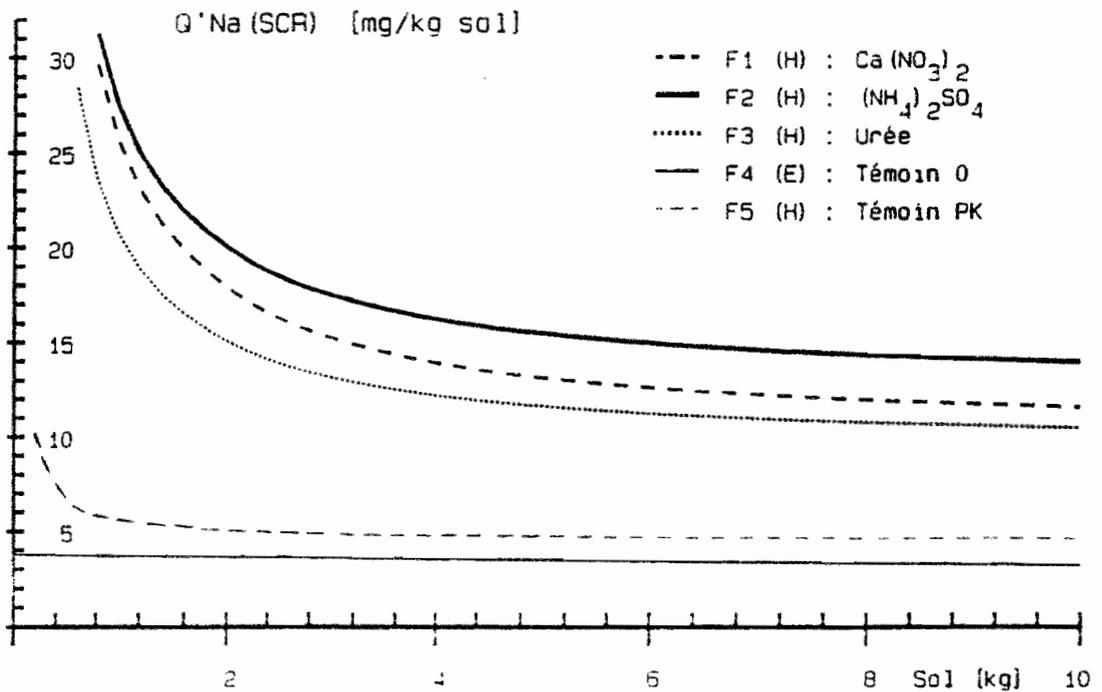
Immobilisation sodium/kg sol: racines

Figure 138



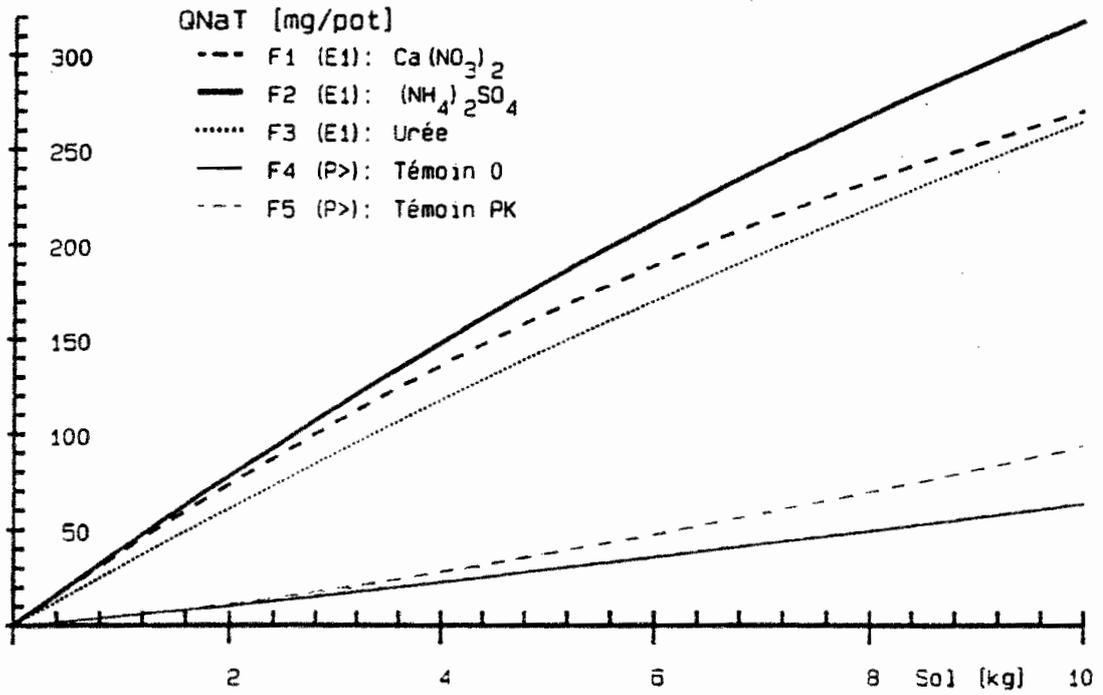
Immobilisation sodium: chaumes + racines (SCR)

Figure 139



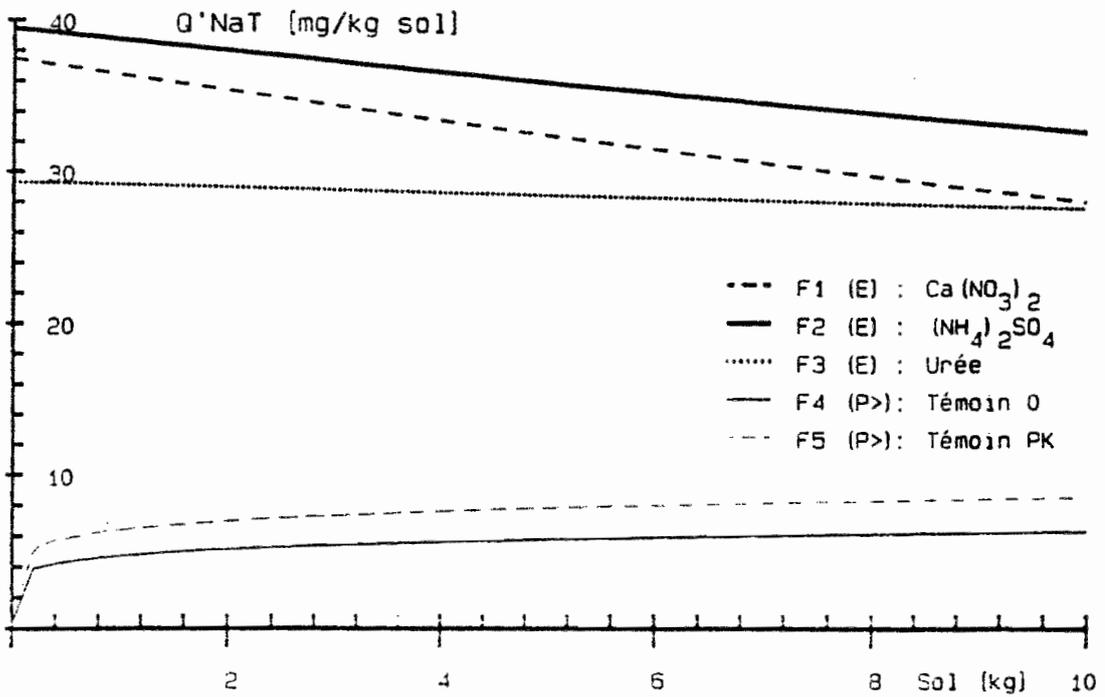
Immobilisation sodium/kg sol: chaumes + racines (SCR)

Figure 140



Exportation sodium: total plante

Figure 141



Exportation sodium/kg sol: total plante

Figure 142

- pour les 2 témoins, les teneurs sont représentées par des droites croissantes vers les grands volumes de sol (les teneurs de V_5 sont plus du double de celles de V_1), et les exportations, du fait de cette augmentation en fonction des volumes de sol, répondent à des fonctions " $P_{>} - P_{>}$ "; dans le cas de F_5 , qui a reçu un apport potassique, la teneur en K de V_5 à la 1^{ère} coupe n'était supérieure à celle de V_1 que de 20 %, cette faible variation explique peut-être la forte augmentation de Na.

Les teneurs en Na de la 2^{ème} coupe sont supérieures à celles de la 1^{ère} coupe et les teneurs de la 3^{ème} coupe sont supérieures à celles de la 2^{ème} coupe : ceci pour les traitements F_1, F_2, F_3 ; dans le cas des témoins, elles ont à peine augmenté par rapport à celles de la 1^{ère} coupe. Les erreurs étant très élevées pour les 2^{ème} et 3^{ème} coupes, aussi bien pour les teneurs que pour les exportations, l'imprécision des fonctions oblige seulement à des hypothèses .

Les exportations de la somme 2^{ème} + 3^{ème} coupes (figures 131 et 132) répondent aux fonctions " $E_2 - E_1$ " pour F_1, F_3 et F_4 ; aux fonctions " $P_{>} - P_{>}$ " pour F_2 et F_5 .

Précisons que le traitement F_1 , contrairement aux 4 autres, ne présente aucune augmentation significative des teneurs en fonction des volumes pour chacune des coupes, aussi les fonctions " $E_2 - E_1$ " caractérisent-elles les exportations de la 1^{ère} coupe à la somme des 3 coupes.

Nous retrouvons pour les **exportations de S_3** (figures 133 et 134), les mêmes fonctions que pour la 1^{ère} coupe : pour F_1, F_2, F_3 , les fonctions " $E_2 - E_1$ ", pour F_4, F_5 : les fonctions " $P_{>} - P_{>}$ ", avec une légère amélioration des erreurs relatives, qui restent très élevées pour les témoins.

Signalons que, contrairement aux autres éléments, l'exportation de Na par les tiges + feuilles des 3 coupes se caractérise par les fonctions " $E_2 - E_1$ " pour les traitements ayant reçu des engrais (le facteur limitant dans ce cas est le potassium, largement prélevé par la plante), alors que les fonctions puissance, avec augmentation des quantités de Na exporté par kg de sol avec les volumes de sol, caractérisent les témoins F_4 et F_5 .

Les **chaumes** se caractérisent par des teneurs en Na très élevées : 4 à 5 fois celles de la 1^{ère} coupe pour F_1, F_2, F_3 et 3 fois pour F_4 et F_5 : il y a un véritable stockage du Na dans les chaumes, qui augmente fortement de V_1 à V_5 pour tous les traitements. Les fonctions puissance " $P_{>} - P_{>}$ " caractérisent ce stockage (figures 135 et 136), et la quantité de Na immobilisé dans les chaumes par kg de sol augmente lorsque les volumes de sol augmentent, pour les 5 traitements : dans le

cas de F_4 , V_5 immobilise 2 fois plus de Na par kg de sol que V_1 . Ceci est vraiment particulier au sodium.

Les teneurs en Na des racines restent élevées, elles sont caractérisées par des droites ne présentant aucune variation significative avec les volumes de sol ; aussi les immobilisations du Na dans les racines (figures 137 et 138) sont-elles représentées par des fonctions "D - H" ou " $P_{>} - P_{<}$ ", et les Q' dans ces cas là sont décroissants avec les volumes de sol, comme toujours pour les racines, le témoin F_5 faisant exception.

Vu l'importance des teneurs en Na des chaumes et des racines, les immobilisations de Na dans l'ensemble chaumes + racines sont élevées, elles représentent en moyenne, par rapport à la totalité du sodium exporté et pour chacun des traitements :

$F_1 = 39,9 \%$; $F_2 = 42,6 \%$; $F_3 = 39,9 \%$; $F_4 = 58,3 \%$; $F_5 = 60,9 \%$; le sodium est donc, de tous les éléments, celui qui est le mieux retenu dans les chaumes et les racines. Ces immobilisations (figures 139 et 140) sont caractérisées par les fonctions "D - H" pour F_1, F_2, F_3, F_5 et par les fonctions " $E_1 - E$ " pour F_4 ; les erreurs étant élevées (entre 15 et 20 %) il n'y a que pour les traitements F_1, F_2, F_3 que l'on puisse affirmer que V_1 immobilise plus de Na par unité de volume que V_5 .

Les fonctions représentant les exportations totales du sodium par la plante (figures 141 et 142) sont, pour F_1, F_2, F_3 différentes de celles obtenues pour la 1^{ère} coupe : elles répondent aux fonctions classiques " $E_1 - E$ " nous indiquant que les Q' ont tendance à être décroissants avec les volumes de sol ; l'analyse statistique de variance nous montre que cela est vrai pour F_1 , mais pour F_2 et F_3 , on peut considérer que Na exporté par kg de sol par l'ensemble de la plante ne varie pas avec les volumes de sol, c'est le seul élément pour lequel le traitement F_2 présente ce type de réaction. Par contre, pour F_4 et F_5 , les fonctions "puissance" se maintiennent et dans ce cas, les Q' auraient tendance à augmenter quand les volumes de sol augmentent : mais là aussi, l'analyse statistique nous montre que ces variations ne sont pas significatives ; ceci est une exception pour le témoin F_4 , car pour tous les autres éléments, la quantité d'élément prélevé par unité de volume diminuait toujours quand les volumes de sol augmentaient. On peut donc estimer que l'élément Na se comporte différemment de tous les autres éléments. Pour le témoin F_5 par contre, nous avons observé ce même résultat pour le potassium et le calcium.

3.9 LES EXPORTATIONS DE SILICE

"La silice est un élément indispensable aux graminées, on la trouve sous forme de silice amorphe ou d'acide silicique polymérisé, en grande partie dans les parties aériennes, tandis que les espèces pauvres en silice la conservent surtout dans leurs racines.

Dans les graminées, la silice paraît former des complexes avec les autres constituants des parois squelettiques assurant la rigidité des tissus, elle se combine avec la cellulose pour former une couche sous - cuticulaire protégeant contre l'excès de transpiration et elle joue un rôle antitoxique vis-à-vis de Fe et de Mn." (MARTIN-PREVEL P. - 1984).

La teneur en silice des graminées est donc élevée par rapport à la majorité des plantes, car indispensable à la constitution de ses tissus.

Les résultats expérimentaux du prélèvement de la silice par *Panicum* sont donnés dans le tableau X.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 143 à 160.

Les teneurs en silice de la 1^{ère} coupe varient en moyenne de 3 à 4,5 % : F₁ a les teneurs les plus faibles, sans doute par la présence de Ca⁺⁺, SiO₂ et Ca⁺⁺ participant à la solidité des tissus, si l'un domine, l'autre est moindre ; F₅ a les teneurs les plus élevées, comme il avait les teneurs en P les plus fortes. Précédemment (THOMANN Ch. - 1988), nous avons souligné l'excellente corrélation entre la teneur en P et la teneur en SiO₂, surtout à la 1^{ère} coupe.

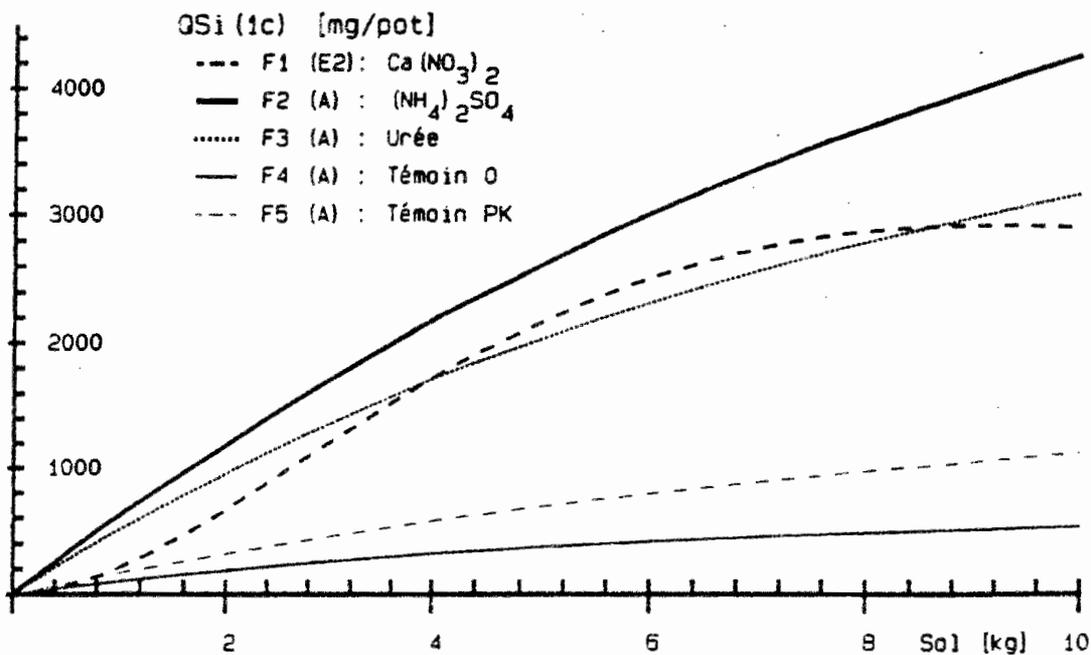
Ces teneurs sont représentées par des droites, avec des pentes non significatives (excepté pour F₃), nous retrouvons donc pour les exportations (figures 143 et 144) les fonctions "A" obtenues pour les rendements, F₁ fait exception et répond à une fonction "E₂". Le traitement F₂ exporte plus de silice que F₁ et F₃, car pour ce traitement, étant donné les très bonnes corrélations existant entre les teneurs de la 1^{ère} coupe en SiO₂ et les teneurs en N, P, K, Na, toutes celles-ci étant pour F₂ un peu supérieures à celles de F₁ et F₃, il en résulte un effet cumulatif qui se traduit par des teneurs plus élevées, et par conséquent des exportations plus importantes, différenciant nettement F₂ de F₁ et de F₃.

Ramenées à l'unité de volume, les exportations de silice à la 1^{ère} coupe se traduisent par les fonctions "AH", seul F₁ répond à la fonction "E₁"; pour F₂, F₃, F₄ les pentes sont significatives, c'est-à-dire que V₁ exportera plus de silice par kg de sol que V₅, ce qui n'est pas le cas pour F₅.

TABLEAU X – PRELEVEMENT DE LA SILICE PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

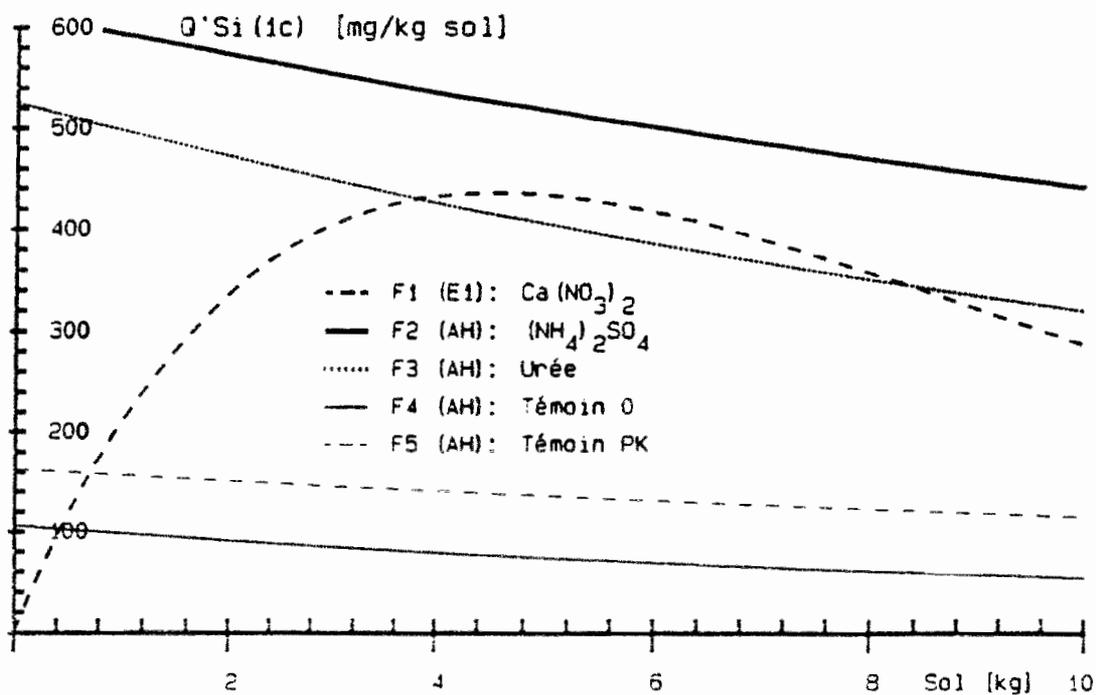
(Q = mg SiO₂ par pot ; Q' = mg SiO₂ par kg de sol)

F - V	1 ^{ère} coupe		2 ^{ème} coupe		3 ^{ème} coupe		2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		1 ^{ère} + 2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	768	376	235	115	136	66	370	182	1138	558	253	124	223	109	476	233	1614	791
	V ₂	1115	379	386	131	197	67	582	198	1697	577	332	113	202	69	534	182	2232	759
	V ₃	1880	405	455	98	258	56	713	154	2593	559	479	103	239	51	718	154	3310	713
	V ₄	2914	427	540	79	254	37	794	116	3708	544	554	81	255	37	809	118	4518	662
	V ₅	2816	315	518	58	238	27	756	85	3572	399	585	65	317	35	902	101	4474	500
F ₂	V ₁	1079	529	339	166	159	78	498	244	1577	773	269	132	182	89	451	221	2027	994
	V ₂	1770	602	511	174	213	73	724	246	2494	848	371	126	205	70	576	196	3070	1044
	V ₃	2448	528	648	140	334	72	982	212	3430	739	483	104	396	85	879	189	4310	929
	V ₄	3360	493	585	86	312	46	897	132	4257	624	601	88	339	50	940	138	5197	762
	V ₅	3939	440	838	94	389	44	1228	137	5167	577	834	93	562	63	1396	156	6563	733
F ₃	V ₁	963	472	235	115	139	68	375	184	1338	656	241	118	142	69	382	187	1720	843
	V ₂	1311	446	360	123	169	57	529	180	1840	626	343	117	162	55	505	172	2346	798
	V ₃	1898	409	469	101	234	50	704	152	2601	561	454	98	180	39	634	137	3236	697
	V ₄	2616	384	630	92	257	38	887	130	3503	514	559	82	190	28	749	110	4252	623
	V ₅	2920	326	395	44	230	26	624	70	3544	396	640	72	276	31	916	102	4461	498
F ₄	V ₁	182	88	107	52	77	37	184	89	366	178	113	55	144	70	257	125	623	302
	V ₂	246	84	168	57	120	41	288	98	534	182	160	55	147	50	307	104	841	286
	V ₃	410	88	288	62	193	41	481	103	891	191	235	50	186	40	421	90	1312	281
	V ₄	377	55	346	51	200	29	546	80	923	135	248	36	131	19	378	55	1302	190
	V ₅	535	59	368	41	161	18	529	59	1064	118	270	30	132	15	402	45	1465	163
F ₅	V ₁	286	139	119	58	87	42	206	100	492	239	141	68	67	33	208	101	700	340
	V ₂	470	160	193	66	145	49	338	115	809	275	190	65	74	25	264	90	1073	365
	V ₃	643	138	289	62	210	45	499	107	1142	245	271	58	92	20	362	78	1504	323
	V ₄	881	129	357	52	252	37	609	89	1490	218	318	46	147	22	465	68	1956	285
	V ₅	1036	115	360	40	247	27	607	67	1643	183	370	41	227	25	597	66	2240	249



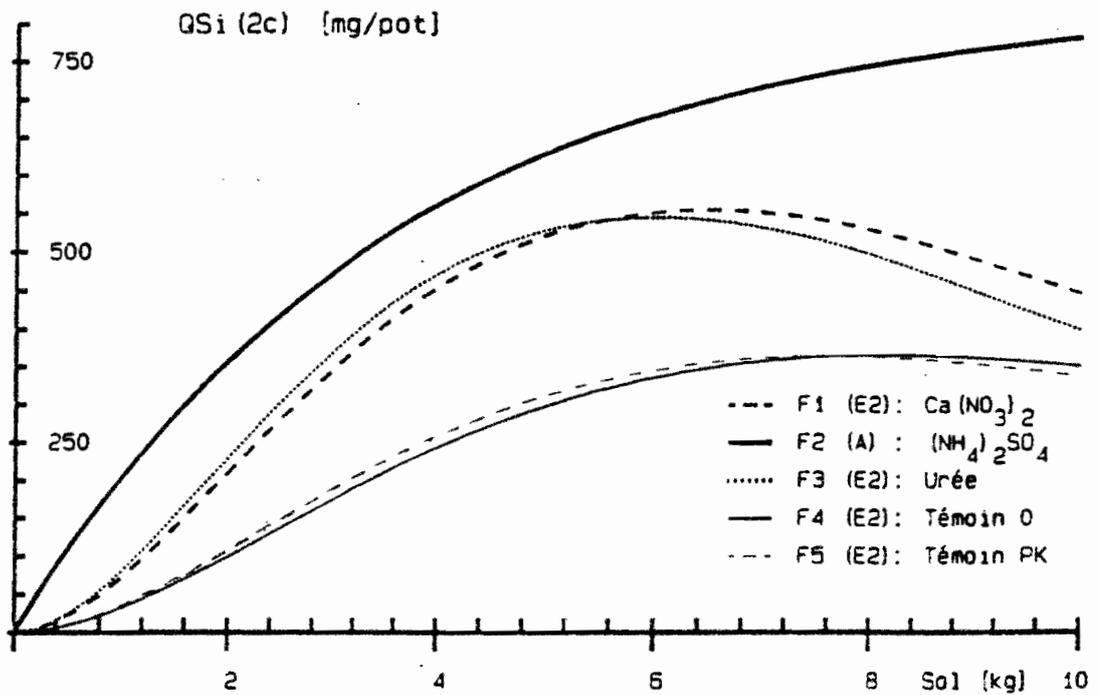
Exportation silice: 1ère coupe

Figure 143



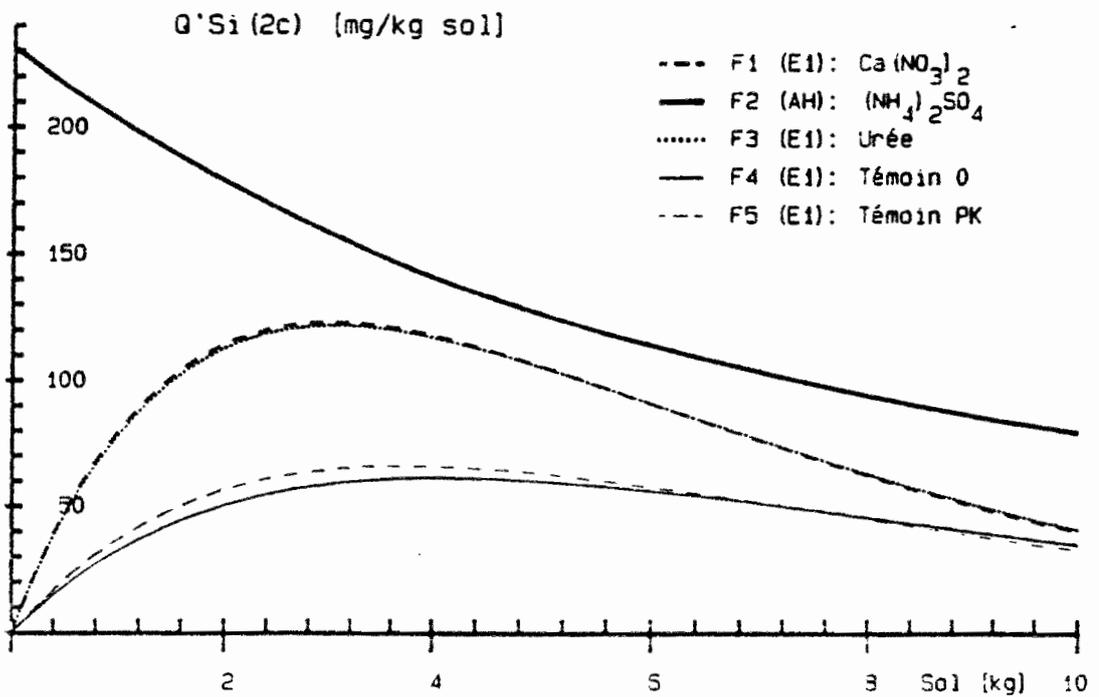
Exportation silice/kg sol: 1ère coupe

Figure 144



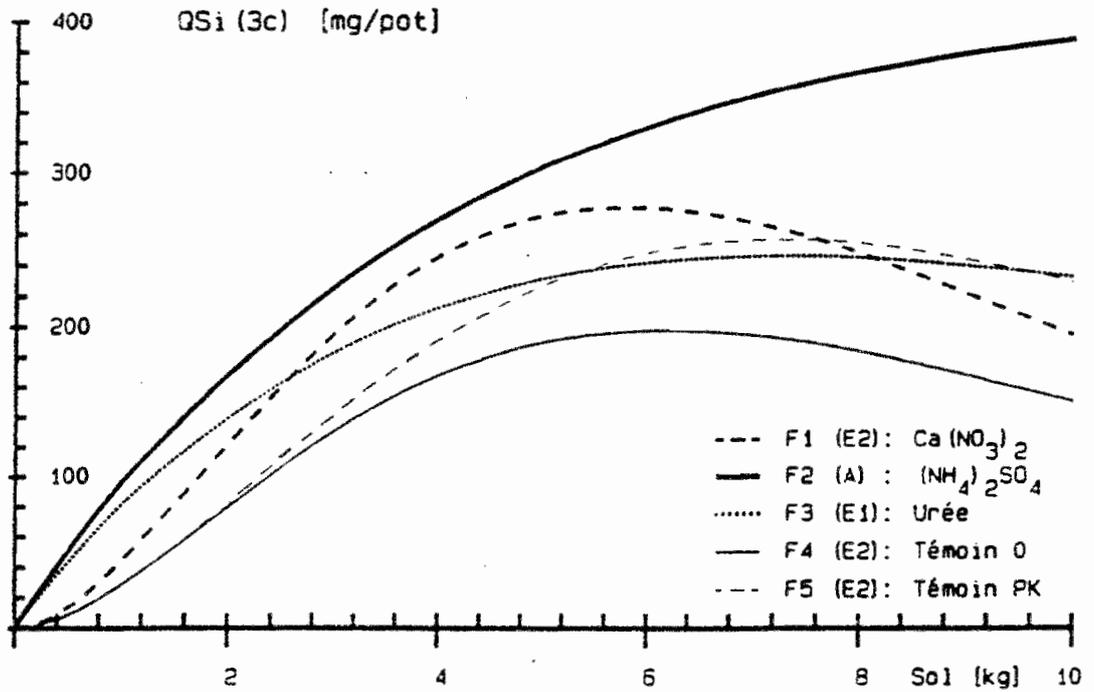
Exportation silice: 2ème coupe

Figure 145



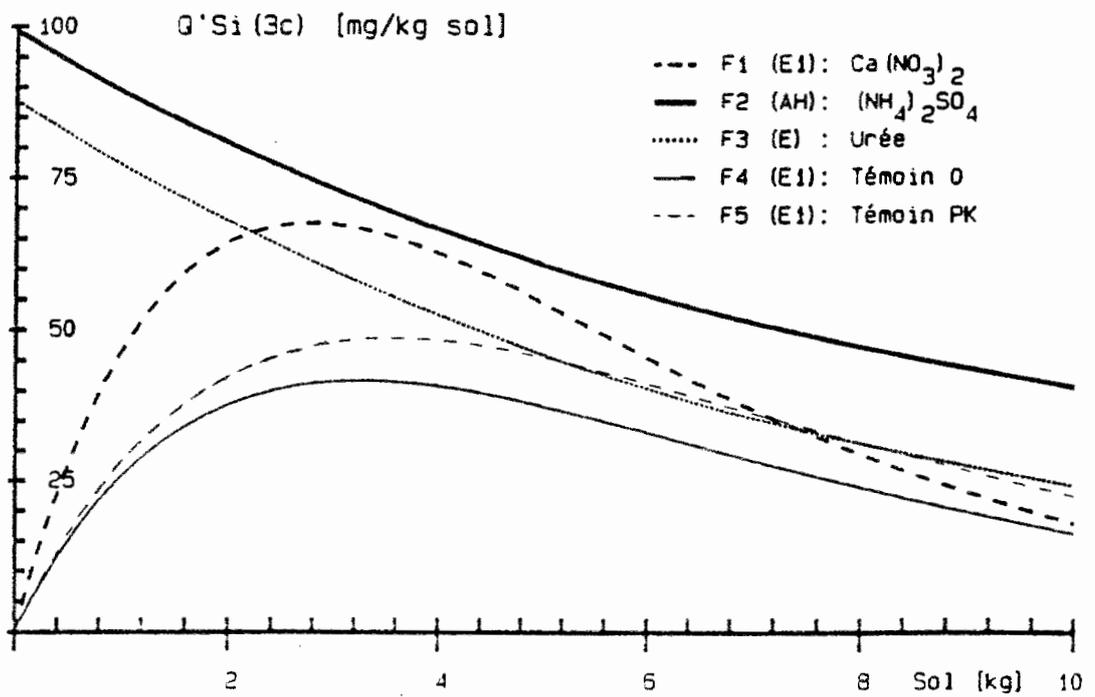
Exportation silice/kg sol: 2ème coupe

Figure 146



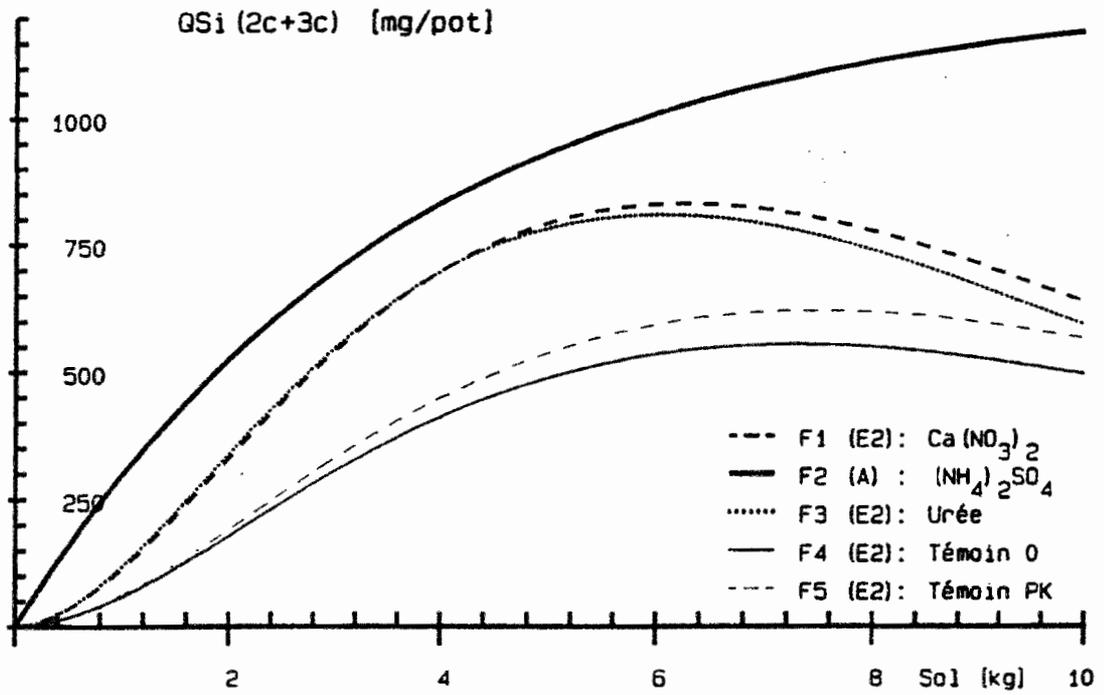
Exportation silice: 3ème coupe

Figure 147



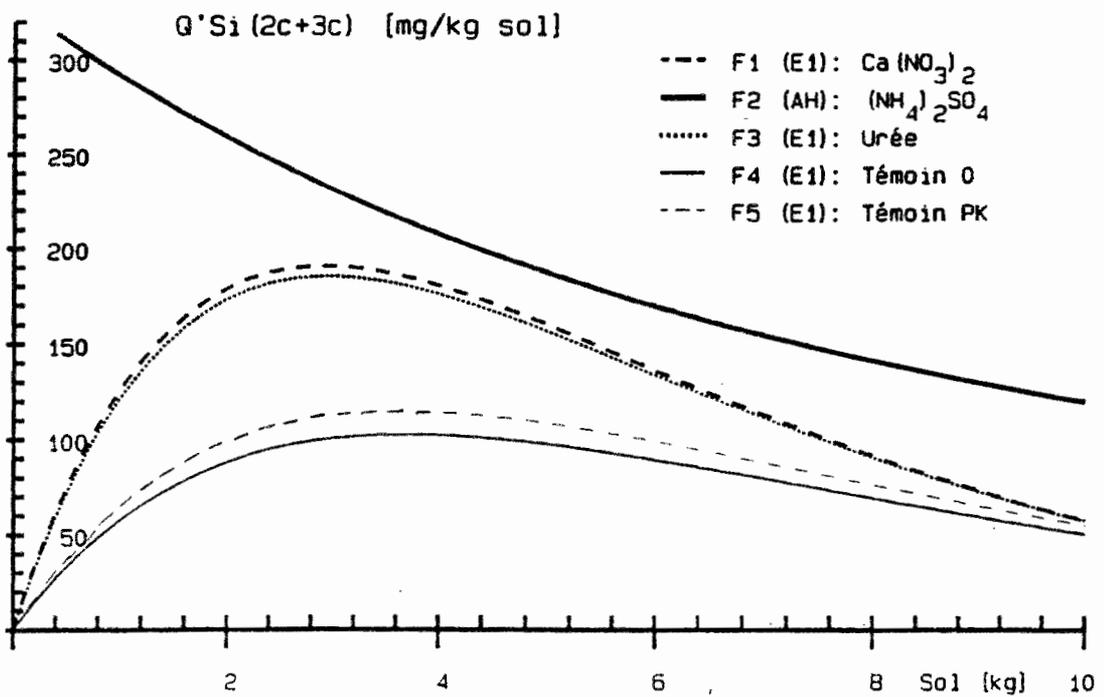
Exportation silice/kg sol: 3ème coupe

Figure 148



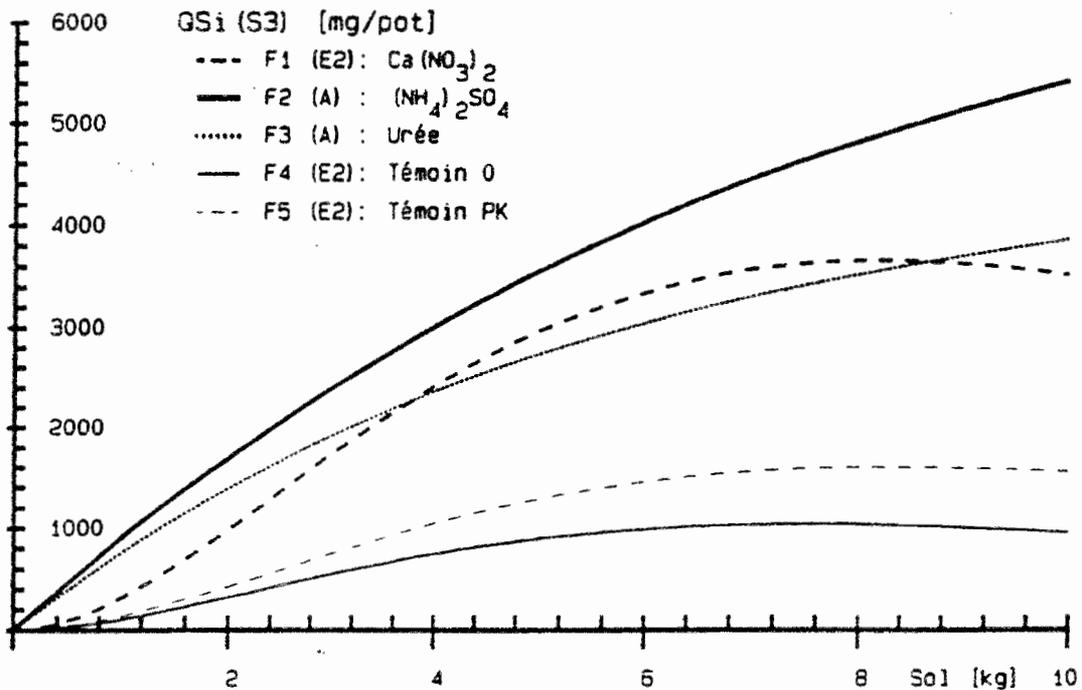
Exportation silice: 2ème + 3ème coupes

Figure 149



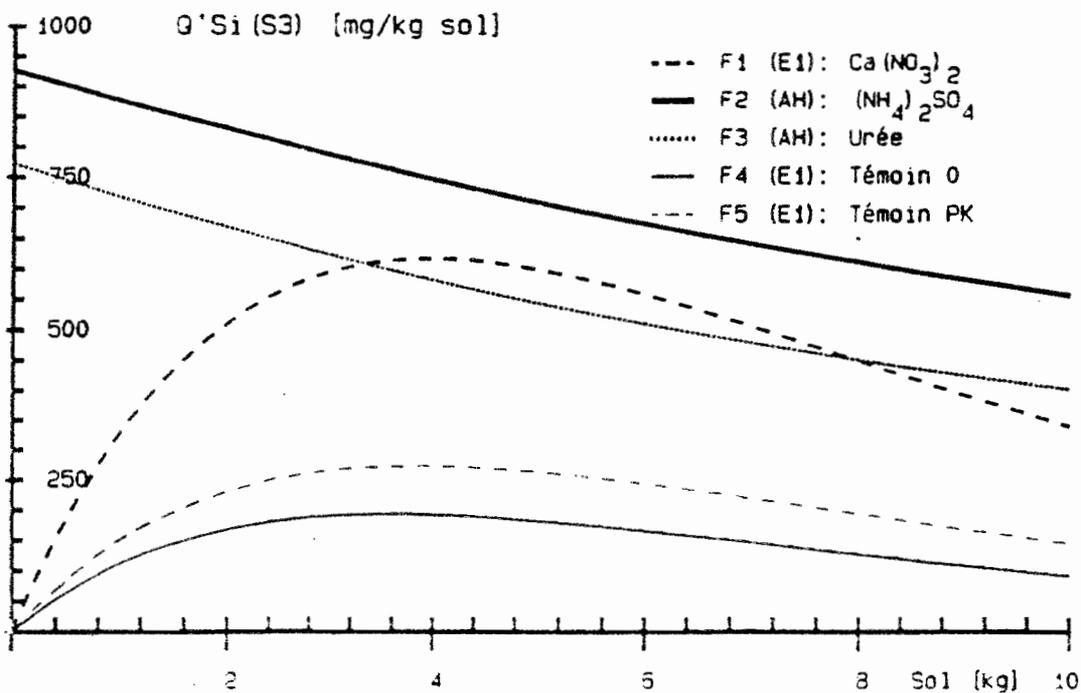
Exportation silice/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 150



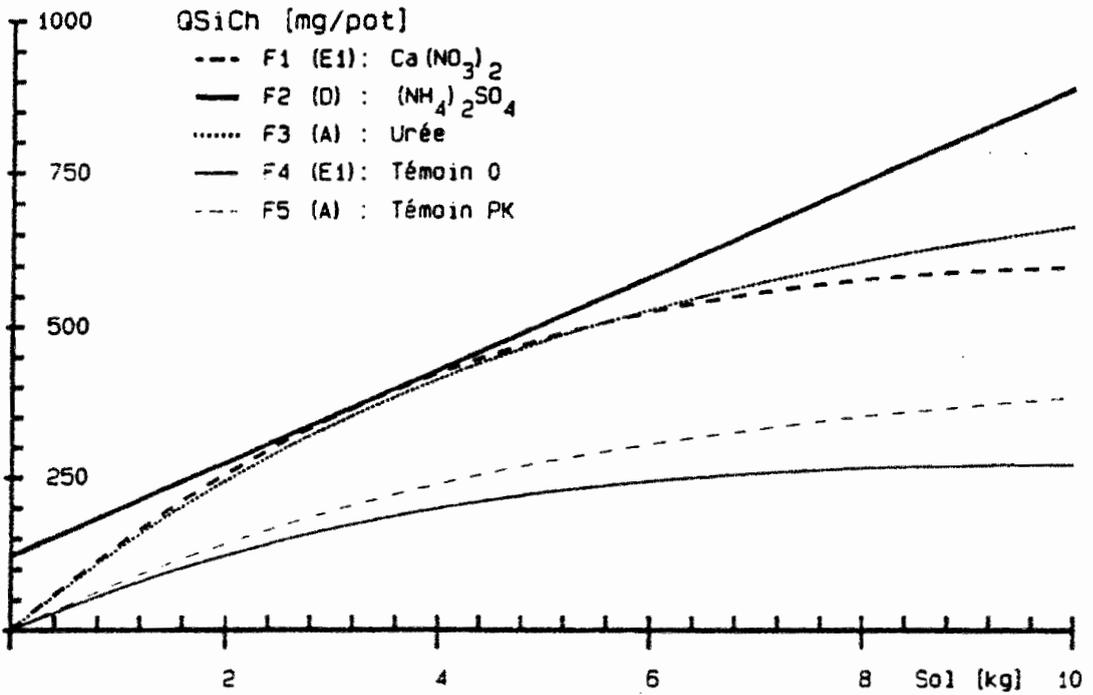
Exportation silice: 3 coupes (S3)

Figure 151



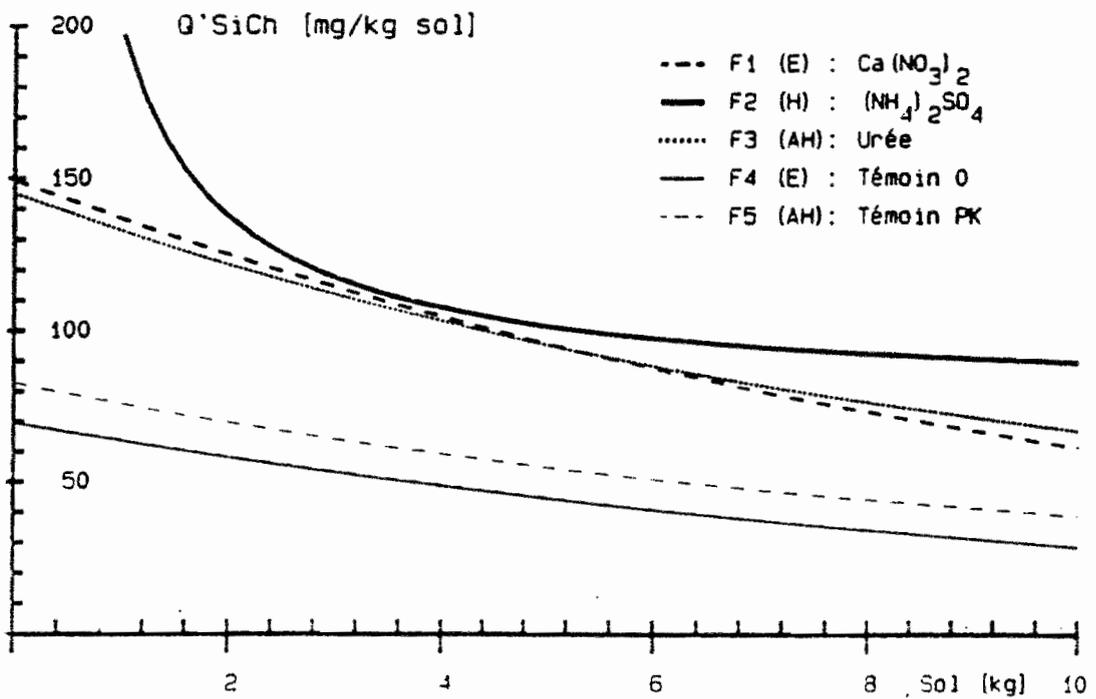
Exportation silice/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 152



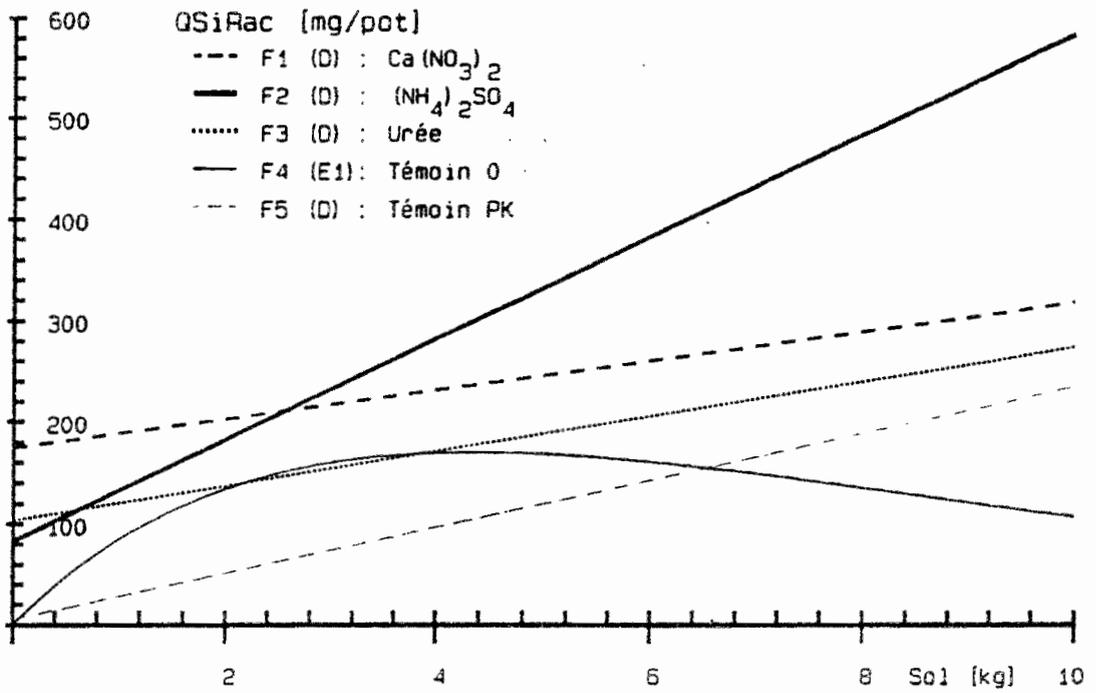
Immobilisation silice: chaumes

Figure 153



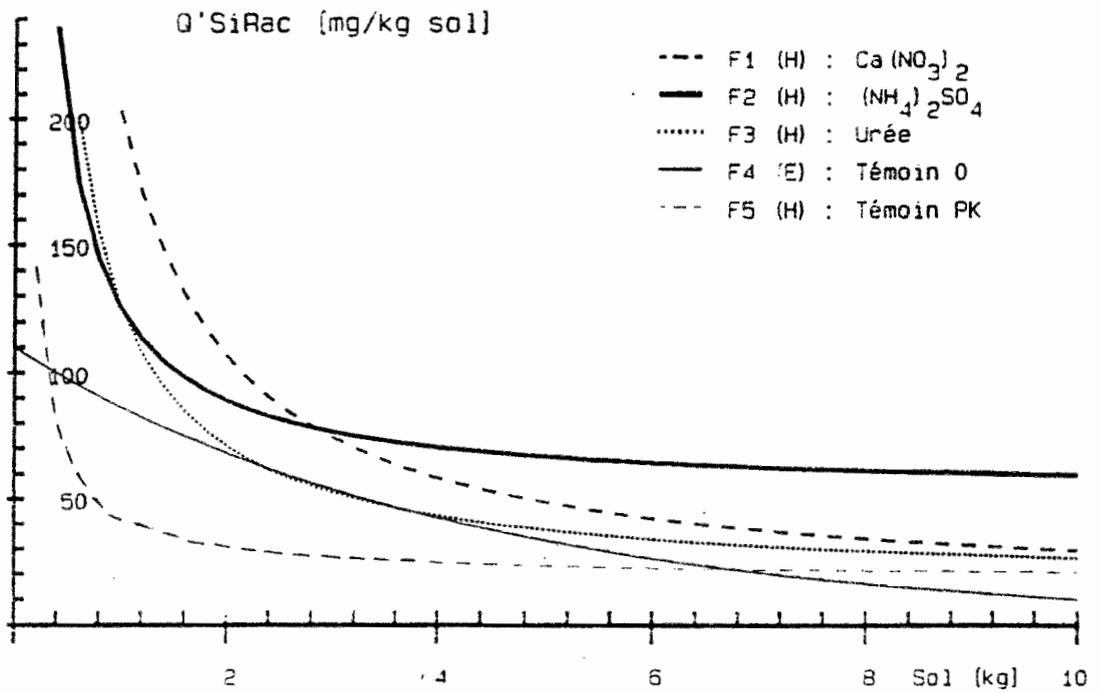
Immobilisation silice/kg sol: chaumes

Figure 154



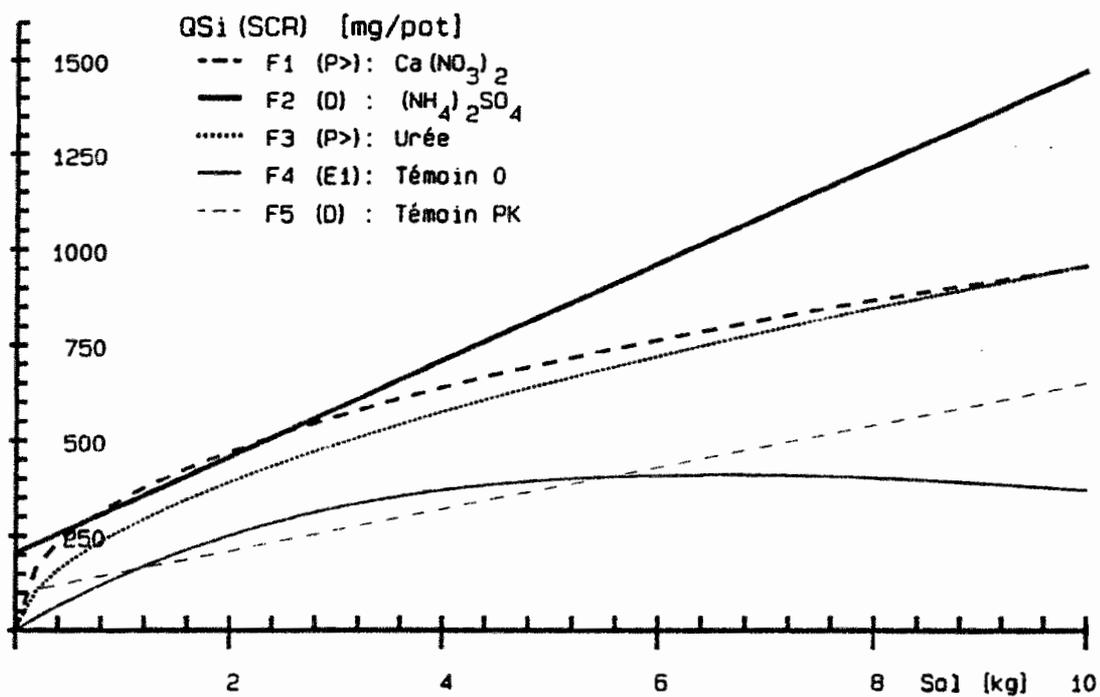
Immobilisation silice: racines

Figure 155



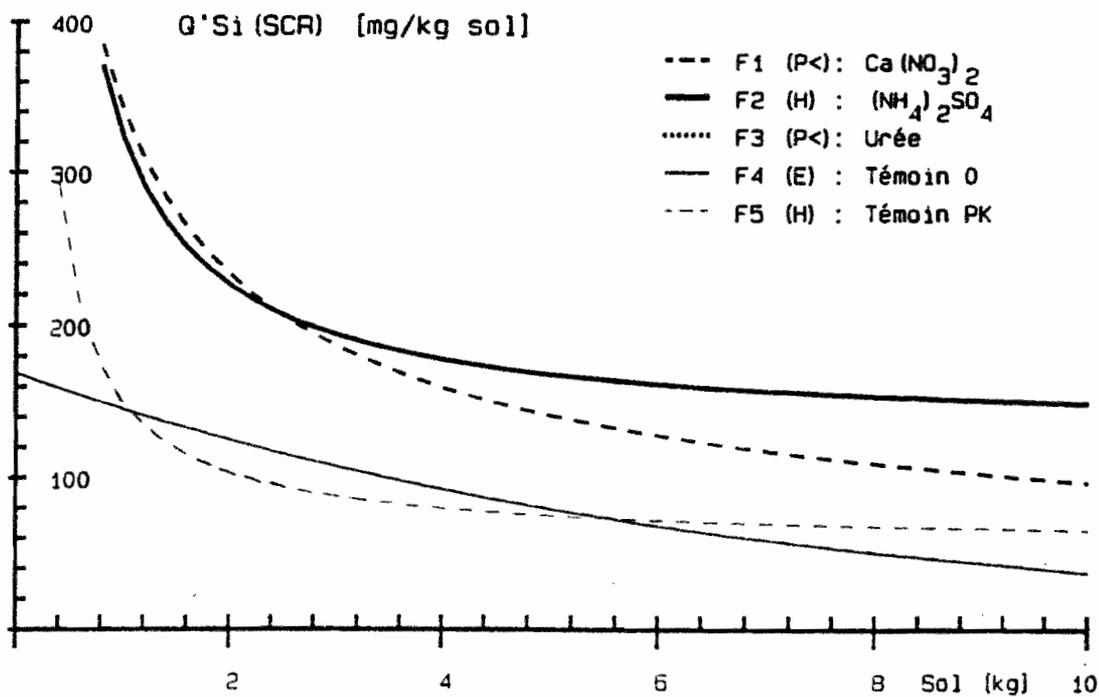
Immobilisation silice/kg sol: racines

Figure 156



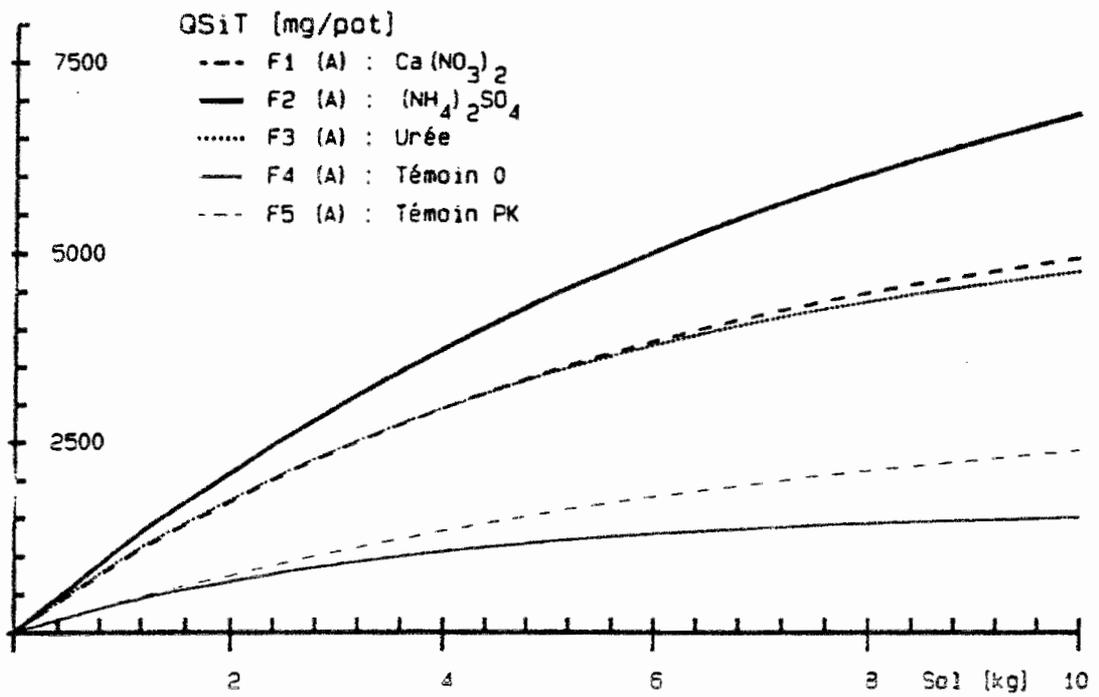
Immobilisation silice: chaumes + racines (SCR)

Figure 157



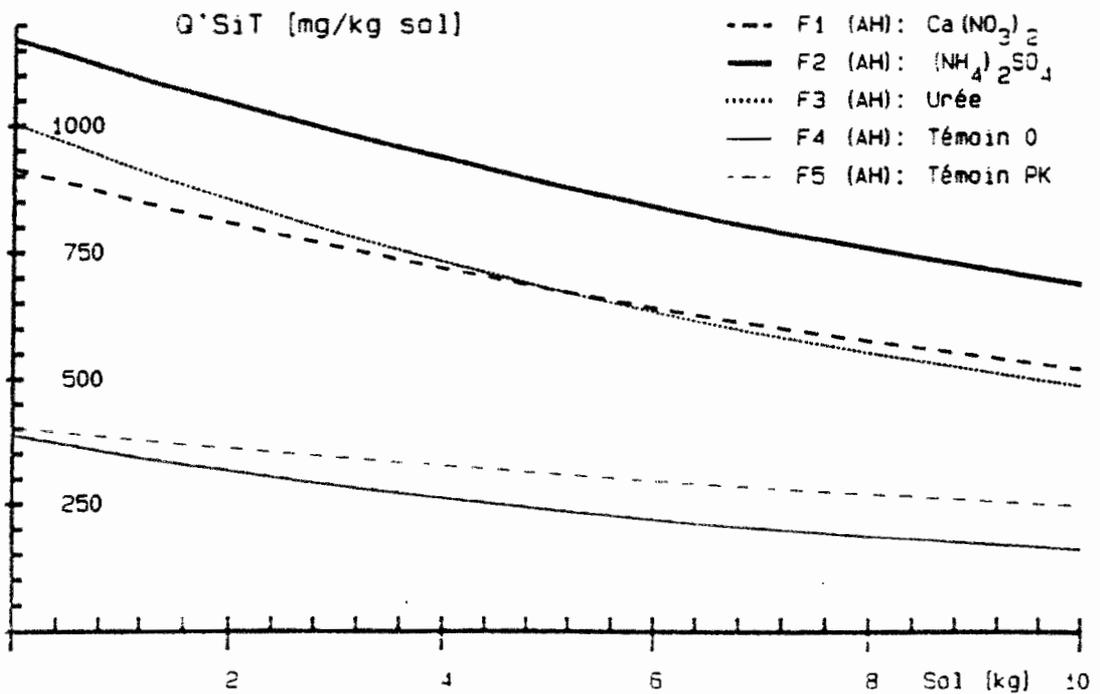
Immobilisation silice/kg sol: chaumes + racines (SCR)

Figure 158



Exportation silice: total plante

Figure 159



Exportation silice/kg sol: total plante

Figure 160

Les teneurs moyennes des 2^{ème} et 3^{ème} coupes sont plus élevées que celles de la 1^{ère} coupe, la plante ayant moins d'azote à sa disposition, a un développement moindre, avec concentration de la silice. Elles répondent souvent aux fonctions "E₁" (sauf pour F₂ et F₅) montrant que les teneurs sont les plus importantes pour V₂ ou V₃. Il en résulte des fonctions "E₂" pour les exportations, mais une fonction "A" pour F₂ (figures 149 et 150) indiquant que l'exportation maximum de silice est au-delà des 10 kg de sol. F₁ et F₃ sont très semblables, et F₄ et F₅ sont très proches ; seul F₂ domine toutes les autres exportations. Avec les fonctions "E₁" représentatives des exportations par kg de sol, ce n'est plus V₁ qui exporte le maximum par unité de volume, mais V₂. La fonction "AH" caractérise l'exportation de silice par kg de sol du traitement F₂ et dans ce cas V₁ exporte plus que les 4 autres volumes.

Si l'on évalue une teneur moyenne pour les 3 coupes, ce sont les 2 témoins F₄ et F₅ qui ont les valeurs les plus élevées, phénomène que nous n'avions pas encore rencontré pour aucun autre élément, mises à part la supériorité de F₅ pour les teneurs en P, et celle de F₄ pour les teneurs en Mg, donc 2 éléments qui avaient de très bonnes corrélations avec SiO₂, aussi bien à la 1^{ère} coupe qu'aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes (THOMANN Ch. - 1988). Ces teneurs répondent à des droites, décroissantes quand les volumes de sol augmentent, seule la pente de la droite F₁ n'est pas significative.

Les exportations de silice pour les 3 coupes (figures 151 et 152) sont représentées par les fonctions "E₂" pour F₁, F₄, F₅ ; F₂ et F₃ conservent les fonctions "A" que ces traitements présentaient à la 1^{ère} coupe. Notons, qu'au niveau tiges et feuilles, F₂ se différencie de F₁ et F₃ en exportant davantage de SiO₂ (32 % en plus en moyenne), aucun autre élément ne présente ces relations au niveau des 3 coupes regroupées. F₁ et F₃ exportent la même quantité de silice pour chacun des volumes de sol.

Pour les exportations de silice par kg de sol, F₂ et F₃ sont représentés par les fonctions "AH", pour lesquelles V₁ exporte le maximum, alors que F₁, F₄, F₅ sont représentés par les fonctions "E₁" pour lesquelles le maximum exporté se situe entre V₂ et V₃.

Les chaumes sont très riches en SiO₂, ils ont des teneurs moyennes 2 fois plus élevées que celles de la 1^{ère} coupe, en particulier F₂ se différencie des 4 autres traitements.

Les immobilisations de silice dans les chaumes se caractérisent ainsi (figures 153 et 154) :

- pour F_1 et F_4 : on retrouve une fonction " E_1 " (la teneur répondait à une fonction " E_1 ", le rendement à une fonction " D " pour F_1 , et l'inverse pour F_4),
- pour F_2 : on retrouve une " D ", comme pour le rendement malgré une teneur exprimée par la fonction " E_1 ",
- pour F_3 et F_5 : d'une fonction " P " pour le rendement et d'une fonction " D " pour la teneur, on arrive à une fonction " A " pour l'immobilisation de la silice dans les chaumes.

Ramenées à l'unité de volume, les diverses fonctions (" E ", " H ", ou " AH ") expriment la même tendance : l'immobilisation de la silice dans les chaumes diminue quand les volumes de sol augmentent. Notons que F_1 et F_3 présentent pour ce Q'SiCh une homogénéité de 100 %.

Les teneurs moyennes en SiO_2 des racines sont environ le tiers des teneurs moyennes des chaumes ; ces teneurs varient peu avec les volumes de sol, sauf pour F_4 pour lequel elles diminuent fortement de V_1 à V_5 . Les immobilisations de la silice dans les racines (figures 155 et 156) sont caractérisées par les fonctions " $D - H$ ", sauf pour F_4 (" $E_1 - E$ "), mais sur ces paramètres les erreurs relatives atteignent parfois 40 %, dans ces cas-là, les fonctions n'expriment plus grand chose.

Au total, la fraction immobilisée par les **chaumes + racines** est de l'ordre du cinquième pour F_1 , F_2 , F_3 , elle est plus du quart pour F_4 et F_5 par rapport à la silice totale assimilée par la plante. On se rend compte du rôle important de la silice dans les parties aériennes des graminées. Pour les 5 traitements, cette immobilisation par unité de volume diminue fortement de V_1 à V_5 (figure 158) : F_1 n'est pas très différent de F_3 , F_4 n'est pas très différent de F_5 , mais F_2 a des valeurs supérieures aux 4 autres traitements.

Si l'on exprime une teneur moyenne de **l'ensemble de la plante**, on observe que les teneurs en silice de F_2 , F_4 , F_5 sont très proches et supérieures à celles de F_1 et F_3 ; toutes ces teneurs peuvent être représentées par des droites à pente nulle ou très faible.

De ce fait, nous retrouvons les fonctions " $A - AH$ " pour les exportations totales de silice (figures 159 et 160), c'est à dire les mêmes fonctions que pour les rendements. Dans le cas de la silice, le traitement F_2 domine nettement les traitements F_1 et F_3 , qui sont très proches.

Les fonctions " AH " exprimant l'exportation de silice par kg de sol pour l'ensemble ne correspondent à rien de concret, mais elles permettent une synthèse au niveau de l'élément silice, après épuisement du sol par la plante. Le graphique

montre la supériorité de F_2 , observée tout au long de l'évolution de la plante, et la similitude entre F_1 et F_3 d'une part, et F_4 et F_5 d'autre part. Toutes ces courbes décroissent de V_1 à V_5 .

Il est permis de penser que la présence d'ions NH_4 dans le cas du traitement F_2 a légèrement acidifié le milieu (le pH final du sol = 6,1 ; il est de 6,25 pour F_1 et F_3 et de 6,45 pour F_4 et F_5), provoquant une meilleure solubilisation et assimilabilité de la silice (HAGEMAN R.H. - 1982).

Quant aux variations en fonction des volumes, elles sont générales pour les 5 traitements : pour les petits volumes de sol, les exportations + immobilisations de la silice (ramenées au kg de sol) sont plus importantes que celles relatives aux grands volumes.

3.10 LA PRODUCTION DE MATIERE MINERALE (CENDRES)

Les cendres représentent toute la partie minérale de la plante, leur évolution au cours du développement de la plante serait un peu l'image de l'évolution de l'ensemble des éléments minéraux, que nous avons suivis précédemment. Elles peuvent donc apporter un plus à notre vision globale des quantités exportées en fonction des volumes de sol.

Les résultats expérimentaux de la production de cendres par *Panicum* sont donnés dans le tableau XI.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 161 à 178.

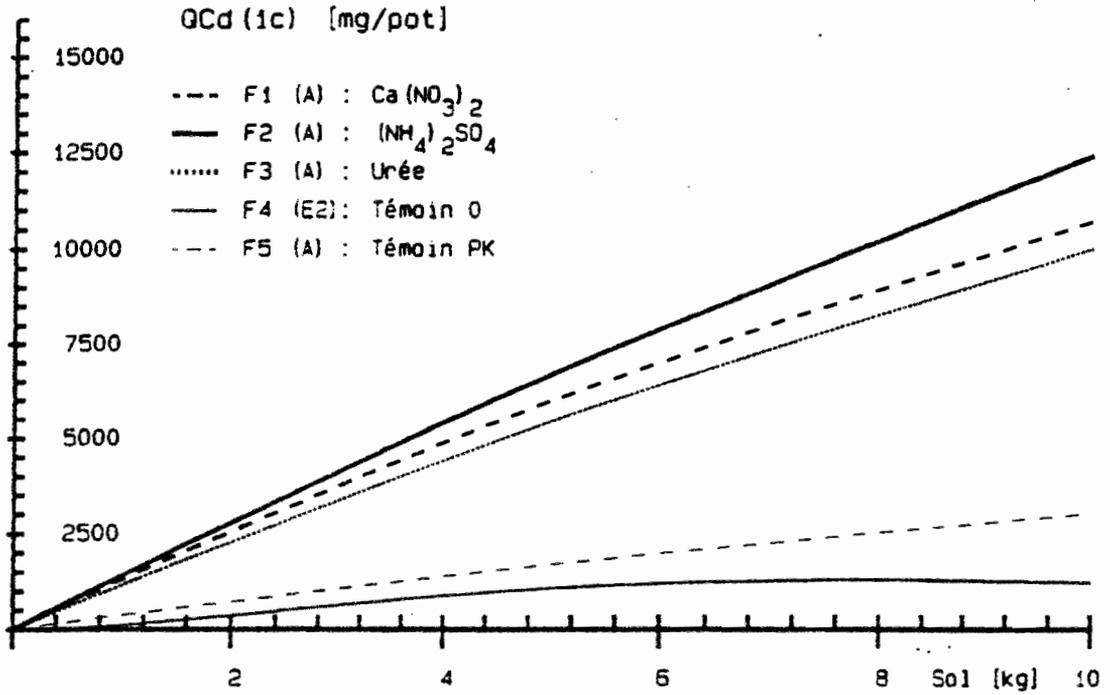
Les teneurs moyennes en cendres de la 1^{ère} coupe sont très proches pour chacun des traitements : elles varient de 9 à 11 %, et sont un peu plus élevées pour les témoins que pour les traitements F_1 , F_2 , F_3 . Du fait de leurs très faibles variations en fonction des volumes de sol, les exportations en cendres de la 1^{ère} coupe vont répondre à peu près aux mêmes fonctions que celles des rendements. F_1 , F_2 , F_3 , F_5 sont bien représentées par les fonctions "A - AH", tandis que les fonctions "E₂ - E₁" sont mieux adaptées pour le témoin F_4 (figures 161 et 162).

Il n'y a aucune similitude entre les 5 traitements : F_2 produit plus de matière minérale que F_1 et F_3 , F_4 en produit moins que F_5 . On peut considérer que les cendres extraites à la 1^{ère} coupe sont proportionnelles aux volumes de sol, car pour F_1 , F_2 , F_3 et F_5 , la quantité exportée par unité de volume ne varie pas en fonction des volumes de sol, mais elle est spécifique pour chacun des traitements. Seul, le traitement F_4 présente une diminution en fonction des volumes, ceci à partir de 3,8 kg de sol (maximum de la courbe "E₁").

TABLEAU XI – PRODUCTION DE CENDRES PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

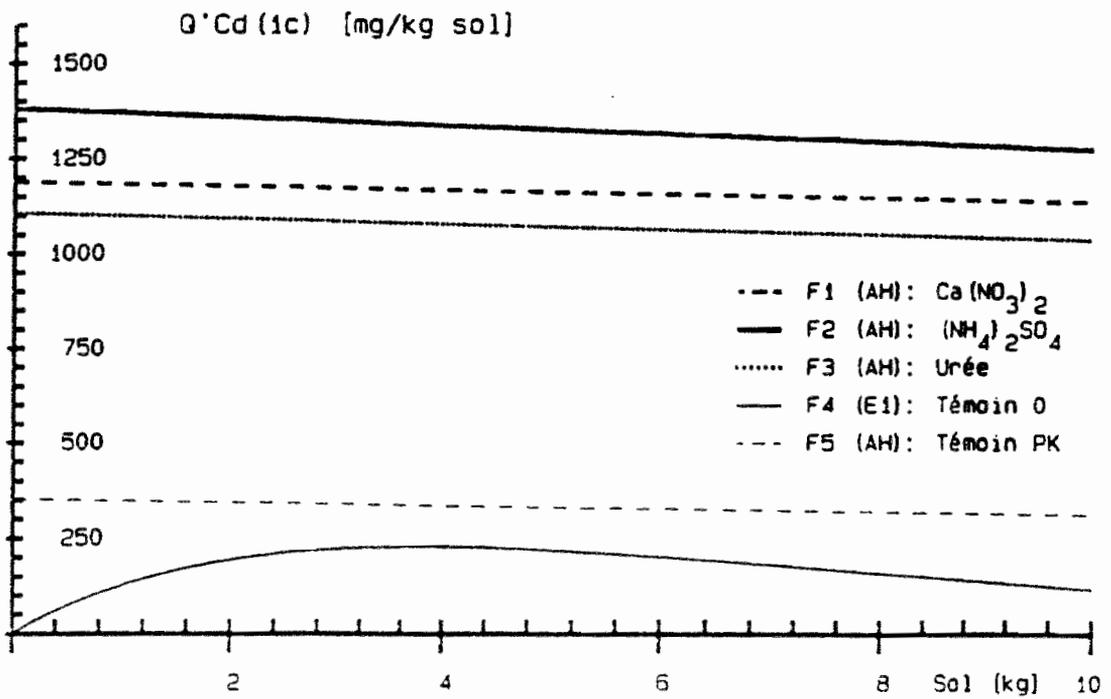
(Q = mg cendres par pot ; Q' = mg cendres par kg de sol)

F . V	1 ^{ère} coupe		2 ^{ème} coupe		3 ^{ème} coupe		2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		1 ^{ère} + 2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	2235	1096	483	237	259	127	742	364	2977	1460	446	219	624	306	1069	524	4047	1984
	V ₂	3592	1222	760	259	355	121	1115	380	4708	1601	586	199	535	182	1121	381	5829	1983
	V ₃	5439	1172	935	202	506	109	1441	311	6881	1483	924	199	644	139	1568	338	8449	1821
	V ₄	8618	1264	1116	170	526	77	1686	247	10304	1511	1110	163	708	104	1818	267	12122	1777
	V ₅	9421	1053	1234	138	552	62	1786	200	11206	1252	1383	155	865	97	2248	251	13454	1503
F ₂	V ₁	2638	1293	610	299	317	155	927	454	3565	1747	521	255	488	239	1009	495	4574	2242
	V ₂	4146	1410	892	303	363	123	1254	426	5400	1837	749	255	492	167	1241	422	6642	2259
	V ₃	6171	1330	1193	257	585	126	1778	383	7949	1713	1011	218	977	211	1988	428	9937	2142
	V ₄	9114	1336	1217	179	619	91	1836	269	10951	1606	1418	208	990	145	2407	353	13358	1959
	V ₅	11187	1250	1701	190	821	92	2522	282	13709	1532	1915	214	1462	163	3377	377	17085	1909
F ₃	V ₁	2195	1076	470	230	264	129	734	360	2929	1436	433	212	360	176	793	389	3722	1824
	V ₂	3143	1069	664	226	315	107	979	333	4123	1402	610	207	366	124	976	332	5099	1734
	V ₃	5088	1097	928	200	458	99	1386	299	6474	1395	852	184	459	99	1311	283	7785	1678
	V ₄	7587	1112	1234	181	516	76	1750	257	9337	1369	1143	168	479	70	1622	238	10959	1607
	V ₅	8923	997	918	103	485	54	1403	157	10326	1154	1398	156	741	83	2138	239	12464	1393
F ₄	V ₁	448	218	197	96	140	68	338	164	786	382	194	94	349	169	543	263	1329	645
	V ₂	590	201	301	102	214	73	515	175	1106	376	268	91	314	107	582	198	1688	574
	V ₃	1058	227	502	108	336	72	838	180	1896	407	380	82	398	86	779	167	2674	574
	V ₄	1209	177	640	93	371	54	1011	148	2221	324	422	62	305	45	727	106	2948	430
	V ₅	1317	146	676	75	298	33	974	108	2291	255	460	51	297	33	758	84	3049	339
F ₅	V ₁	688	334	221	107	162	79	384	186	1072	520	252	123	163	79	415	202	1487	722
	V ₂	1013	344	347	118	262	89	608	207	1621	551	332	113	169	57	500	170	2121	722
	V ₃	1532	329	540	116	393	84	933	200	2465	529	478	103	243	52	721	155	3185	684
	V ₄	2393	349	683	100	484	71	1167	170	3560	520	592	86	381	55	973	142	4534	662
	V ₅	2688	299	742	82	514	57	1256	140	3944	438	752	84	574	64	1326	147	5270	586



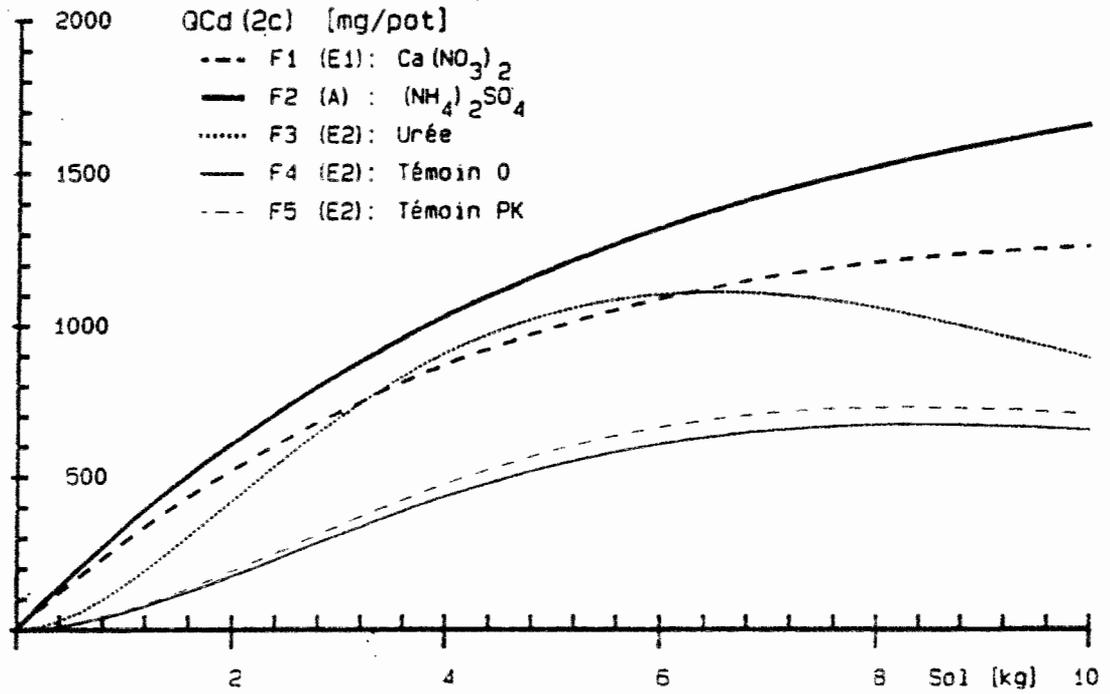
Exportation cendres: 1ère coupe

Figure 161



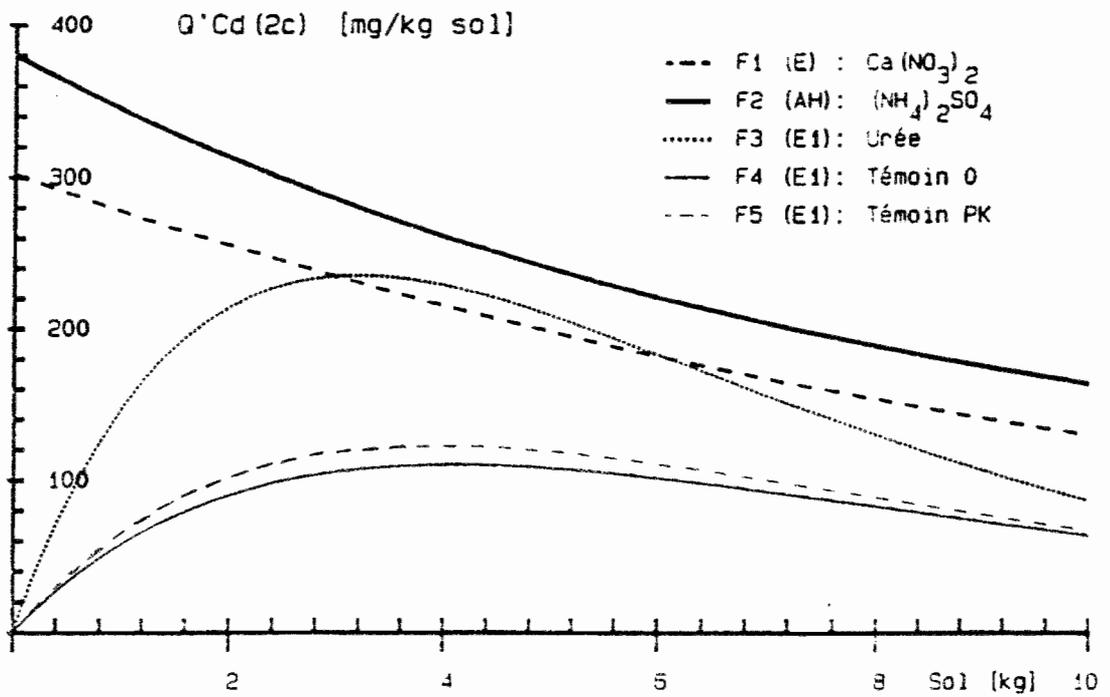
Exportation cendres/kg sol: 1ère coupe

Figure 162



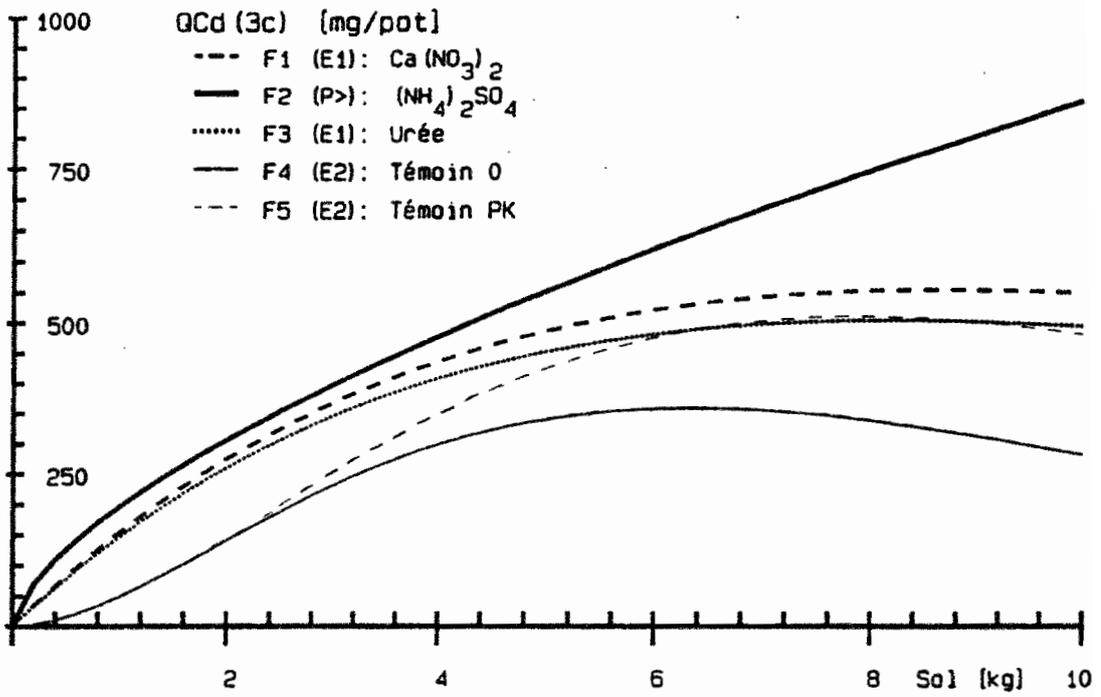
Exportation cendres: 2ème coupe

Figure 163



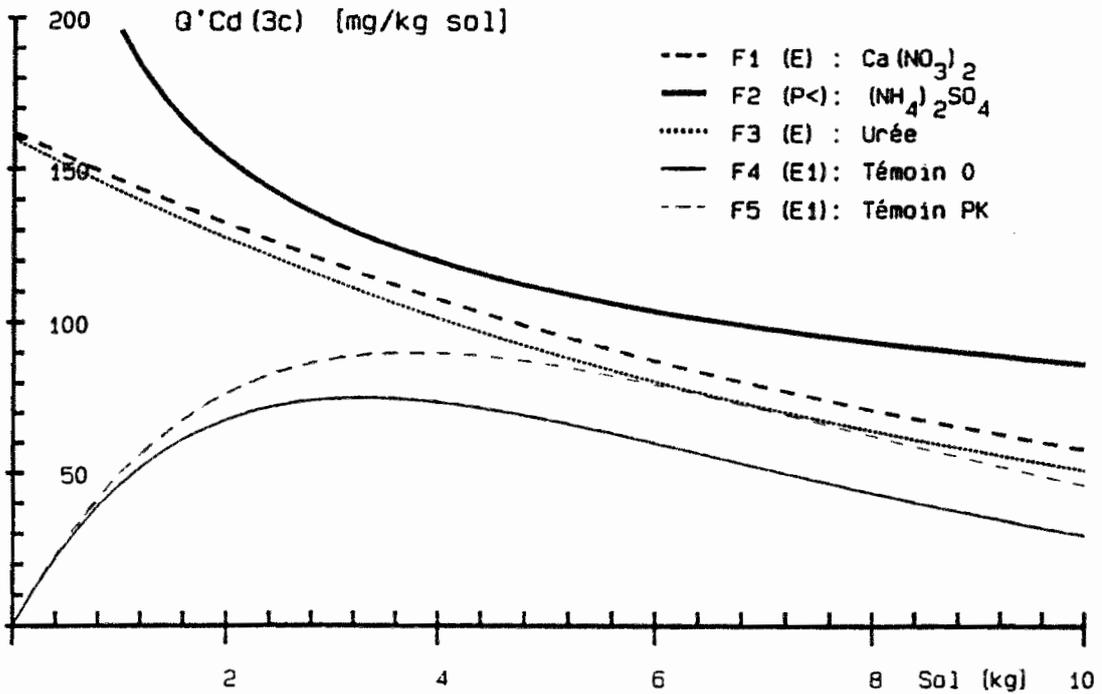
Exportation cendres/kg sol: 2ème coupe

Figure 164



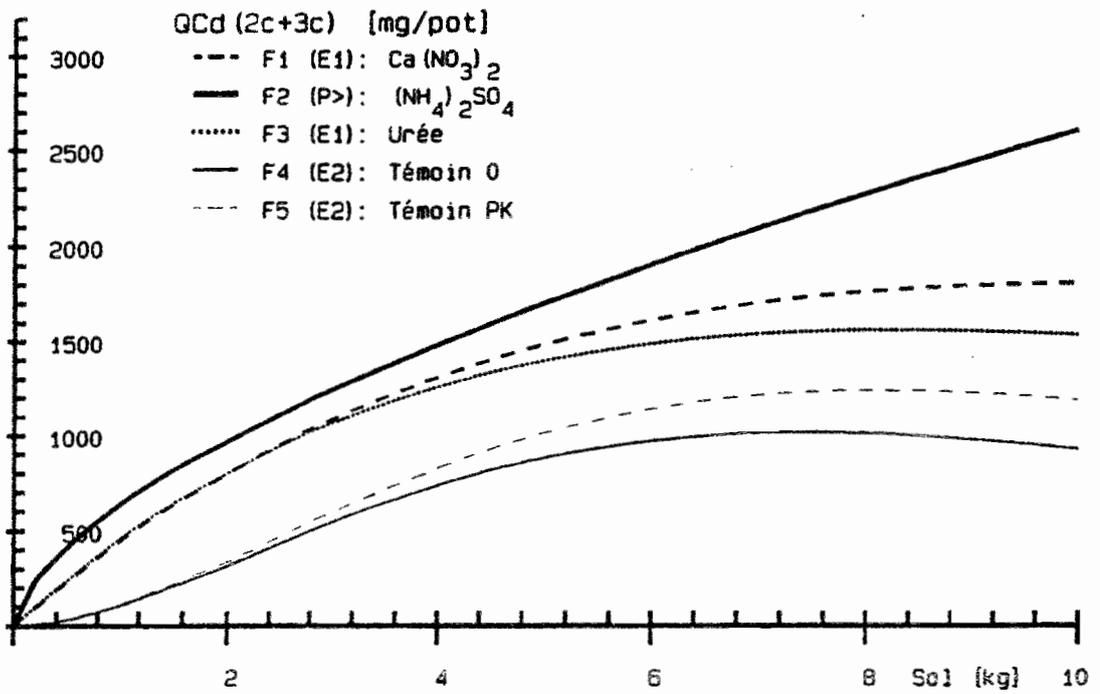
Exportation cendres: 3ème coupe

Figure 165



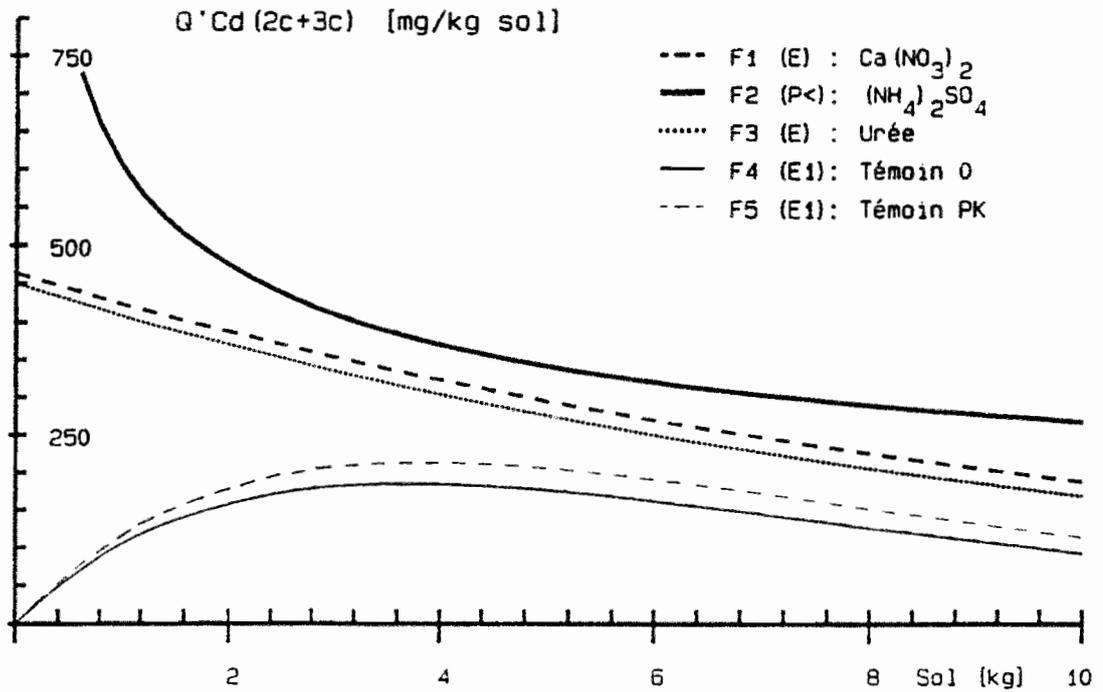
Exportation cendres/kg sol: 3ème coupe

Figure 166



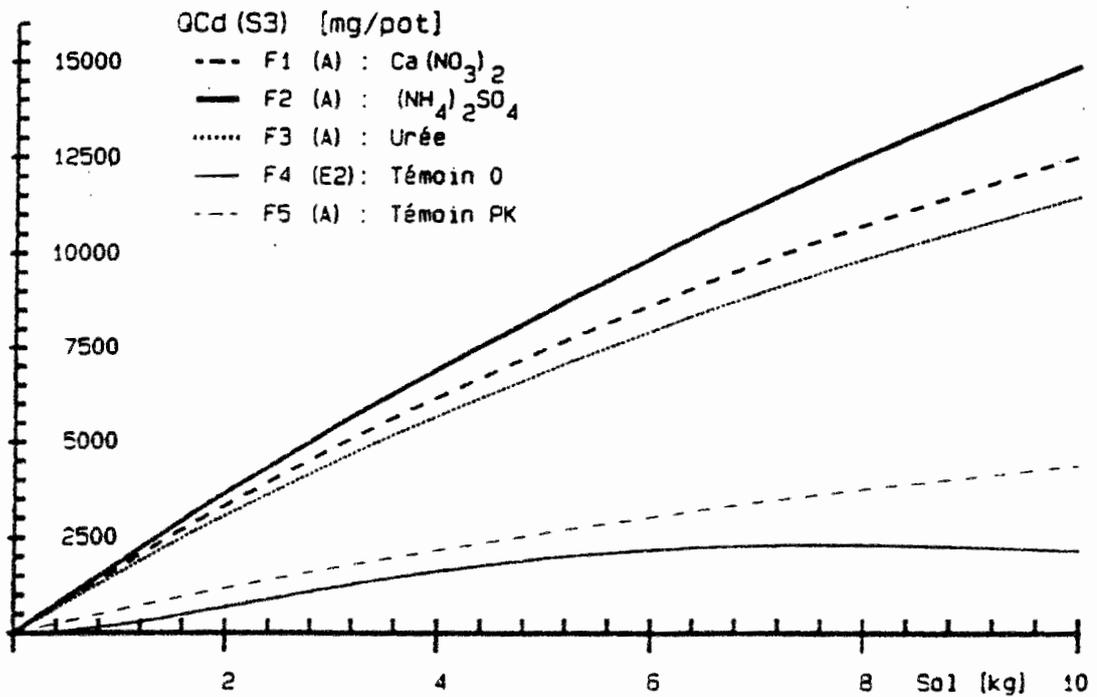
Exportation cendres: 2ème + 3ème coupes

Figure 167



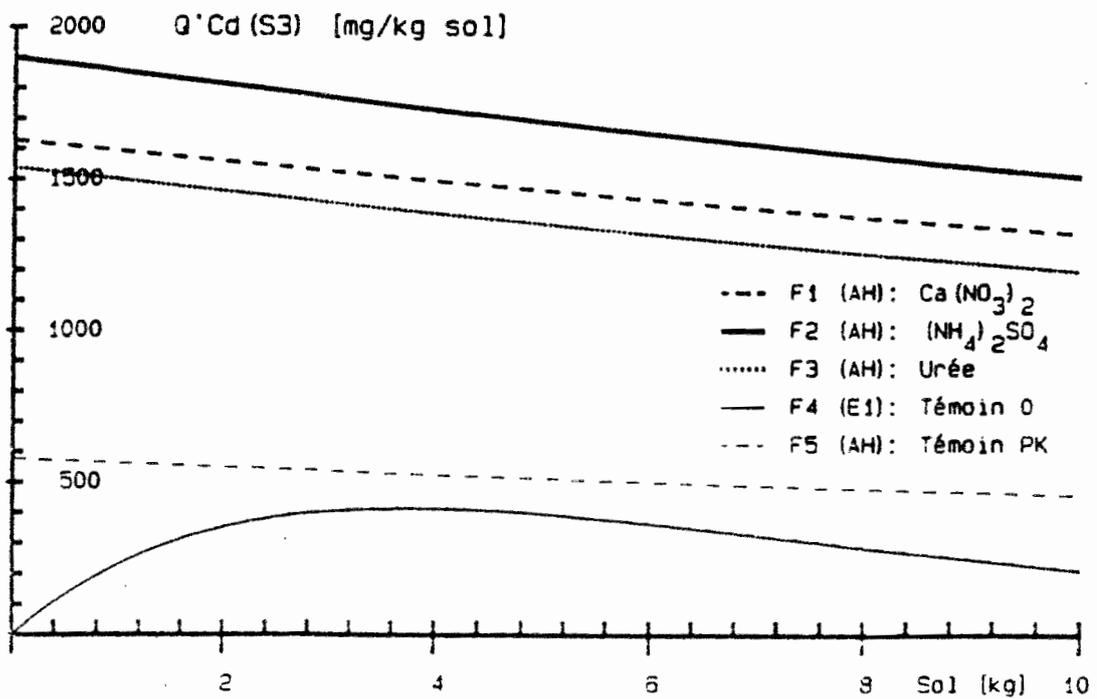
Exportation cendres/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 168



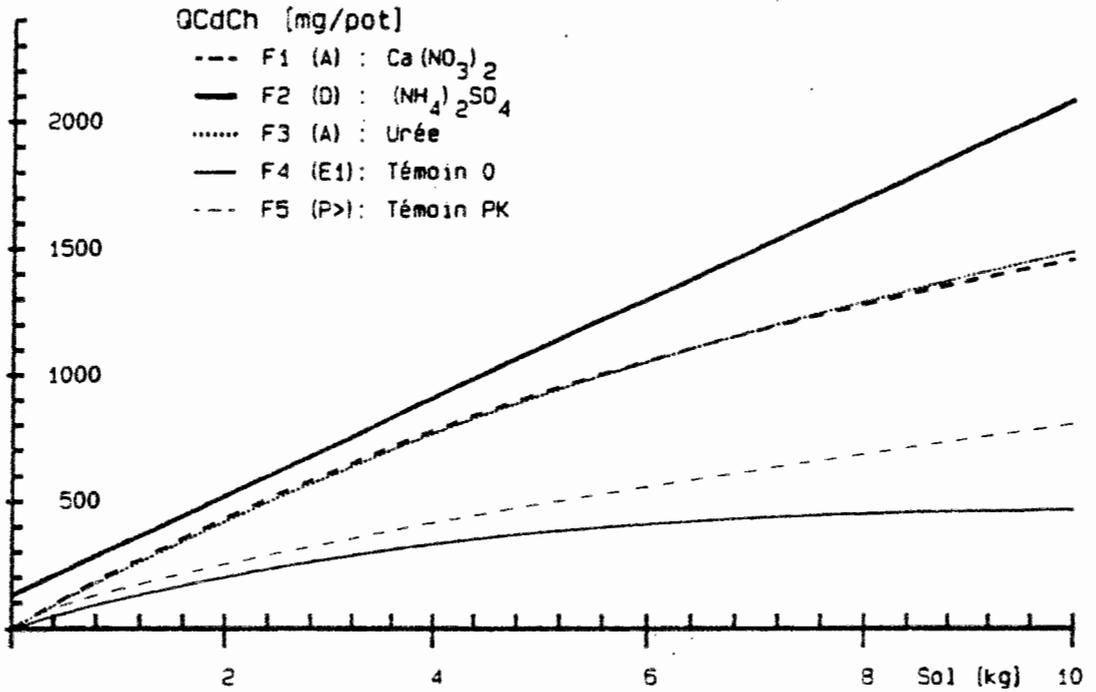
Exportation cendres: 3 coupes (S3)

Figure 169



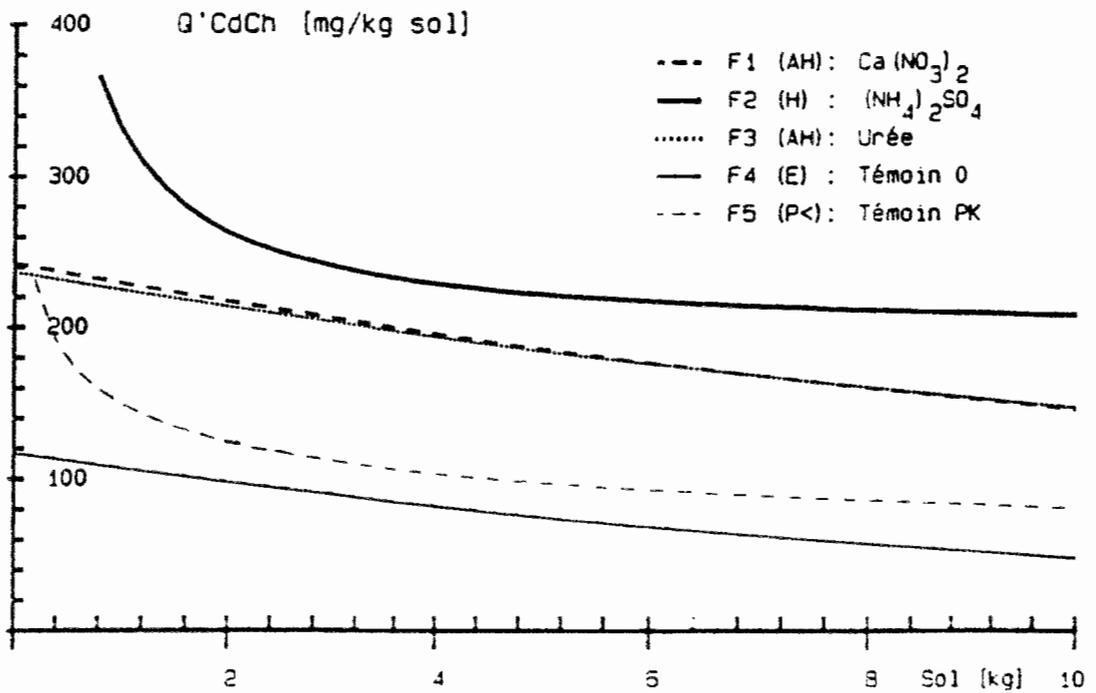
Exportation cendres/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 170



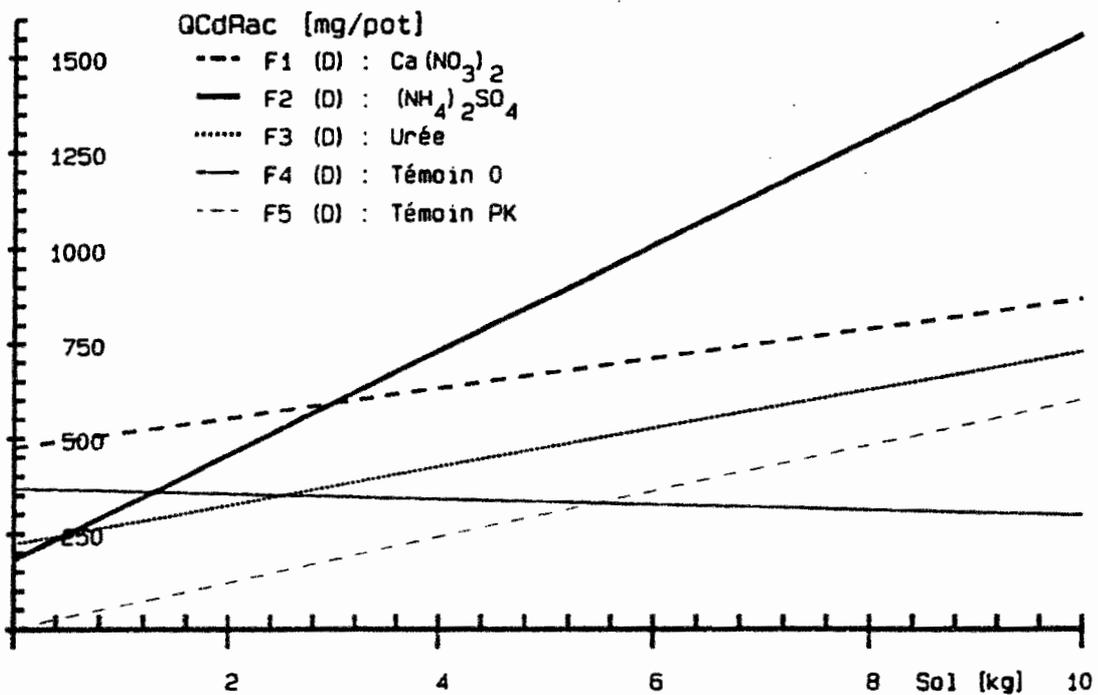
Immobilisation cendres: chaumes

Figure 171



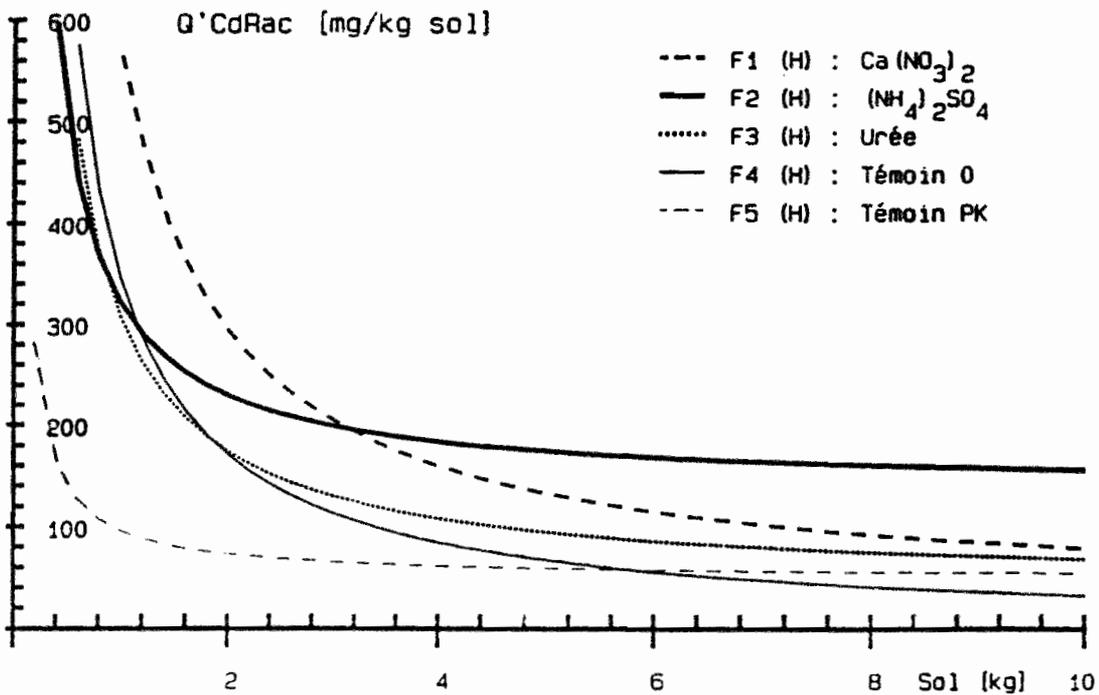
Immobilisation cendres/kg sol: chaumes

Figure 172



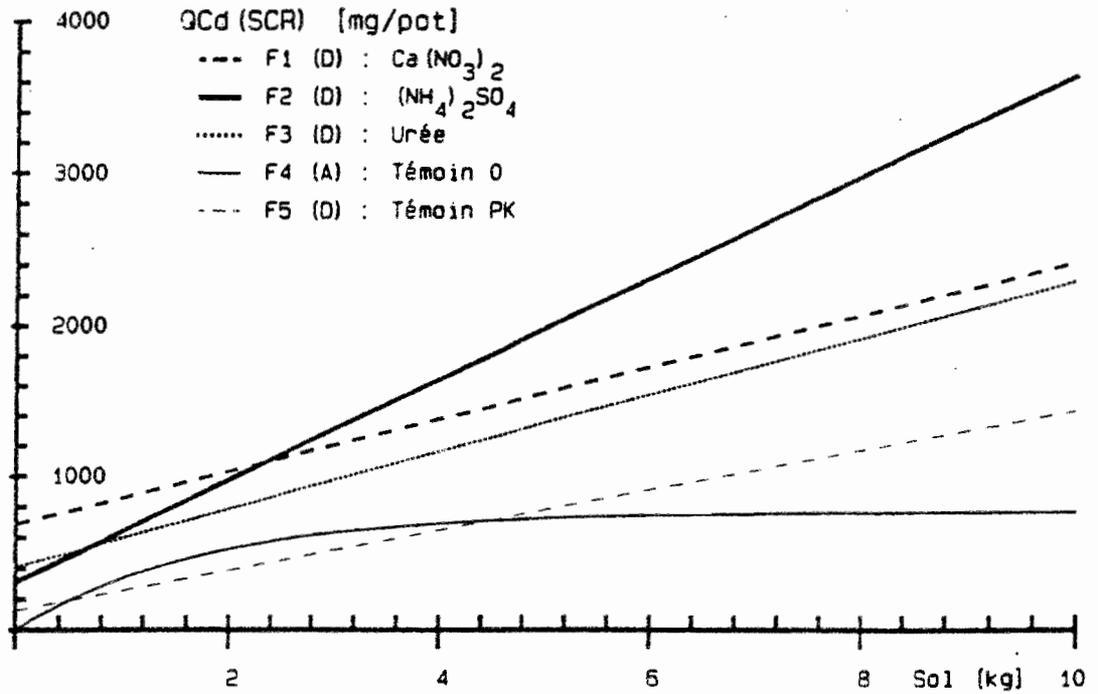
Immobilisation cendres: racines

Figure 173



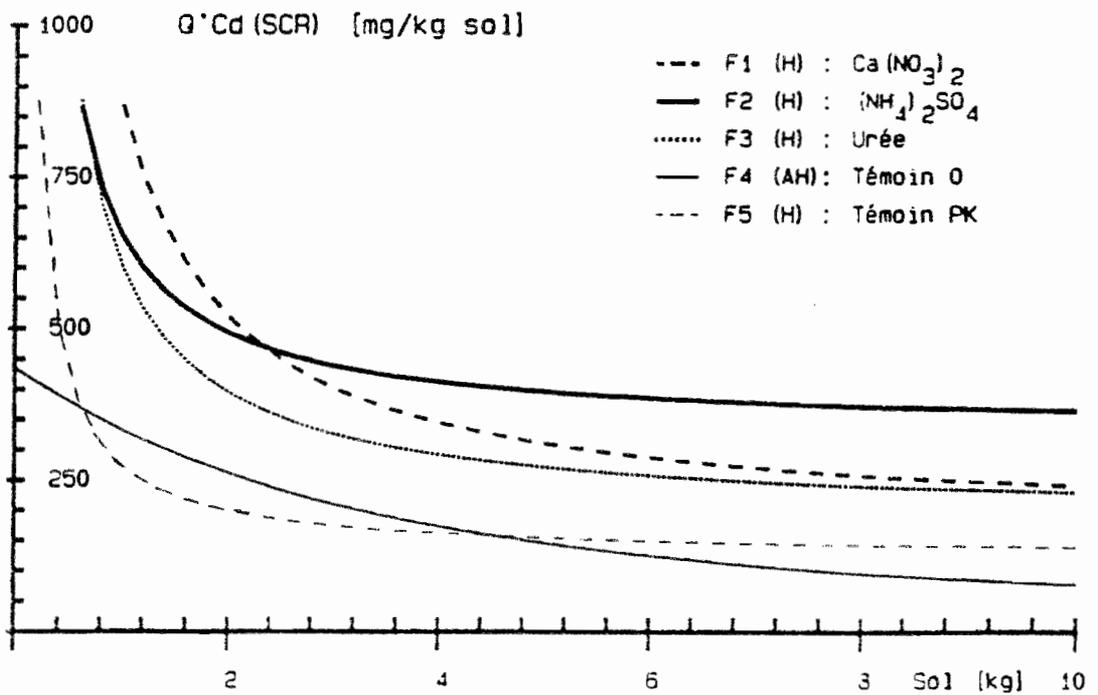
Immobilisation cendres/kg sol: racines

Figure 174



Immobilisation cendres: chaumes + racines (SCR)

Figure 175



Immobilisation cendres/kg sol: chaumes + racines (SCR)

Figure 176

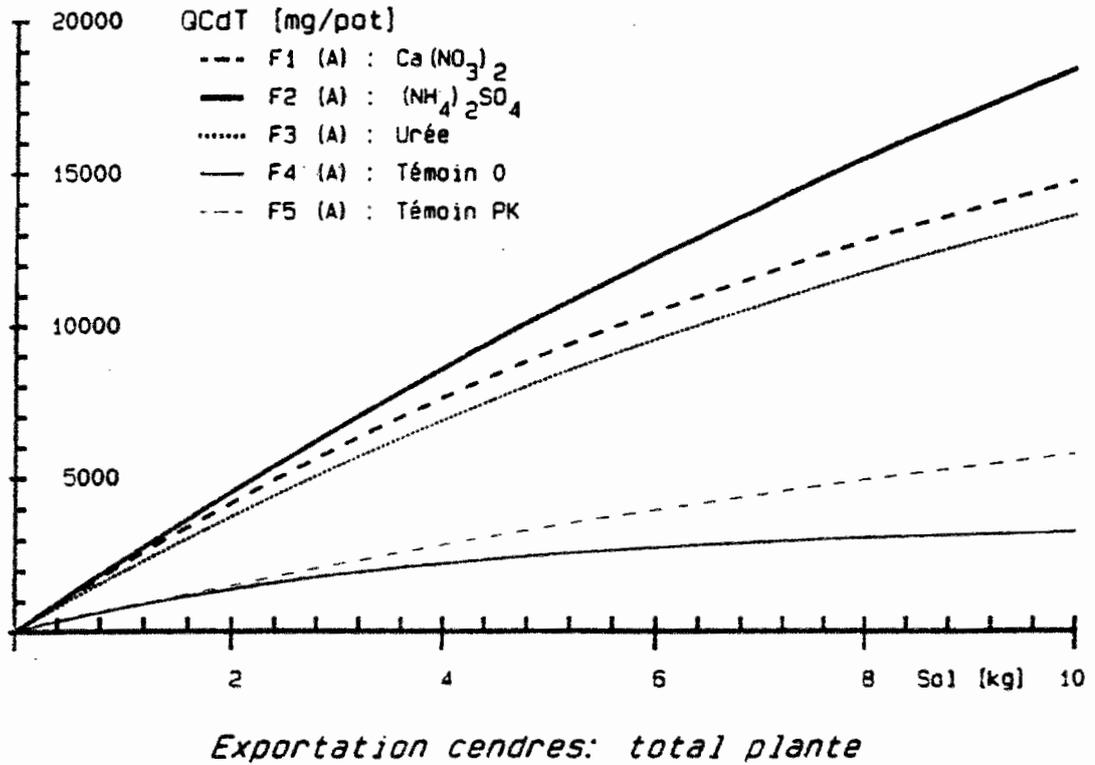


Figure 177

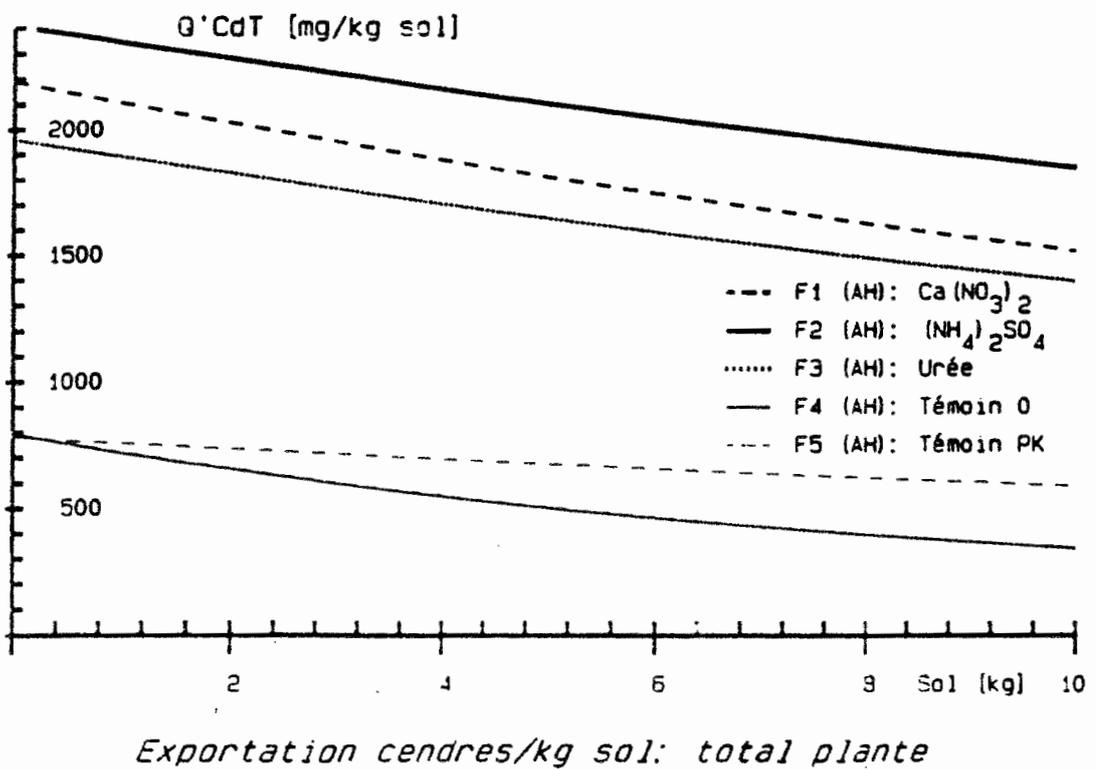


Figure 178

Dans le cas de F_2 en particulier, il y aurait eu compensation entre les éléments apportés, dont la quantité exportée par unité de volume augmente avec les volumes de sol et les éléments du sol, dont la quantité exportée par unité de volume diminue quand les volumes de sol augmentent.

Les teneurs des 2^{ème} et 3^{ème} coupes sont très voisines les unes des autres, celles de F_1 , F_2 , F_3 sont un peu plus élevées qu'à la 1^{ère} coupe, mais pour F_4 et F_5 , elles sont identiques à celles de la 1^{ère} coupe.

Quand il y a eu apport d'engrais, pour N et K spécialement, les teneurs des 2^{ème} et 3^{ème} coupes étaient inférieures à celles de la 1^{ère} coupe; pour les éléments en provenance du sol (Ca - Mg - Na - SiO_2) les teneurs des 2^{ème} et 3^{ème} coupes sont toujours supérieures à celles de la 1^{ère} coupe.

Les teneurs en cendres sont donc le reflet de ces 2 tendances puisqu'elles varient très peu d'une coupe à l'autre. Si, à la 2^{ème} coupe, les teneurs ne varient pas avec les volumes de sol, par contre, à la 3^{ème} coupe, elles diminuent nettement quand les volumes de sol augmentent. La teneur moyenne des 2^{ème} + 3^{ème} coupes ne présente des variations avec les volumes de sol que pour F_2 : cette teneur moyenne diminue quand les volumes de sol augmentent.

Les exportations regroupées des 2^{ème} et 3^{ème} coupes sont caractérisées par des fonctions variables selon les traitements (figures 167 et 168) :

F_2 ne présente pas de palier, d'où les fonctions " $P_> - P_<$ ".

F_1 et F_3 présentent un maximum pour l'exportation par pot d'où les fonctions " $E_1 - E$ ".

F_4 et F_5 présentent également un maximum, à la fois pour l'exportation par pot et pour l'exportation par unité de volume, d'où les fonctions " $E_2 - E_1$ ".

Ramenées au kg de sol, les courbes " $P_<$ ", " E " et " E_1 " montrent une inclinaison vers les grands volumes de sol, indiquant qu'il n'y a plus proportionnalité de la production de la matière minérale en fonction des volumes de sol : le volume V_5 aura une production de matière minérale par kg de sol nettement moindre que le volume V_1 .

Les teneurs calculées, et toutes théoriques des 3 coupes regroupées sont très proches en valeurs absolues de celles de la 1^{ère} coupe et ne présentent pas de variation en fonction des volumes de sol, excepté pour F_4 (les teneurs diminuent quand les volumes de sol augmentent). On signalera que les droites les représentant donnent 95 % d'homogénéité entre F_1 et F_3 .

Puisque ces teneurs ne varient pas avec les volumes de sol, on retrouve donc pour les exportations de cette fraction minérale, les mêmes fonctions que pour les rendements (figures 169 et 170):

les fonctions "A - AH" pour F_1 , F_2 , F_3 et F_5 ,

les fonctions "E₂ - E₁" pour F_4 .

Au total des 3 coupes, la partie minérale exportée par les tiges + feuilles représente les pourcentages suivants par rapport au total plante :

$F_1 = 82,2 \%$; $F_2 = 80,6 \%$; $F_3 = 82,9 \%$; $F_4 = 71,0 \%$; $F_5 = 76,3 \%$

pour F_1 , F_2 , F_3 , plus des 4/5 de la partie minérale de la plante se retrouvent dans les tiges et feuilles. Ces proportions sont à peu près celles de la silice, mais surtout celles des rendements pour F_1 , F_2 , F_3 .

Graphiquement, la courbe F_2 domine celles des autres traitements ; la fraction minérale exportée par les 3 coupes varie donc selon l'apport azoté : c'est avec le sulfate d'ammonium que l'on obtient la fraction minérale la plus importante. La fraction minérale exportée par les 3 coupes et exprimée par unité de volume ou kg de sol a tendance à diminuer quand les volumes de sol augmentent, seule la pente de la courbe du traitement F_5 n'est pas significative, on peut considérer que dans ce cas, la fraction minérale exportée par les tiges et feuilles par kg de sol est identique pour les 5 volumes de sol. Pour ce témoin, quelques courbes relatives à la somme des 3 coupes, n'avaient pas non plus une pente significative, comme celles du rendement, du potassium et du calcium.

La teneur en cendres des chaumes est élevée : elle est en moyenne de 13 % pour F_1 , F_3 , F_4 , et F_5 et atteint 18 % pour F_2 .

La fraction minérale des chaumes exprimée en fonction des volumes de sol répond à des fonctions différentes selon les traitements (figures 171 et 172):

pour F_1 et F_3 (dont le test d'homogénéité est de 100 %) : "A - AH",

pour F_2 : "D - H",

pour F_4 : "E₁ - E",

pour F_5 : "P_> - P_<",

dans tous les cas, la fraction minérale ramenée au kg de sol diminue de façon importante de V_1 à V_5 .

Les racines ont des teneurs deux fois moins élevées en cendres que les chaumes, avec peu de variations en fonction des volumes de sol, sauf pour F_4 (la teneur diminue quand les volumes de sol augmentent).

La fraction minérale des racines (figures 173 et 174) est caractérisée par les fonctions "D - H" pour les 5 traitements, avec une nette prédominance du traitement

F_2 : la partie minérale des racines est plus importante pour ce traitement par rapport aux 4 autres, surtout pour les volumes V_3 , V_4 , V_5 . Exprimée par unité de volume ou kg sol, cette fraction minérale diminuerait quand les volumes de sol augmentent pour F_1 , F_3 , F_4 , mais cette variation ne serait pas significative pour F_2 et F_5 ; dans le cas de F_1 , la fraction minérale des racines de V_1 est 3,4 fois plus importante que celle de V_5 , dans le cas de F_4 , elle atteint 4,6 fois plus : ces rapport sont très voisins de ceux obtenus pour la silice dans les racines.

Aussi peut-on se demander si la silice entre toujours dans les mêmes proportions dans la fraction minérale, ou si, selon les parties de la plante, ce pourcentage varie. Le tableau suivant indique les pourcentages de SiO_2 dans les cendres, en fonction des parties de la plante, pour chacun des traitements.

Ces pourcentages sont la moyenne obtenue sur les 5 volumes, sachant que dans tous les cas, le pourcentage diminue quand les volumes de sol augmentent.

Pourcentage de silice dans les cendres

	1 ^{ère} coupe	2 ^{ème} coupe	3 ^{ème} coupe	1 + 2 + 3 coupes	chaumes	racines	total plante
F_1	33,5 %	47,7 %	50,3 %	36,7 %	51,8 %	36,6 %	37,9%
F_2	39,1 %	53,3 %	53,2 %	42,2 %	47,0 %	38,5 %	42,4 %
F_3	37,4 %	50,7 %	51,0 %	40,2 %	52,3 %	40,0 %	41,5 %
F_4	40,0 %	55,7 %	55,5 %	45,6 %	59,7 %	44,3 %	47,5 %
F_5	40,7 %	53,4 %	53,2 %	45,1 %	55,1 %	40,2 %	46,1 %

Quelques réflexions s'imposent à la lecture de ce tableau :

- la proportion de SiO_2 dans les cendres est inférieure à la moyenne générale pour le traitement F_1 (excepté pour les chaumes) : du fait de l'apport de Ca par l'engrais (nitrate de Ca), la plante a été enrichie en Ca, au détriment de la silice ;
- les 2 témoins, F_4 en particulier, présentent pour toutes les parties de la plante, les pourcentages les plus élevés : la silice a été plus sollicitée en l'absence d'engrais azotés, ou plus exactement, les autres éléments minéraux (P-K-Ca-Mg-Na) ont été moins sollicités en l'absence d'engrais azotés ;
- les pourcentages de SiO_2 sont plus importants pour les 2^{ème} et 3^{ème} coupes et les chaumes, que pour la 1^{ère} coupe et les racines. Dans le cas du témoin F_4 , la fraction minérale des chaumes est constituée à près de 60 % de silice.

Si l'on estime une teneur moyenne en cendres des **chaumes + racines**, on constate qu'elles sont équivalentes à celles de la 1^{ère} coupe pour F₁, F₂, F₃, mais pour F₄ et F₅, elles sont inférieures ; ces teneurs augmentent quand les volumes de sol augmentent pour F₁, F₂, F₃, elles diminuent pour F₄ et ne varient pas pour F₅.

La partie minérale des chaumes + racines est à peine plus importante que la partie minérale correspondant à la somme des 2^{ème} + 3^{ème} coupes pour F₁, F₂, F₃, elle est presque équivalente pour F₄ et F₅. Ces immobilisations des cendres dans les chaumes + racines en fonction des volumes de sol, répondent aux fonctions "D - H" pour F₁, F₂, F₃, F₅ et aux fonctions "A - AH" pour F₄ ; F₂ a la partie minérale la plus importante des 5 traitements (figures 175 et 176).

Ramenée à l'unité de volume, ces fractions minérales des chaumes + racines diminuent de V₁ à V₅, nous indiquant que la partie minérale des chaumes + racines ramenée au kg de sol est toujours bien plus importante pour V₁ que pour V₅. Les 2 témoins F₄ et F₅ présentent un test d'homogénéité de 100 % pour cette partie de la plante.

La teneur moyenne en cendres dans l'ensemble de la plante est une notion théorique qui permet une meilleure comparaison des éléments entre eux. Ces teneurs moyennes sont très regroupées, donc voisines les unes des autres : elles varient pour chacun des traitements entre 9 et 10 %. Graphiquement, F₂ domine F₁ et F₃, lesquelles sont presque confondues.

Les teneurs en SiO₂ avaient tendance à décroître quand les volumes de sol augmentaient, dans le cas des teneurs en cendres, au contraire, elles ont tendance à augmenter quand les volumes de sol augmentent, sauf dans le cas de F₄.

Le tableau suivant compare les productions exprimées en g par pot des cendres et des rendements (m. s.) pour chaque traitement, pour les volumes de sol V₁ et V₅ :

	F ₁		F ₂		F ₃		F ₄		F ₅	
	cendres	Rdt	cendres	Rdt	cendres	Rdt	cendres	Rdt	cendres	Rdt
V ₁	4,3 g	45,6 g	4,6 g	45,2 g	3,8 g	42,0 g	1,4 g	13,3 g	1,6 g	15,1 g
V ₅	13,8 g	141,6 g	17,0 g	155,0 g	12,7 g	129,5 g	3,1 g	34,4 g	5,3 g	50,9 g

On constate que la fraction minérale représente environ 10 % de la matière sèche, indépendamment du traitement et du volume de sol.

La fraction minérale de la plante en fonction des volumes de sol répond aux fonctions "A - AH" pour chacun des traitements (figures 177 et 178); les courbes F₂ prédominent toutes les autres, mais il n'y a plus d'analogies, comme il y en avait pour la silice, ni entre F₁ et F₃, ni entre F₄ et F₅. D'autres éléments ont fortement joué pour différencier les traitements :

Ca et Mg pour F_1 (par rapport à F_3),

P et K pour F_5 (par rapport à F_4).

Exprimées par kg de sol, les fractions minérales diminuent quand les volumes de sol augmentent pour les 5 traitements ; dans le cas de F_1 , F_2 , F_3 , l'importance de la silice dans cette fraction minérale, minimise l'effet N et K.

IV - DISCUSSIONS

Ce chapitre comprendra 2 parties relatives aux relations sol-plante, aussi importantes l'une que l'autre.

La première, d'ordre qualitatif, concernera les fonctions auxquelles on parvient pour préciser les exportations des différents éléments, les fonctions caractéristiques des exportations n'étant que le produit des fonctions - rendements par les fonctions - teneurs ; les éléments réagissent différemment, qu'il s'agisse des éléments apportés par les engrais, ou des éléments du sol.

La deuxième partie, d'ordre quantitatif, comprendra les bilans des différents éléments :

éléments apportés par les engrais,

éléments du sol,

éléments exportés par la plante.

Ce bilan est particulièrement intéressant et précis pour l'azote, puisque l'engrais azoté a été apporté sous forme de ^{15}N .

4.1 INTERPRETATION DES FONCTIONS

Les différentes fonctions représentatives des exportations des éléments (N-P-K-Ca-Mg-Na-SiO₂-cendres) ne sont que la conséquence du produit des fonctions se rapportant aux rendements par celles se rapportant aux teneurs, puisque :

$$\text{rendement} \cdot \text{teneur} = \text{exportation}$$

Les teneurs en éléments répondent souvent à des fonctions simples, et les fonctions caractérisant les rendements sont limitées en nombre, mais leur produit génère toute la gamme possible des différentes fonctions analysées plus haut.

Les exportations se rapportant au traitement F_2 sont particulièrement intéressantes car les erreurs y sont les plus faibles ; nous suivrons, à partir du rendement de la 1^{ère} coupe, le devenir des exportations pour chacun des éléments. Ainsi, nous aurons déjà un aperçu assez large des différentes fonctions.

Nous compléterons ce tableau par d'autres exemples, présentant une particularité.

4.1.1 Le rendement = fonctions "A - AH" (cas le plus fréquent)

Les fonctions relatives aux exportations ne seront différentes de celles des rendements que si les teneurs présentent des variations importantes (positives ou négatives) en fonction des volumes de sol.

Les cas examinés se rapportent donc à la 1^{ère} coupe pour le traitement F₂.

Azote : figure 179

La teneur en N des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe pour le traitement F₂ augmente fortement de V₁ à V₅ (+ 58,5 %), les fonctions "A - AH" du rendement deviennent alors "A₁ - A" pour l'exportation de l'azote en fonction du volume croissant de sol.

Phosphore : figure 180

La teneur en P des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe pour le traitement F₂ augmente peu de V₁ à V₅ (+ 14,0 %), aussi pour exprimer l'exportation du P, la fonction "A" se maintient-elle, mais la courbe se redresse, elle tend vers une droite et la fonction "AH" exprimant l'exportation de P par kg de sol, devient presque parallèle à l'axe des abscisses.

Potassium : figure 181

La teneur en K des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe pour le traitement F₂ augmente suffisamment de V₁ à V₅ (+ 37,3 %) pour engendrer les fonctions "A₁ - A" représentant l'exportation du potassium à la 1^{ère} coupe, comme cela s'était présenté pour l'azote.

Calcium et magnésium : figures 182 et 183

La faible diminution des teneurs des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe pour le traitement F₂ en fonction des volumes de sol (- 4,5 % pour Ca entre V₅ et V₁, - 5,5 % pour Mg, et ces pentes d'ailleurs ne sont pas significatives) ne modifie pas les fonctions de départ et, comme pour les rendements, les fonctions "A - AH" caractérisent les exportations de Ca et celles de Mg à la 1^{ère} coupe.

Sodium : figure 184

La teneur en Na des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe pour le traitement F₂ répond à la fonction "E₁" présentant un maximum pour 5 kg de sol, au-delà la teneur diminue. Ces variations de pente engendrent les fonctions "E₂ - E₁" pour les

exportations de Na, ces fonctions sont caractéristiques d'un problème au niveau de la plante : pour les volumes V_4 et V_5 , la plante a des difficultés de prélèvement. Dans ce cas, c'est vraisemblablement l'élément K (exporté fortement pour V_4 et V_5) qui a limité le prélèvement de Na.

SiO₂ et cendres : figures 185 et 186

Comme pour Ca et Mg, les teneurs des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe varient faiblement en fonction des volumes de sol (- 9,3 % pour SiO₂, + 8,7 % pour les cendres), il s'ensuit que les fonctions représentatives des exportations de SiO₂ et de la production des cendres sont identiques à celles des rendements ("A - AH").

Cas de F₄ (1^{ère} coupe) : figure 187

La teneur en P des "tiges + feuilles" de la 1^{ère} coupe pour le traitement F₄ diminuant fortement quand les volumes de sol augmentent (- 48,3 % entre V_1 et V_5), les fonctions "A - AH" du rendement deviennent les fonctions "E₂ - E₁" pour les exportations du P à la 1^{ère} coupe.

4.1.2 Le rendement = fonctions "P_> - P_<"

Cas de F₁ (SCR) : figure 188

La teneur en Mg des chaumes + racines pour le traitement F₁ répond à une droite à pente croissante (+ 30,2 % pour V_5 par rapport à V_1) : les immobilisations Q et Q' répondent aux fonctions "D - H", la droite représentative de Q accusant une forte pente (+ 117,2 %).

Cas de F₅ (SCR) : figure 189

Dans le cas du P des chaumes + racines, on aboutit aux mêmes fonctions que précédemment, c'est-à-dire les fonctions "D - H", avec des données de départ différentes :

- la fonction "P_>" du rendement a une puissance = 0,75 (et une pente de + 30,2 %),
- la teneur en P, représentée par la fonction "P_<" a une puissance négative (- 0,24),
- le produit de ces 2 fonctions donne une droite à pente très forte (+ 116,2 %), analogue au cas précédent.

Cas de F₂ (2^{ème} + 3^{ème} coupes) : figure 190

Avec pour le rendement, une fonction "P_>" à puissance élevée (0,77) et pour la teneur en Na des tiges et feuilles des 2^{ème} et 3^{ème} coupes, une droite à forte pente (+77,4 %), l'exportation de Na pour 2c + 3c se caractérise par les fonctions "P_> - P_>", avec pour QNa une puissance > 1 (1,21) et une puissance > 0 (0,15) pour Q'Na.

4.1.3 Le rendement = fonctions "D - H"

A partir des fonctions "D - H", on peut aboutir aux fonctions "P_> - P_>" (avec pour Q une puissance > 1), ou aux fonctions "D - H", ou aux fonctions "E₁ - E".

Cas de F₁ (chaumes) : figure 191

La teneur en N des chaumes pour le traitement F₁ étant représentée par une fonction "A", les QNCh et Q'NCh répondent aux fonctions "P_> - P_>" (avec pour QNCh, une puissance > 1).

Cas de F₂ (chaumes) : figures 192, 193, et 194

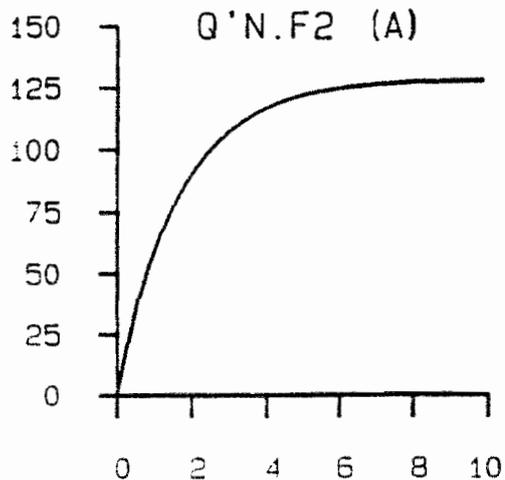
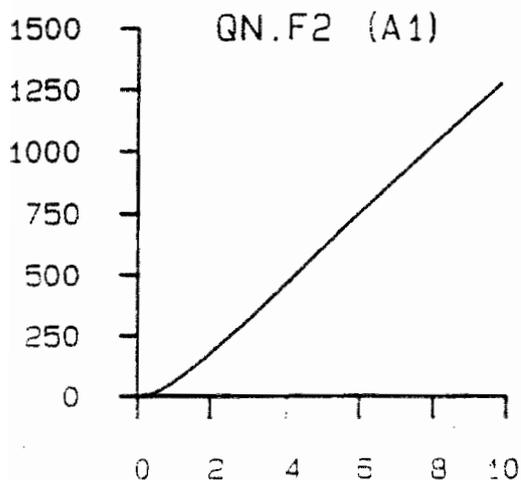
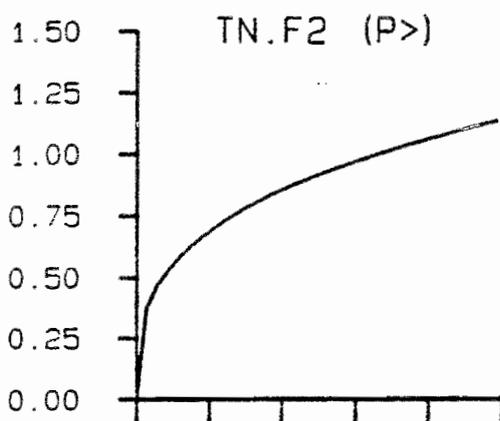
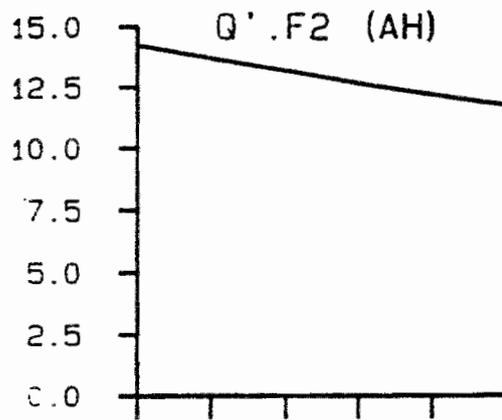
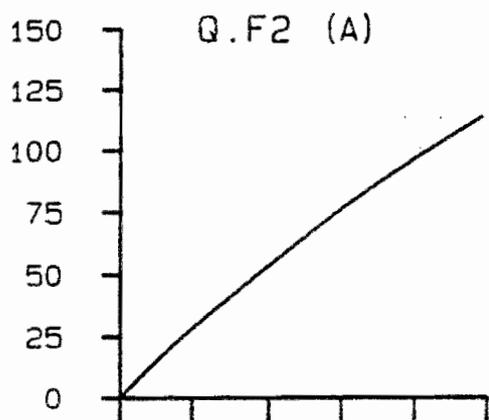
La droite représentant la production de chaumes du traitement F₂ a une très forte pente (+ 270 % pour V₅ par rapport à V₁):

- si, comme pour K, la teneur est une droite à pente élevée (+ 80 %), l'immobilisation du K dans les chaumes répond aux fonctions "P_> - P_>" (avec pour QKCh une puissance > 1) ;
- si, comme pour Mg, la teneur est une fonction "E₁" avec palier, l'immobilisation du Mg dans les chaumes répond aux fonctions "E₁ - E" ;
- alors que si la fonction représentative "E₁" de la teneur en cendres est moins incurvée, la fraction minérale des chaumes répondra aux fonctions "D - H", avec une très forte pente croissante pour la droite (+ 255 %).

En conclusion, les différentes fonctions relatives aux exportations se répartissent de la manière suivante, selon les éléments et selon les traitements.

Cas des éléments qui répondent aux fonctions "A₁ - A" ou "P_> - P_>"

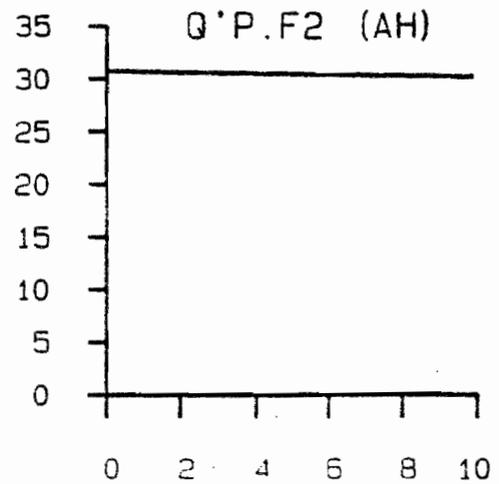
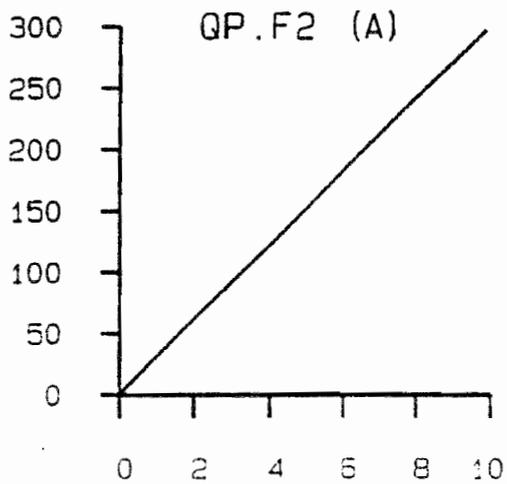
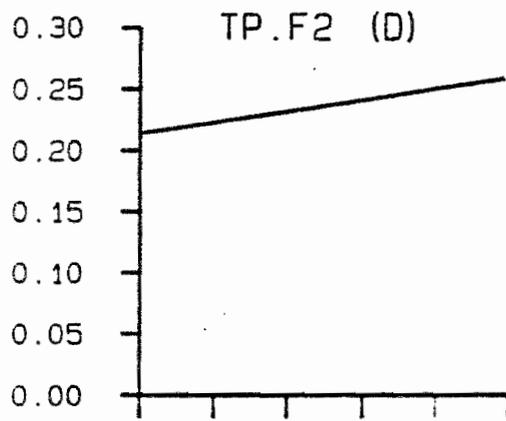
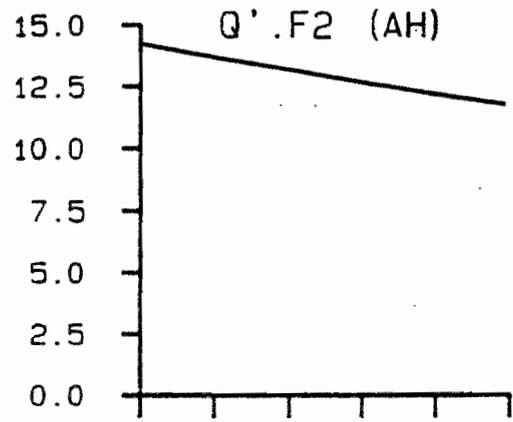
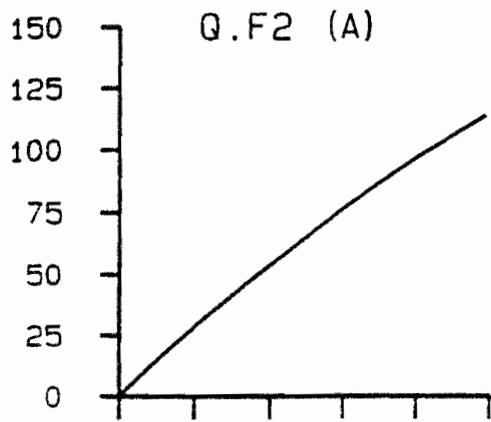
- Au fur et à mesure que les volumes de sol augmentent, la quantité d'élément prélevé par la plante augmente selon une puissance¹ ou > 1, dans la limite des 10 kg de sol ; on peut supposer en effet, qu'au-delà cette fonction puissance ("A₁") tend vers une sigmoïde.



$$QN = Q * TN$$

$$Q'N = Q' * TN$$

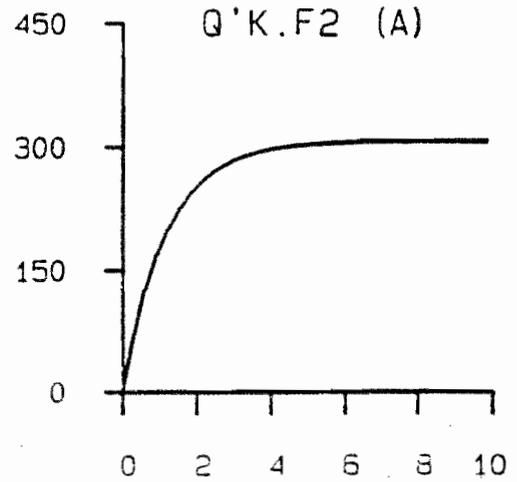
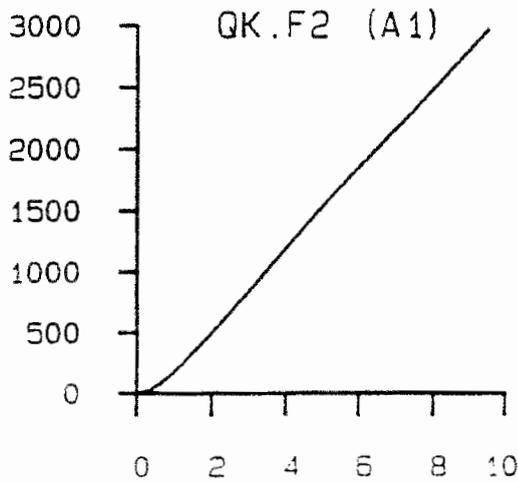
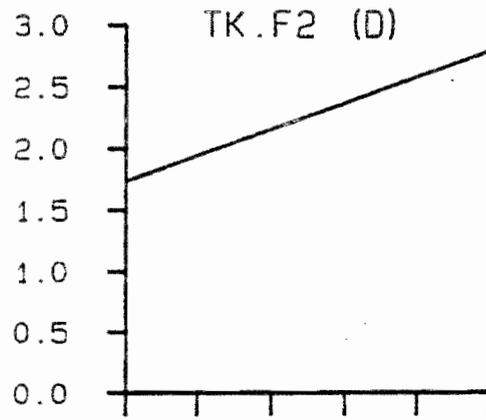
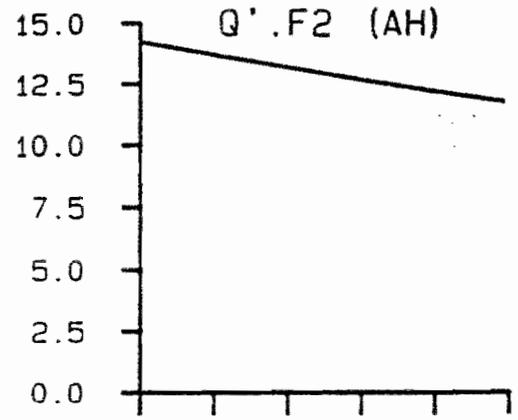
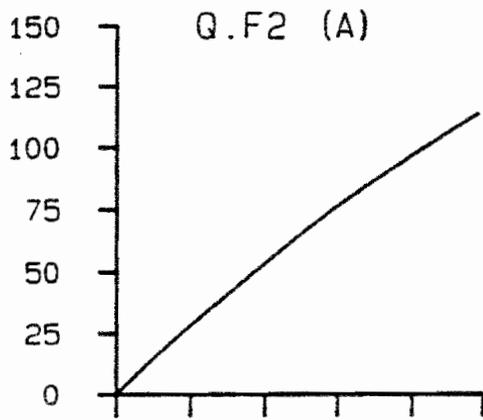
Figure 179



$$QP = Q * TP$$

$$Q'P = Q' * TP$$

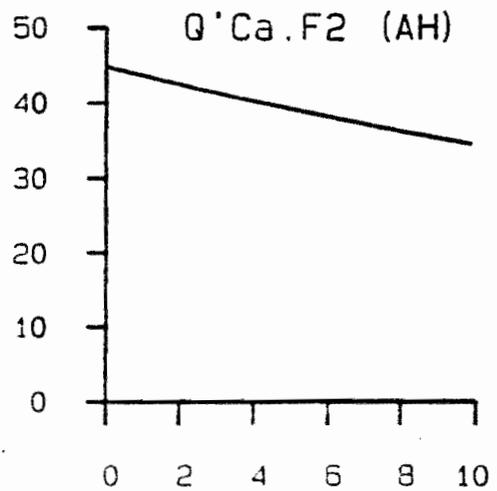
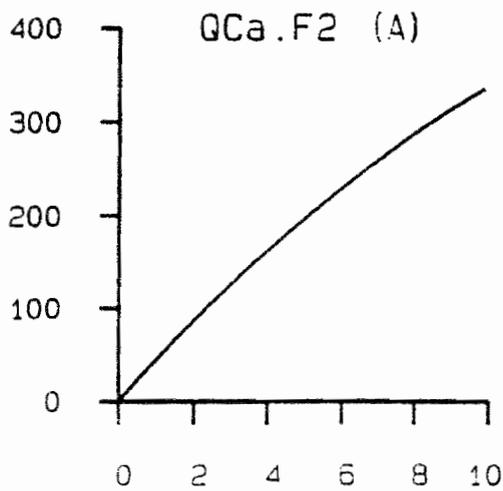
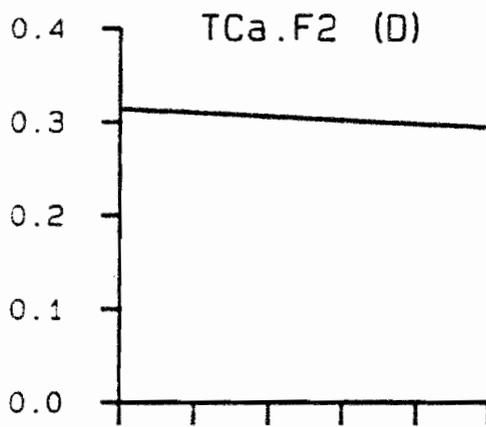
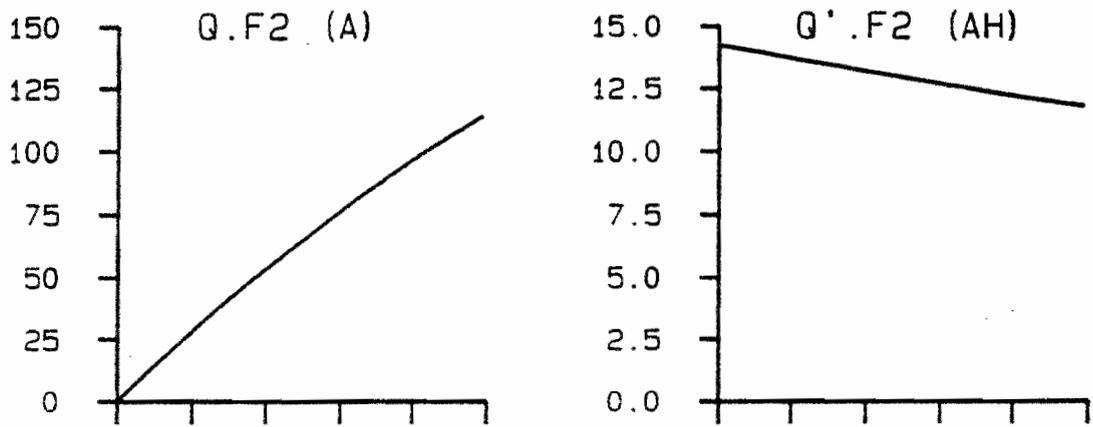
Figure 180



$$QK = Q * TK$$

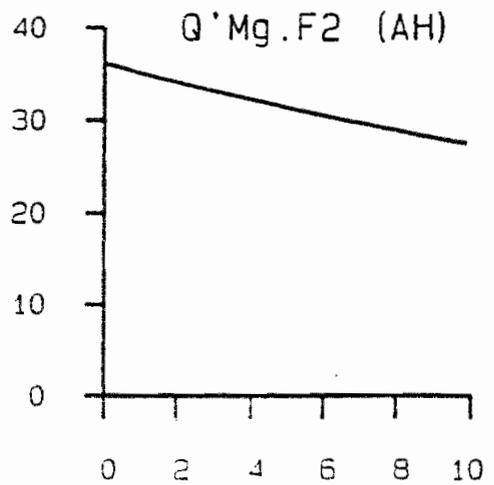
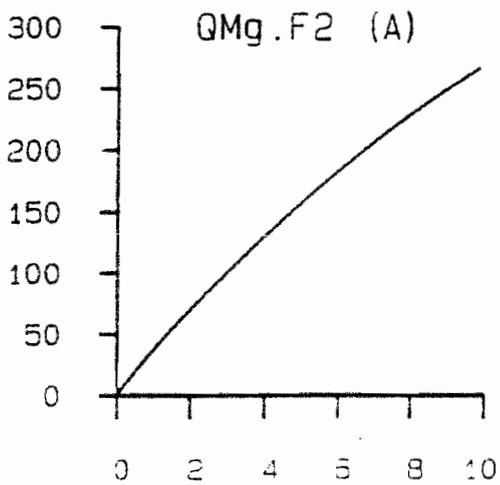
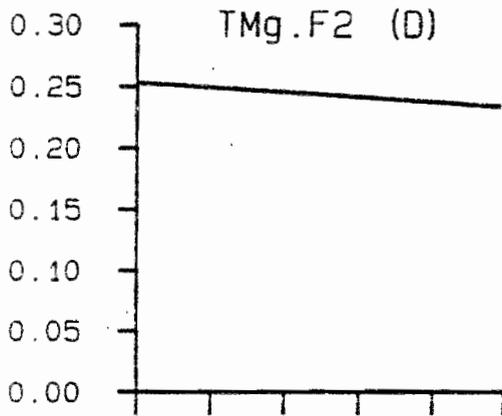
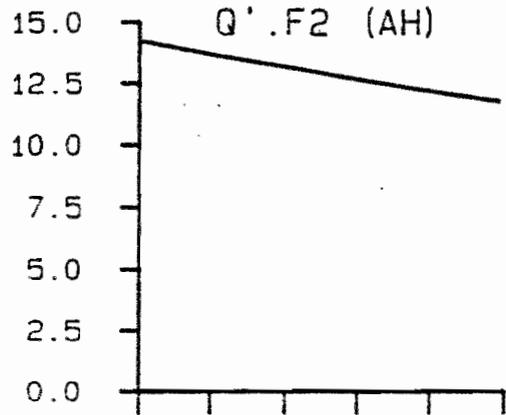
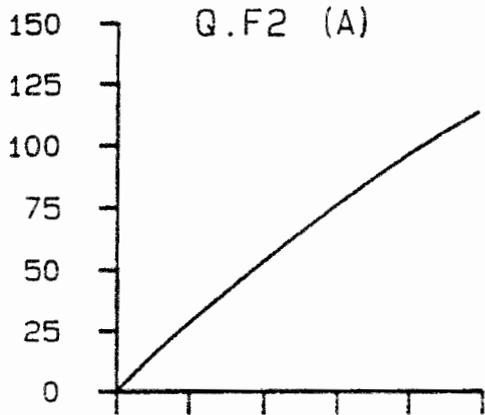
$$Q'K = Q' * TK$$

Figure 181



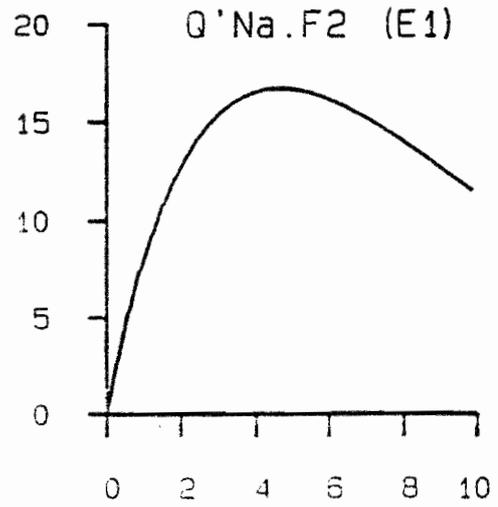
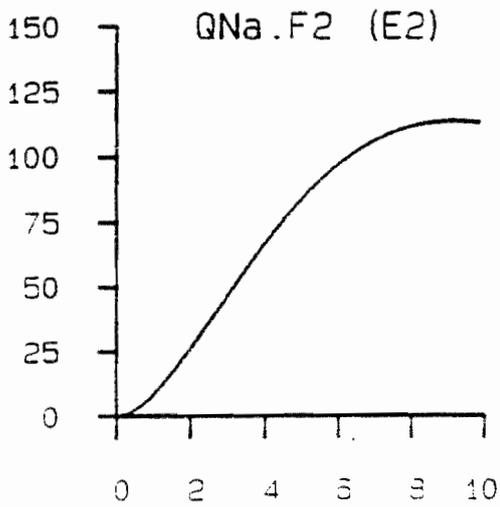
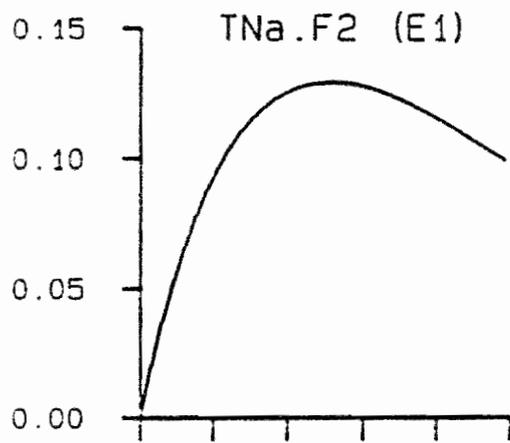
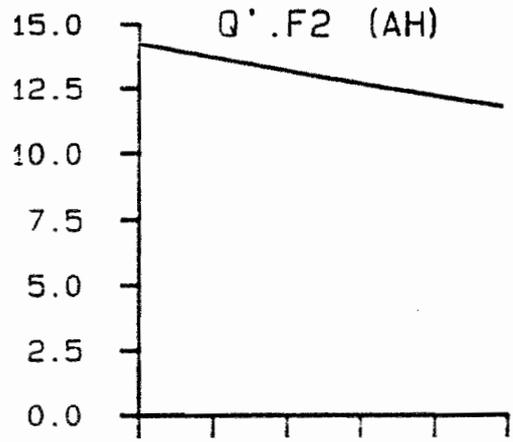
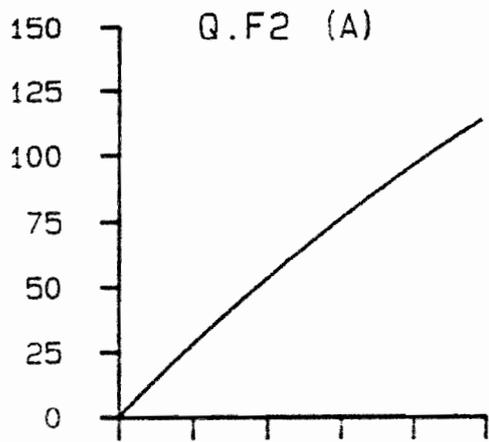
$$QCa = Q * TCa \quad Q'.Ca = Q' * TCa$$

Figure 182



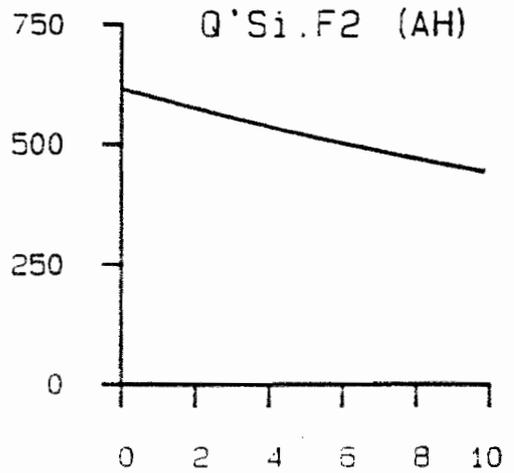
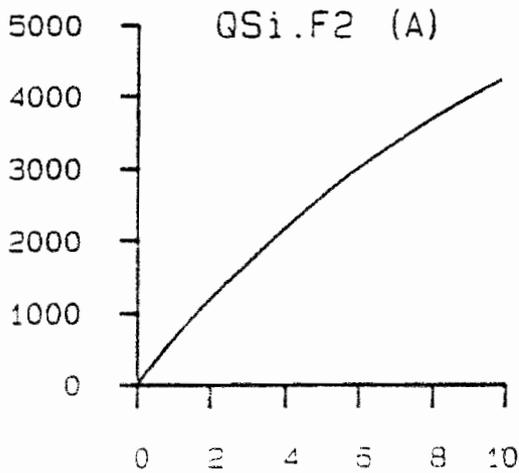
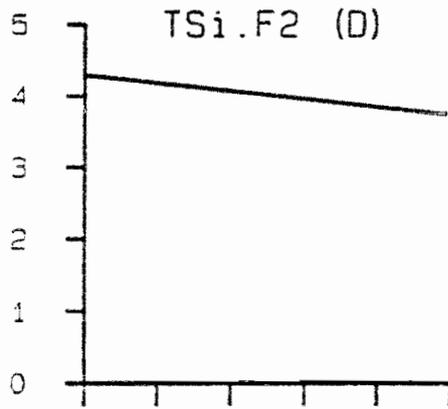
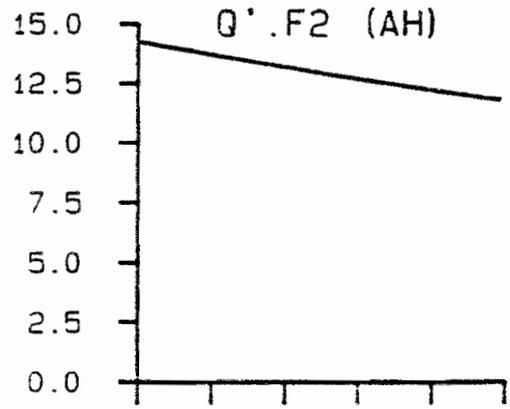
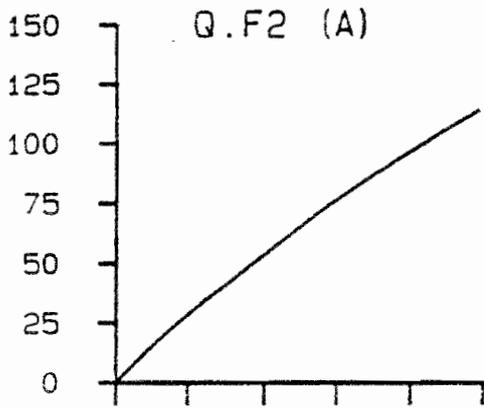
$$QMg = Q * TMg \quad Q'Mg = Q' * TMg$$

Figure 183



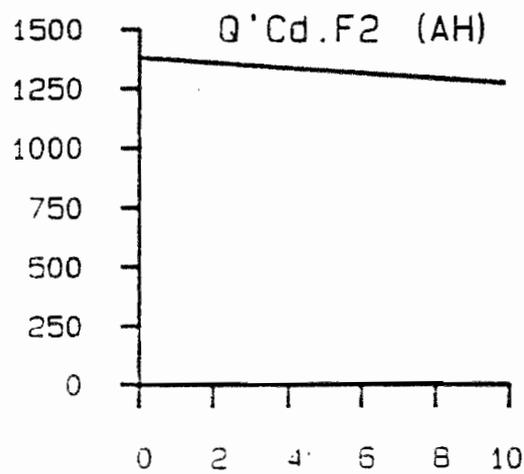
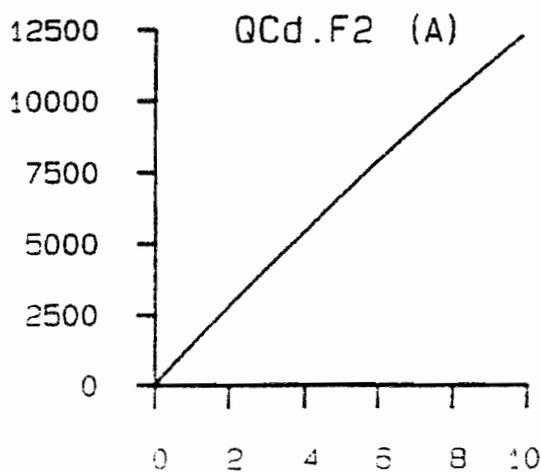
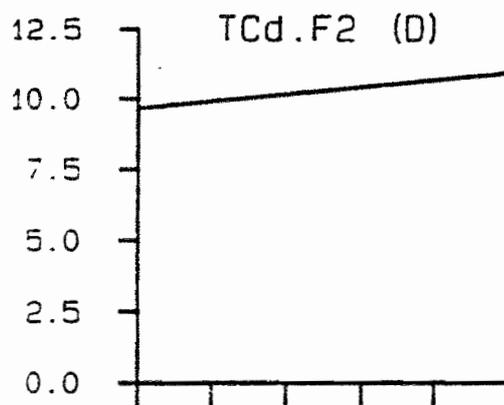
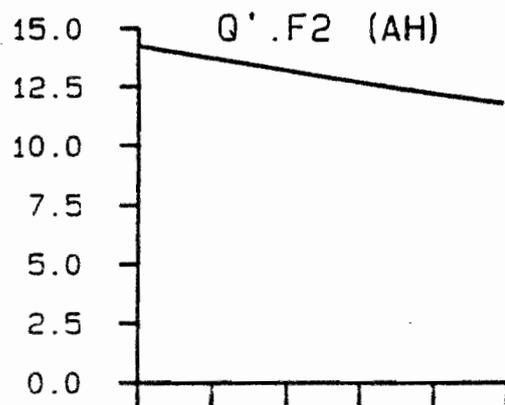
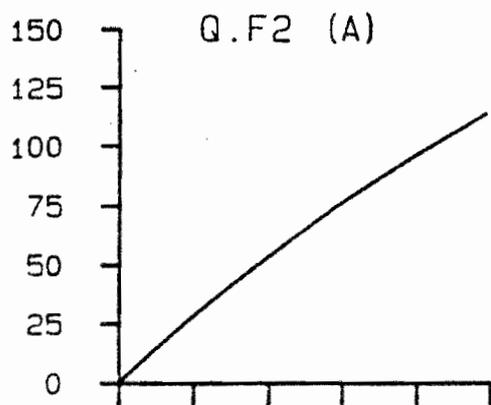
$$QNa = Q * TNa \quad Q'Na = Q' * TNa$$

Figure 184



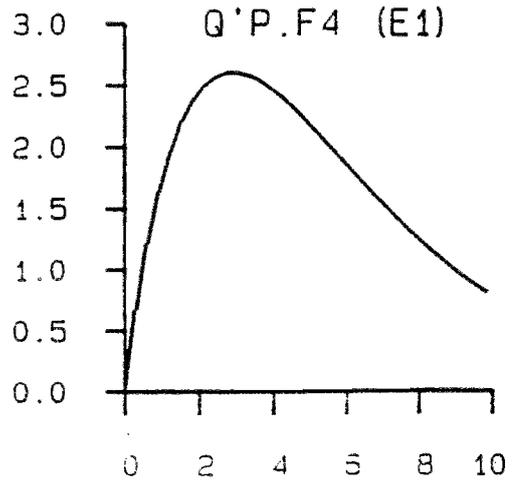
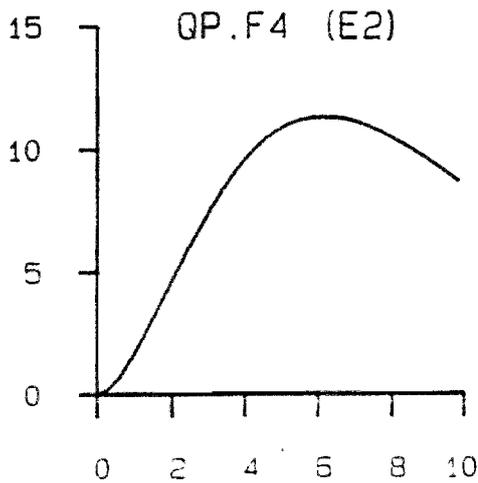
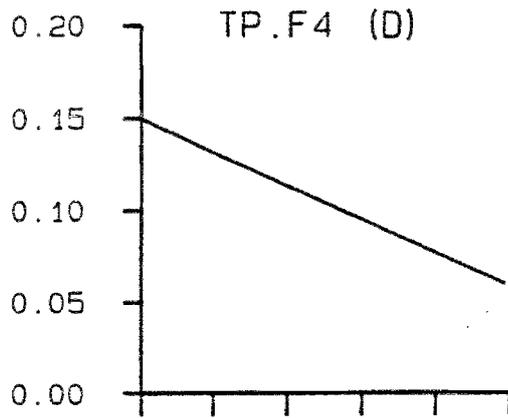
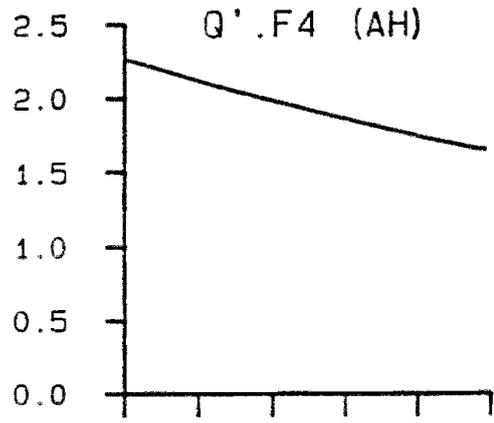
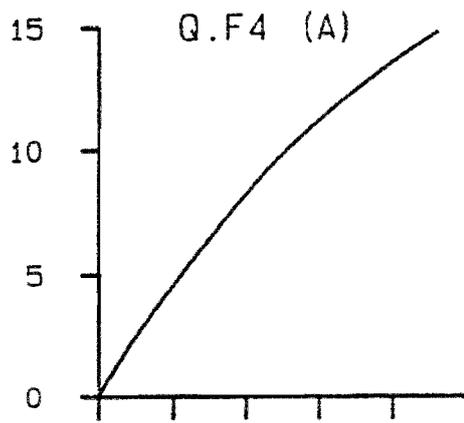
$$QSi = Q * TSi \quad Q'Si = Q' * TSi$$

Figure 185



$$QCd = Q * TCd \quad Q'Cd = Q' * TCd$$

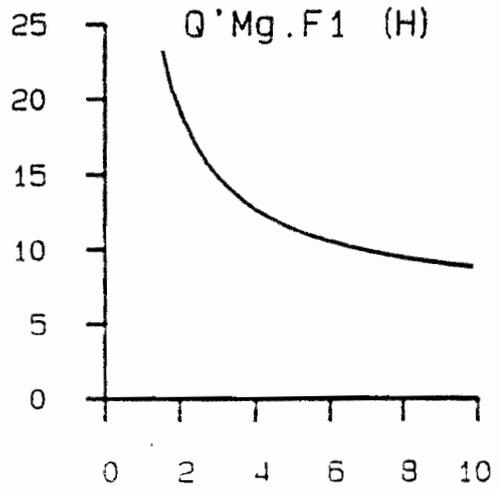
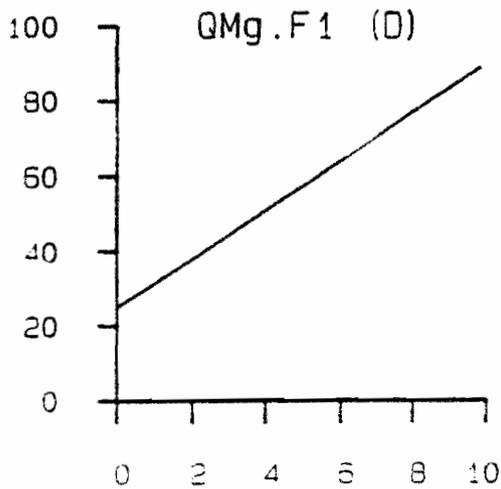
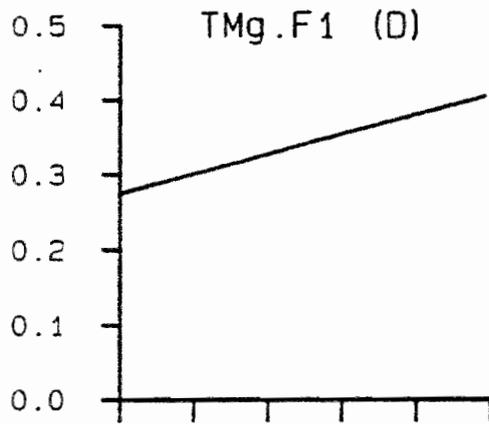
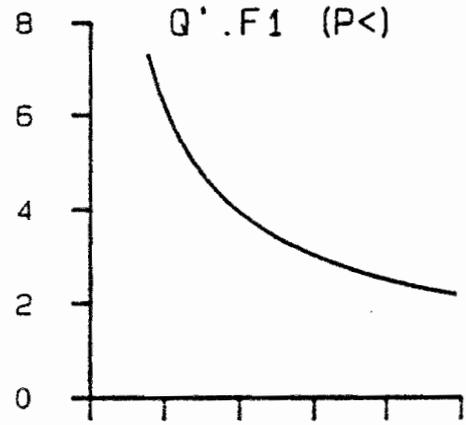
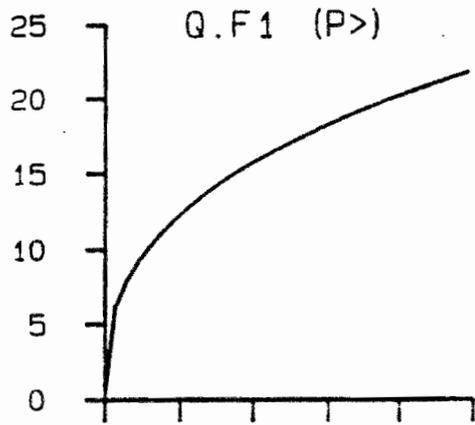
Figure 186



$$QP = Q * TP$$

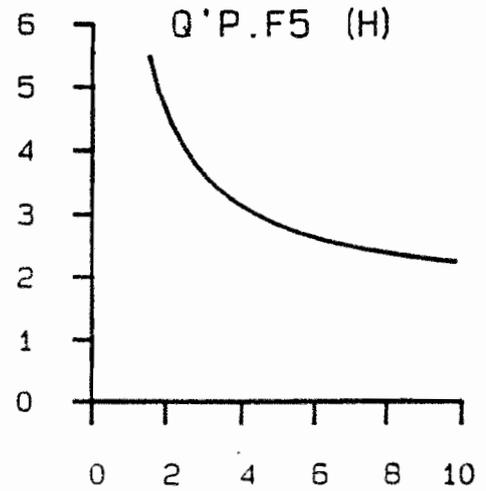
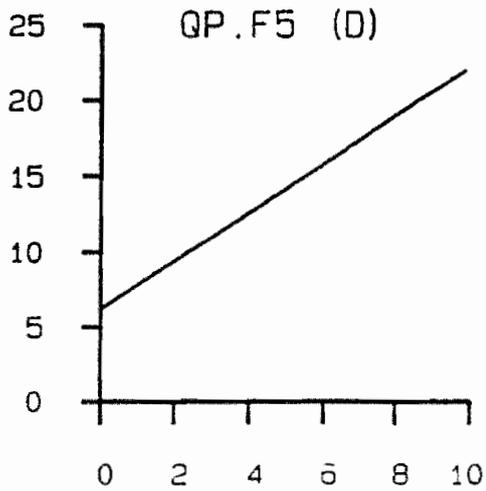
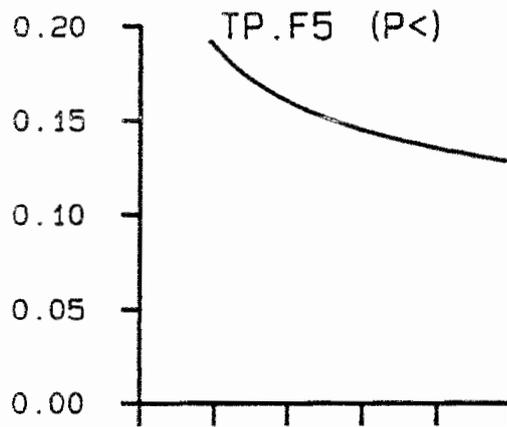
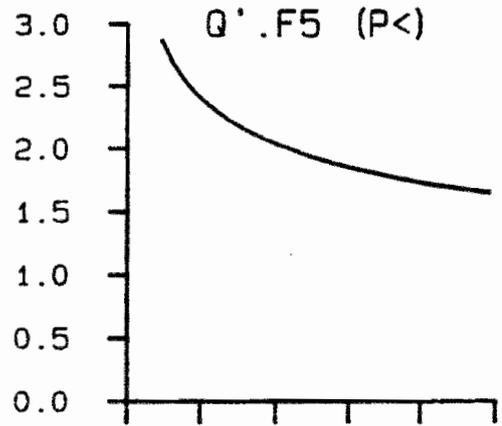
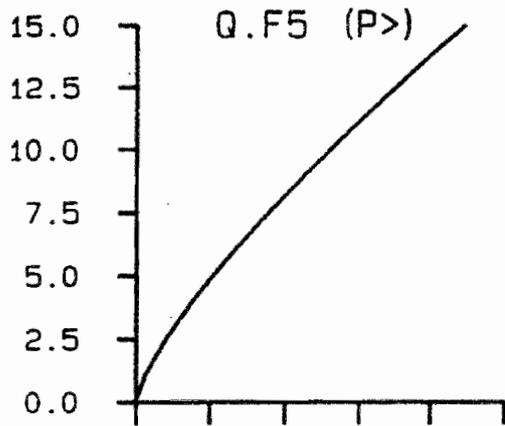
$$Q'P = Q' * TP$$

Figure 187



$$QMg = Q * TMg \quad Q'Mg = Q' * TMg$$

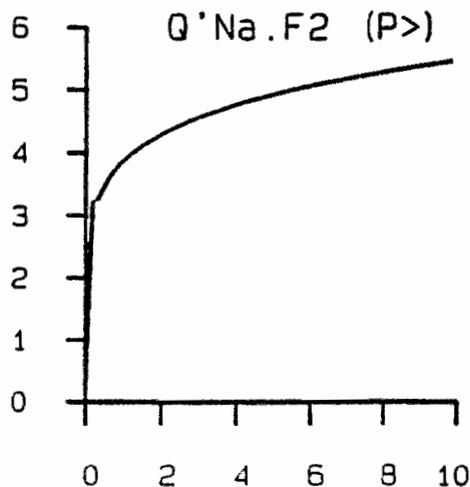
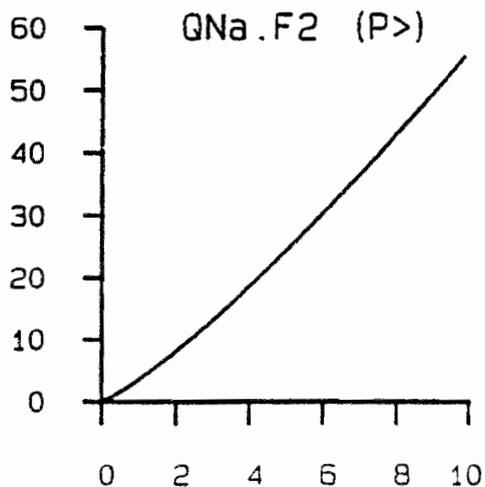
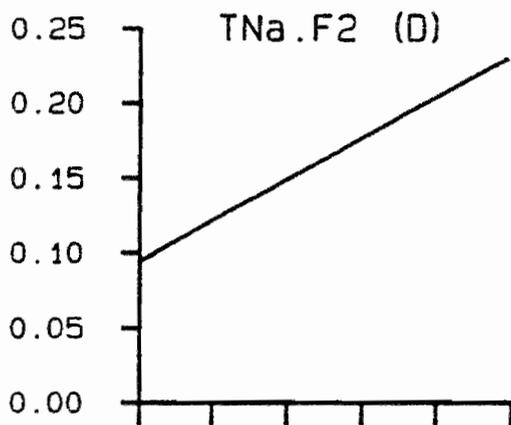
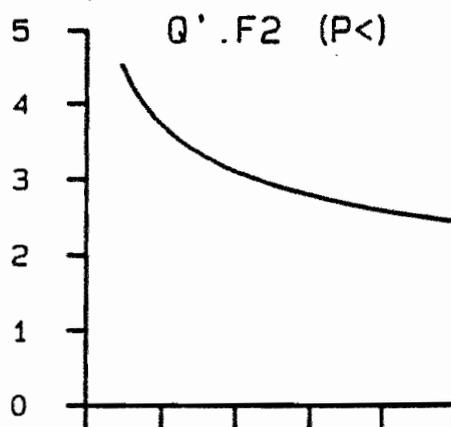
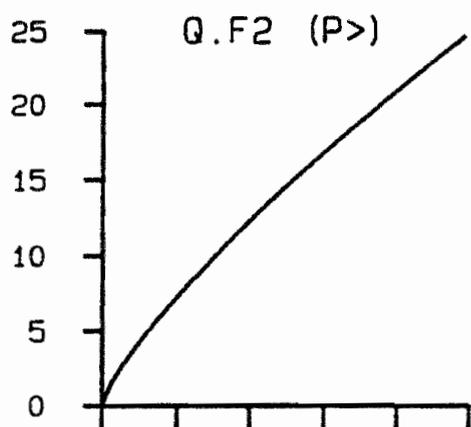
Figure 188



$$QP = Q * TP$$

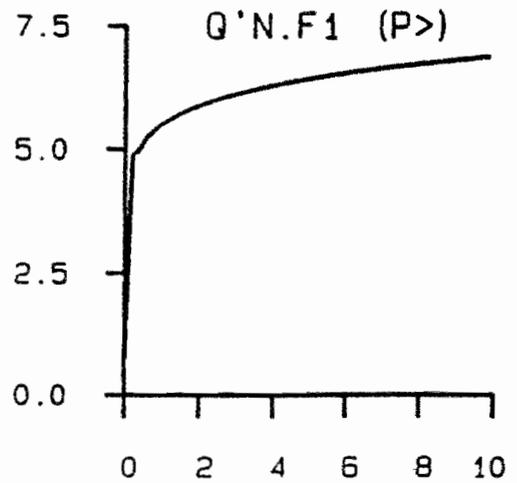
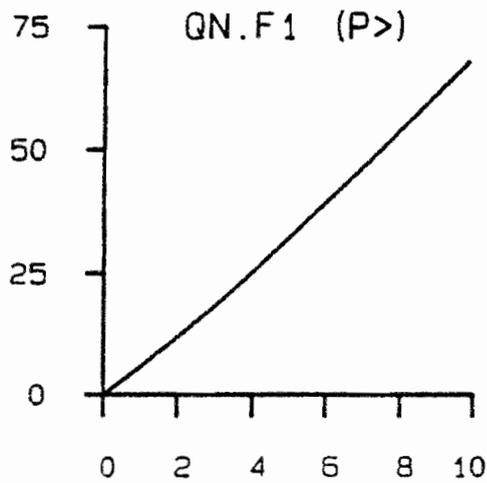
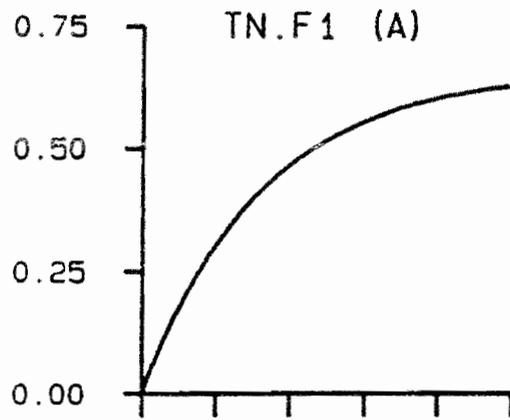
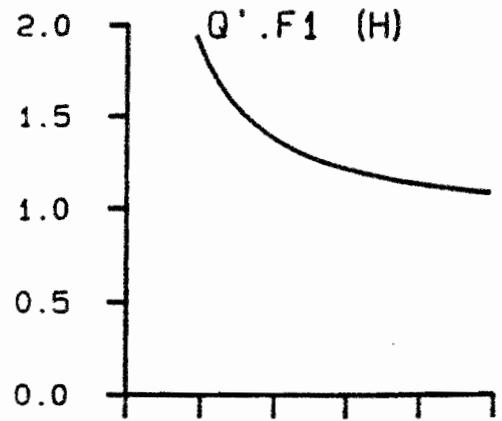
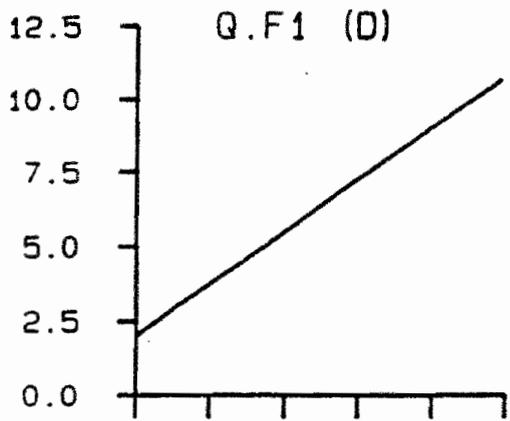
$$Q'P = Q' * TP$$

Figure 189



$$QNa = Q * TNa \quad Q'Na = Q' * TNa$$

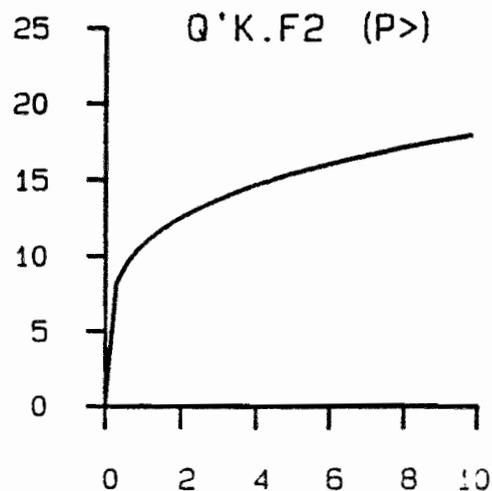
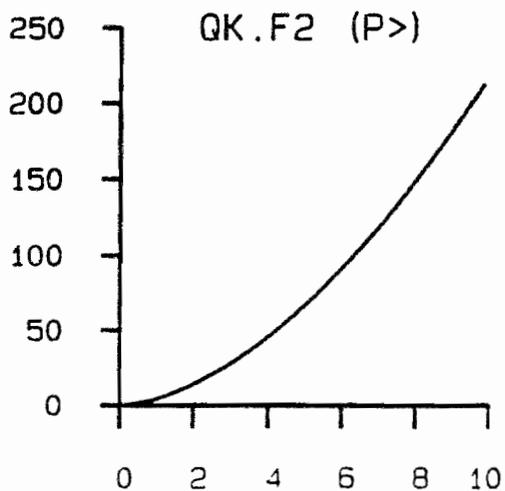
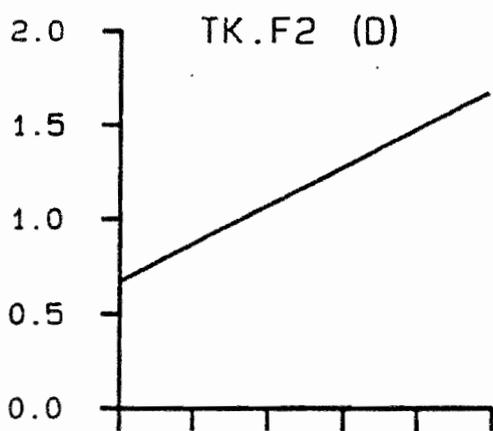
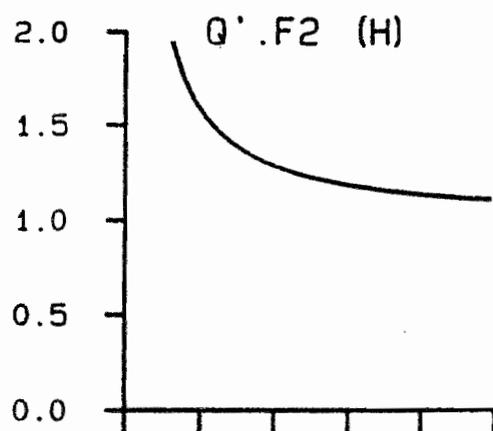
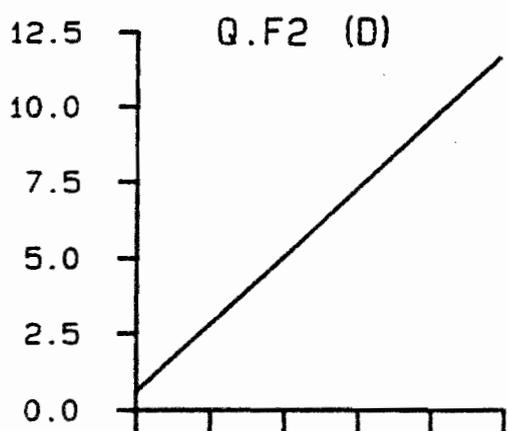
Figure 190



$$QN = Q * TN$$

$$Q'N = Q' * TN$$

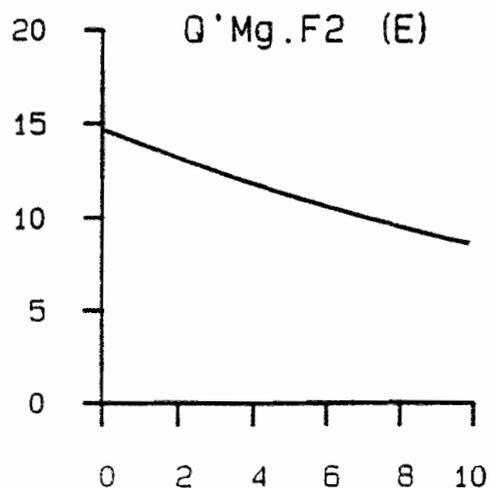
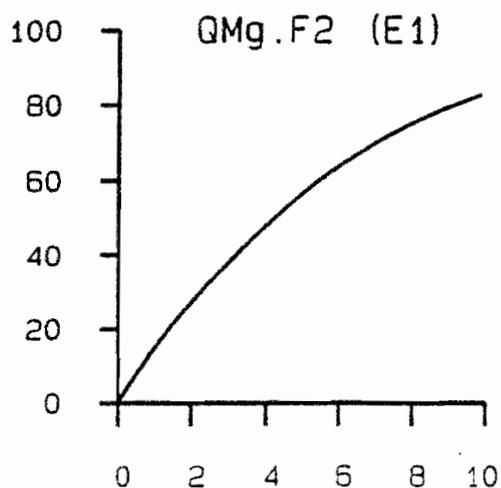
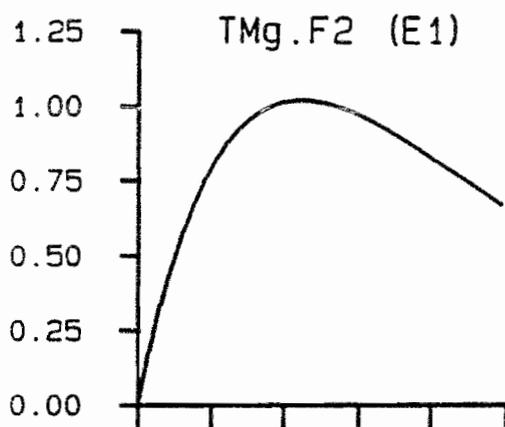
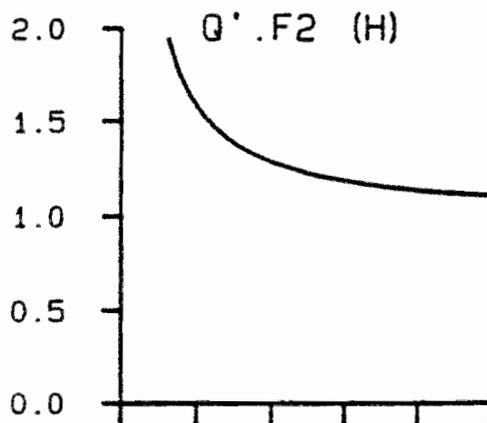
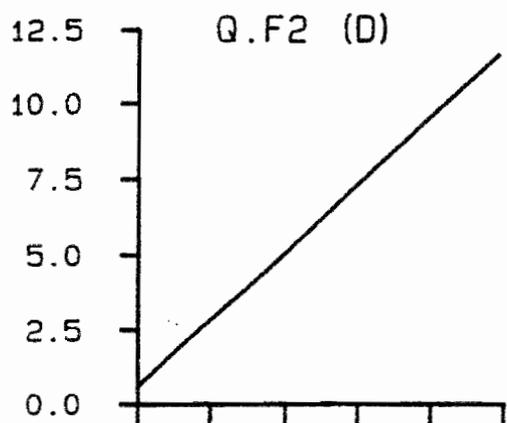
Figure 191



$$QK = Q * TK$$

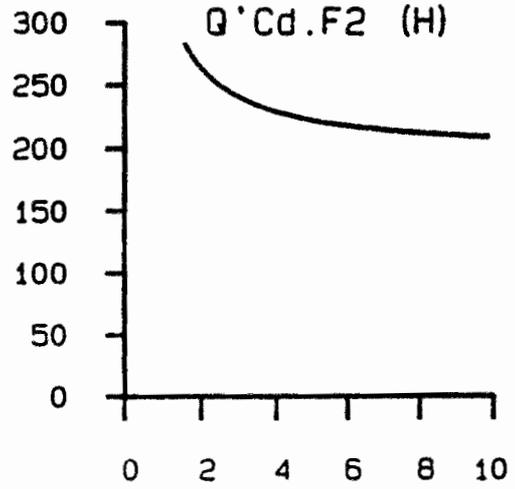
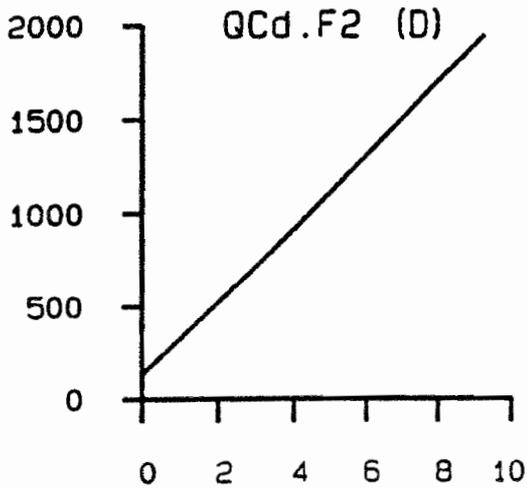
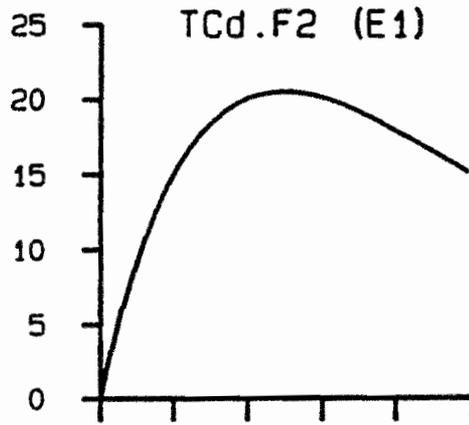
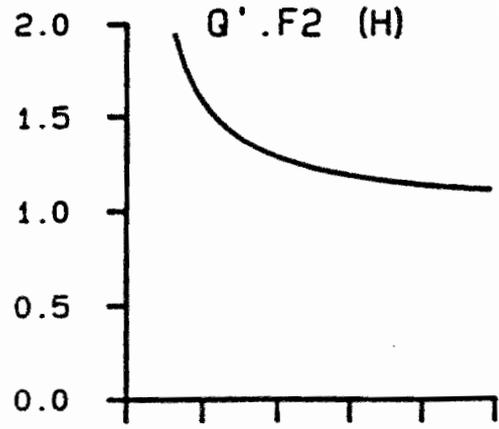
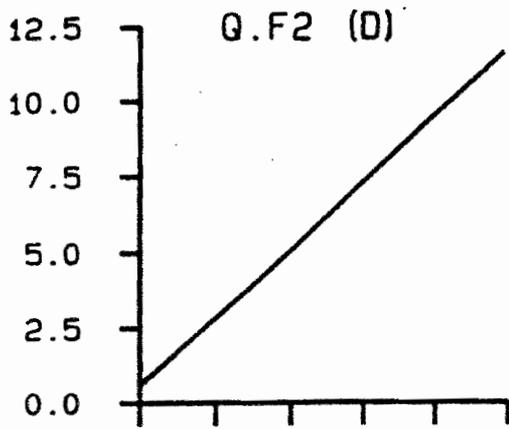
$$Q'K = Q' * TK$$

Figure 192



$$QMg = Q * TMg \quad Q'Mg = Q' * TMg$$

Figure 193



$$QCd = Q * TCd$$

$$Q'.Cd = Q' * TCd$$

Figure 194

	cendres = F ₁ , F ₂ , F ₃ , F ₅ ,
3 coupes :	rendement, cendres = F ₅ ,
	N = F ₄ ,
	P = F ₁ , F ₃ ,
	Ca = F ₄ , F ₅ ,
total plante :	K, Ca = F ₅ .

Cas des fonctions "D - H"

Elles caractérisent les immobilisations des éléments dans les chaumes + les racines, ceci concerne un grand nombre d'éléments. Ces immobilisations exprimées par kg de sol diminuent quand les volumes de sol augmentent : c'est le cas de N, P, Ca, Mg, SiO₂ et cendres pour SCR (chaumes + racines) ; pour K, les pentes ne sont pas significatives pour F₁, F₂, F₃ et pour Na, les pentes ne sont pas significatives pour F₄ et F₅, dans ces 2 cas, les erreurs sont très élevées.

Cas des fonctions "E₂ - E₁"

Elles sont particulières, puisqu'elles présentent en général un maximum dans la gamme des volumes de sol testés, ce maximum se situant souvent autour du volume V₃, cela veut donc dire que les volumes V₄ et V₅ n'ont pas du tout les mêmes réactions que V₁, V₂, V₃. On serait tenté de penser à un déséquilibre dans l'alimentation de la plante, car ces fonctions apparaissent le plus souvent dans le cas du témoin F₄ aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes (notamment pour les rendements). Mais parfois, on les observe dès la 1^{ère} coupe :

- pour F₄ : dans le cas de P et K,
- pour F₁, F₂, F₃ : dans le cas de Na (on peut supposer que l'extrême assimilabilité du K, qui réagit par une fonction "A₁", inhibe sans doute le prélèvement du Na),
- pour F₁ : dans le cas de SiO₂ (ici, la silice est gênée et concurrencée par le calcium, soluble et assimilable, apporté par l'engrais et largement exporté dès la 1^{ère} coupe, la fonction "A" caractérisant l'exportation de Ca à la 1^{ère} coupe est quasiment une droite).

Ces fonctions "E₂ - E₁" caractérisant les prélèvements des éléments par *Panicum*, en rapport avec les différents volumes de sol des pots de culture, apparaissent parce qu'il existe un facteur limitant à ces prélèvements.

On peut estimer que dans le cas du témoin F₄, la graminée a été entravée dans son développement, puisque ces fonctions se retrouvent 32 fois pour l'ensemble des éléments (pour P et K en particulier). Dans le cas du traitement F₃ par exemple, ces fonctions se rencontrent 10 fois (pour P et Na essentiellement), alors que pour le traitement F₂, on ne les trouve que 2 fois (exportation du Na à la

1^{ère} coupe et pour la somme des 3 coupes). On peut en déduire que, dans le cas du traitement F₂, *Panicum* n'a pas été entravé dans son développement.

On en conclut que l'alimentation de la graminée fourragère "*Panicum maximum*" ne s'effectue pas de la même manière selon le volume de sol dans lequel elle croît, bien que la fumure ait été apportée proportionnellement au volume de sol.

Les éléments apportés, tels N et K, sont d'autant mieux assimilés (par kg de sol) que les volumes de sol sont importants ; par contre, les éléments du sol sont d'autant mieux prélevés (par kg de sol) que les volumes de sol sont petits : la plante multipliant ses racines dans les petits pots, accède mieux aux éléments nutritifs du sol.

Les relations sol - plante ne sont donc pas identiques pour des pots de culture de 2 kg ou de 9 kg : elles dépendent du volume de sol exploité.

4.2 BILAN DES ELEMENTS

L'expérimentation étant réalisée en circuit fermé – l'eau de drainage des pots de culture a été remise en circulation au fur et à mesure de sa production –, il est possible d'établir un bilan pour les principaux éléments (N-P-K-Ca-Mg-Na) en fonction des données fournies par :

- les analyses de sol effectuées au début et à la fin de l'essai,
- les analyses du végétal,
- les analyses des percolats, recueillis en phase finale de l'essai.

Ce bilan permet donc de connaître l'appauvrissement ou l'enrichissement du sol en tel ou tel élément et de comparer les éléments entre eux.

Ces bilans, pour une plus grande précision, seront effectués d'après les chiffres donnés pour chacun des volumes de sol par les fonctions représentatives de l'exportation de l'élément, ramenée au kg de sol.

4.2.1 Le bilan de l'azote

Il est l'élément le plus important de cet essai, car les 3 engrais azotés apportés (F₁ = nitrate de calcium, F₂ = sulfate d'ammonium, F₃ = urée) étaient marqués à l'azote 15, ce qui a permis d'établir un bilan très détaillé de l'azote provenant des engrais, et de l'azote du sol.

Toute la partie traitant de l'azote 15 est basée sur les données essentielles de la dilution isotopique (GUIRAUD G. - 1984) pour tout ce qui concerne les excès isotopiques, les coefficients réels d'utilisation des engrais etc..

Les 150 ppm d'azote 15 apportés, l'ont été avec les excès isotopiques suivants:

$E = 2 \%$ pour les volumes V_1, V_3, V_4, V_5 ,

$E = 15 \%$ pour le volume V_2 .

Toutes les analyses d'azote 15 sur les tiges + feuilles (des 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} coupes), les chaumes et les racines ont été réalisées par spectrométrie optique (au Centre ORSTOM de Nouméa), ainsi que les analyses de sol des pots de volume V_2 . Seul l'azote 15 des sols des pots de volumes V_1, V_3, V_4, V_5 a été déterminé au spectromètre de masse (au CEN de Cadarache), la faible teneur dans ces cas- là ne pouvant être déterminée de façon suffisamment précise par spectrométrie optique. Le prix de revient des engrais marqués, à apporter sur 90 pots de culture (soit près de 460 kg de sol) explique que nous nous soyons limité pour les 4 / 5 des pots à un excès isotopique de 2 %.

Azote - engrais utilisé par la plante

Les résultats expérimentaux du prélèvement de l'azote-engrais par *Panicum* sont donnés dans le tableau XII.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 195 à 212.

Le tracé des différentes fonctions pour chacune des coupes, les chaumes et les racines permet les observations suivantes :

- **à la 1^{ère} coupe** (figures 195 et 196), plus les volumes de sol augmentent, meilleure est l'utilisation de l'engrais par la plante (fonctions " $A_1 - A$ ") : le sulfate d'ammonium est mieux utilisé que le nitrate de calcium et celui-ci mieux que l'urée ; l'analyse de variance montre que les CRU (coefficient réel d'utilisation de l'engrais) des 3 traitements F_1, F_2, F_3 sont significativement différents les uns des autres pour chacun des volumes de sol. Pour chacun des traitements, la différence entre les CRU de V_1 et de V_5 est de + 25 % en moyenne (cf. tableau XIII). Précisons que les teneurs en azote-engrais augmentent fortement de V_1 à V_5 (de + 85 % en moyenne, pour les 3 traitements). La représentation graphique de l'exportation de l'azote-engrais par kg de sol et celle des CRU est identique :

l'une est exprimée en valeurs absolues (mg N par kg de sol),

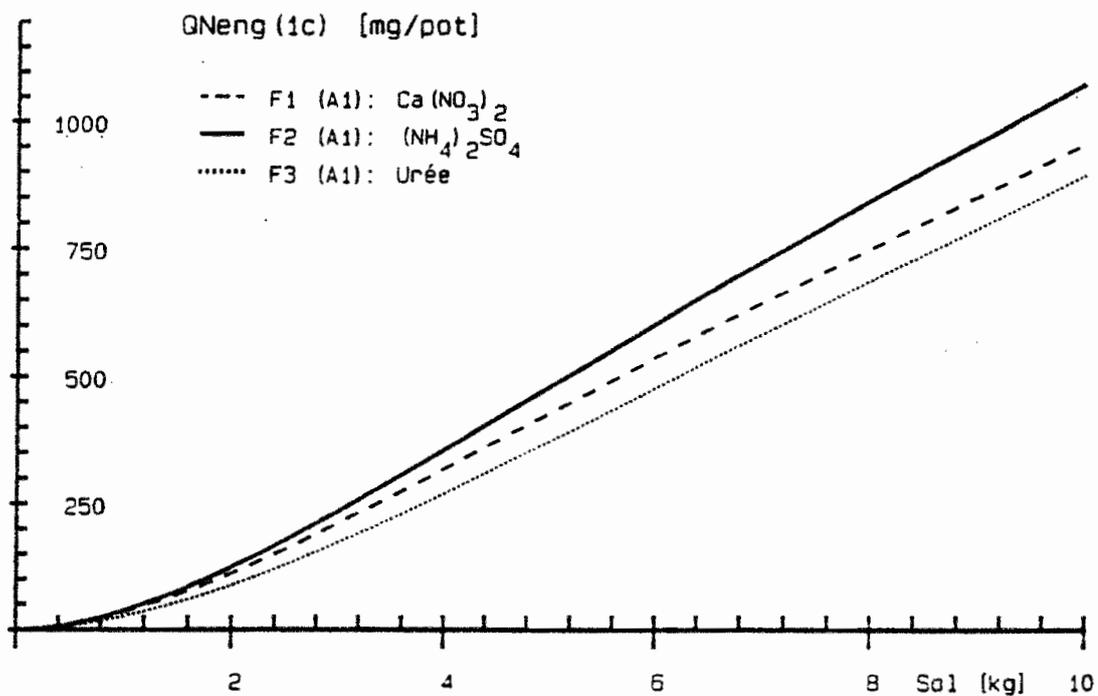
l'autre est exprimée en valeurs relatives (% de N_{eng} apporté) : tableau XIII;

- **aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes**, les CRU sont très faibles, et diminuent avec l'accroissement des volumes de sol ; en moyenne pour les 3 traitements, les CRU de la somme 2^{ème} + 3^{ème} coupes sont de : 8 % pour V_1 et 4 % pour V_5 .

TABLEAU XII – PRELEVEMENT DE L'AZOTE - ENGRAIS PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

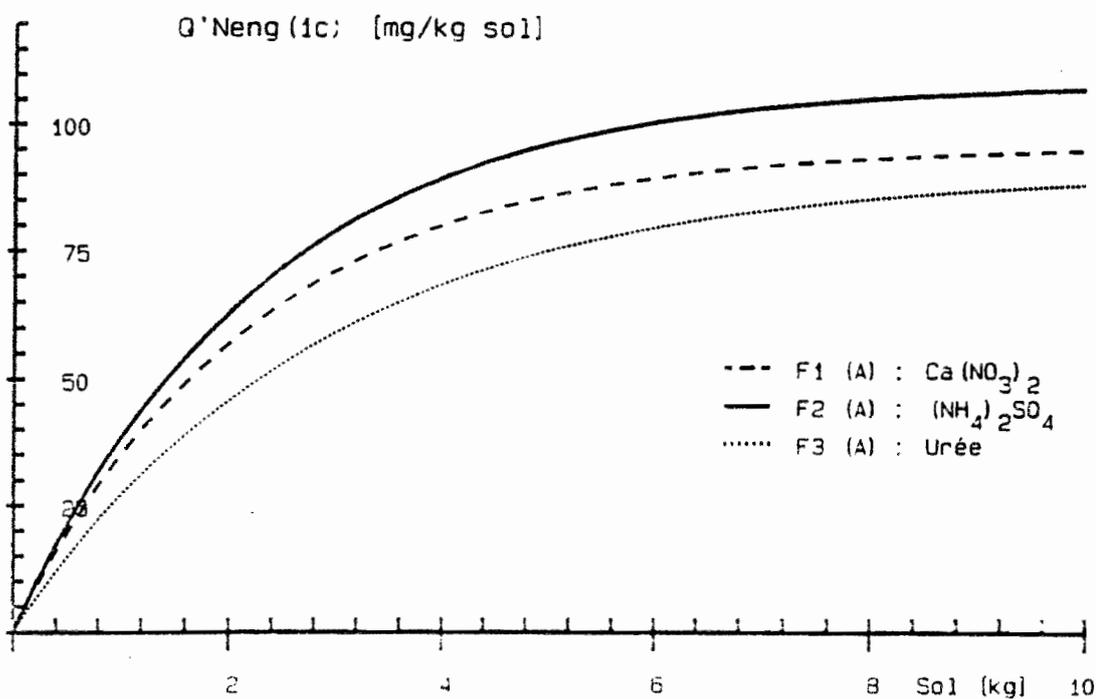
(Q = mg N_{eng} par pot ; Q' = mg N_{eng} par kg de sol)

F - V	1 ^{ère} coupe		2 ^{ème} coupe		3 ^{ème} coupe		2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		1 ^{ère} + 2 ^{ème} + 3 ^{ème} coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	124,1	60,8	18,5	9,0	5,9	2,9	24,4	11,9	148,5	72,8	4,9	2,4	24,9	12,2	29,8	14,6	178,2	87,4
	V ₂	202,1	68,7	24,8	8,4	7,2	2,4	32,0	10,9	234,1	79,6	7,8	2,6	24,1	8,2	31,9	10,8	265,9	90,5
	V ₃	372,5	80,3	30,5	6,6	9,5	2,0	40,0	8,6	412,4	88,9	15,0	3,2	30,0	6,5	44,9	9,7	457,4	98,6
	V ₄	643,8	94,4	36,8	5,4	10,0	1,5	46,8	6,9	690,6	101,3	23,5	3,5	32,4	4,8	55,9	8,2	746,5	109,5
	V ₅	839,2	93,8	46,0	5,1	12,7	1,4	58,7	6,6	897,8	100,3	34,5	3,9	38,3	4,3	72,8	8,1	970,7	108,5
F ₂	V ₁	140,3	68,8	19,5	9,6	6,5	3,2	26,0	12,7	166,2	81,5	4,8	2,3	24,3	11,9	29,0	14,2	195,3	95,7
	V ₂	214,6	73,0	23,8	8,1	6,8	2,3	30,6	10,4	245,2	83,4	7,8	2,7	21,9	7,5	29,8	10,1	275,0	93,5
	V ₃	432,2	93,2	35,0	7,5	10,7	2,3	45,7	9,8	477,9	103,0	13,7	2,9	38,5	8,3	52,1	11,2	530,1	114,2
	V ₄	713,9	104,7	41,4	6,1	11,3	1,7	52,7	7,7	766,6	112,4	23,3	3,4	42,3	6,2	65,6	9,6	832,3	122,0
	V ₅	948,0	105,9	58,5	6,5	15,2	1,7	73,6	8,2	1021,6	114,1	37,4	4,2	56,3	6,3	93,7	10,5	1115,3	124,6
F ₃	V ₁	110,8	54,3	16,0	7,9	6,1	3,0	22,1	10,9	132,9	65,1	4,1	2,0	19,6	9,6	23,7	11,6	156,6	76,8
	V ₂	150,0	51,0	20,4	6,9	6,2	2,1	26,6	9,1	176,6	60,1	6,4	2,2	17,6	6,0	24,1	8,2	200,7	68,2
	V ₃	334,1	72,0	29,6	6,4	10,3	2,2	39,9	8,6	374,0	80,6	12,5	2,7	27,5	5,9	40,0	8,6	414,0	89,2
	V ₄	569,5	83,5	38,9	5,7	11,2	1,6	50,1	7,3	619,6	90,8	21,3	3,1	27,7	4,1	49,0	7,2	668,5	98,0
	V ₅	782,9	87,5	35,7	4,0	11,8	1,3	47,5	5,3	830,5	92,8	27,0	3,0	40,2	4,5	67,2	7,5	897,7	100,3



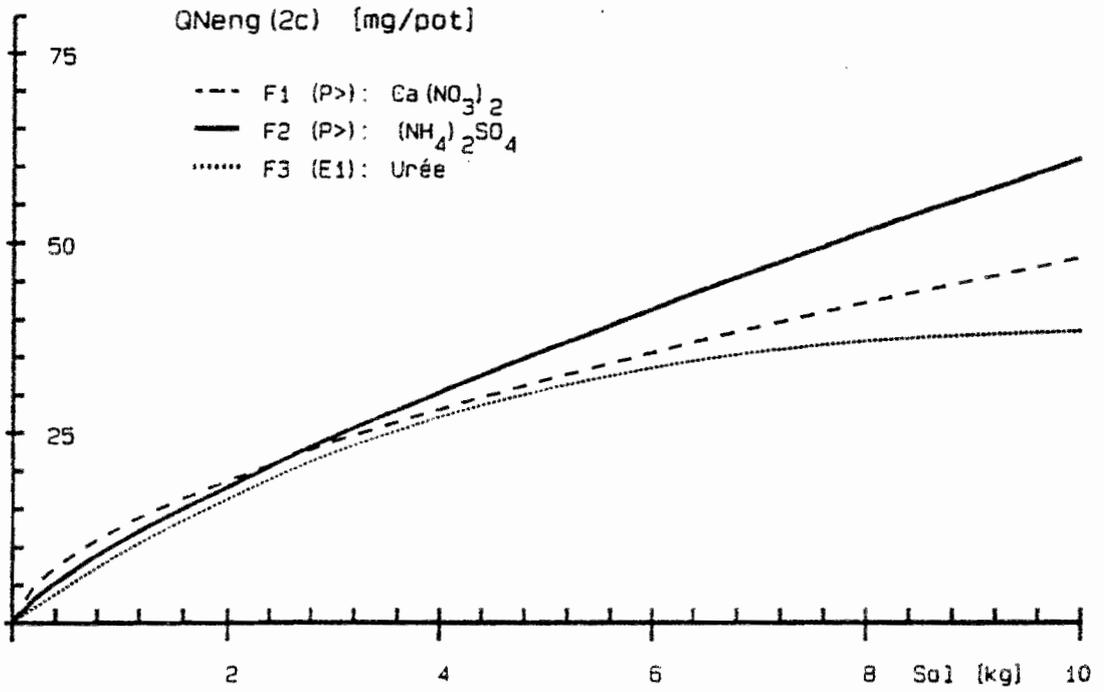
Exportation azote-engrais: 1ère coupe

Figure 195

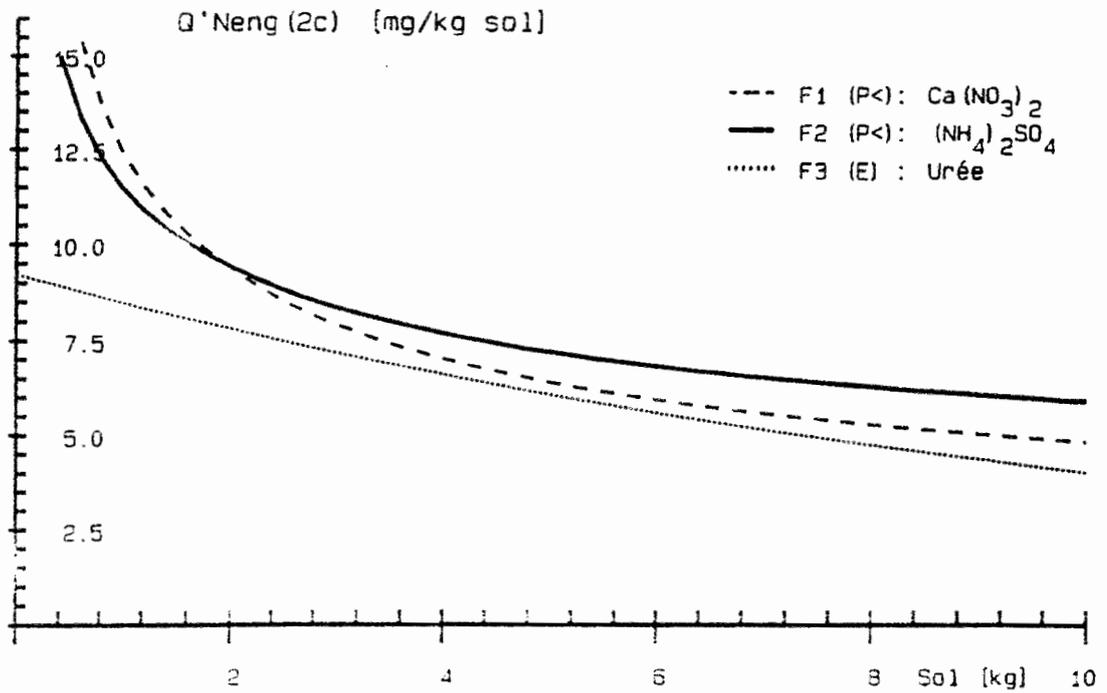


Exportation azote-engrais/kg sol: 1ère coupe

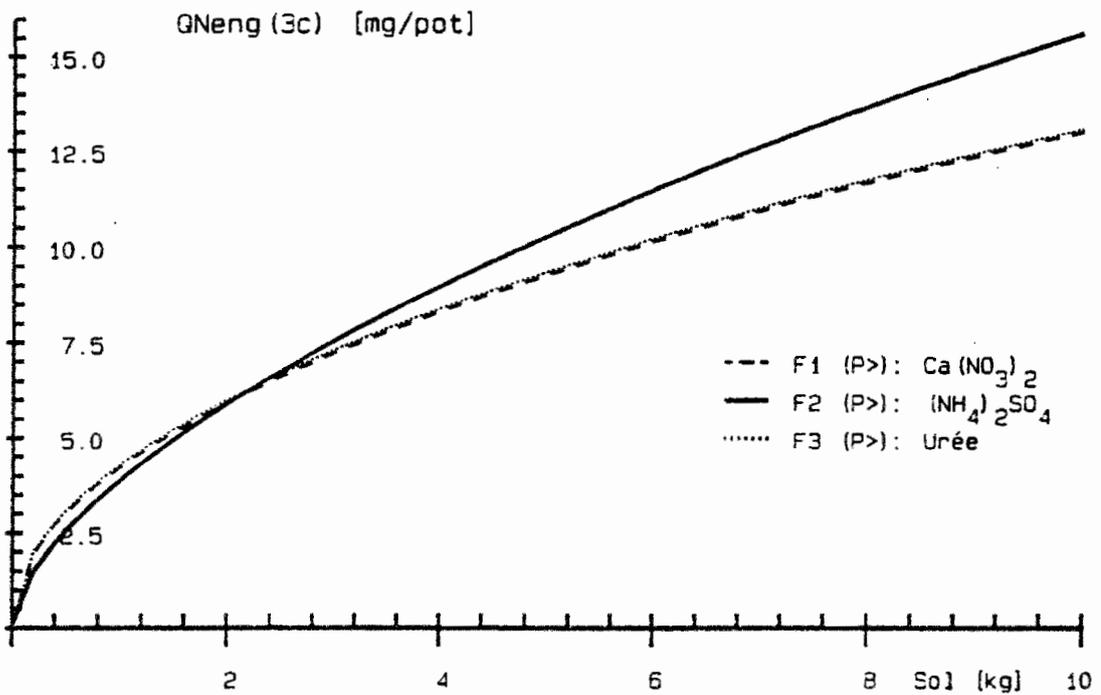
Figure 196



Exportation azote-engrais: 2ème coupe
Figure 197

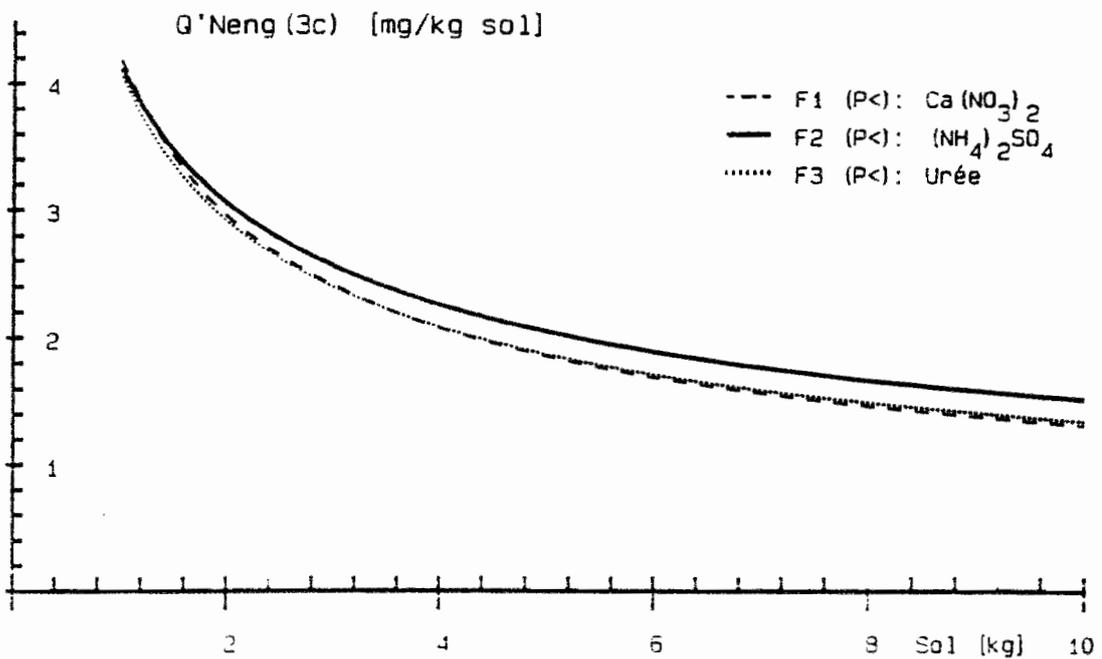


Exportation azote-engrais/kg sol: 2ème coupe
Figure 198



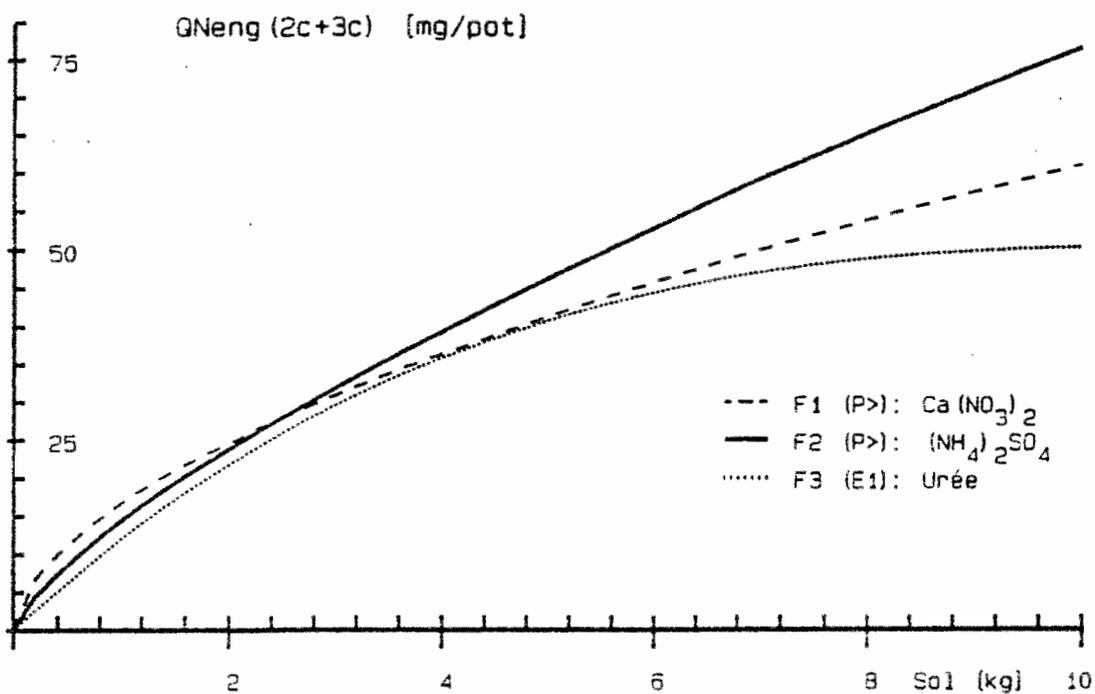
Exportation azote-engrais: 3ème coupe

Figure 199



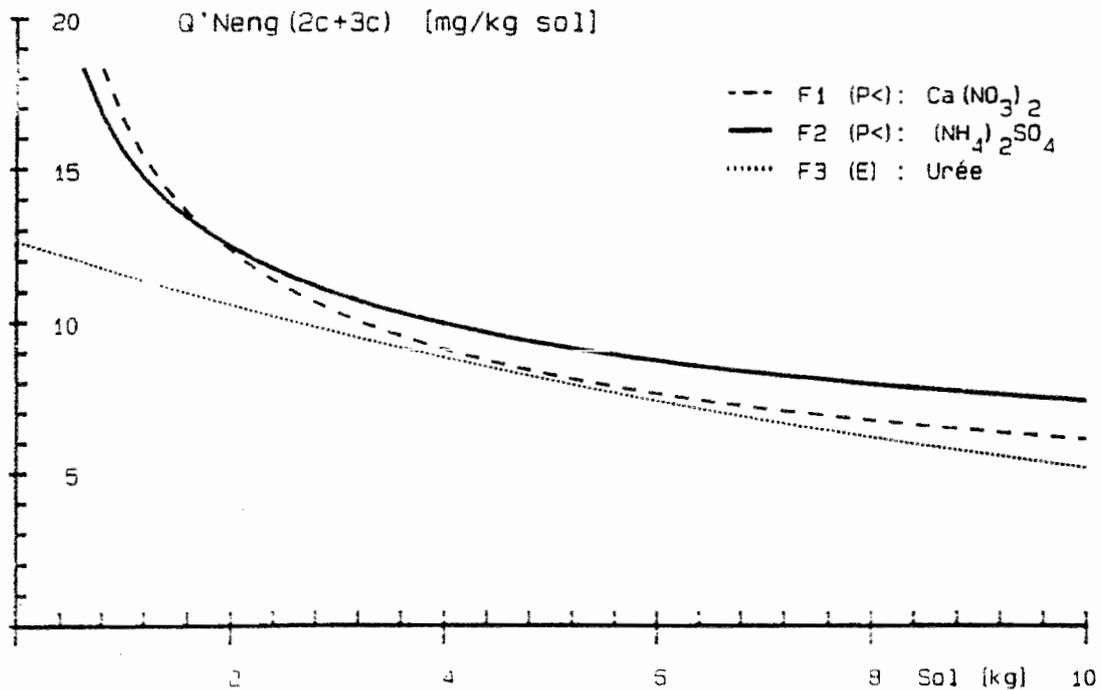
Exportation azote-engrais/kg sol: 3ème coupe

Figure 200



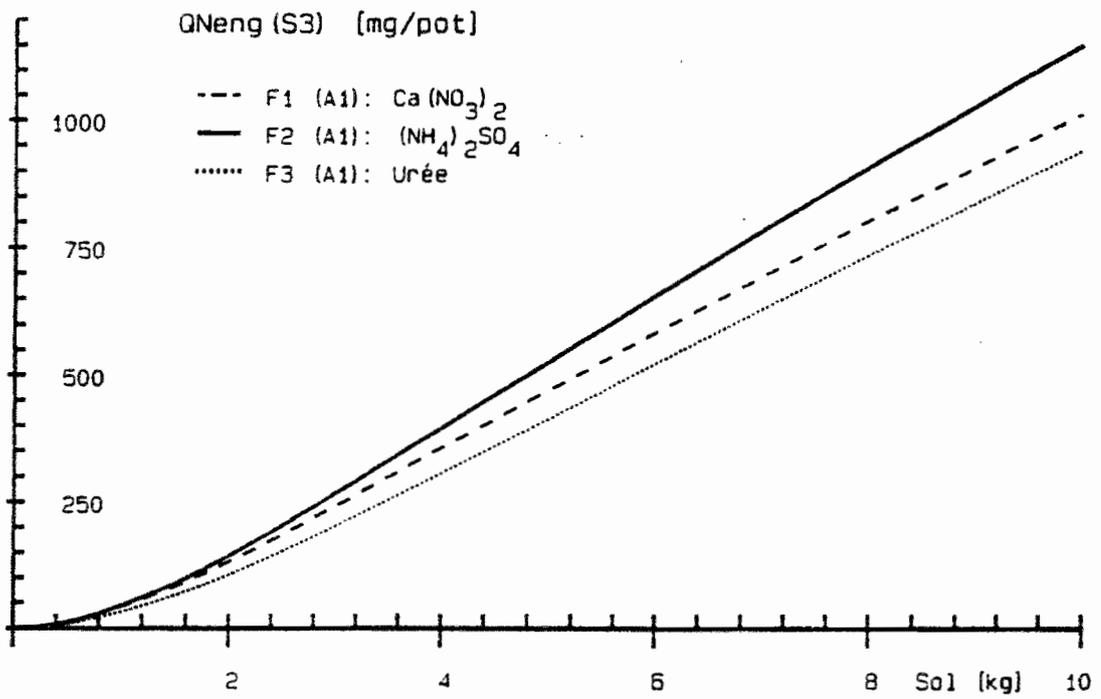
Exportation azote-engrais: 2ème + 3ème coupes

Figure 201



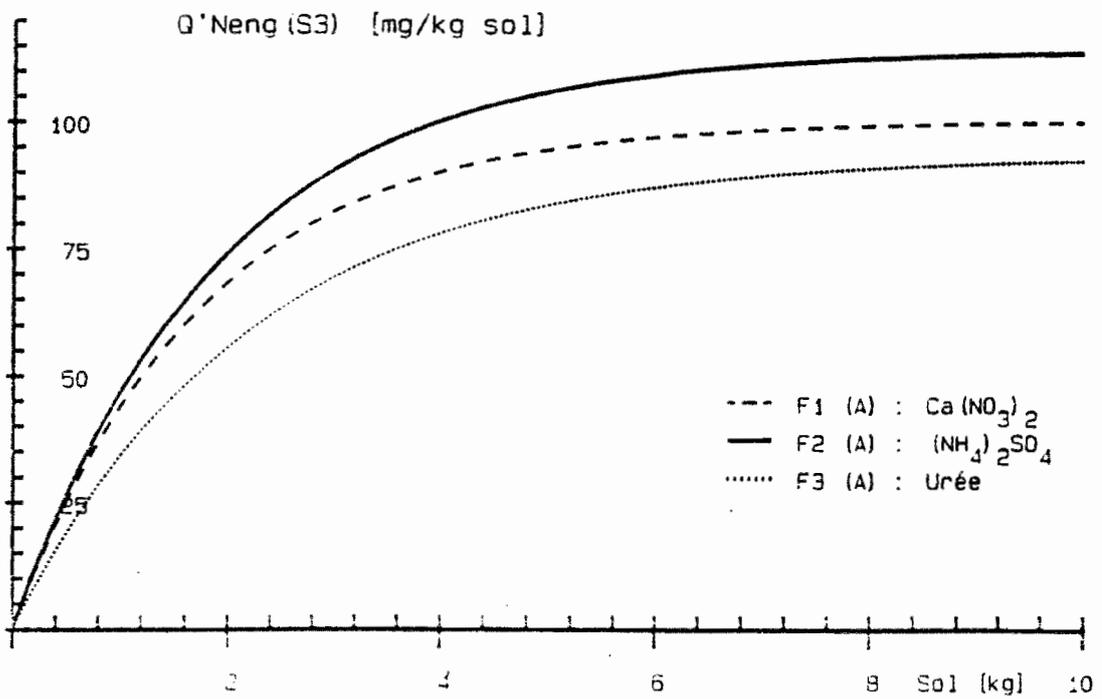
Exportation azote-engrais/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 202



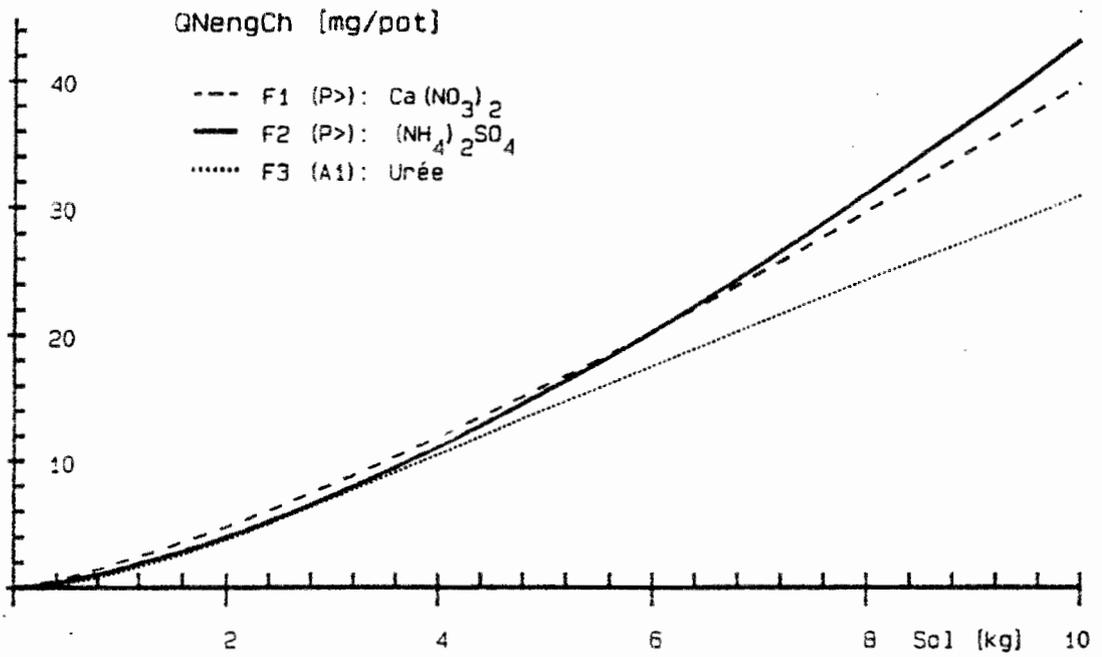
Exportation azote-engrais: 3 coupes (S3)

Figure 203



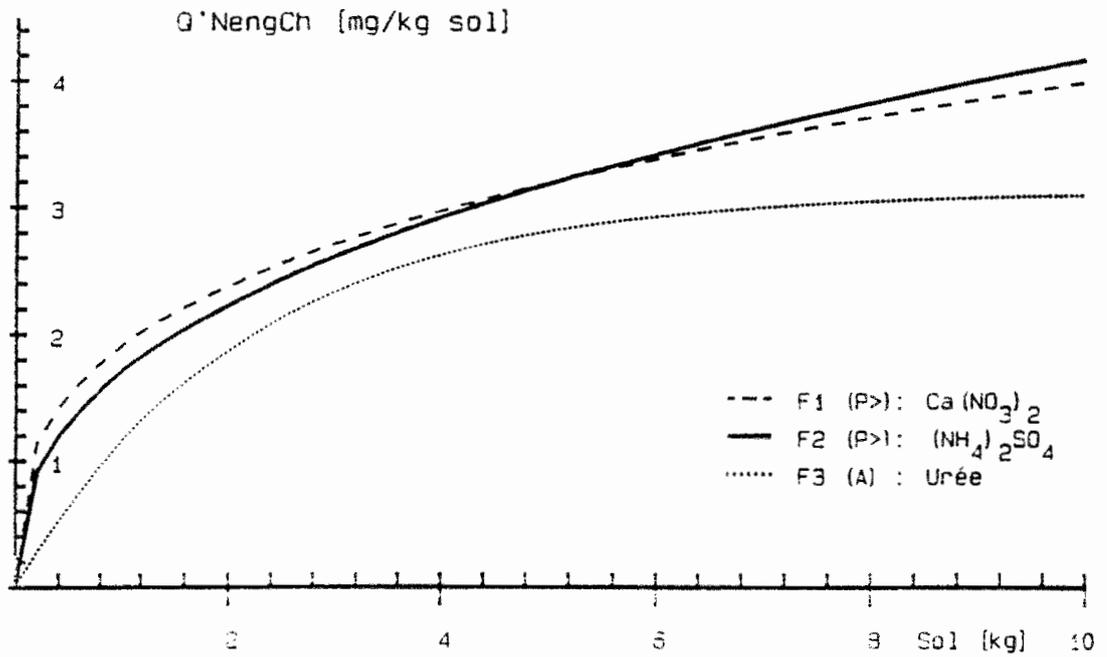
Exportation azote-engrais/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 204



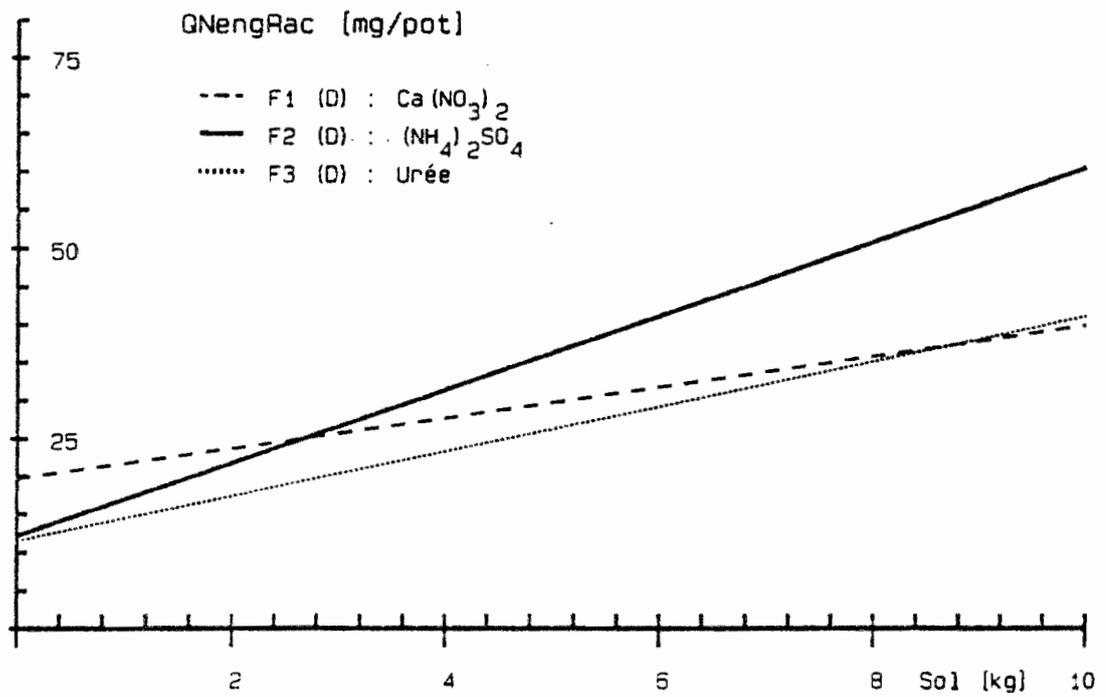
Immobilisation azote-engrais: chaumes

Figure 205



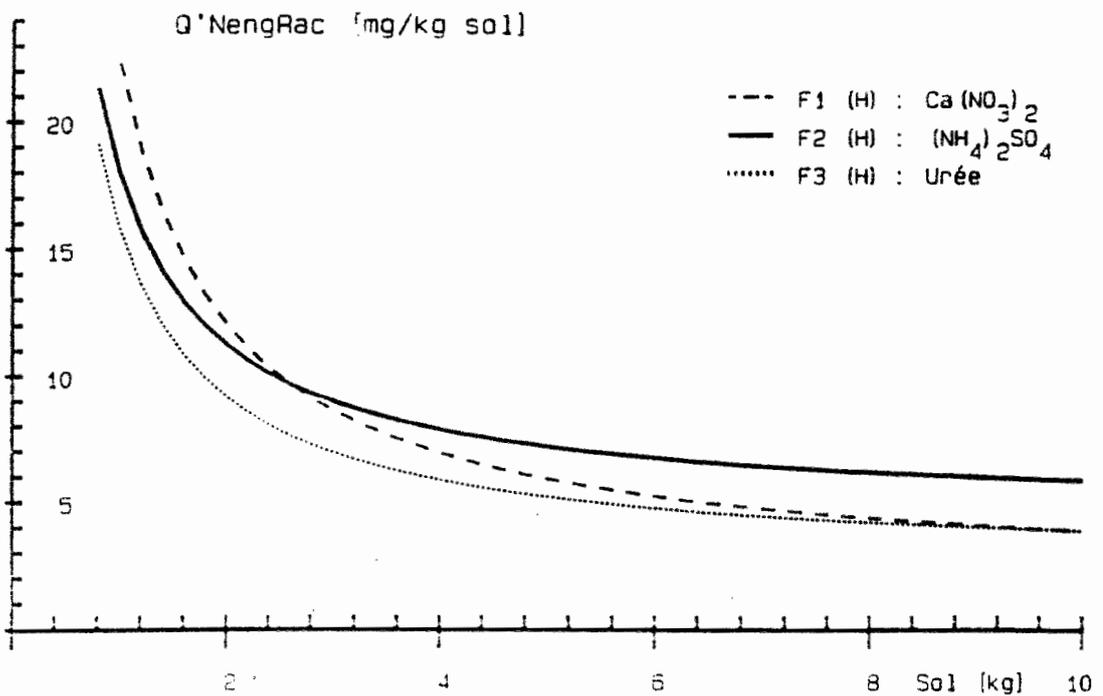
Immobilisation azote-engrais/kg sol: chaumes

Figure 206



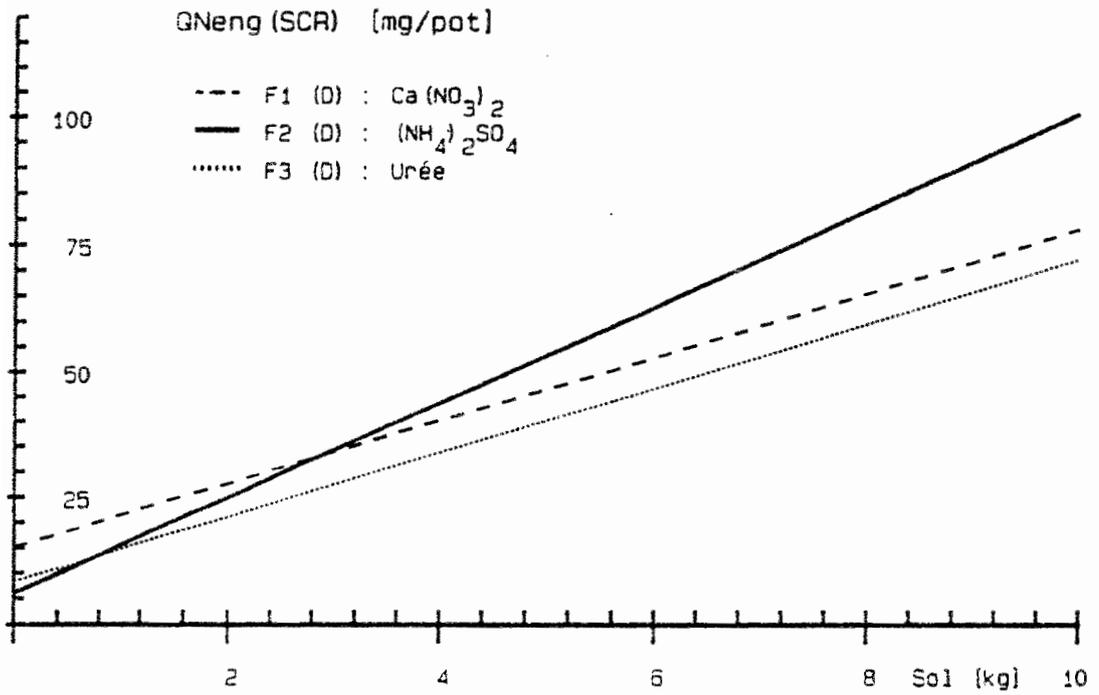
Immobilisation azote-engrais: racines

Figure 207



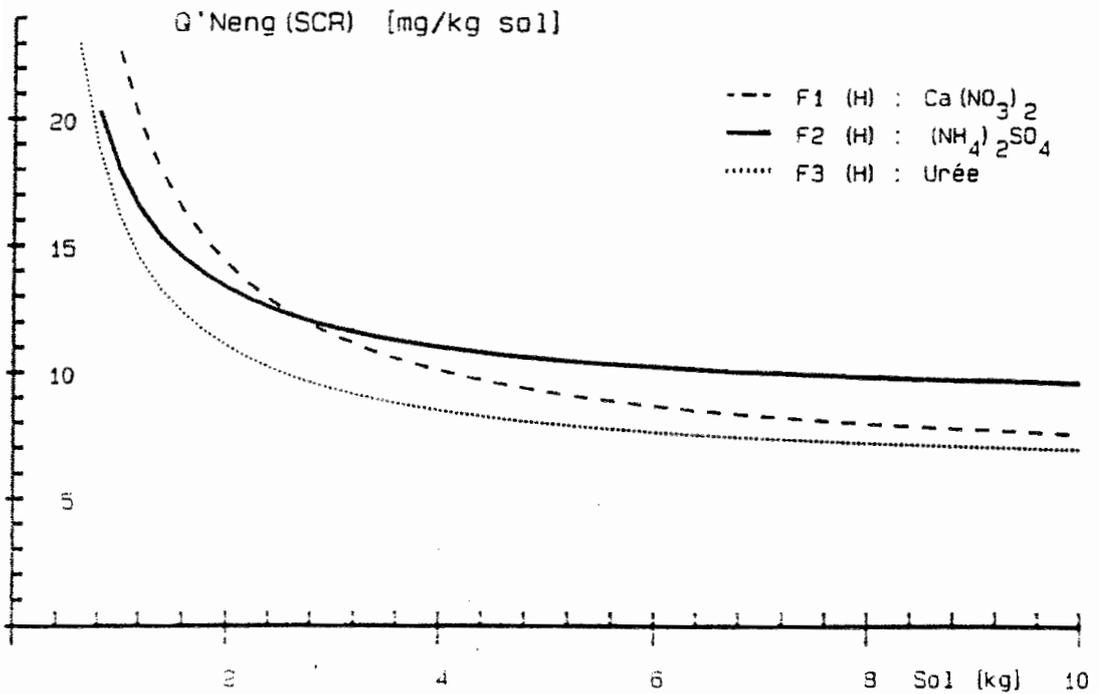
Immobilisation azote-engrais/kg sol: racines

Figure 208



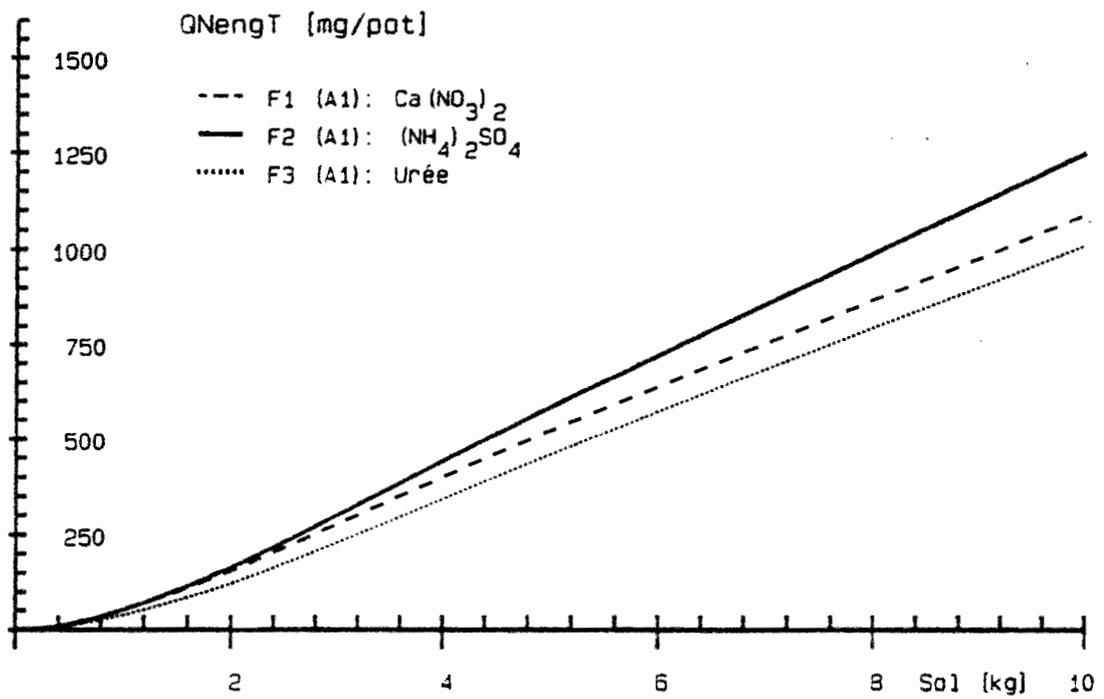
Immobilisation azote-engrais: chaumes+racines (SCR)

Figure 209



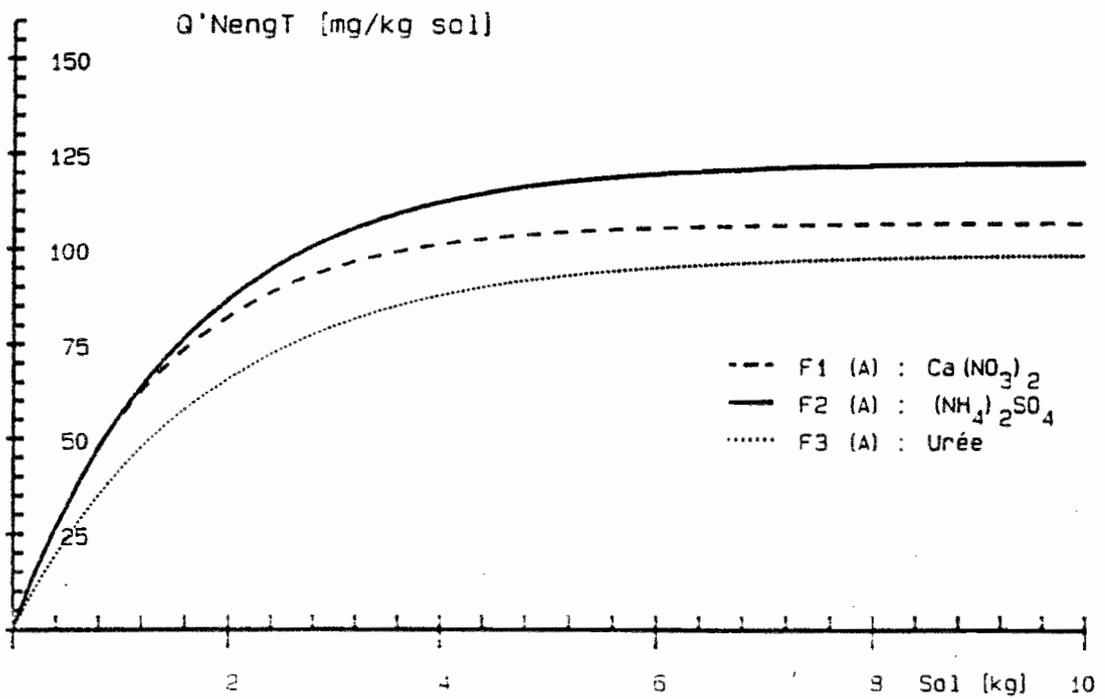
Immobilisation azote-engrais/kg sol: chaumes+racines

Figure 210



Exportation azote-engrais: total plante

Figure 211



Exportation azote-engrais/kg sol: total plante

Figure 212

Dans ce cas, les teneurs ne présentent pas de variation significative entre les volumes de sol, et les fonctions exprimant les exportations de N_{eng} répondent à " $P_{>}$ - $P_{<}$ " pour F_1 et F_2 , et à " $E_1 - E$ " pour F_3 (figures 201 et 202);

- la somme des **3 coupes** présente les mêmes fonctions (" $A_1 - A$ ") que celles de la 1^{ère} coupe, vu l'importance de celle-ci, et l'analyse de variance montre toujours les mêmes différences significatives entre les 3 traitements (figures 203 et 204);
- si pour **les chaumes**, les CRU augmentent avec les volumes de sol (les teneurs en N_{eng} augmentent d'environ 150 % de V_1 à V_5), pour **les racines**, les CRU diminuent quand les volumes de sol augmentent, malgré une augmentation des teneurs d'environ 30 % de V_1 à V_5 . Les CRU étant plus faibles pour les chaumes que pour les racines, le total SCR de l'immobilisation de l'azote-engrais est plus important pour les petits volumes de sol que pour les grands volumes, les fonctions les représentant sont du type : " $D - H$ " (figures 209 et 210);
- **au total**, l'azote-engrais utilisé par la plante croît avec les volumes de sol ; l'analyse de variance montre que les 3 traitements F_1 , F_2 , F_3 sont différents les uns des autres pour chacun des volumes de sol (à une exception près : F_2V_2 n'est pas différent de F_1V_2) quant à l'exportation de l'azote-engrais par unité de volume pour l'ensemble de la plante, donc les CRU présentent les mêmes différences (figures 211 et 212).

L'utilisation de l'azote-engrais par *Panicum* varie de façon significative selon l'engrais azoté utilisé :

le sulfate d'ammonium a été le mieux utilisé par la plante (de 61 % pour V_1 à 82 % pour V_5), le nitrate de calcium l'est un peu moins (de 57 % pour V_1 à 72 % pour V_5), quant à l'urée, elle n'est utilisée que de 46 % pour V_1 à 66 % pour V_5 , soit en moyenne 16 % de moins que le sulfate d'ammonium pour chacun des volumes de sol.

Ces prélèvements globaux de l'azote-engrais par la graminée répondent parfaitement, pour les 3 traitements, aux fonctions : " $A_1 - A$ ".

La plus grande consommation de l'engrais a donc lieu à la 1^{ère} coupe, elle représente en moyenne 70 % de la consommation totale pour V_1 , et 87 % pour V_5 .

En résumé, plus les volumes de sol sont importants, meilleure est l'utilisation de l'engrais par la plante, avec une nette prédominance du sulfate d'ammonium sur l'urée.

**TABLEAU XIII - CRU (%) : COEFFICIENT REEL D'UTILISATION DE L'ENGRAIS
(calculé d'après les fonctions)**

F - V	1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe	2 + 3 coupes	1+2+3 coupes	chaumes	racines	ch. +rac.	total plante
F₁ Ca(NO₃)₂	%	%	%	%	%	%	%	%	%
V ₁	39,3	6,3	2,0	8,3	47,6	1,6	8,1	9,7	57,3
V ₂	47,6	5,4	1,6	7,0	54,6	1,8	6,0	7,8	62,4
V ₃	56,5	4,5	1,3	5,8	62,2	2,1	4,2	6,3	68,5
V ₄	61,1	3,8	1,1	4,8	65,9	2,4	3,2	5,6	71,5
V ₅	62,4	3,4	0,9	4,3	66,6	2,6	2,7	5,3	71,9
F₂ (NH₄)₂SO₄	%	%	%	%	%	%	%	%	%
V ₁	43,4	6,4	2,0	8,4	51,8	1,5	7,6	9,1	60,9
V ₂	52,9	5,7	1,7	7,4	60,3	1,8	6,1	7,9	68,2
V ₃	63,2	5,0	1,4	6,4	69,6	2,1	5,0	7,1	76,7
V ₄	68,7	4,4	1,2	5,6	74,3	2,4	4,3	6,7	81,1
V ₅	70,4	4,0	1,1	5,1	75,5	2,6	4,0	6,6	82,1
F₃ Urée	%	%	%	%	%	%	%	%	%
V ₁	31,6	5,3	2,0	7,3	38,9	1,3	6,1	7,4	46,3
V ₂	39,5	4,9	1,6	6,5	46,0	1,6	4,8	6,4	52,4
V ₃	49,1	4,2	1,3	5,5	54,6	1,9	3,6	5,5	60,1
V ₄	55,1	3,5	1,1	4,6	59,7	2,0	3,0	5,0	64,7
V ₅	57,5	2,9	1,0	3,9	61,4	2,0	2,7	4,7	66,1

Azote - sol utilisé par la plante

Les résultats expérimentaux du prélèvement de l'azote-sol par *Panicum* sont donnés dans le tableau XIV.

Les fonctions mathématiques représentatives de ces résultats sont exprimées par les figures 213 à 230.

• **A la 1^{ère} coupe**, l'exportation de l'azote en provenance du sol ne présente pas de variation significative entre les volumes : la quantité d'azote prélevé par kg de sol est la même pour chacun des volumes ; F₁, F₂, F₃ ne présentent pas de différences à ce niveau, mais la quantité d'azote du sol prélevé est un peu plus importante que pour F₄ et F₅ :

TABLEAU XIV – PRELEVEMENT DE L'AZOTE - SOL PAR *PANICUM* : RESULTATS EXPERIMENTAUX

(Q = mg N_{sol} par pot ; Q' = mg N_{sol} par kg de sol)

F - V	1ère coupe		2ème coupe		3ème coupe		2ème + 3ème coupes		1ère + 2ème + 3ème coupes		chaumes		racines		chaumes + racines		total plante		
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'	
F ₁	V ₁	41,4	20,3	12,0	5,9	11,6	5,7	23,6	11,6	65,1	31,9	7,7	3,8	27,9	13,7	35,6	17,5	100,7	49,4
	V ₂	80,1	27,3	20,2	6,9	16,3	5,5	36,5	12,4	116,6	39,7	8,6	2,9	27,2	9,3	35,8	12,2	152,4	51,8
	V ₃	113,4	24,4	26,7	5,8	29,3	6,3	56,0	12,1	169,4	36,5	16,9	3,6	29,3	6,3	46,2	10,0	215,6	46,5
	V ₄	187,0	27,4	31,5	4,6	31,6	4,6	63,1	9,3	250,1	36,7	20,1	2,9	32,5	4,8	52,6	7,7	302,7	44,4
	V ₅	238,5	26,6	37,9	4,2	34,6	3,9	72,5	8,1	311,0	34,7	26,9	3,0	42,4	4,7	69,3	7,7	380,2	42,5
F ₂	V ₁	50,0	24,5	12,0	5,9	10,9	5,4	22,9	11,2	72,9	35,7	7,4	3,6	23,2	11,4	30,6	15,0	103,5	50,7
	V ₂	96,3	32,8	19,7	6,7	12,2	4,2	31,9	10,9	128,3	43,6	8,4	2,9	27,4	9,3	35,8	12,2	164,1	55,8
	V ₃	104,3	22,5	25,2	5,4	20,0	4,3	45,2	9,7	149,5	32,2	13,0	2,8	36,8	7,9	49,8	10,7	199,4	43,0
	V ₄	168,7	24,7	34,9	5,1	29,0	4,2	63,9	9,4	232,6	34,1	17,2	2,5	40,2	5,9	57,4	8,4	290,0	42,5
	V ₅	194,4	21,7	41,7	4,7	42,7	4,8	84,5	9,4	278,9	31,2	26,9	3,0	55,2	6,2	82,1	9,2	361,0	40,3
F ₃	V ₁	48,0	23,5	13,5	6,6	12,8	6,3	26,4	12,9	74,4	36,5	7,6	3,7	23,0	11,3	30,5	15,0	104,9	51,4
	V ₂	81,9	27,9	19,1	6,5	15,3	5,2	34,4	11,7	116,4	39,6	9,3	3,2	24,1	8,2	33,4	11,4	149,8	50,9
	V ₃	113,4	24,4	25,9	5,6	24,8	5,3	50,7	10,9	164,1	35,4	15,3	3,3	29,2	6,3	44,5	9,6	208,6	45,0
	V ₄	182,2	26,7	31,2	4,6	29,7	4,4	60,9	8,9	243,1	35,6	18,6	2,7	26,8	3,9	45,5	6,7	288,5	42,3
	V ₅	235,0	26,3	27,1	3,0	29,6	3,3	56,7	6,3	291,7	32,6	30,8	3,4	37,8	4,2	68,5	7,7	360,2	40,2
F ₄	V ₁	31,2	15,1	10,8	5,2	7,6	3,7	18,4	8,9	49,6	24,1	6,0	2,9	22,3	10,8	28,3	13,8	77,9	37,8
	V ₂	40,5	13,8	19,1	6,5	13,6	4,6	32,7	11,1	73,1	24,9	6,7	2,3	23,5	8,0	30,2	10,3	103,4	35,2
	V ₃	76,9	16,5	30,0	6,4	20,1	4,3	50,1	10,7	127,0	27,3	10,5	2,3	31,4	6,7	41,9	9,0	168,9	36,2
	V ₄	97,8	14,3	42,3	6,2	24,8	3,6	67,0	9,8	164,8	24,1	15,6	2,3	32,7	4,8	48,3	7,0	213,1	31,1
	V ₅	141,1	15,7	44,8	5,0	20,0	2,2	64,7	7,2	205,9	22,9	16,2	1,8	38,2	4,2	54,4	6,0	260,3	28,9
F ₅	V ₁	39,6	19,2	13,3	6,4	9,8	4,7	23,1	11,1	62,6	30,4	6,7	3,3	17,3	8,4	24,0	11,6	86,6	42,0
	V ₂	53,6	18,2	18,8	6,4	14,3	4,9	33,0	11,3	86,7	29,5	8,9	3,0	18,6	6,3	27,4	9,3	114,1	38,8
	V ₃	84,0	18,0	29,5	6,3	21,5	4,6	50,9	10,9	135,0	29,0	13,0	2,8	29,8	6,4	42,8	9,2	177,8	38,1
	V ₄	123,7	18,1	37,9	5,5	27,1	4,0	65,0	9,5	188,7	27,5	16,6	2,4	39,2	5,7	55,7	8,1	244,4	35,7
	V ₅	160,0	17,8	44,6	5,0	31,8	3,5	76,4	8,5	236,4	26,3	24,0	2,7	46,9	5,2	70,9	7,9	307,3	34,1

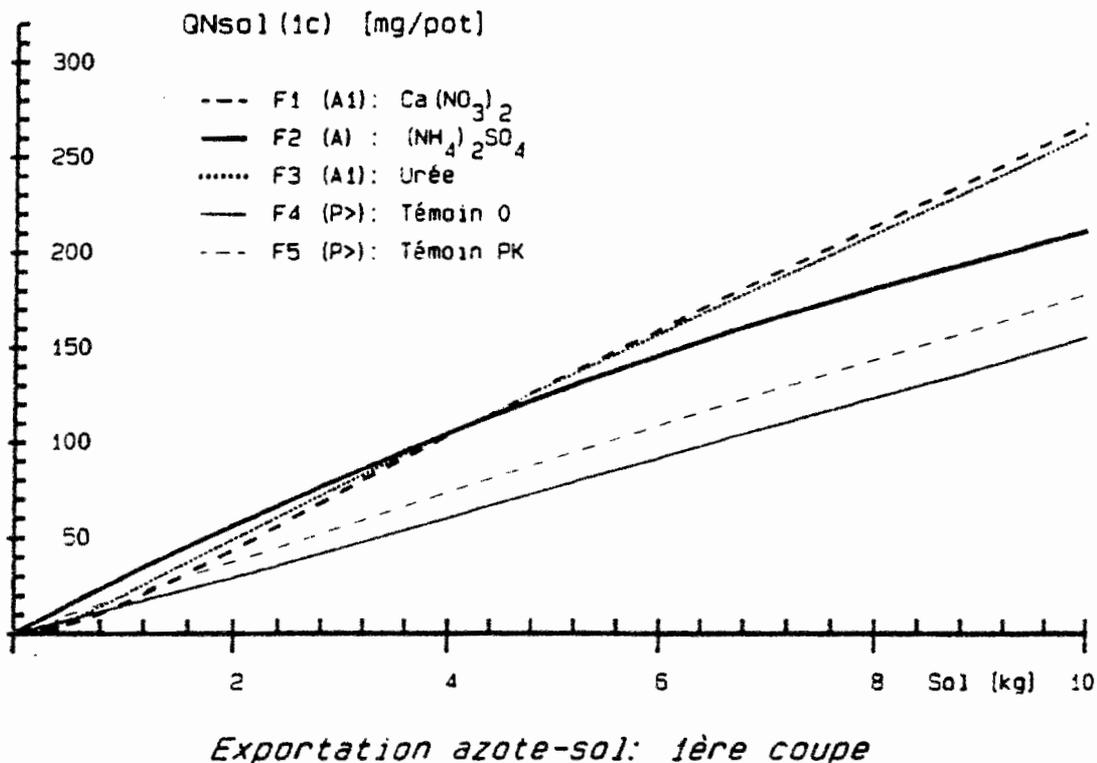


Figure 213

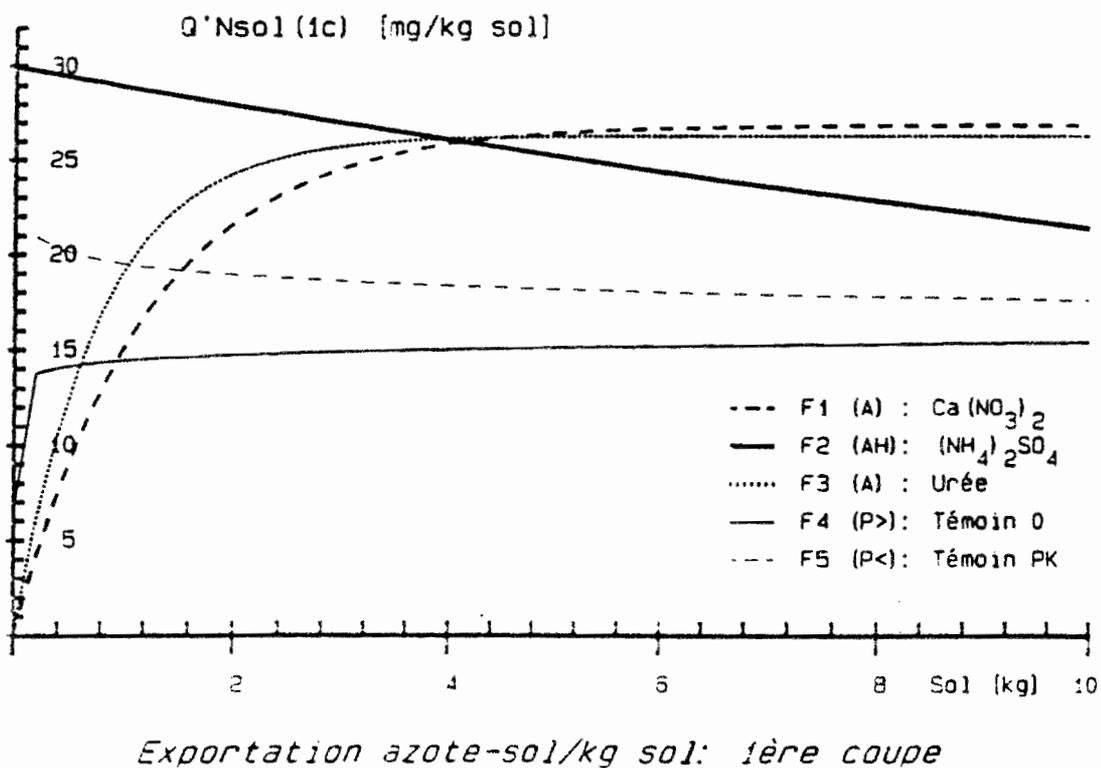
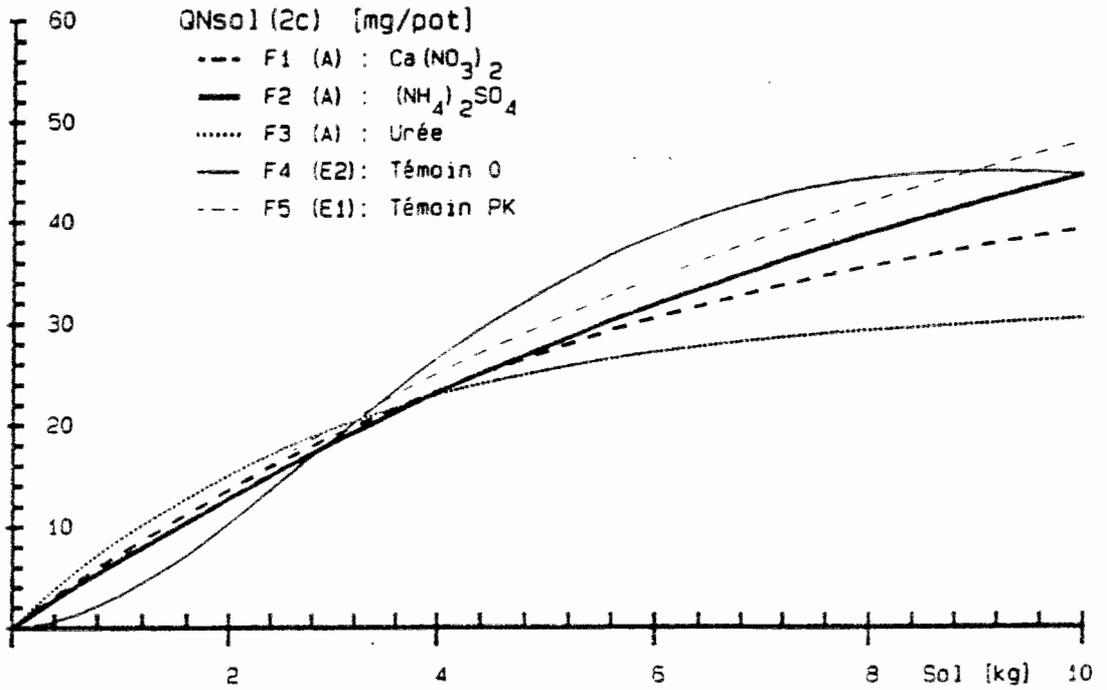
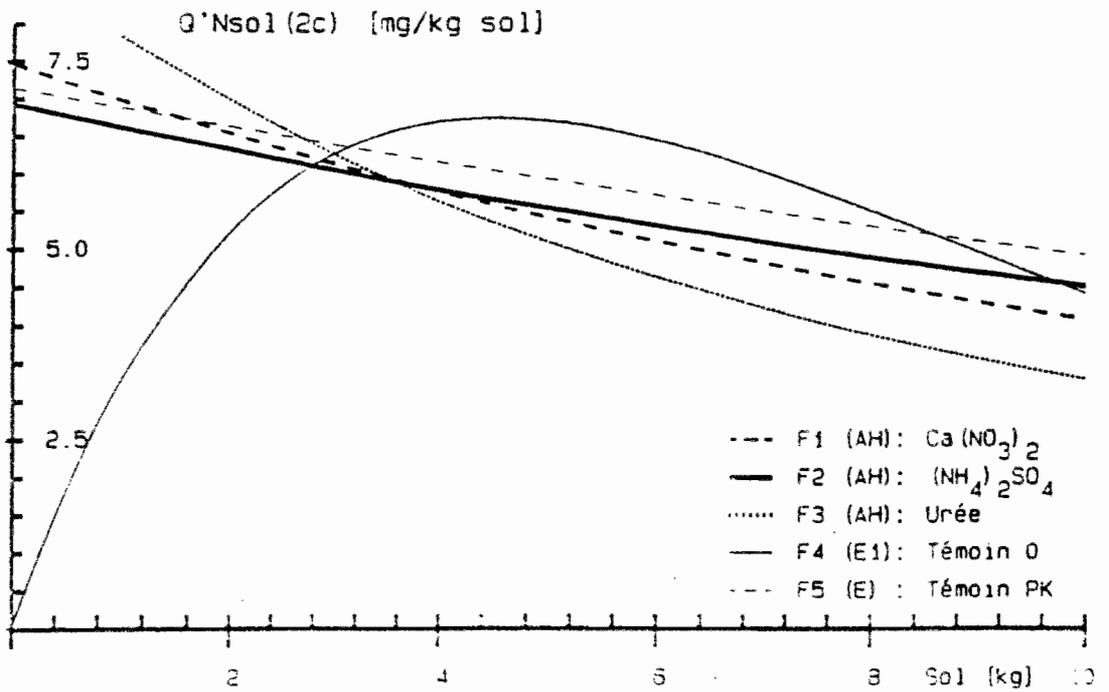


Figure 214



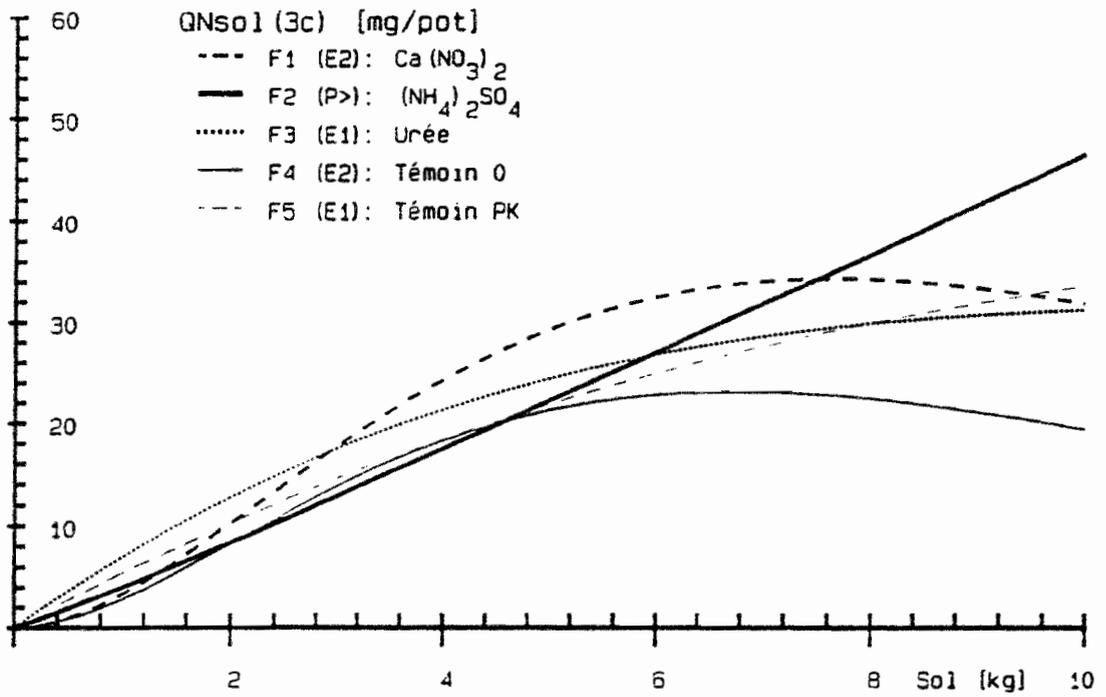
Exportation azote-sol: 2ème coupe

Figure 215



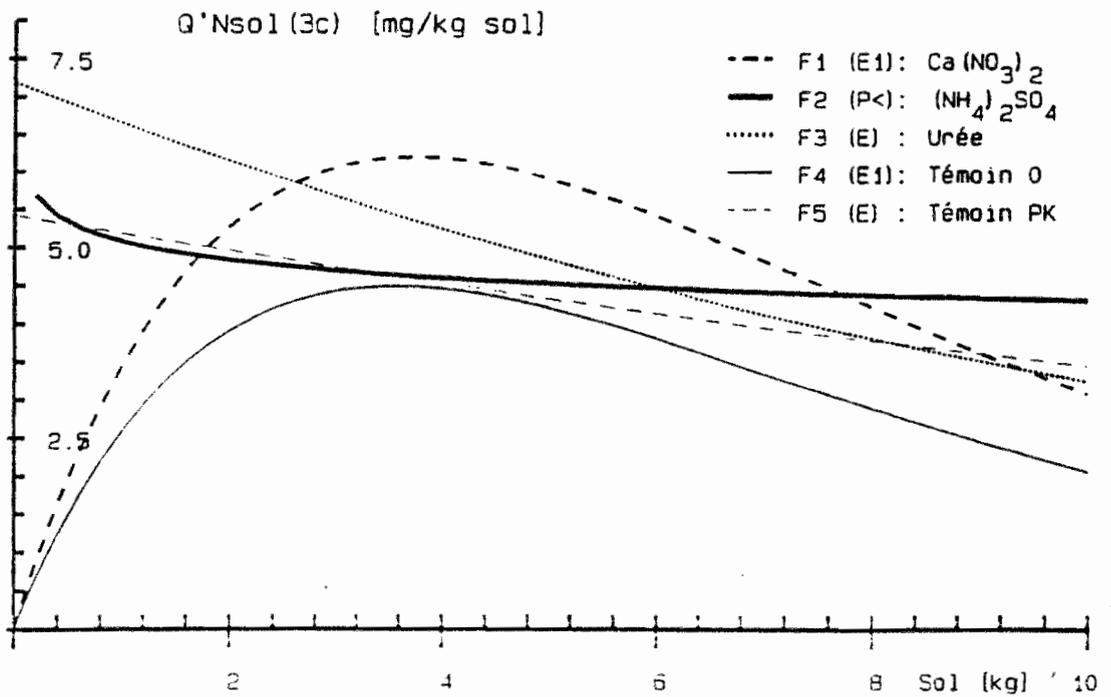
Exportation azote-sol/kg sol: 2ème coupe

Figure 216



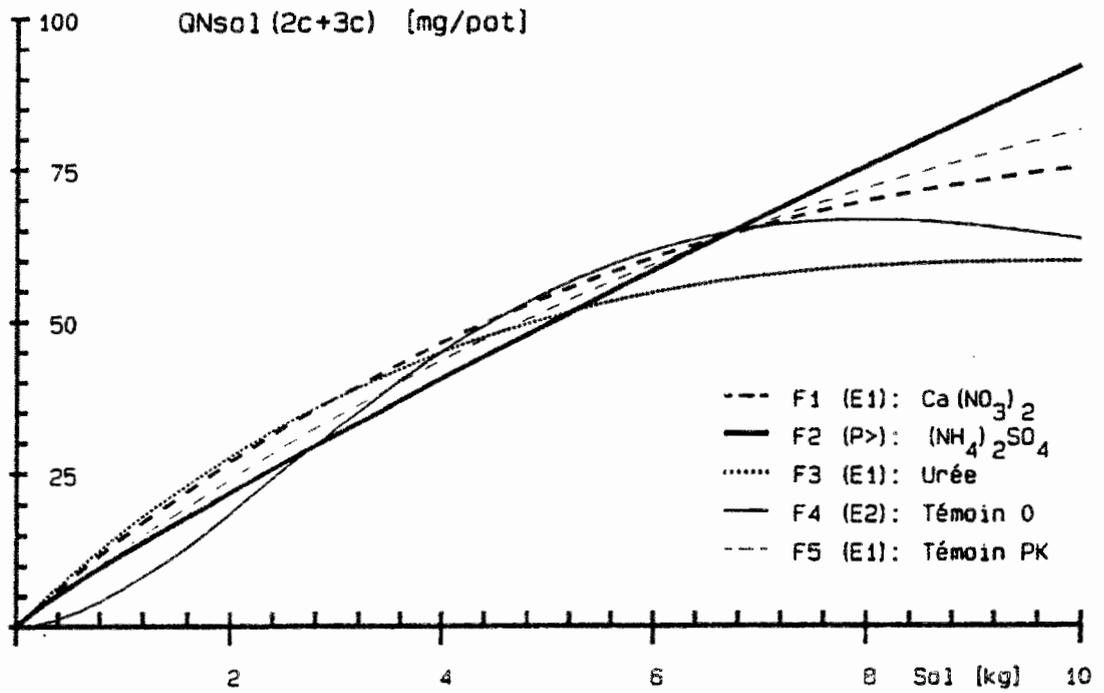
Exportation azote-sol: 3ème coupe

Figure 217



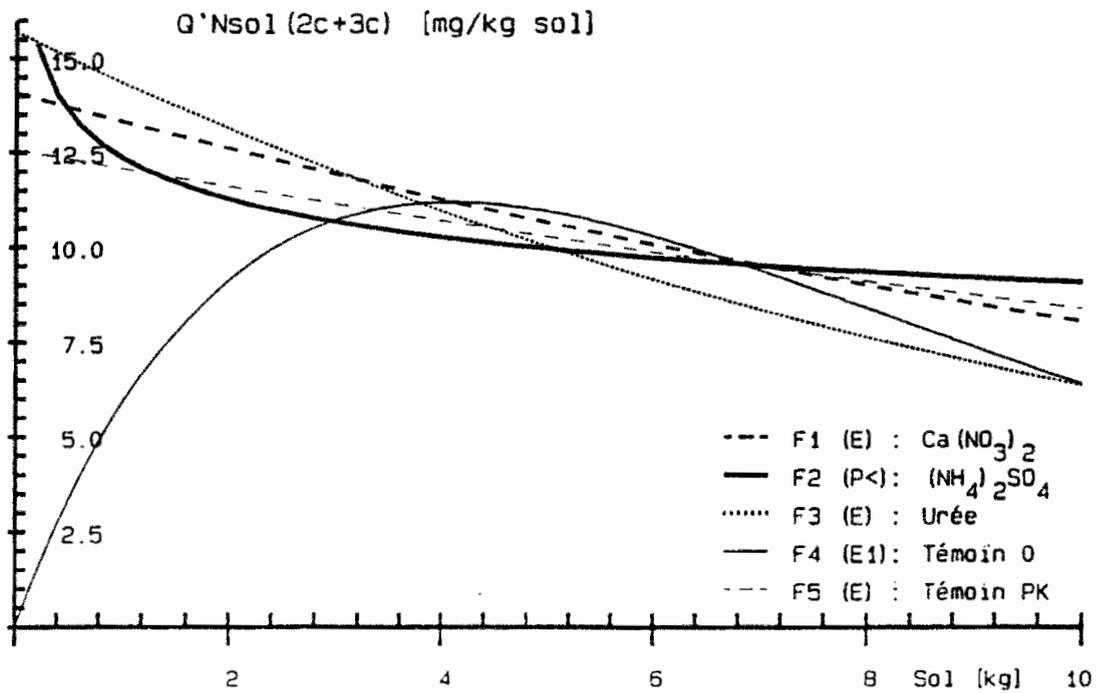
Exportation azote-sol/kg sol: 3ème coupe

Figure 218



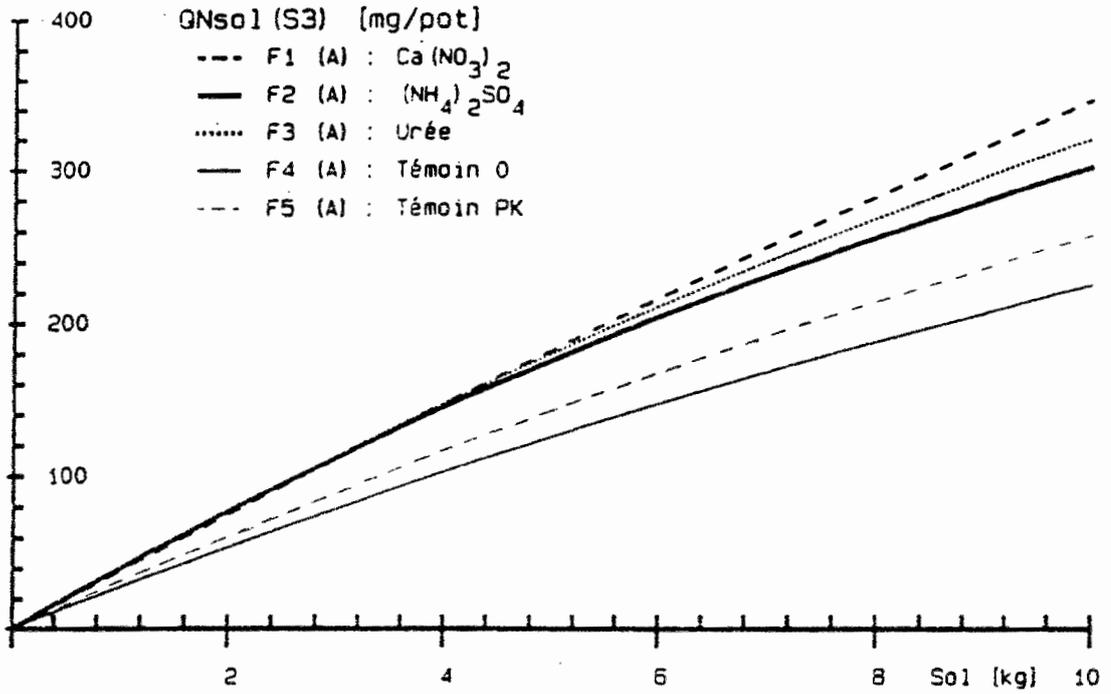
Exportation azote-sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 219



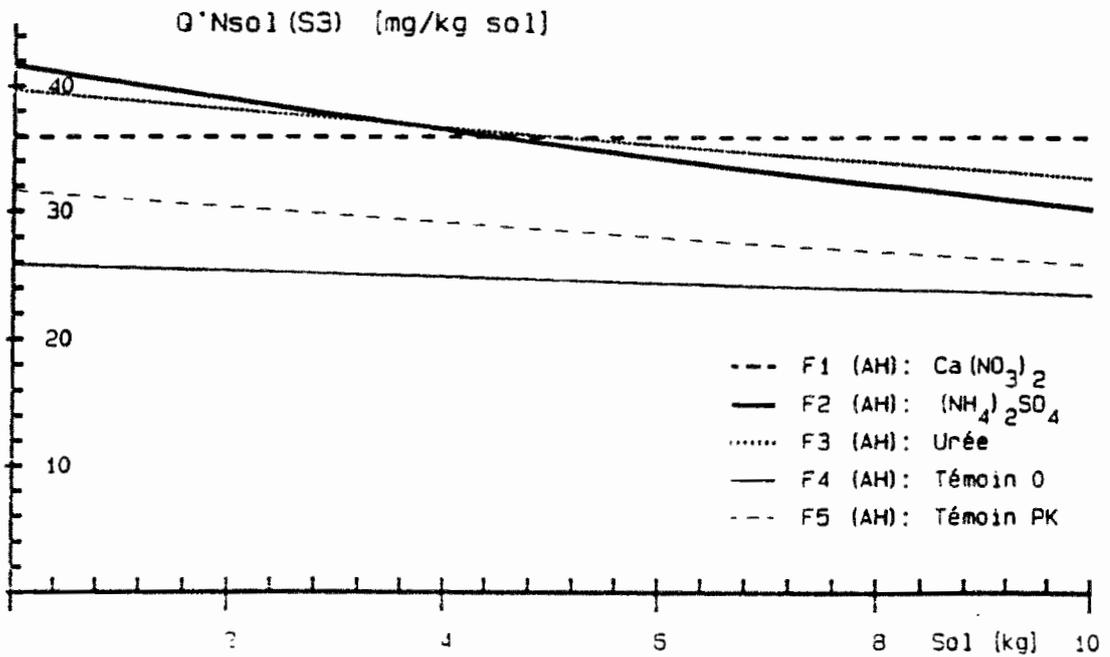
Exportation azote-sol/kg sol: 2ème + 3ème coupes

Figure 220



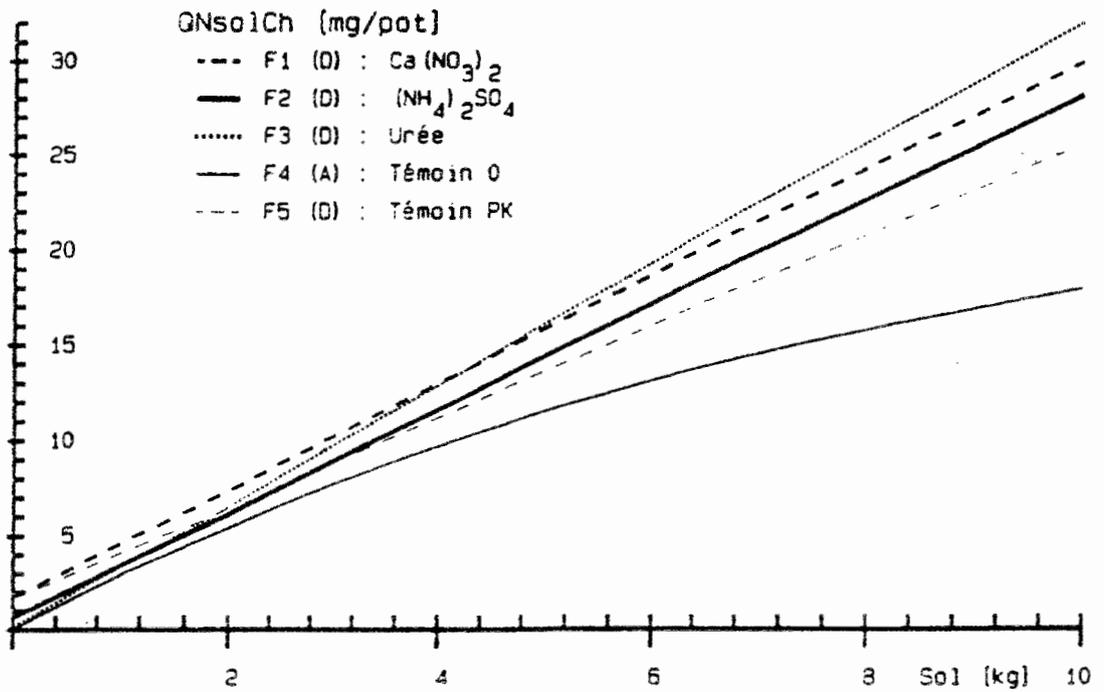
Exportation azote-sol: 3 coupes (S3)

Figure 221



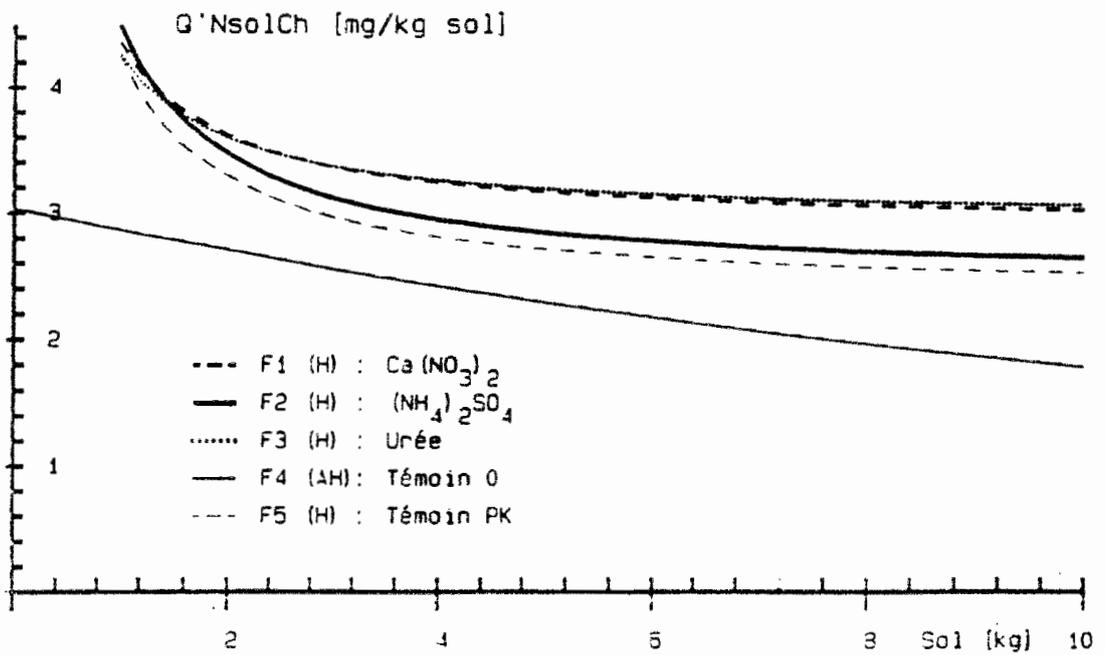
Exportation azote-sol/kg sol: 3 coupes (S3)

Figure 222



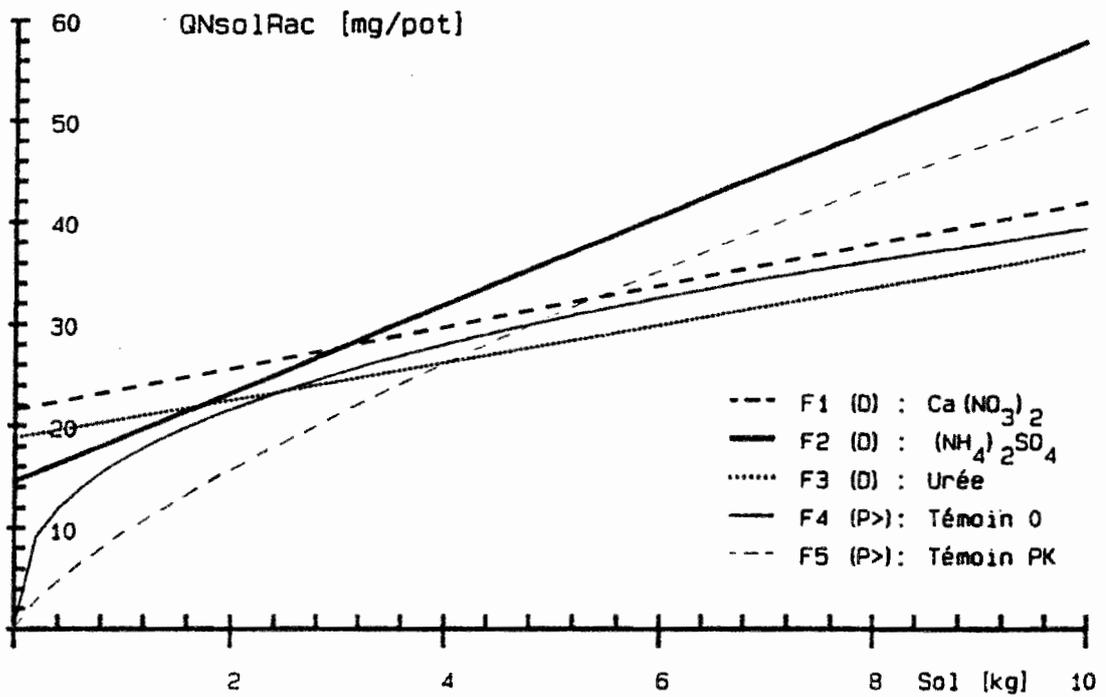
Immobilisation azote-sol: chaumes

Figure 223



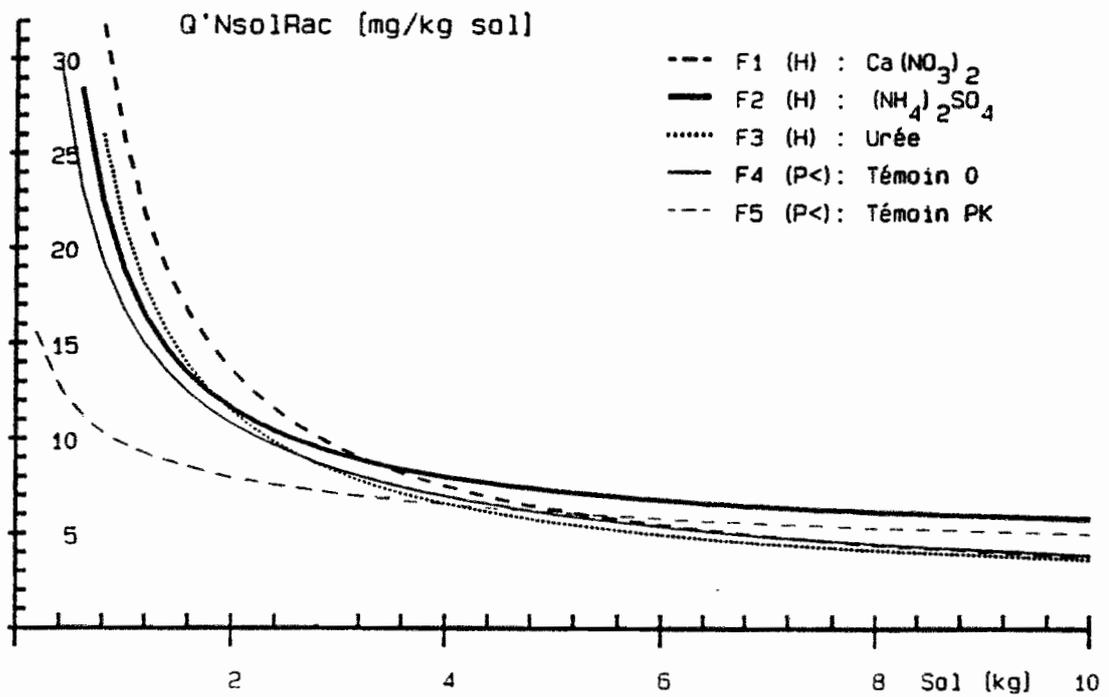
Immobilisation azote-sol/kg sol: chaumes

Figure 224



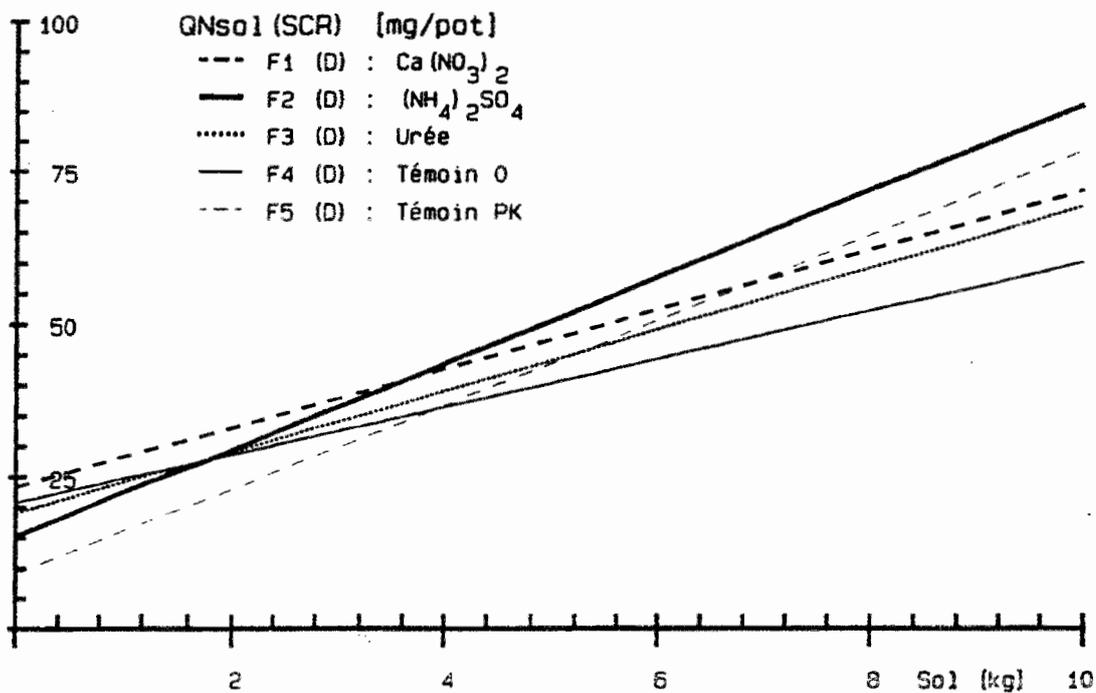
Immobilisation azote-sol: racines

Figure 225



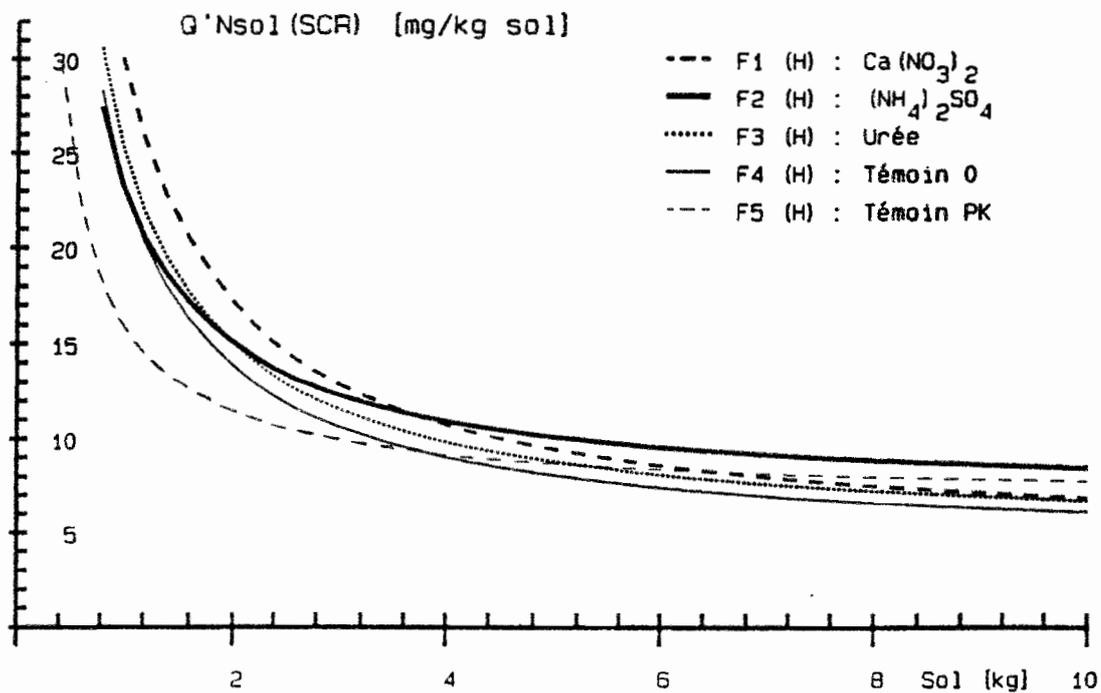
Immobilisation azote-sol/kg sol: racines

Figure 226



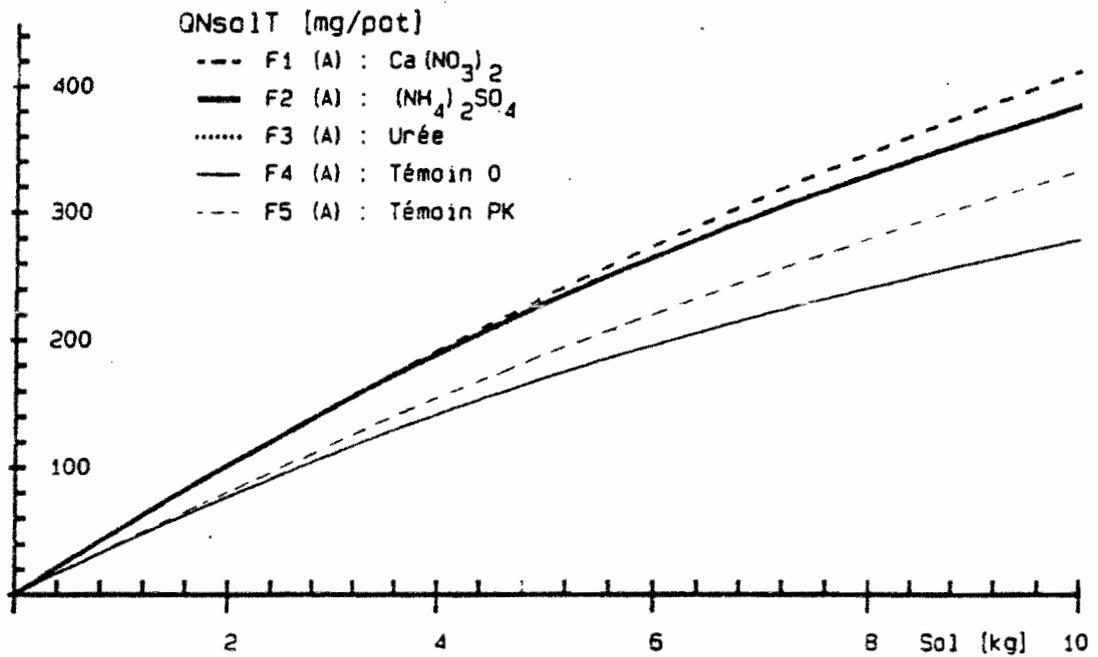
Immobilisation azote-sol: chaumes + racines

Figure 227



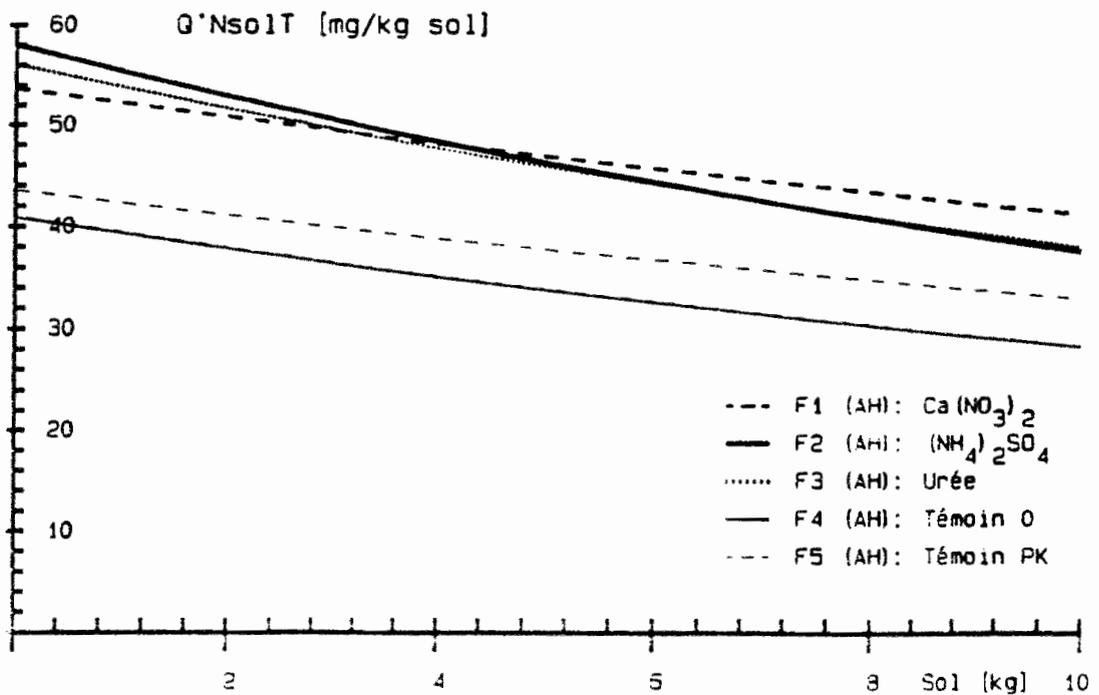
Immobilisation azote-sol/kg sol: chaumes+racines (SCR)

Figure 228



Exportation azote-sol: total plante

Figure 229



Exportation azote-sol/kg sol: total plante

Figure 230

pour F_1, F_2, F_3 = 25 mg N par kg de sol,
pour F_4 = 15 mg N par kg de sol,
pour F_5 = 18 mg N par kg de sol.

Les fonctions représentatives du prélèvement de l'azote-sol à la 1^{ère} coupe sont très variables (figures 213 et 214):

"A₁ - A" : pour F_1 et F_3 ,

"A - AH" : pour F_2 ,

"P_> - P_<" : pour F_4 et F_5 ,

précisons que le test d'homogénéité atteint 96 % pour $F_1 - F_2 - F_3$.

• **Aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes**, les courbes F_1, F_2, F_3 ne sont pas différentes de celles de F_4 et F_5 ; l'azote du sol prélevé est un peu plus important pour V_1 que pour V_5 (12 mg environ pour V_1 , et 8 mg pour V_5); les fonctions caractérisant les exportations des 2^{ème} + 3^{ème} coupes sont du type (figures 219 et 220):

"E₁ - E" : pour F_1, F_3, F_5 ,

"P_> - P_<" : pour F_2 ,

"E₂ - E₁" : pour F_4 ,

le test d'homogénéité atteint 99 % pour $F_2 - F_3 - F_5$.

• On peut estimer que pour le total des **3 coupes** l'exportation de l'azote du sol est identique pour les 3 traitements F_1, F_2, F_3 et pour les 5 volumes de sol : elle serait de 36 mg N par kg de sol, de 24 mg pour F_4 et de 29 mg pour F_5 . Les fonctions "A - AH" caractérisent ces exportations (figures 221 et 222).

• L'immobilisation de l'azote du sol dans **les chaumes** est indépendante du volume de sol sauf pour F_4 , mais dans le cas des **racines**, elle diminue quand les volumes de sol augmentent, et au total (chaumes + racines) les 5 traitements sont bien regroupés : la moyenne serait de 10 mg N_{sol} immobilisé par kg de sol par les chaumes + les racines. Les fonctions "D - H" représentent ces immobilisations de l'azote-sol dans les chaumes + les racines pour les 5 traitements (figures 227 et 228).

• **Au total**, l'azote du sol prélevé par la plante et ramené à l'unité de volume varie pour les 5 traitements avec les volumes de sol : plus le volume de sol est petit, meilleur est le prélèvement par la plante de l'azote du sol. Les fonctions "A - AH" traduisent ces prélèvements de l'azote du sol par l'ensemble de la plante, et ceci pour les 5 traitements (figures 229 et 230).

F_1, F_2, F_3 , présentant peu de différences (le test d'homogénéité pour $F_1 - F_2 - F_3$ = 84 %), on peut estimer à : 56 mg par kg de sol, l'azote du sol maximal utilisable par la plante (soit 4,3 % de N total du sol), l'azote facilement accessible, prélevé par le témoin F_4 , serait de 41 mg par kg de sol (soit 3,2 % de N total du sol). La présence des engrais N - P - K a stimulé le prélèvement de l'azote du sol, de plus de 15 mg par rapport au témoin, soit une augmentation de 36 %. Ces chiffres concernent le prélèvement de l'azote du sol par *Panicum* pour les 3 coupes + chaumes + racines, représentant 3 mois 1/2 de culture.

Pour les 3 traitements F_1 , F_2 , F_3 , l'azote-engrais et l'azote du sol ne sont donc pas prélevés de la même manière :

- l'azote-engrais est d'autant mieux prélevé que les volumes de sol sont importants : ceci est représentatif d'un élément soluble, mobile et facilement assimilable,
- l'azote-sol est d'autant mieux prélevé que les volumes de sol sont plus petits : ceci est représentatif d'un élément du sol de faible mobilité et moins facilement assimilable.

La répartition entre l'azote-engrais et l'azote-sol au cours du prélèvement de l'azote par la plante est donnée par les tableaux suivants :

- tableau XV : pour le traitement F_1 ,
- tableau XVI : pour le traitement F_2 ,
- tableau XVII : pour le traitement F_3 ,

on peut en tirer les observations suivantes :

- à la 1^{ère} coupe : au moins 2 fois plus de N_{eng} que de N_{sol} est prélevé par la plante, pour le volume de sol V_1 , mais pour le volume V_5 , 3 à 5 fois plus de N_{eng} est exporté par rapport à N_{sol} ;

- aux 2^{ème} et 3^{ème} coupes : si à la 2^{ème} coupe, les rapports N_{eng} / N_{sol} sont encore > 1 , il n'en est plus de même à la 3^{ème} coupe, où N_{sol} devient excédentaire par rapport à N_{eng} . Ces rapports varient peu entre V_1 et V_5 ;

- pour les chaumes : les rapports N_{eng} / N_{sol} vont du simple au double de V_1 à V_5 , avec pour V_1 plus de N_{sol} que de N_{eng} , et pour V_5 plus de N_{eng} que de N_{sol} (les rapports vont de 1,0 pour F_3 à 1,5 pour F_2) ;

- pour les racines : les rapports N_{eng} / N_{sol} évoluent très peu de V_1 à V_5 , ils sont voisins de 1, donc l'azote des racines renferme autant de N_{eng} que de N_{sol} ;

- au total : la 1^{ère} coupe étant importante pour le prélèvement de l'azote, les rapports de cette 1^{ère} coupe influent sur la répartition de l'azote :

	N_{eng} / N_{sol}	
$F_1 V_1 = 1,67$	$F_2 V_1 = 1,66$	$F_3 V_1 = 1,30$
$F_1 V_5 = 2,58$	$F_2 V_5 = 3,12$	$F_3 V_5 = 2,48$

si pour les petits volumes de sol (V_1), F_1 et F_2 ont les mêmes rapports, ils se différencient plus fortement pour V_5 , où la participation de N_{eng} est bien supérieure pour F_2 par rapport à F_1 . Dans le cas de F_3 (avec l'urée), N_{eng} prélevé par l'ensemble de la plante reste inférieur à celui de F_1 et F_2 , autant pour V_1 que pour V_5 .

Il y a donc un maximum de N_{eng} prélevé à la 1^{ère} coupe, par rapport à N_{sol} , mais pour tout ce qui n'est pas la 1^{ère} coupe, c'est à dire la somme 2^{ème} coupe + 3^{ème} coupe + chaumes + racines, N_{eng} exporté est presque toujours égal à N_{sol} exporté, pour chacun des volumes de sol.

TABLEAU XV – PRELEVEMENT DE L'AZOTE PAR *PANICUM MAXIMUM* :
REPARTITION ENTRE L'AZOTE-engrais ET L'AZOTE-sol POUR LE TRAITEMENT F₁

F ₁	V ₁			V ₂			V ₃			V ₄			V ₅		
	mg	%	% eng. sol	mg	%	% eng. sol	mg	%	% eng. sol	mg	%	% eng. sol	mg	%	% eng. sol
1 ^{ère} cpe	¹⁵ N 57,71	72,6	39,25	70,43	74,2	47,60	84,00	76,2	56,49	91,35	77,3	61,08	94,04	77,8	62,35
sol	21,80	27,4	1,69	24,44	25,8	1,89	26,27	23,8	2,04	26,77	22,7	2,08	26,85	22,2	2,09
2 ^{ème} cpe	¹⁵ N 9,29	58,8	6,32	7,99	56,4	5,40	6,62	54,4	4,45	5,65	53,8	3,78	5,05	54,2	3,35
sol	6,51	41,2	0,50	6,17	43,6	0,48	5,56	45,6	0,43	4,86	46,2	0,38	4,27	45,8	0,33
3 ^{ème} cpe	¹⁵ N 2,92	35,4	1,99	2,43	28,7	1,64	1,93	24,2	1,30	1,59	24,3	1,06	1,39	27,5	0,92
sol	5,33	64,6	0,41	6,03	71,3	0,47	6,03	75,8	0,47	4,94	75,7	0,38	3,66	72,5	0,28
2 ^è +3 ^è cpes	¹⁵ N 12,21	50,8	8,31	10,42	46,1	7,04	8,55	42,5	5,75	7,24	42,5	4,84	6,43	44,8	4,27
sol	11,84	49,2	0,91	12,20	53,9	0,95	11,59	57,5	0,90	9,80	57,5	0,76	7,93	55,2	0,61
S ₃	¹⁵ N 69,92	67,5	47,55	80,85	68,8	54,64	92,55	71,0	62,24	98,59	72,9	65,92	100,47	74,3	66,61
sol	33,64	32,5	2,60	36,64	31,2	2,84	37,86	29,0	2,94	36,57	27,1	2,84	34,78	25,7	2,70
chau- mes	¹⁵ N 2,40	40,0	1,63	2,69	44,4	1,82	3,12	49,4	2,10	3,52	53,3	2,36	3,84	55,9	2,55
sol	3,60	60,0	0,28	3,37	55,6	0,26	3,19	50,6	0,25	3,08	46,7	0,24	3,03	44,1	0,24
raci- nes	¹⁵ N 11,87	47,1	8,07	8,80	47,6	5,95	6,24	48,4	4,20	4,83	49,2	3,23	4,12	49,9	2,73
sol	13,33	52,9	1,03	9,68	52,4	0,75	6,65	51,6	0,52	4,98	50,8	0,39	4,13	50,1	0,32
SCR	¹⁵ N 14,27	45,7	9,70	11,49	46,8	7,77	9,36	48,8	6,30	8,35	50,9	5,59	7,96	52,6	5,28
sol	16,93	54,3	1,31	13,05	53,2	1,01	9,84	51,2	0,76	8,06	49,1	0,63	7,16	47,4	0,56
total	¹⁵ N 84,19	62,5	57,25	92,34	65,0	62,41	101,91	68,1	68,53	106,94	70,6	71,50	108,43	72,1	71,88
sol	50,57	37,5	3,91	49,69	35,0	3,85	47,70	31,9	3,70	44,63	29,4	3,46	41,94	27,9	3,26

**TABLEAU XVI – PRELEVEMENT DE L'AZOTE PAR *PANICUM MAXIMUM* :
REPARTITION ENTRE L'AZOTE-engrais ET L'AZOTE-sol POUR LE TRAITEMENT F₂**

F ₂	V ₁			V ₂			V ₃			V ₄			V ₅			
	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	
1 ^{ère} cpe	¹⁵ N sol	63,79 27,86	69,6 30,4	43,38 2,16	78,24 27,03	74,3 25,7	52,88 2,09	93,99 25,53	78,6 21,4	63,20 1,98	102,79 23,72	81,3 18,7	68,73 1,84	106,15 22,07	82,8 17,2	70,37 1,71
2 ^{ème} cpe	¹⁵ N sol	9,35 6,30	59,7 40,3	6,36 0,49	8,41 6,06	58,1 41,9	5,68 0,47	7,37 5,63	56,7 43,3	4,96 0,44	6,59 5,13	56,2 43,8	4,41 0,40	6,09 4,68	56,5 43,5	4,04 0,36
3 ^{ème} cpe	¹⁵ N sol	3,03 4,82	38,6 61,4	2,06 0,37	2,58 4,70	35,4 64,6	1,75 0,36	2,12 4,55	31,8 68,2	1,43 0,35	1,79 4,43	28,8 71,2	1,20 0,34	1,59 4,34	26,8 73,2	1,06 0,34
2 ^è +3 ^è cpes	¹⁵ N sol	12,38 11,12	52,7 47,3	8,42 0,86	10,99 10,76	50,5 49,5	7,43 0,83	9,49 10,18	48,2 51,8	6,39 0,79	8,38 9,56	46,7 53,3	5,61 0,74	7,68 9,02	46,0 54,0	5,09 0,70
S ₃	¹⁵ N sol	76,17 38,98	66,1 33,9	51,80 3,02	89,23 37,79	70,2 29,8	60,31 2,93	103,48 35,71	74,3 25,7	69,59 2,77	111,17 33,28	77,0 23,0	74,33 2,58	113,83 31,09	78,5 21,5	75,46 2,41
chau- mes	¹⁵ N sol	2,25 3,44	39,5 60,5	1,53 0,27	2,59 3,13	45,3 54,7	1,75 0,24	3,09 2,87	51,8 48,2	2,08 0,22	3,59 2,73	56,8 43,2	2,40 0,21	3,99 2,66	60,0 40,0	2,65 0,21
raci- nes	¹⁵ N sol	11,12 11,45	49,3 50,7	7,56 0,89	9,10 9,28	49,5 50,5	6,15 0,72	7,42 7,48	49,8 50,2	4,99 0,58	6,49 6,48	50,0 50,0	4,34 0,50	6,02 5,98	50,2 49,8	3,99 0,46
SCR	¹⁵ N sol	13,36 14,89	47,3 52,7	9,09 1,15	11,69 12,41	48,5 51,5	7,90 0,96	10,51 10,35	50,4 49,6	7,07 0,80	10,08 9,21	52,3 47,7	6,74 0,72	10,01 8,64	53,7 46,3	6,64 0,67
total	¹⁵ N sol	89,53 53,87	62,4 37,6	60,88 4,17	100,92 50,20	66,8 33,2	68,21 3,89	113,99 46,06	71,2 28,8	76,65 3,57	121,25 42,49	74,1 25,9	81,07 3,30	123,84 39,73	75,7 24,3	82,10 3,08

TABLEAU XVII – PRELEVEMENT DE L'AZOTE PAR *PANICUM MAXIMUM* :
REPARTITION ENTRE L'AZOTE-engrais ET L'AZOTE-sol POUR LE TRAITEMENT F₃

F ₃	V ₁			V ₂			V ₃			V ₄			V ₅			
	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	mg	%	% eng.sol	
1 ^{ère} cpe	¹⁵ N sol	46,47	65,6	31,60	58,48	69,5	39,52	72,98	73,6	49,08	82,46	75,8	55,14	86,80	76,8	57,54
	sol	24,39	34,4	1,89	25,69	30,5	1,99	26,21	26,4	2,03	26,27	24,2	2,04	26,28	23,2	2,04
2 ^{ème} cpe	¹⁵ N sol	7,78	52,9	5,29	7,22	53,2	4,88	6,27	54,0	4,22	5,23	54,9	3,50	4,38	55,9	2,91
	sol	6,94	47,1	0,54	6,34	46,8	0,49	5,34	46,0	0,41	4,29	45,1	0,33	3,46	44,1	0,27
3 ^{ème} cpe	¹⁵ N sol	2,88	32,0	1,96	2,42	29,8	1,64	1,95	28,1	1,31	1,62	27,9	1,08	1,42	28,7	0,94
	sol	6,12	68,0	0,47	5,70	70,2	0,44	4,98	71,9	0,39	4,19	72,1	0,32	3,53	71,3	0,27
2 ^è +3 ^è cpes	¹⁵ N sol	10,66	44,9	7,25	9,64	44,5	6,52	8,22	44,3	5,53	6,85	44,7	4,58	5,80	45,4	3,85
	sol	13,06	55,1	1,01	12,04	55,5	0,93	10,32	55,7	0,80	8,47	55,3	0,66	6,98	54,6	0,54
S ₃	¹⁵ N sol	57,13	60,4	38,85	68,12	64,4	46,04	81,20	69,0	54,60	89,31	72,0	59,72	92,60	73,6	61,39
	sol	37,45	39,6	2,90	37,73	35,6	2,92	36,53	31,0	2,83	34,74	28,0	2,70	33,26	26,4	2,58
chau- mes	¹⁵ N sol	1,90	34,7	1,29	2,32	40,7	1,56	2,75	46,1	1,85	2,99	48,9	2,00	3,07	50,0	2,04
	sol	3,58	65,3	0,28	3,38	50,3	0,26	3,21	53,9	0,25	3,12	51,1	0,24	3,07	50,0	0,24
raci- nes	¹⁵ N sol	9,06	44,6	6,16	7,07	45,9	4,78	5,42	47,9	3,64	4,50	49,7	3,01	4,04	50,9	2,68
	sol	11,24	55,4	0,87	8,32	54,1	0,64	5,90	52,1	0,46	4,56	50,3	0,35	3,89	49,1	0,30
SCR	¹⁵ N sol	10,96	42,5	7,45	9,39	44,5	6,34	8,17	47,3	5,49	7,49	49,4	5,01	7,11	50,5	4,71
	sol	14,82	57,5	1,15	11,70	55,5	0,91	9,11	52,7	0,71	7,68	50,6	0,60	6,96	49,5	0,54
total	¹⁵ N sol	68,09	56,6	46,30	77,51	61,1	52,38	89,37	66,2	60,10	96,80	69,5	64,72	99,71	71,3	66,10
	sol	52,27	43,4	4,05	49,43	38,9	3,83	45,64	33,8	3,54	42,42	30,5	3,29	40,22	28,7	3,12

Bilan de l'azote - engrais

La répartition de l'azote-engrais s'effectue ainsi :

- prélèvement par la plante,
- réorganisation dans le sol,
- volatilisation (dénitrification).

Le prélèvement par la plante, comme nous l'avons vu, a pu être quantifié, ainsi que l'azote 15 "retenu" dans le sol ; la différence par rapport à l'engrais apporté sera attribuée à la volatilisation : une partie de l'azote-engrais, particulièrement soluble, a ainsi "disparu" sous forme gazeuse.

Cette répartition de l'azote-engrais est donnée dans le tableau XVIII.

TABLEAU XVIII - REPARTITION DE L'AZOTE - ENGRAIS
(mg N eng par kg sol - % de l'azote - engrais apporté)

			V ₁		V ₂		V ₃		V ₄		V ₅		
			mg	%									
F ₁	plante	A	83,04	56,5	94,58	63,9	103,37	69,5	106,19	71,0	106,75	70,8	
		P	86,60	58,9	92,01	62,2	99,24	66,7	105,78	70,7	110,66	73,4	
	sol	H	38,99	26,5	35,36	23,9	32,34	21,8	30,68	20,5	29,83	19,8	
		volat ⁿ .	A	25,03	17,0	18,02	12,2	13,00	8,7	12,69	8,5	14,26	9,4
			P	21,47	14,6	20,59	13,9	17,13	11,5	13,10	8,8	10,35	6,8
F ₂	plante	A	87,79	59,7	102,67	69,4	115,72	77,8	120,94	80,9	122,29	81,1	
		P	92,80	63,1	100,26	67,8	110,41	74,2	119,78	80,1	126,87	84,1	
	sol	H	44,04	29,9	36,21	24,5	29,70	20,0	26,10	17,5	24,28	16,1	
		volat ⁿ .	A	15,23	10,4	9,08	6,1	3,29	2,2	2,52	1,7	4,27	2,8
			P	10,22	7,0	11,49	7,7	8,60	5,8	3,68	2,4	- 0,31	-
F ₃	plante	A	66,70	45,4	79,25	53,6	91,12	61,3	96,46	64,5	98,05	65,0	
		P	71,06	48,3	77,66	52,5	86,77	58,3	95,29	63,7	101,80	67,5	
	sol	H	40,46	27,5	35,93	24,3	32,16	21,6	30,08	20,1	29,03	19,2	
		volat ⁿ .	A	39,90	27,1	32,78	22,1	25,43	17,1	23,02	15,4	23,76	15,8
			P	35,54	24,2	34,37	23,2	29,78	20,1	24,19	16,2	20,01	13,3

remarque :

Les valeurs mentionnées sur ce tableau ont été calculées d'après les 2 meilleures fonctions obtenues pour l'exportation de l'azote-engrais par la plante, à savoir :

la fonction exponentielle "A", la plus plausible, puisqu'intervient une asymptote, limitant l'exportation de l'azote-engrais pour les grands volumes de sol,
et la fonction puissance "P_>", qui continue de croître quand les volumes de sol augmentent.

Il en résulte pour chacun des volumes, 2 valeurs différentes pour la volatilisation, dont l'écart peut atteindre plus de 5 mg, soit 3 % de l'engrais apporté.

Les écarts entre les valeurs données par les fonctions et les valeurs des points expérimentaux étant du même ordre de grandeur pour chacune des 2 fonctions, nous opterons pour la fonction exponentielle et ferons intervenir ces valeurs dans le bilan.

Les chiffres montrent que :

-le bilan est différent pour F₁, F₂, F₃, il varie essentiellement pour l'exportation par la plante et la volatilisation, il y a peu de différences entre les 3 traitements pour N_{eng} fixé sur le sol. F₂ et F₃ présentent les différences les plus importantes ;

-comme nous l'avons déjà souligné, l'azote-engrais utilisé par la plante augmente quand les volumes de sol augmentent :

pour F₁ : de 57 % pour V₁ à 71 % pour V₅, soit + 14 %,

pour F₂ : de 60 % pour V₁ à 81 % pour V₅, soit + 21 %,

pour F₃ : de 45 % pour V₁ à 65 % pour V₅, soit + 20 %,

-N_{eng} fixé sur le sol répond à la fonction hyperbole : quand les volumes de sol augmentent, N_{eng} fixé sur le sol diminue :

pour F₁ : de 26,5 % pour V₁ à 19,8 % pour V₅, soit - 6,7 %,

pour F₂ : de 29,9 % pour V₁ à 16,1 % pour V₅, soit - 13,8 %,

pour F₃ : de 27,5 % pour V₁ à 19,2 % pour V₅, soit - 8,3 %,

la réorganisation de l'azote-engrais dans le sol s'effectue mieux dans les petits pots que dans les grands pots.

Par comparaison, les données suivantes montrent que les quantités de N_{eng} fixé dans la matière organique du sol varient avec les cultures (BROADBENT F.E. - 1982):

30 à 40 % avec les céréales (aussi bien pour des expérimentations en pots qu'au champ),

11 à 18 % avec le riz,

20 % avec le sorgho,

nos résultats se rapprocheraient de ceux donnés pour le sorgho, mais nous pouvons préciser que pour une même culture, N_{eng} fixé dans le sol varie avec le volume des pots de culture pour un essai en serre;

-enfin, une partie de N_{eng} s'est volatilisée ou dénitrifiée au cours de l'expérimentation, et là les différences sont importantes entre les 3 traitements, mais de façon générale, cette volatilisation ou dénitrification de l'azote-engrais est plus importante pour les petits pots que pour les grands pots :

pour F_1 : de 17,0 % pour V_1 à 9,4 % pour V_5 , soit - 7,6 %,

pour F_2 : de 10,4 % pour V_1 à 2,8 % pour V_5 , soit - 7,6 %,

pour F_3 : de 27,1 % pour V_1 à 15,8 % pour V_5 , soit - 11,3 %,

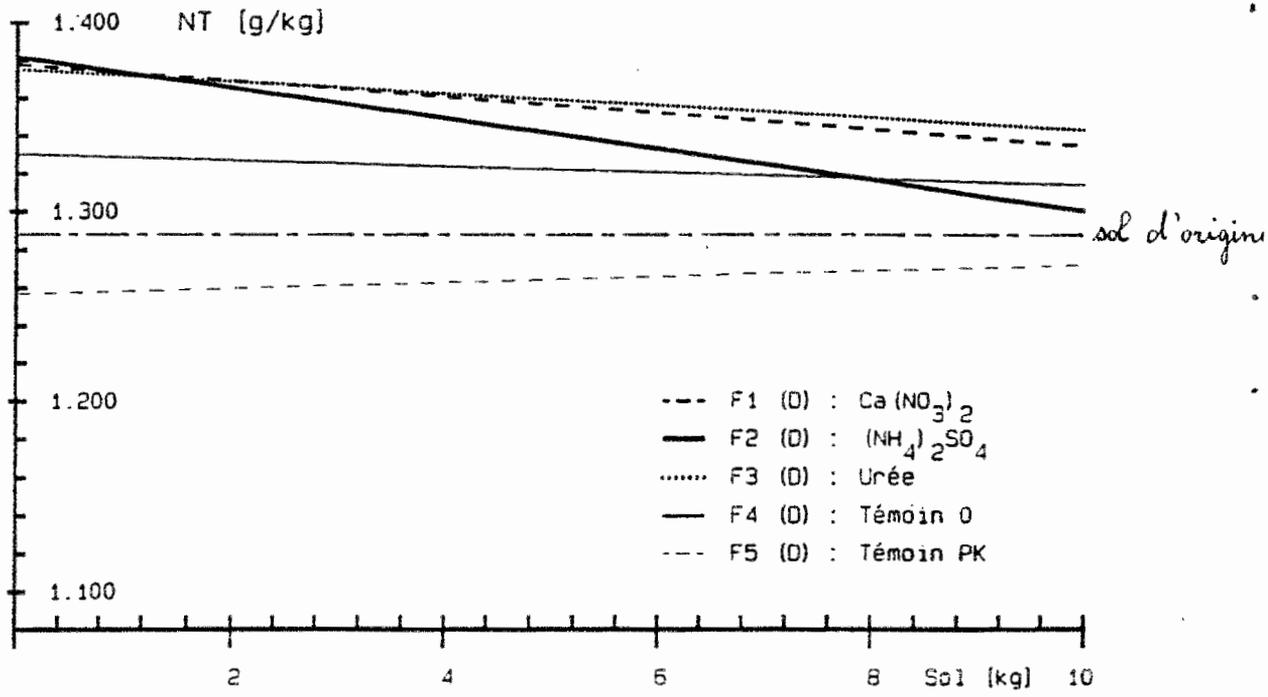
les pertes par volatilisation sont les plus importantes pour F_3 : il est bien connu que l'urée est particulièrement sensible à ce phénomène, les chiffres sont légèrement inférieurs à ceux donnés pour N_{eng} fixé sur le sol. Le nitrate de Ca est déjà moins sujet à ce départ sous forme gazeuse ; quant au sulfate d'ammonium, les pertes sont minimales : on peut donc supposer que l'ammonium a été rapidement utilisé par la plante et / ou remanié aussi rapidement.

Cette question a été largement étudiée (FRENEY J.R. -1988 et HARGROVE W.L. - 1989) : en résumé, on peut estimer que les pertes en NH_3 résultant de l'application d'engrais aux cultures et pâturages peuvent être très importantes (jusqu'à 50 % et même 85 % de l'apport azoté), et qu'elles varient avec la nature de l'engrais, la technique et la durée de l'apport, le niveau de croissance de la culture, les propriétés du sol (pH, capacité d'échange, activité uréase), et les facteurs de l'environnement (t° , humidité du sol, rayonnement solaire, importance du vent). Dans notre essai, seuls les facteurs nature de l'engrais azoté et volume de sol exploité nous montrent les variations possibles de cette volatilisation de l'azote.

Bilan de l'azote du sol

Le graphique représentant l'azote total du sol mesuré en fin d'expérimentation, nous montre que la teneur en azote du sol a augmenté pour F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , et elle a diminué pour F_5 par rapport au sol d'origine (figure 231).

Le tableau suivant traduit cet azote excédentaire, qui serait de l'azote de l'air fixé biologiquement par la plante, vraisemblablement par l'intermédiaire de la bactérie *Azospirillum* comme cela a été démontré dans de nombreux travaux, cités page 205.



Azote total du sol (sans racines)

Figure 231

N air fixé biologiquement (mg par kg de sol)

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
V ₁	+ 61,9 mg	+ 49,5 mg	+ 71,5 mg	+ 61,8 mg	+ 10,4 mg
V ₂	+ 69,6 mg	+ 57,4 mg	+ 77,1 mg	+ 62,7 mg	+ 10,2 mg
V ₃	+ 74,8 mg	+ 62,0 mg	+ 80,0 mg	+ 62,6 mg	+ 9,2 mg
V ₄	+ 76,2 mg	+ 62,4 mg	+ 79,7 mg	+ 61,3 mg	+ 7,6 mg
V ₅	+ 76,0 mg	+ 61,1 mg	+ 78,1 mg	+ 59,8 mg	+ 6,0 mg

Cet N excédentaire est calculé d'après la formule :

$$N_{\text{sol}} (\text{fin expér.}) = N_{\text{sol}} (\text{origine}) - N_{\text{sol}} (\text{plante}) + N_{\text{eng}} \text{ fixé}$$

•N_{sol} (fin expér.) = les droites exprimant ces teneurs ont des pentes non significatives (sauf pour F₂), nous avons donc opté pour une seule valeur moyenne pour chaque traitement, représentative de la teneur du sol en N à la fin de l'expérimentation :

$$F_1 = 1356 \text{ mg,}$$

$$F_2 = 1340 \text{ mg,}$$

$$F_3 = 1359 \text{ mg,}$$

$$F_4 = 1322 \text{ mg,}$$

$$F_5 = 1264 \text{ mg.}$$

La teneur en N du sol à l'origine était de : 1287 mg N par kg de sol. On observe donc en fin d'expérimentation la teneur la plus faible pour F₅, et les plus fortes pour F₁ et F₃.

L'analyse de variance montre que :

- les teneurs en N du sol de F₁ et F₃ sont semblables (le test d'homogénéité = 70 %),
- toutes les autres teneurs sont différentes entre elles.

Les erreurs relatives sur 6 mesures, pour chacun des traitements, ne dépassent pas 1,7 %.

•N_{sol} (plante) : représente l'azote prélevé par la plante, en provenance du sol ; les valeurs pour chaque traitement et chacun des volumes sont calculées d'après la fonction "AH".

•N_{eng} fixé sur le sol : représente l'azote en provenance de l'engrais retenu dans le sol ; les valeurs pour F₁, F₂, F₃ et chacun des volumes sont calculées d'après la fonction hyperbole.

Ce tableau montre des variations en fonction des volumes de sol et des traitements :

pour F_1, F_2, F_3 : les quantités d'azote attribuées à une fixation biologique de l'azote de l'air ont tendance à augmenter avec les volumes de sol, avec toutefois un maximum pour le volume V_4 ;

pour F_4 : on peut estimer que les valeurs des 5 volumes de sol sont identiques, cette fixation biologique est aussi importante pour les petits pots que pour les grands pots;

pour F_5 : les valeurs diminuent quand les volumes de sol augmentent, mais ces valeurs sont 6 à 10 fois inférieures à celles des autres traitements.

Les conditions de milieu sont donc favorables au développement de la bactérie fixatrice de l'azote atmosphérique pour les traitements F_1, F_2, F_3, F_4 , elles sont nettement moins bonnes pour F_5 , qui présentait un déséquilibre (plante jaunie) à cause de l'apport PK et par conséquent d'un manque d'azote. Par contre, le témoin F_4 , dans le cas de cette graminée fourragère et de ce type de sol, se comporte comme les traitements ayant reçu l'engrais NPK, autrement dit, la plante n'aurait pas "souffert", bien que nous ayons pu démontrer que le phosphore se présentait comme facteur limitant.

Cet "enrichissement" en N, sur une période de 3 mois 1/2, équivaldrait à un apport azoté de :

230 à 240 kg N ha⁻¹ pour F_1 et F_3 (pour les volumes de sol V_4),

185 kg N ha⁻¹ pour F_2 (pour le volume V_4), et F_4 ,

30 kg N ha⁻¹ pour F_5 (pour les volumes de sol V_1 et V_2),

ces chiffres peuvent paraître très élevés pour F_1, F_2, F_3, F_4 .

Dans le cas de cette expérimentation, il n'y a eu aucune lixiviation, contrairement à ce qui peut se passer au champ, où lixiviation et fixation biologique pourraient plus au moins se compenser.

Toutefois, on peut se demander pourquoi, lors de la 2^{ème} coupe et surtout lors de la 3^{ème} coupe, la plante n'a pas mieux profité de ce surcroît azoté, tout au moins dans le cas des traitements F_1, F_2, F_3 , suffisamment pourvus en phosphore.

Il n'en reste pas moins que ce bilan est très théorique, puisqu'il est impossible de saisir les fluctuations de cette dernière donnée concernant un apport difficilement mesurable. Si l'azote du sol et l'azote de l'engrais sont des données tangibles, l'azote de l'air fixé biologiquement intervient vraisemblablement aussi bien dans l'alimentation de la plante que dans une réorganisation de l'azote du sol, modifiant ainsi le bilan.

Ce problème de l'azote de l'air fixé biologiquement n'est pas nouveau, il est étudié depuis une vingtaine d'années. Dès 1976, DOBEREINER (DOBEREINER J. - 1976) avait pu préciser l'existence de la bactérie *Azospirillum* dans la rhizosphère d'un grand nombre de graminées tropicales, dont *Panicum maximum*.

Depuis, des centaines de publications sur le sujet ont paru, précisant la nature d'*Azospirillum* (bactérie diazotrophe hétérotrophe microaérophile), l'existence de corrélations positives entre d'une part, l'activité nitrogénase et d'autre part, l'humidité du sol, la t°, l'intensité lumineuse, la teneur en argile du sol (GIBSON A.H. - 1988).

"Les plantes en C₄ (telle *Panicum maximum*) sont surtout infectées par *Azospirillum lipoferum*. Les bactéries sont présentes dans les tissus du cortex et en particulier dans les vaisseaux du protoxylème pendant l'activité maximale de nitrogénase." (BODDEY R.M. - 1982).

"On a aussi trouvé qu'*Azospirillum* produit des hormones végétales capables de favoriser le développement racinaire, permettant à la plante d'augmenter sa surface d'absorption en éléments nutritifs du sol." (OKON Y. - 1982).

La conséquence de toutes ces connaissances permet des applications pratiques, entre autres de procéder au champ à des inoculations de bactéries fixatrices d'azote, afin d'augmenter les rendements des plantes fourragères et d'économiser l'apport d'engrais azotés. De nombreuses expériences de ce genre ont été faites en particulier au Brésil, en Inde, en Egypte, et en Israël.

"Les rendements les plus élevés atteints dans des champs inoculés partiellement fertilisés étaient équivalents à ceux de champs non inoculés ayant reçu une fertilisation complète. Ces résultats donnent la preuve évidente que l'on peut remplacer l'azote des engrais par l'inoculation avec *Azospirillum*, au moins dans des conditions comparables à celles d'Israël." (OKON Y. - 1982).

Dans le cas d'une inoculation au champ, jusqu'à 40 % de l'azote des plantes proviendrait de la fixation biologique.

Tous les auteurs cités sont d'accord pour reconnaître la difficulté à mesurer l'azote fixé biologiquement (en partie prélevé par la plante, en partie stocké dans le sol), la méthode expérimentale qui consiste à faire pousser la plante en atmosphère marquée avec ¹⁵N serait la plus fiable.

4.2.2 Le bilan du phosphore

Le bilan est établi pour chacun des traitements et des volumes pour le P assimilable (extractible) et pour le P total, il est donné par le tableau XIX.

Ce tableau nous montre que :

- en général, c'est-à-dire pour F₁, F₂, F₃, F₅, la mesure finale sur le sol est toujours inférieure à la différence : P départ - P exporté ;

- ces excédents calculés sont remarquablement constants :

• de l'ordre de 50 mg P par kg de sol dans le cas du P assimilable pour F₁, F₂, F₃, de l'ordre de 62 mg pour F₅ ;

TABLEAU XIX – BILAN DU PHOSPHORE } ASSIMILABLE
} TOTAL (exprimé en mg P par kg de sol) - Valeurs données par les fonctions)

P eng = 109,1 mg P sol { as. = 11,86 mg tot. = 144,70 mg	F ₁		F ₂		F ₃		F ₄		F ₅	
	assim ^{ble}	total	assim ^{ble}	total	assim ^{ble}	total	assim ^{ble}	total	assim ^{ble}	total
V ₁ { P départ P exporté P (dép. – exp.) P sol différence	118,82 43,30 75,52 24,54 + 51,0	251,67 43,30 208,37 189,90 + 18,5	118,82 45,80 73,02 23,07 + 50,0	251,67 45,80 205,87 190,30 + 15,6	118,82 41,84 76,98 23,75 + 53,2	251,67 41,84 209,83 189,20 + 20,6	11,86 6,54 5,32 6,96 - 1,64	144,70 6,54 138,16 139,67 - 1,51	117,78 21,10 96,68 36,37 + 60,3	250,63 21,10 229,53 213,20 + 16,3
V ₂ { P départ P exporté P (dép. – exp.) P sol différence	119,48 42,10 77,38 25,32 + 52,1	252,32 42,10 210,22 189,90 + 20,3	119,48 45,04 74,44 24,31 + 50,1	252,32 45,04 207,28 190,30 + 17,0	119,48 40,75 78,73 24,76 + 54,0	252,32 40,75 211,57 191,45 + 20,1	11,86 6,84 5,02 7,11 - 2,09	144,70 6,84 137,86 140,63 - 2,77	119,48 20,07 99,41 37,54 + 61,9	252,32 20,07 232,25 213,20 + 19,1
V ₃ { P départ P exporté P (dép. – exp.) P sol différence	120,02 39,96 80,06 26,78 + 53,3	252,86 39,96 212,90 189,90 + 23,0	120,02 43,65 76,37 26,66 + 49,7	252,86 43,65 209,21 190,30 + 18,9	120,02 39,42 80,60 26,69 + 53,9	252,86 39,42 213,44 195,70 + 17,7	11,86 5,90 5,96 7,39 - 1,43	144,70 5,90 138,80 142,53 - 3,73	119,56 18,19 101,37 39,82 + 61,6	252,40 18,19 234,21 213,20 + 21,0
V ₄ { P départ P exporté P (dép. – exp.) P sol différence	120,64 37,42 83,22 28,66 + 54,6	253,48 37,42 216,06 189,90 + 26,2	120,64 41,94 78,70 29,66 + 49,0	253,48 41,94 211,54 190,30 + 21,2	120,64 38,33 82,31 29,15 + 53,2	253,48 38,33 215,15 201,15 + 14,0	11,86 3,99 7,87 7,75 + 0,12	144,70 3,99 140,71 144,94 - 4,23	120,17 16,06 104,11 42,72 + 61,4	253,01 16,06 236,95 213,20 + 23,8
V ₅ { P départ P exporté P (dép. – exp.) P sol différence	121,57 35,15 86,42 30,50 + 55,9	254,42 35,15 219,27 189,90 + 29,4	121,57 40,37 81,20 32,60 + 48,6	254,42 40,37 214,05 190,30 + 23,8	121,57 37,58 83,99 31,56 + 52,4	254,42 37,58 216,84 206,48 + 10,4	11,86 2,45 9,41 8,10 + 1,31	144,70 2,45 142,25 147,30 - 5,05	120,97 14,21 106,76 45,58 + 61,2	253,81 14,21 239,60 213,20 + 26,4
erreur % (P sol)	(+ 197,3)	(+ 12,4)	(+ 184,7)	(+ 10,1)	(+ 198,5)	(+ 8,5)	(18,0)	(- 2,4)	(+152,7)	(+ 10,0)
V ₁	+ 207,8	+ 9,7	+ 216,7	+ 8,2	+ 224,0	+ 10,9	- 23,6	- 1,1	+ 165,8	+ 7,6
V ₂	+ 205,8	+ 10,7	+ 206,1	+ 8,9	+ 218,1	+ 10,5	- 29,4	- 2,0	+ 164,9	+ 9,0
V ₃	+ 199,0	+ 12,1	+ 186,4	+ 9,9	+ 201,9	+ 9,0	- 19,4	- 2,6	+ 154,7	+ 9,8
V ₄	+ 190,5	+ 13,8	+ 165,2	+ 11,1	+ 182,5	+ 7,0	+ 1,5	- 2,9	+ 143,7	+ 11,2
V ₅	+ 183,3	+ 15,5	+ 149,1	+ 12,5	+ 166,0	+ 5,0	+ 16,2	- 3,4	+ 134,3	+ 12,4

•de 18 à 23 mg P par kg de sol dans le cas du P total pour F₁, F₂, F₃, F₅. Dans ce cas, il ne peut s'agir que d'erreurs de mesure, qui se chiffrent donc à 10 % en moyenne ;

•l'excédent étant plus important pour le P assimilable, on peut supposer que le P apporté sous forme d'engrais n'est pas resté entièrement sous forme assimilable et qu'une partie (environ la moitié du P apporté) s'est immobilisée au cours de l'essai ;

-quant au traitement F₄, les différences sur le bilan seraient :

•de l'ordre de 18 % pour le P assimilable, les variations ne portant que sur 1 ppm avec une teneur moyenne en P en fin de manipulation de 7,5 ppm ;

•de l'ordre de 2,4 % pour le P total, la différence augmentant quand les volumes de sol augmentent .

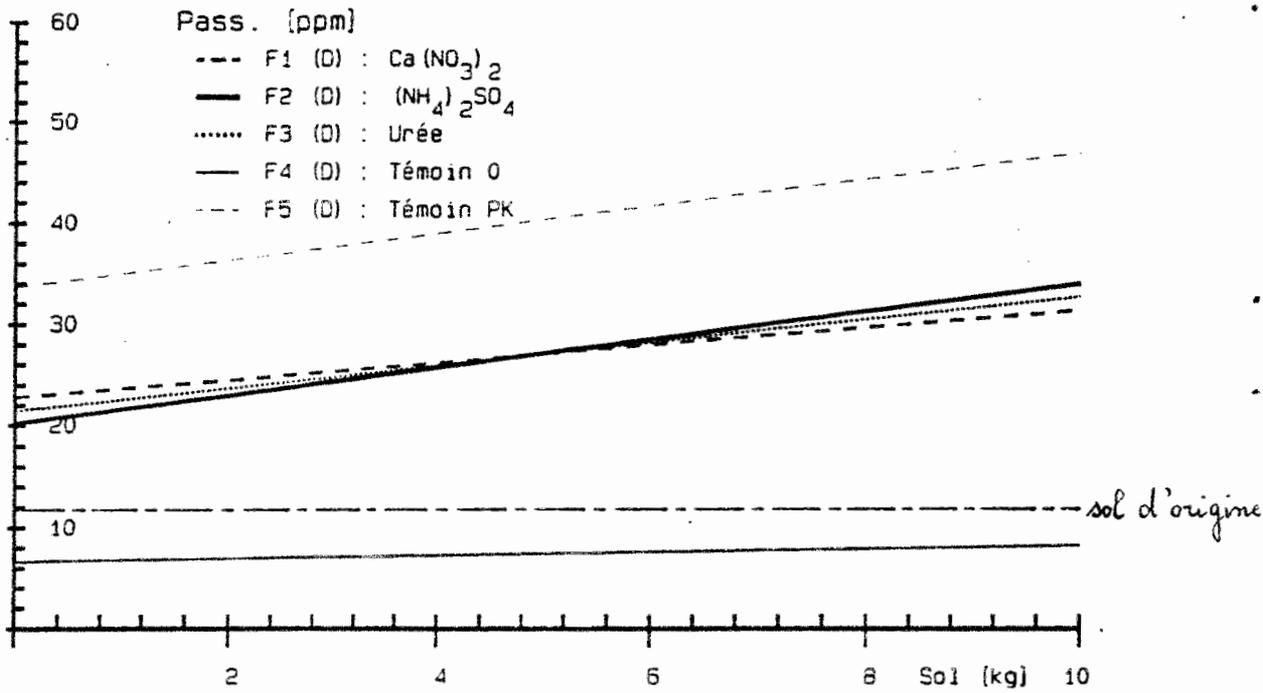
Il y a donc eu enrichissement en P du sol pour F₁, F₂, F₃, F₅ grâce au P apporté sous forme d'engrais et non totalement consommé par la plante ; pour le témoin F₄, il y a eu appauvrissement puisque la plante a puisé dans les réserves du sol (figures 232 et 233).

A titre de comparaison, signalons pour les 5 traitements, la consommation du P par la plante pour les volumes de sol V₁ et V₅ :

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
P assimilable					
V ₁	36,4 %	38,5 %	35,2 %	55,1 %	17,9 %
V ₅	28,9 %	33,2 %	30,9 %	20,7 %	11,7 %
P total					
V ₁	17,2 %	18,2 %	16,6 %	4,5 %	8,4 %
V ₅	13,8 %	15,9 %	14,8 %	1,7 %	5,6 %

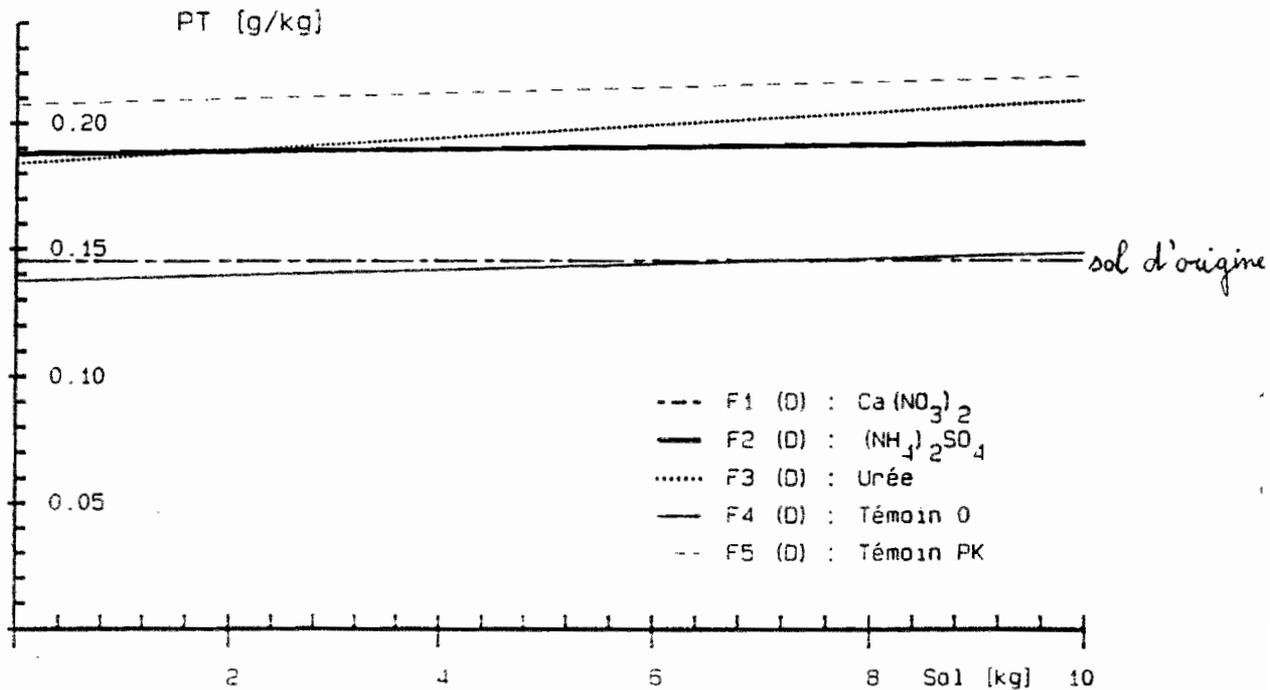
L'absence d'apport azoté a provoqué pour le traitement F₅ une consommation 2 à 3 fois moindre que pour F₁, F₂, F₃. On peut noter pour le témoin F₄, la différence très importante entre les volumes V₁ et V₅ de l'utilisation du P assimilable du sol par la plante; le P assimilable a été d'autant mieux prélevé par la plante que le volume du pot était petit, et que la densité racinaire était plus élevée.

La consommation de V₅, étant toujours inférieure à celle de V₁ tend à nous prouver que le P apporté (sous forme soluble) est beaucoup moins assimilable que l'azote apporté, puisque dans le cas de l'azote, V₅ exportait plus de N que V₁, pour les traitements F₁, F₂, F₃.



Phosphore assimilable du sol (sans racines)

Figure 232



Phosphore total du sol (sans racines)

Figure 233

4.2.3 Le bilan du potassium

Le bilan est établi pour chacun des traitements et des volumes de sol, pour le potassium échangeable et pour le potassium total, il est donné par le tableau XX .

On observe que :

- les erreurs relatives, aussi bien pour K échangeable que pour K total sont en moyenne de l'ordre de 10 % ,elles dépassent rarement 20 % ;

- la consommation du K par la plante dépasse toujours 300 mg par kg de sol pour F₁, F₂, F₃, alors que l'apport d'engrais était de 200 mg par kg de sol. On peut donc supposer que la totalité de l'engrais a été consommée, vu sa solubilité et sa grande assimilabilité par *Panicum* et qu'une partie du K échangeable du sol a été utilisée ;

- le témoin F₅ par contre, n'a utilisé que 110 mg en moyenne par kg de sol, le sol s'est donc enrichi en potassium ; l'erreur dans le cas du K échangeable dépasse 20 % et représente un excès d'environ 60 mg K pour l'exportation par rapport au K échangeable du sol mesuré en fin de manipulation. Là aussi, on peut supposer que le K apporté par l'engrais et le K échangeable pourraient plus ou moins s'insolubiliser dans la fraction K total. L'erreur concernant le bilan du K total ne dépasse pas en moyenne 7,5 % .

L'utilisation du K par la plante se chiffre ainsi pour les volumes V₁ et V₅ de chacun des traitements, nous avons distingué le K apporté par l'engrais du K du sol (échangeable et total) :

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
K engrais					
V ₁	100 %	100 %	100 %	—	57,7 %
V ₅	100 %	100 %	100 %	—	54,3 %
K sol éch.					
V ₁	38,0 %	49,5 %	37,2 %	29,6 %	0
V ₅	55,6 %	63,8 %	45,2 %	20,1 %	0
K sol tot.					
V ₁	25,8 %	33,7 %	25,3 %	20,2 %	0
V ₅	37,8 %	43,4 %	30,8 %	13,7 %	0

TABLEAU XX – BILAN DU POTASSIUM $\left\{ \begin{array}{l} \text{ECHANGEABLE} \\ \text{TOTAL} \end{array} \right.$ (exprimé en mg K par kg de sol) – Valeurs données par les fonctions)

K eng = 200 mg / kg sol K sol { éch. = 269,14 mg tot. = 395,71 mg	F ₁		F ₂		F ₃		F ₄		F ₅	
	éch. ble	total	éch. ble	total	éch. ble	total	éch. ble	total	éch. ble	total
V ₁ { K départ K exporté K (dép. – exp.) K sol différence	467,05	593,62	467,05	593,62	467,05	593,62	270,95	397,52	467,05	593,62
	300,17	300,17	331,22	331,22	297,92	297,92	80,22	80,22	114,26	114,26
	166,88	293,45	135,83	262,40	169,13	295,70	190,73	317,30	352,79	479,36
	125,69	293,56	105,47	278,37	139,29	294,91	173,78	362,12	294,72	522,82
	+ 41,2	- 0,1	+ 30,4	- 16,0	+ 29,8	+ 0,8	+ 16,9	- 44,8	+ 58,1	- 43,5
V ₂ { K départ K exporté K (dép. – exp.) K sol différence	467,69	594,26	467,69	594,26	467,69	594,26	270,41	396,98	467,69	594,26
	329,35	329,35	341,08	341,08	314,84	314,84	90,14	90,14	112,89	112,89
	138,34	264,91	126,62	253,18	152,85	279,42	180,27	306,84	354,80	481,37
	125,69	293,56	105,47	273,68	139,29	294,91	173,78	362,12	294,72	522,82
	+ 12,7	- 28,7	+ 21,1	- 20,5	+ 13,6	- 15,5	+ 6,5	- 55,3	+ 60,1	- 41,5
V ₃ { K départ K exporté K (dép. – exp.) K sol différence	468,22	594,79	468,22	594,79	468,22	594,79	269,94	396,51	468,22	594,79
	346,77	346,77	353,97	353,97	322,22	322,22	89,40	89,40	111,51	111,51
	121,45	248,02	114,25	240,82	146,00	272,57	180,54	307,11	356,71	483,28
	125,69	293,56	105,47	264,82	139,29	294,91	173,78	362,12	294,72	522,82
	- 4,2	- 45,5	+ 8,8	- 24,0	+ 6,7	- 22,3	+ 6,8	- 55,0	+ 62,0	- 39,5
V ₄ { K départ K exporté K (dép. – exp.) K sol différence	469,10	595,67	469,10	595,67	469,10	595,67	269,68	396,25	469,10	595,67
	350,67	350,67	365,12	365,12	323,18	323,18	73,20	73,20	110,59	110,59
	118,43	245,00	103,98	230,55	145,92	272,49	196,48	323,05	358,51	485,08
	125,69	293,56	105,47	253,46	139,29	294,91	173,78	362,12	294,72	522,82
	- 7,3	- 48,6	- 1,5	- 22,9	+ 6,6	- 22,4	+ 22,7	- 39,1	+ 63,8	- 37,7
V ₅ { K départ K exporté K (dép. – exp.) K sol différence	470,67	597,24	470,67	597,24	470,67	597,24	269,55	396,12	470,67	597,24
	351,05	351,05	373,29	373,29	323,28	323,28	54,31	54,31	109,47	109,47
	119,62	246,19	97,38	223,95	147,39	273,96	215,24	341,81	361,20	487,77
	125,69	293,56	105,47	242,36	139,29	294,91	173,78	362,12	294,72	522,82
	- 6,1	- 47,4	- 8,1	- 18,4	+ 8,1	- 21,0	+ 41,5	- 20,3	+ 66,5	- 35,1
erreur % (K sol)	(11,4)	(- 11,6)	(13,3)	(- 7,8)	(+ 9,3)	(5,6)	(+ 10,9)	(- 11,9)	(+ 21,1)	(- 7,5)
V ₁	+ 32,8	0	+ 28,8	- 5,7	+ 21,4	+ 0,3	+ 9,8	- 12,4	+ 19,7	- 8,3
V ₂	+ 10,1	- 9,8	+ 20,1	- 7,5	+ 9,7	- 5,3	+ 3,7	- 15,3	+ 20,4	- 7,9
V ₃	- 3,4	- 15,5	+ 8,3	- 9,1	+ 4,8	- 7,6	+ 3,9	- 15,2	+ 21,0	- 7,6
V ₄	- 5,8	- 16,5	- 1,4	- 9,0	+ 4,8	- 7,6	+ 13,1	- 10,8	+ 21,6	- 7,2
V ₅	- 4,8	- 16,1	- 7,7	- 7,6	+ 5,8	- 7,1	+ 23,9	- 5,6	+ 22,6	- 6,7

Le capital K du sol a donc été bien entamé pour les traitements F_1 , F_2 , F_3 , la plante aurait utilisé dans le cas de F_2 plus du tiers du K total du sol. Dans le cas de F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , le sol s'est donc nettement appauvri en K après cette culture, seul le traitement F_5 s'est enrichi puisque la plante n'a utilisé qu'un peu plus de la moitié de l'engrais apporté (figures 234 et 235).

Le problème de l'apport potassique dans le cas d'une culture de *Panicum* reste difficile à maîtriser, sachant que plus on apporte d'engrais, plus la graminée en consomme. Nous avons abordé précédemment dans le chapitre concernant les exportations de K, le problème d'une possible consommation de luxe en K pour les volumes de sol V_3 , V_4 , V_5 .

4.2.4 Le bilan du calcium

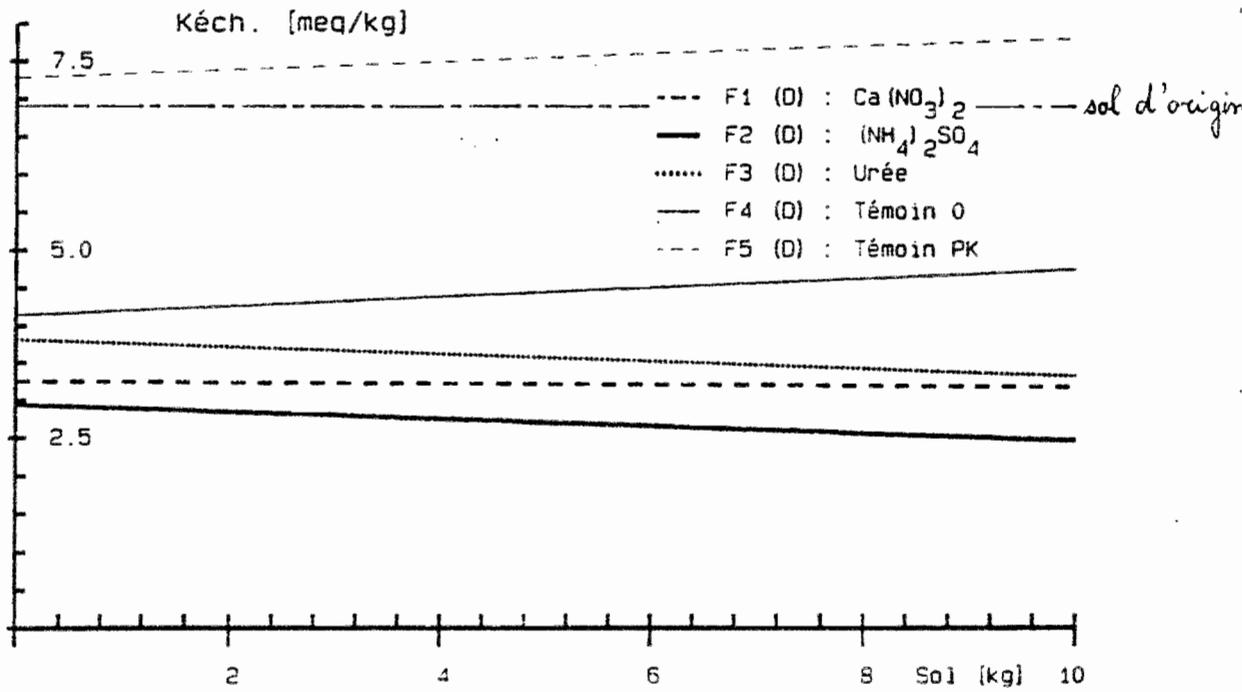
Le bilan du calcium est donné dans le tableau XXI, pour Ca échangeable et pour Ca total du sol.

Rappelons que dans le cas du traitement F_1 , du Ca a été apporté par l'engrais azoté (nitrate de Ca) dans la proportion de 2,35 % par rapport au Ca total du sol d'origine.

Les erreurs relatives estimées sur la différence entre la teneur en Ca du sol réellement mesurée à la fin de l'essai et la même teneur calculée (Ca du sol d'origine - Ca exporté) sont très faibles et pour cause ! les valeurs du Ca échangeable et du Ca total atteignent respectivement 8 et 9 g Ca par kg de sol, alors que les exportations s'échelonnent de 26 mg à 133 mg. Bien souvent la différence trouvée entre le chiffre réel et théorique est supérieure au chiffre de l'exportation. Précisons que l'exportation mentionnée dans ce tableau comprend le prélèvement du Ca par la plante et le Ca mesuré en fin d'essai dans les percolats, ce dernier pouvant représenter jusqu'à la moitié de la consommation par la plante (cas de F_4 et F_5).

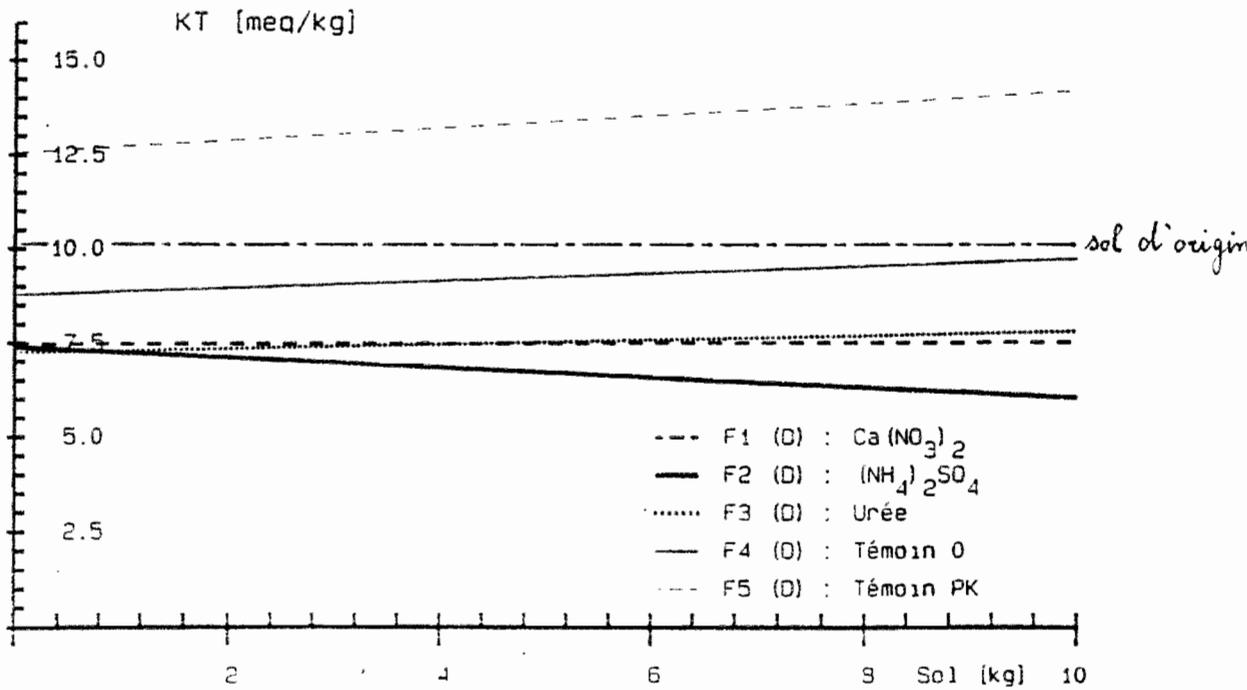
L'utilisation du Ca par la plante se chiffre ainsi pour les volumes V_1 et V_5 de chacun des traitements :

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
Ca éch.					
V_1	1,10 %	1,05 %	0,89 %	0,25 %	0,31 %
V_5	0,87 %	0,80 %	0,66 %	0,20 %	0,26 %
Ca total					
V_1	0,96 %	0,91 %	0,77 %	0,22 %	0,27 %
V_5	0,76 %	0,69 %	0,57 %	0,17 %	0,23 %



Potassium échangeable du sol (sans racines)

Figure 234



Potassium total du sol (sans racines)

Figure 235

TABLEAU XXI – BILAN DU CALCIUM { ECHANGEABLE
TOTAL (exprimé en mg Ca par kg de sol) – Valeurs données par les fonctions)

Ca eng. (F ₁) = 214,6 mg Ca sol { éch. = 7952 mg tot. = 9145 mg	F ₁		F ₂		F ₃		F ₄		F ₅		
	éch ^{ble}	total									
V ₁ {	Ca départ	8167,1	9359,5	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9
	Ca exporté	133,37	133,37	122,97	122,97	109,69	109,69	42,99	42,99	51,31	51,31
	Ca (dép. – exp.)	8033,75	9226,13	7829,53	9021,93	7842,81	9035,21	7909,51	9101,91	7901,19	9093,59
	Ca sol	7900,1	9019,0	7664,6	9064,07	7745,47	8917,00	8009,36	8876,93	7742,60	8939,66
	différence	+ 133,6	+ 207,1	+ 164,9	- 42,1	+ 97,3	+ 118,2	- 99,9	+ 225,0	+ 158,6	+ 153,9
V ₂ {	Ca départ	8167,1	9359,5	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9
	Ca exporté	115,36	115,36	108,49	108,49	95,64	95,64	40,29	40,29	47,44	47,44
	Ca (dép. – exp.)	8051,74	9244,14	7844,01	9036,41	7856,86	9049,26	7912,21	9104,61	7905,06	9097,46
	Ca sol	7900,1	9049,7	7664,6	9064,07	7769,37	8917,00	7977,17	8876,93	7742,60	8939,66
	différence	+ 151,6	+ 194,4	+ 179,4	- 27,7	+ 87,5	+ 132,3	- 65,0	+ 227,7	+ 162,5	+ 157,8
V ₃ {	Ca départ	8167,1	9359,5	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9
	Ca exporté	101,17	101,17	94,68	94,68	81,42	81,42	35,59	35,59	41,52	41,52
	Ca (dép. – exp.)	8065,93	9258,33	7857,82	9050,22	7871,08	9063,48	7916,91	9109,31	7910,98	9103,38
	Ca sol	7900,1	9107,6	7664,6	9064,07	7814,53	8917,00	7914,27	8876,93	7742,60	8939,66
	différence	+ 165,8	+ 150,7	+ 193,2	- 13,9	+ 56,6	+ 146,5	+ 2,6	+ 232,4	+ 168,4	+ 163,7
V ₄ {	Ca départ	8167,1	9359,5	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9
	Ca exporté	89,46	89,46	85,62	85,62	70,56	70,56	30,55	30,55	36,12	36,12
	Ca (dép. – exp.)	8077,64	9270,04	7866,88	9059,28	7881,94	9074,34	7921,95	9114,35	7916,38	9108,78
	Ca sol	7900,1	9181,9	7664,6	9064,07	7872,43	8917,00	7834,17	8876,93	7742,60	8939,66
	différence	+ 177,5	+ 88,1	+ 202,3	- 4,8	+ 9,5	+ 157,3	+ 87,8	+ 237,4	+ 173,8	+ 169,1
V ₅ {	Ca départ	8167,1	9359,5	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9	7952,5	9144,9
	Ca exporté	81,86	81,86	80,25	80,25	62,90	62,90	26,43	26,43	32,29	32,29
	Ca (dép. – exp.)	8085,24	9277,64	7872,25	9064,65	7889,60	9082,00	7926,07	9118,47	7920,21	9112,61
	Ca sol	7900,1	9254,4	7664,6	9064,07	7929,00	8917,00	7755,54	8876,93	7742,60	8939,66
	différence	+ 185,1	+ 23,2	+ 207,7	+ 0,6	- 39,4	+ 165,0	+ 170,5	+ 241,5	+ 177,6	+ 173,0
erreur % (Ca sol)	(+ 2,0)	(+ 1,5)	(+ 2,5)	(- 0,2)	(0,7)	(+ 1,6)	(1,1)	(+ 2,6)	(+ 2,2)	(+ 1,8)	
V ₁	+ 1,7	+ 2,3	+ 2,15	- 0,46	+ 1,26	+ 1,33	- 1,25	+ 2,53	+ 2,05	+ 1,72	
V ₂	+ 1,9	+ 2,1	+ 2,34	- 0,31	+ 1,13	+ 1,48	- 0,81	+ 2,57	+ 2,10	+ 1,77	
V ₃	+ 2,1	+ 1,7	+ 2,52	- 0,15	+ 0,72	+ 1,64	+ 0,03	+ 2,62	+ 2,17	+ 1,83	
V ₄	+ 2,2	+ 1,0	+ 2,64	- 0,05	+ 0,12	+ 1,76	+ 1,12	+ 2,67	+ 2,24	+ 1,89	
V ₅	+ 2,3	+ 0,3	+ 2,71	+ 0,01	- 0,50	+ 1,85	+ 2,20	+ 2,72	+ 2,29	+ 1,94	

L'utilisation du Ca par la plante pour le traitement F₁ est estimée par rapport au Ca sol + Ca engrais.

Au maximum, 1 % du Ca du sol est utilisé par la plante et dans tous les cas la consommation pour le volume V₁ est supérieure à celle du volume V₅, ce qui indique une moindre assimilabilité de cet élément par rapport au potassium.

Le témoin F₄ n'a utilisé que le quart de la consommation de F₂ aussi bien pour V₁ que pour V₅.

Les figures 236 et 237 montrent cette faible consommation du Ca par la plante, par rapport au taux élevé de calcium dans le sol, les ordonnées de ces graphiques ne partant pas de 0.

4.2.5 Le bilan du magnésium

Le bilan du magnésium est donné dans le tableau XXII pour Mg échangeable et pour Mg total. Pour cet élément, le magnésium exporté ne peut venir que du sol, pour l'ensemble des traitements.

Comme pour le calcium, les erreurs relatives sont très faibles, d'autant plus celles concernant le Mg total, puisque celui-ci est 3 fois plus important que le Mg échangeable. L'erreur la plus importante sur le bilan du Mg échangeable atteint 2,2 %, elle était de 2,7 % pour le Ca échangeable ; pour Mg total, bien que 2,5 fois supérieur au Ca total (exprimé en meq), les valeurs absolues indiquant la différence entre ce qu'on aurait dû trouver dans le sol en fin d'essai et ce qu'on a réellement mesuré, sont toujours inférieures aux valeurs observées sur Ca total. On en déduit que les mesures effectuées sur le magnésium sont plus précises que celles concernant le calcium. L'utilisation du Mg par la plante se chiffre ainsi pour les volumes V₁ et V₅ de chacun des traitements :

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
Mg éch.					
V ₁	1,59 %	1,58 %	1,26 %	0,51 %	0,54 %
V ₅	1,15 %	1,15 %	0,86 %	0,30 %	0,38 %
Mg total					
V ₁	0,51 %	0,51 %	0,41 %	0,16 %	0,17 %
V ₅	0,37 %	0,37 %	0,28 %	0,10 %	0,12 %

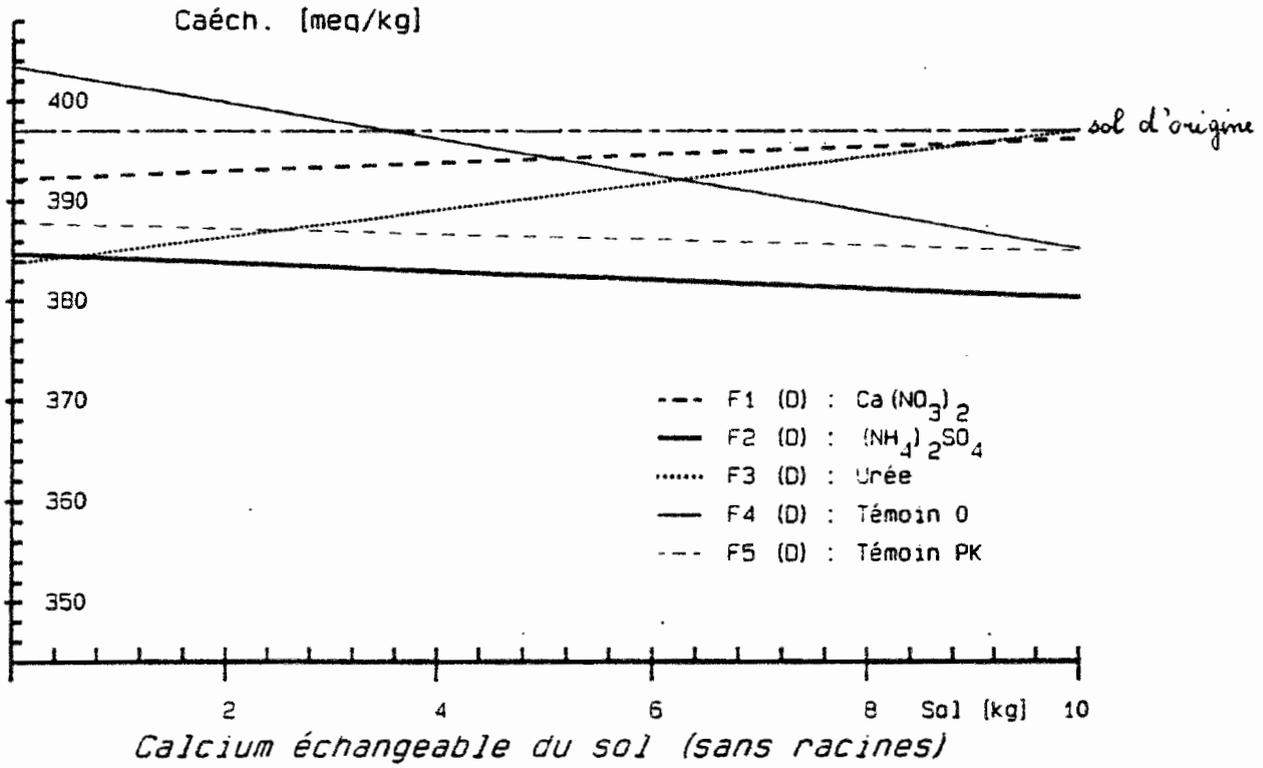


Figure 236

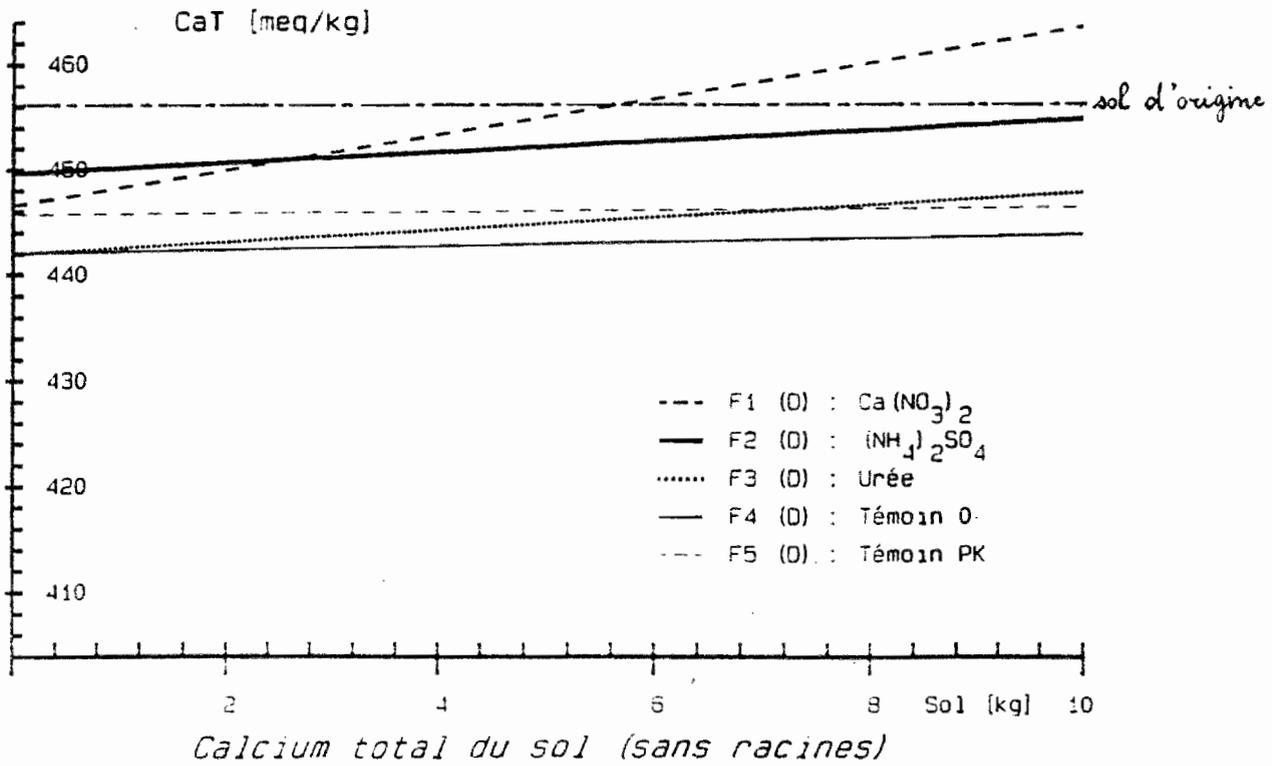


Figure 237

TABLEAU XXII – BILAN DU MAGNESIUM } ECHANGEABLE
} TOTAL (exprimé en mg Mg par kg de sol) - Valeurs données par les fonctions)

Mg sol	F ₁		F ₂		F ₃		F ₄		F ₅	
	éch ^{ble}	total								
V ₁ { Mg départ Mg exporté Mg (dép. - exp.) Mg sol différence	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8
	104,62	104,6	100,29	100,3	84,81	84,81	38,45	38,5	41,85	41,9
	4275,59	13512,2	4279,92	13516,5	4295,40	13532,0	4341,76	13578,3	4338,36	13574,9
	4342,54	13430,3	4318,19	13498,9	4297,97	13483,5	4401,32	13730,7	4328,94	13698,0
	-67,0	+81,9	-38,3	+17,6	-2,6	+48,5	-59,6	-152,4	+9,4	-123,0
V ₂ { Mg départ Mg exporté Mg (dép. - exp.) Mg sol différence	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8
	91,45	91,5	90,00	90,0	73,94	73,9	35,92	35,9	39,97	40,0
	4288,76	13525,3	4290,21	13526,8	4306,27	13542,9	4344,29	13580,9	4340,24	13576,8
	4352,49	13447,1	4318,19	13516,1	4312,39	13500,5	4401,32	13730,7	4328,94	13698,0
	-63,7	+78,2	-28,0	+10,7	-6,1	+42,4	-57,0	-149,8	+11,3	-121,2
V ₃ { Mg départ Mg exporté Mg (dép. - exp.) Mg sol différence	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8
	77,78	77,8	78,82	78,8	62,41	62,4	31,85	31,9	36,46	36,5
	4302,43	13539,0	4301,39	13538,0	4317,80	13554,4	4348,36	13584,9	4343,75	13580,3
	4371,28	13478,9	4318,19	13548,8	4339,63	13532,4	4401,32	13730,7	4328,94	13698,0
	-68,9	+60,1	-16,8	-10,8	-21,8	+22,0	-53,0	-145,8	+14,8	-117,7
V ₄ { Mg départ Mg exporté Mg (dép. - exp.) Mg sol différence	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8
	67,21	67,2	69,71	69,7	53,35	53,4	27,30	27,3	32,29	32,3
	4313,00	13549,6	4310,50	13547,1	4326,86	13563,4	4352,91	13589,5	4347,92	13584,5
	4395,39	13519,6	4318,19	13590,6	4374,57	13573,4	4401,32	13730,7	4328,94	13698,0
	-82,4	+30,0	-7,7	-43,5	-47,7	-10,0	-48,4	-141,2	+19,0	-113,5
V ₅ { Mg départ Mg exporté Mg (dép. - exp.) Mg sol différence	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8	4380,21	13616,8
	59,82	59,8	63,11	63,1	47,04	47,0	23,41	23,4	28,47	28,5
	4320,39	13557,0	4317,10	13553,7	4333,17	13569,8	4356,80	13593,4	4351,74	13588,3
	4418,93	13559,4	4318,19	13631,4	4408,70	13613,4	4401,32	13730,7	4328,94	13698,0
	-98,5	-2,4	-1,1	-77,7	-75,5	-43,6	-44,5	-137,3	+22,8	-109,7
erreur % (Mg sol)	(-1,7)	(+0,4)	(-0,4)	(0,2)	(-0,7)	(0,2)	(-1,2)	(-1,1)	(+0,4)	(-0,9)
V ₁	-1,54	+0,61	-0,89	+0,13	-0,06	+0,36	-1,35	-1,11	+0,22	-0,90
V ₂	-1,46	+0,58	-0,65	+0,08	-0,14	+0,31	-1,30	-1,09	+0,26	-0,88
V ₃	-1,58	+0,45	-0,39	-0,08	-0,50	+0,16	-1,20	-1,06	+0,34	-0,86
V ₄	-1,87	+0,22	-0,18	-0,32	-1,09	-0,07	-1,10	-1,03	+0,44	-0,83
V ₅	-2,23	+0,02	-0,03	-0,57	-1,71	-0,32	-1,01	-1,00	+0,53	-0,80

La consommation du Mg échangeable est toujours supérieure à celle du Ca échangeable, pour des teneurs du sol à peu près identiques :

Ca éch. = 39,7 meq. % ; Mg éch. = 36,0 meq. %,

mais dans le cas de Mg, le rapport entre les 2 volumes de sol V_1 et V_5 est toujours supérieur à celui du Ca, Mg est d'autant mieux prélevé que le volume des pots est plus petit.

Les figures 238 et 239 montrent, comme pour le calcium, que le magnésium du sol a été peu prélevé par la plante, au maximum à 0,5 % pour Mg total; mais quand il est prélevé à moins de 0,2 %, des erreurs apparaissent sur la teneur mesurée en Mg du sol en fin d'expérimentation (cas des traitements F_4 et F_5 dont les teneurs finales en Mg sont supérieures à celles du sol d'origine).

D'autre part, les rapports Mg / Ca relatifs à la plante (Mg et Ca étant exprimés en meq) sont toujours supérieurs à 1 comme le montrent les chiffres suivants :

Mg / Ca	F_1		F_2		F_3		F_4		F_5	
	V_1	V_5								
1 ^{ère} coupe	1,18	1,18	1,32	1,32	1,23	1,16	1,45	1,18	1,31	1,21
3 coupes	1,16	1,16	1,29	1,29	1,17	1,17	1,54	1,24	1,40	1,20
ch. + rac.	1,71	1,37	1,76	1,52	1,73	1,38	2,39	1,80	2,22	1,69
total pl.	1,23	1,23	1,37	1,37	1,29	1,18	1,80	1,34	1,59	1,31

Il apparaît donc que Mg est plus facilement prélevé par la plante que Ca, son assimilabilité est supérieure à celle du Ca, et ce d'autant plus que la densité racinaire dans les pots est importante par rapport à la production végétale (cas du volume V_1 pour le témoin F_4).

4.2.6 Le bilan du sodium

Le bilan du sodium est donné dans le tableau XXIII pour Na échangeable et pour Na total ; pour les 5 traitements, le sodium exporté par la plante ne peut provenir que du sol.

Les erreurs relatives, exprimant le rapport suivant :

$$\frac{[\text{Na sol origine} - \text{Na exporté(plante + percolats)}] - \text{Na sol fin expér.} \times 100}{\text{Na sol fin expér.}}$$

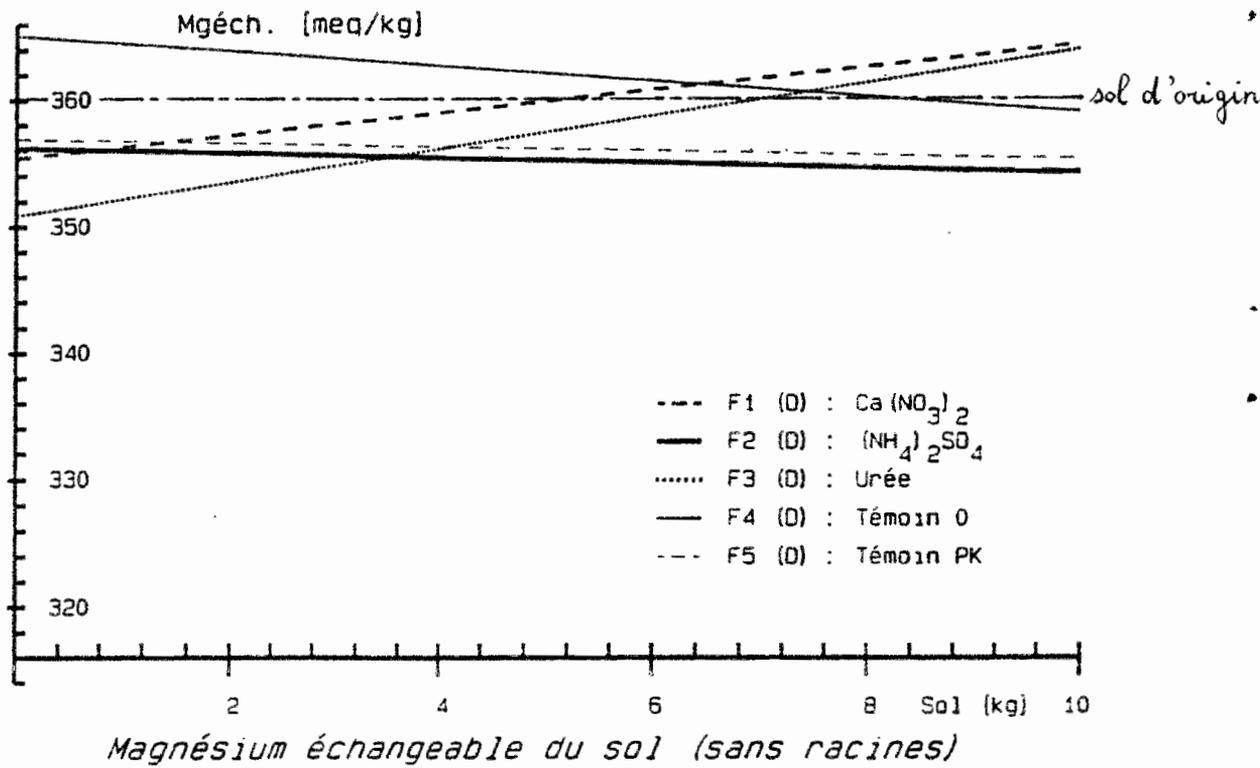


Figure 238

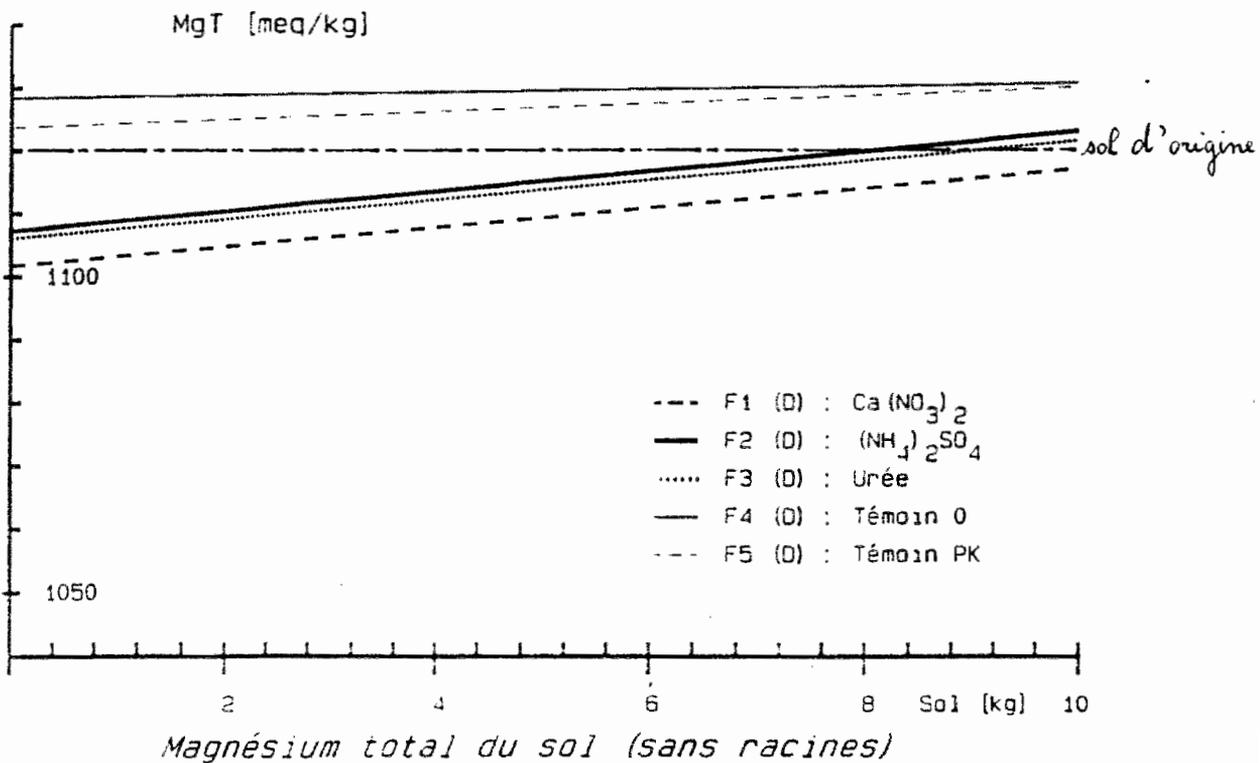


Figure 239

TABLEAU XXIII – BILAN DU SODIUM } ECHANGEABLE
 TOTAL (exprimé en mg Na par kg de sol) - Valeurs données par les fonctions)

Na sol { éch. = 209,2 mg tot. = 354,0 mg	F ₁		F ₂		F ₃		F ₄		F ₅	
	éch ^{ble}	total	éch ^{ble}	total	éch ^{ble}	total	éch ^{ble}	total	éch ^{ble}	total
V ₁ { Na départ	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04
Na exporté	59,76	59,76	58,13	58,13	51,75	51,75	26,42	26,42	31,22	31,22
Na (dép. – exp.)	149,45	294,28	151,08	295,91	157,46	302,29	182,79	327,62	177,99	322,82
Na sol	173,00	305,66	173,69	297,12	191,53	320,65	204,64	344,58	204,37	346,14
différence	- 23,55	- 11,38	- 22,61	- 1,21	- 34,07	- 18,36	- 21,85	- 16,96	- 26,38	- 23,32
V ₂ { Na départ	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04
Na exporté	51,91	51,91	52,71	52,71	45,20	45,20	21,78	21,78	25,57	25,57
Na (dép. – exp.)	157,30	302,13	156,50	301,33	164,01	308,84	187,43	32,26	183,64	328,47
Na sol	176,58	305,66	176,25	299,07	191,53	320,65	204,64	345,86	204,37	346,14
différence	- 19,28	- 3,53	- 19,75	+ 2,26	- 27,52	- 11,81	- 17,21	- 13,60	- 20,73	- 17,67
V ₃ { Na départ	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04
Na exporté	44,48	44,48	47,55	47,55	39,59	39,59	17,88	17,88	20,84	20,84
Na (dép. – exp.)	164,73	309,56	161,66	306,49	169,62	314,45	191,33	336,16	188,37	333,20
Na sol	183,37	305,66	181,08	302,76	191,53	320,65	204,64	348,37	204,37	346,14
différence	- 18,64	+ 3,90	- 19,42	+ 3,73	- 21,91	- 6,2	- 13,31	- 12,21	- 16,00	- 12,94
V ₄ { Na départ	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04
Na exporté	39,27	39,27	43,87	43,87	36,27	36,27	15,86	15,86	18,41	18,41
Na (dép. – exp.)	169,94	314,77	165,34	310,17	172,94	317,77	193,35	338,18	190,80	335,63
Na sol	192,06	305,66	187,27	307,50	191,53	320,65	204,64	351,56	204,37	346,14
différence	- 22,12	+ 9,11	- 21,93	+ 2,67	- 18,59	- 2,88	- 11,29	- 13,38	- 13,57	- 10,51
V ₅ { Na départ	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04	209,21	354,04
Na exporté	35,80	35,80	41,36	41,36	34,41	34,41	14,90	14,90	17,26	17,26
Na (dép. – exp.)	173,41	318,24	167,85	312,68	174,80	319,63	194,31	339,14	191,95	336,78
Na sol	200,56	305,66	193,33	312,13	191,53	320,65	204,64	354,70	204,37	346,14
différence	- 27,15	- 12,58	- 25,48	+ 0,55	- 16,73	- 1,02	- 10,33	- 15,56	- 12,42	- 9,36
erreur % (Na sol)	(- 12,0)	(2,7)	(- 12,0)	(0,7)	(- 12,4)	(- 2,5)	(- 7,2)	(- 4,1)	(- 8,7)	(- 4,3)
V ₁	- 13,61	- 3,72	- 13,02	- 0,41	- 17,79	- 5,73	- 10,68	- 4,92	- 12,91	- 6,74
V ₂	- 10,92	- 1,15	- 11,21	+ 0,76	- 14,37	- 3,68	- 8,41	- 3,93	- 10,14	- 5,10
V ₃	- 10,17	+ 1,28	- 10,72	+ 1,23	- 11,44	- 1,93	- 6,50	- 3,50	- 7,83	- 3,74
V ₄	- 11,52	+ 2,98	- 11,71	+ 0,87	- 9,71	- 0,90	- 5,52	- 3,81	- 6,64	- 3,04
V ₅	- 13,54	+ 4,12	- 13,18	+ 0,18	- 8,73	- 0,32	- 5,05	- 4,39	- 6,08	- 2,70

sont très voisines de celles obtenues pour le potassium ; les erreurs sont forcément plus importantes pour le sodium échangeable que pour le sodium total, ce dernier étant 1,7 fois plus élevé que Na échangeable. Elles sont de l'ordre de 10 % sur Na échangeable et 3 % sur Na total. L'erreur la plus faible est obtenue pour le traitement F₂ sur Na total : 0,7 % en moyenne, sur les 5 volumes de sol.

L'utilisation du sodium par la plante se chiffre ainsi pour les volumes V₁ et V₅ de chacun des traitements :

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
Na éch.					
V ₁	16,9 %	18,1 %	13,8 %	2,5 %	3,3 %
V ₅	13,8 %	15,9 %	13,2 %	3,0 %	4,0 %
Na total					
V ₁	10,0 %	10,7 %	8,2 %	1,5 %	2,0 %
V ₅	8,1 %	9,4 %	7,8 %	1,8 %	2,4 %

Si pour F₁, F₂, F₃, les pourcentages sont toujours plus élevés pour V₁ que pour V₅, il n'en est pas de même pour F₄ et F₅ : nous avons souligné la question au chapitre exportation du sodium.

Les teneurs du sol en sodium en fin d'expérimentation sont données par les figures 240 et 241.

4.2.7 L'utilisation des éléments du sol par *Panicum maximum*

Le témoin F₄, qui n'a reçu aucun apport d'engrais, nous permet de comparer la "consommation" des divers éléments du vertisol par *Panicum*. Certes, il est difficile de comparer ce qui n'est pas comparable (exprimé en meq, le sol renferme environ 10 fois moins de K total que de N total et 72 fois moins de Na total que de Mg total), mais le pourcentage de l'élément utilisé par la plante, nous permet d'établir une échelle de consommation (et / ou d'assimilabilité ?) des éléments les uns par rapport aux autres.

Le tableau XXIV exprime les pourcentages utilisés par les 3 coupes et par la plante dans son ensemble, pour chaque élément et pour chaque volume de sol.

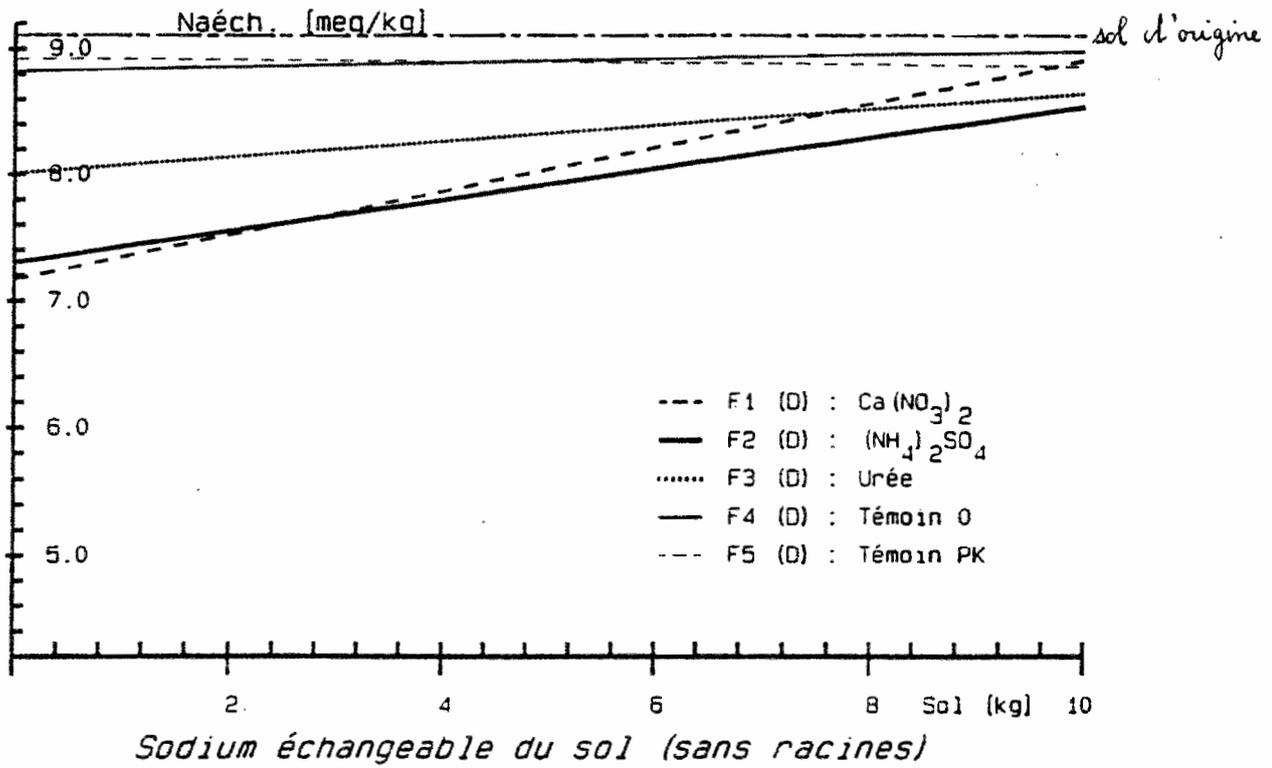


Figure 240

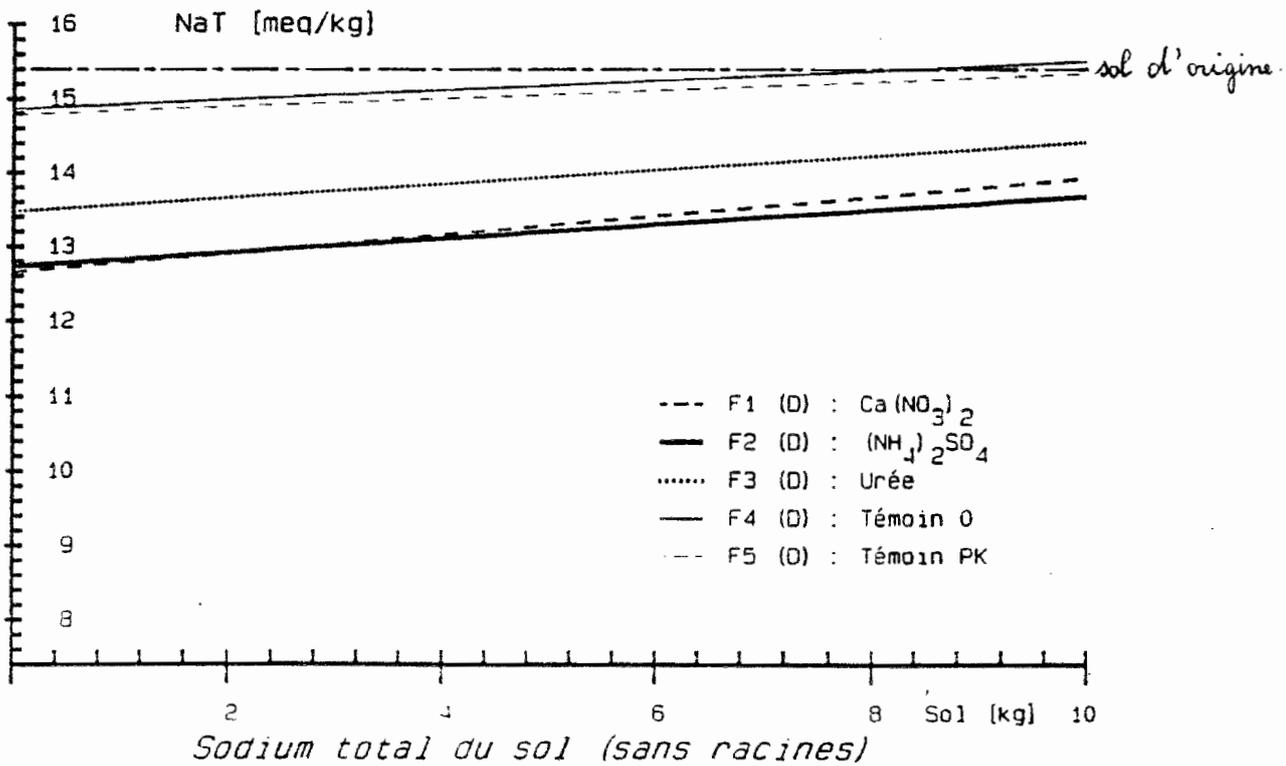


Figure 241

TABLEAU XXIV – UTILISATION DES ELEMENTS DU SOL (exprimée en %) : CAS DU TEMOIN F₄

éléments : meq. et mg par kg sol		V ₁		V ₂		V ₃		V ₄		V ₅	
		3 coupes	total								
N	{ 91,86 meq. 1287 mg	1,96	2,92	1,95	2,83	1,92	2,65	1,88	2,45	1,84	2,27
P _{as.}	{ 1,15 meq. 11,86 mg	42,99	55,15	45,43	57,70	40,01	49,72	27,83	33,63	17,54	20,67
P _{t.}	{ 14,02 meq. 144,7 mg	3,52	4,52	3,72	4,73	3,28	4,07	2,28	2,75	1,44	1,69
K _{éch.}	{ 6,88 meq. 269,1 mg	24,42	29,39	27,83	33,10	28,42	33,03	23,88	26,94	18,11	19,86
K _{t.}	{ 10,12 meq. 395,7 mg	16,61	19,98	18,93	22,68	19,33	22,47	16,24	18,32	12,32	13,50
Ca _{éch.}	{ 396,83 meq. 7952 mg	0,18	0,25	0,18	0,25	0,17	0,23	0,16	0,21	0,16	0,20
Ca _{t.}	{ 456,33 meq. 9145 mg	0,15	0,22	0,15	0,21	0,15	0,20	0,14	0,18	0,14	0,17
Mg _{éch.}	{ 360,33 meq. 4380 mg	0,30	0,50	0,29	0,47	0,27	0,41	0,24	0,34	0,22	0,30
Mg _{t.}	{ 1120,2 meq. 13617 mg	0,10	0,16	0,09	0,15	0,09	0,13	0,08	0,11	0,07	0,10
Na _{éch.}	{ 9,12 meq. 209,7 mg	0,73	2,46	0,86	2,57	1,05	2,73	1,25	2,87	1,42	2,97
Na _{t.}	{ 15,40 meq. 354,0 mg	0,43	1,46	0,50	1,52	0,62	1,62	0,73	1,70	0,83	1,76

On en déduit que :

- le phosphore assimilable a été prélevé à plus de 50 % par la plante pour les volumes V_1 , V_2 , V_3 , il apparaît donc comme l'élément le plus assimilable, mais sans doute aussi comme le plus nécessaire à la plante ;

- K échangeable (à plus de 30 %), puis K total (à plus de 20 %) pour les volumes V_2 , V_3 , sont également bien utilisés par *Panicum*, gros consommateur de ce cation ;

- pour l'azote, sa consommation ne dépasse pas 3 %. Rappelons que les différentes teneurs en azote de la plante étaient très proches de celles des traitements ayant reçu des engrais azotés ;

- le phosphore total, 6.5 fois moins important que N, mais 1.4 fois plus important que K total, n'est prélevé par la plante au mieux qu'à 4.7 %, ces 4.7 % correspondant à la fraction assimilable de ce phosphore total ;

- malgré sa faible teneur dans le sol (légèrement supérieure à celle du potassium), le sodium n'est que faiblement utilisé par la graminée :

Na échangeable est utilisé au mieux à 3 %,

Na total est utilisé au mieux à 1,7 % ;

- en dernier lieu, mais aussi à cause de leur importance dans ce vertisol, la consommation de Ca et Mg est moindre que celle des autres éléments :

Mg échangeable est utilisé au mieux à 0,50 %,

Ca échangeable est utilisé au mieux à 0,25 %,

Ca total est utilisé au mieux à 0,20 %,

Mg total (avec une réserve de plus de 1000 meq par kg de sol) n'est utilisé au mieux qu'à 0,15 %.

Comparativement et compte-tenu des apports d'engrais, le traitement F_2 , par exemple, utilise bien plus tous les éléments : ceci a souvent été chiffré dans les chapitres relatifs aux exportations.

Une production végétale plus importante entraîne une plus grande consommation de tous les éléments, puisque par ailleurs, dans la plupart des cas, les teneurs en éléments de la plante étaient comparables entre le témoin F_4 et les traitements F_1 , F_2 , F_3 .

4.2.8 Observation sur le cumul des exportations

La silice mise à part, il est possible, sous réserve de tout exprimer en meq, et en supposant que l'on puisse ainsi additionner les exportations totales des éléments (N-P-K-Ca-Mg-Na), d'obtenir une valeur pour chacun des traitements et chacun des

volumes de sol concernés. Les chiffres donnés pour les exportations sont déduits des différentes fonctions analysées précédemment. L'ensemble de ces résultats est donné dans le tableau XXV.

On observe que pour F_1 , F_2 , F_3 , les différences sur le total entre volumes sont peu importantes, elles le sont davantage pour F_5 et encore plus pour F_4 :

pour F_1 , la différence entre V_2 et $V_5 = 4,8 \%$,

pour F_2 , la différence entre V_1 et $V_5 = 2,0 \%$,

pour F_3 , la différence entre V_2 et $V_5 = 3,7 \%$,

pour F_4 , la différence entre V_2 et $V_5 = 30,8 \%$,

pour F_5 , la différence entre V_1 et $V_5 = 17,0 \%$,

les valeurs du volume V_2 sont utilisées lorsque celles-ci sont supérieures à celles du volume V_1 .

L'apport d'engrais a donc provoqué le phénomène suivant : la graminée fourragère cultivée dans des petits volumes ou des grands volumes de sol exporte par kg de sol quasiment la même quantité d'éléments, comparables puisqu'ils sont exprimés en meq (silice mise à part).

Nous avons vu que les exportations de N et K par kg de sol pour les traitements F_1 , F_2 , F_3 augmentaient quand les volumes de sol augmentaient ; par contre, les éléments du sol et le phosphore diminuaient quand les volumes de sol augmentaient. Il s'ensuit une homogénéisation des sommes globales des divers éléments au niveau des volumes de sol.

Dans le contexte de cette expérimentation, il y a compensation entre les éléments : pour les petits volumes de sol, les prélèvements par la plante par kg de sol de N et K sont moindres que pour les grands volumes de sol ; inversement, les prélèvements de P, Ca, Mg et Na sont plus importants pour les petits volumes que pour les grands volumes de sol comme si la plante, dans ces conditions expérimentales, avait exploité au maximum les éléments mis à sa disposition ; l'exportation cumulée du Mg, strictement identique pour les traitements F_1 et F_2 le laisse à penser.

Cela n'est plus vrai pour les 2 témoins, pour lesquels la plante n'est pas assez stimulée et dans ce cas, l'exportation cumulée des éléments par kg de sol est plus importante dans les petits pots de culture, mieux explorés par les racines que les grands pots. Les différences des sommes des exportations entre les volumes V_1 et V_5 sont déjà moins importantes pour F_5 que pour F_4 , F_5 ayant reçu un apport P-K.

L'apport azoté semble bien être le "moteur" de l'alimentation de cette graminée.

TABLEAU XXV - EXPORTATIONS TOTALES DES ELEMENTS
(exprimées en meq par kg de sol)

		N	P	K	Ca	Mg	Na	total
F ₁	V ₁	9,83	4,19	7,66	4,49	5,72	1,54	33,43
	V ₂	10,09	4,08	8,41	4,35	5,47	1,50	33,90
	V ₃	10,44	3,87	8,86	4,10	5,04	1,42	33,73
	V ₄	10,73	3,63	8,96	3,81	4,56	1,33	33,02
	V ₅	10,95	3,43	8,97	3,54	4,14	1,25	32,27
F ₂	V ₁	10,42	4,44	8,46	4,16	5,68	1,65	34,81
	V ₂	10,76	4,36	8,71	3,89	5,45	1,62	34,79
	V ₃	11,20	4,23	9,05	3,58	5,03	1,57	34,66
	V ₄	11,60	4,06	9,33	3,33	4,56	1,51	34,39
	V ₅	11,88	3,91	9,54	3,17	4,16	1,45	34,11
F ₃	V ₁	8,78	4,05	7,60	3,53	4,55	1,26	29,77
	V ₂	9,09	3,95	8,04	3,39	4,31	1,25	30,03
	V ₃	9,49	3,82	8,23	3,15	3,91	1,24	29,84
	V ₄	9,84	3,71	8,26	2,87	3,47	1,22	29,37
	V ₅	10,10	3,64	8,26	2,63	3,10	1,20	28,93
F ₄	V ₁	2,69	0,64	2,02	1,01	1,81	0,22	8,39
	V ₂	2,60	0,66	2,28	0,97	1,68	0,24	8,43
	V ₃	2,44	0,59	2,27	0,91	1,46	0,25	7,91
	V ₄	2,25	0,38	1,86	0,84	1,24	0,26	6,83
	V ₅	2,09	0,23	1,37	0,78	1,07	0,27	5,81
F ₅	V ₁	2,93	2,05	2,86	1,22	1,94	0,30	11,30
	V ₂	2,86	1,94	2,85	1,19	1,86	0,32	11,02
	V ₃	2,72	1,76	2,83	1,15	1,70	0,34	10,50
	V ₄	2,56	1,55	2,81	1,10	1,53	0,35	9,90
	V ₅	2,42	1,39	2,78	1,05	1,39	0,36	9,39

V - CONCLUSION

L'étude d'une culture de *Panicum maximum* sur vertisol (de Nouvelle-Calédonie), en vases de végétation, sous serre, sous climat tropical, nous a permis de répondre à un certain nombre de questions posées en introduction.

Rappelons que le protocole expérimental comportait:

5 traitements :

F_1, F_2, F_3 : traitements ayant reçu un apport NPK, et se différenciant par la nature de l'engrais azoté;

F_4, F_5 : traitements-témoins (F_4 n'ayant pas reçu d'engrais, F_5 ayant reçu un apport PK);

5 volumes, ou poids de sol :

$V_1 = 2,0 \text{ kg}$ $V_2 = 2,9 \text{ kg}$ $V_3 = 4,6 \text{ kg}$ $V_4 = 6,8 \text{ kg}$ $V_5 = 9,0 \text{ kg}$.

1- A dose égale d'azote, le traitement F_2 avec le sulfate d'ammonium donne des rendements supérieurs aux traitements F_1 (avec le nitrate de calcium) et F_3 (avec l'urée).

Les différences entre les 3 traitements sont d'autant plus marquées que les volumes de sol sont plus importants, surtout entre F_2 et F_3 . Les rendements des 3 coupes des traitements F_1 et F_2 ne sont significativement différents qu'à partir du volume V_5 (9 kg de sol).

Pour des pots de 2 kg (V_1) et 9 kg (V_5) de sol, les rendements exprimant la production de matière sèche des 3 coupes sont de:

	F_1	F_2	F_3
2 kg	35,4 g	35,6 g	32,9 g
9 kg	121,5 g	128,1 g	110,3 g

le traitement F_2 a une production de 16 % supérieure à celle de F_3 pour le volume V_5 de sol.

2- L'engrais azoté sulfate d'ammonium, a été quantitativement mieux utilisé par la plante que le nitrate de calcium et surtout que l'urée. Les coefficients réels d'utilisation des engrais azotés (CRU) pour l'ensemble de la plante (3 coupes + chaumes + racines), varient dans les proportions suivantes, du volume V_1 au volume V_5 :

pour F_1 : de 57 % à 72 %,

pour F_2 : de 61 % à 82%,

pour F_3 : de 46 % à 66 %,

l'engrais azoté est d'autant mieux utilisé par la graminée que le volume de sol exploité est plus important.

La relation rendement-CRU répondrait à une exponentielle asymptotique; en effet, on se rapproche d'une asymptote pour les CRU des volumes V_4 et V_5 , qui varient peu, alors que les rendements continuent de croître. La totalité de l'azote apporté par les engrais ne peut être utilisée par la plante, car une partie est volatilisée (ou dénitrifiée), une autre partie est retenue dans le sol, pour une réorganisation avec la matière organique du sol.

3- L'utilisation de pots de culture de volumes croissants a permis de montrer que les relations sol-plante pouvaient varier avec les volumes de sol exploités utilisables. Ces relations répondent à des fonctions mathématiques; quatre types principaux de modèles peuvent relier les paramètres biologiques aux volumes explorés de sol.

Les modèles sont couplés:

une fonction est représentative du rendement ou du prélèvement Q d'un élément par la plante en fonction du volume de sol, au niveau pot de culture; elle permet, entre autre, la comparaison des différents traitements entre eux pour une variable donnée; l'autre fonction est représentative du rendement ou du prélèvement Q' d'un élément par la plante, ramené au kg de sol; elle permet de comparer les volumes de sol entre eux pour une variable donnée.

3.1- Modèles "A - AH":

"A": la quantité d'élément prélevé par pot par la plante, répond à une exponentielle croissante, qui atteint une asymptote pour les grands volumes de sol ;

"AH": la fonction asymptote * hyperbole caractérise la quantité d'élément exporté par kg de sol, elle est décroissante quand les volumes de sol augmentent.

Ces fonctions sont applicables à la production de matière sèche (rendements), à la production de matière minérale (cendres) et à quelques éléments exportés du sol (Ca, Mg, SiO_2).

L'exponentielle croissante nous montre qu'un rendement optimum peut être atteint, qui se chiffre, dans le cas de la somme des 3 coupes, à :

238 g pour F_1 , pour un poids de sol de 45 kg,

296 g pour F_2 , pour un poids de sol de 56 kg,

194 g pour F_3 , pour un poids de sol de 31 kg,

73 g pour F_5 , pour un poids de sol de 51 kg.

3.2- Modèles "A₁ - A" :

"A₁": cette fonction asymptote * puissance est croissante avec les volumes de sol. L'exportation de l'élément par pot continue de croître au fur et à mesure que les volumes de sol augmentent ;

"A": nous retrouvons l'exponentielle croissante, pour laquelle la quantité d'élément exporté par kg de sol croît quand les volumes de sol croissent.

Ces modèles sont représentatifs essentiellement des éléments mobiles et très assimilables que sont l'azote minéral et le potassium apportés par les engrais; en particulier, le prélèvement de N_{eng} par la graminée à la 1^{ère} coupe répond parfaitement à ces fonctions (avec des erreurs relatives faibles, de 3 % et 4 %).

3.3- Modèles "E₂ - E₁" :

"E₂": cette exponentielle * puissance² présente un maximum pour un volume de sol donné ; bien souvent, les quantités exportées par le volume V₅ sont moins importantes que celles exportées par V₄ ;

"E₁": cette autre exponentielle * puissance¹ traduit la quantité d'élément exporté par kg de sol selon les volumes. Là aussi la courbe présente un maximum, proche le plus souvent du volume V₃.

Ces fonctions sont représentatives d'un dysfonctionnement dans l'alimentation de la plante, caractéristique du témoin F₄. L'absence d'engrais solubles fait apparaître une certaine difficulté pour cette graminée à se nourrir sur les éléments du sol.

3.4- Modèles "D - H" :

"D": la droite indique qu'il y a une augmentation proportionnelle quand les volumes de sol augmentent; cette droite ne passe pas forcément par l'origine;

"H": l'hyperbole est à Q' ce que la droite est à Q; elle diminue fortement quand les volumes de sol augmentent.

Ce modèle caractérise la plupart des immobilisations des éléments dans les racines, mettant en évidence que la plante immobilise bien plus d'élément dans ses racines - par kg de sol - dans les petits volumes de sol que dans les grands, la densité racinaire étant elle-même bien plus importante pour V₁ que pour V₅.

Ces différents modèles nous montrent donc que le poids de sol utilisé dans une expérimentation en pots de culture a son importance, puisque les relations sol-plante varient avec ce poids de sol. Il semble bien difficile, dans ces conditions, de vouloir extrapoler ces résultats expérimentaux obtenus en serre à des cultures au champ; l'expérimentation au champ reste indispensable.

Sur l'ensemble des variables étudiées (rendement et exportations des éléments) en fonction des volumes de sol, nous avons trouvé 19 % des cas où le volume de sol n'intervenait pas, c'est à dire que Q évoluait proportionnellement aux volumes de sol, et Q' avait donc la même valeur pour les 5 volumes de sol. Le traitement F₅ présentait le maximum de cas, et le traitement F₂ le minimum de cas (1,6 %); l'élément calcium en particulier, élément peu mobile dans la plante, répond à ces exceptions.

4- Le bilan des éléments établi dans le système sol-plante en fin d'expérimentation, conduit à constater un accroissement de la teneur en azote du sol, très important pour les traitements F₁, F₂, F₃ et le témoin F₄, très faible pour le témoin F₅.

Il est reconnu que certaines graminées, dont *Panicum*, sont susceptibles grâce à des bactéries fixées sur et dans leurs racines, de fixer l'azote de l'air; il s'agirait de la bactérie *Azospirillum*. Cette fixation biologique a donc pu être chiffrée avec précision : elle s'élèverait, dans les conditions de l'expérimentation, à plus de 200 kg N ha⁻¹, pour une période de 100 jours. On peut se demander, si cette "réserve" est facilement accessible à la plante. L'augmentation des teneurs en azote (azote-sol) des tiges et feuilles de la 3^{ème} coupe par rapport à la 2^{ème} coupe, laisserait supposer une certaine consommation de cet azote fixé biologiquement, car l'utilisation de l'azote-engrais ne fait que diminuer de la 1^{ère} à la 3^{ème} coupe ; mais cette augmentation des teneurs en N à la 3^{ème} coupe ne correspond pas à un accroissement de la production de matière sèche par rapport à la 2^{ème} coupe.

Le bilan du phosphore est intéressant dans le cas du témoin F₄ : la plante n'ayant à sa disposition que le phosphore du sol, est capable de prélever près de 60 % du P dit assimilable (extractible), qui ne représente qu'un douzième du P total du sol. La disponibilité du P de ce vertisol tropical est donc très limitée et vraisemblablement c'est le phosphore, dans le cas du témoin, qui est le facteur limitant et a entravé le développement de la graminée.

Le phosphore est le seul élément pour lequel les teneurs de la plante-témoin (traitement F₄) sont très inférieures — de moitié — à celles des autres traitements. Pour tous les autres éléments, pour l'azote et le potassium en particulier, les teneurs de la plante-témoin étaient très proches des teneurs de la plante des 4 autres traitements.

Quant au potassium, les réserves de ce vertisol ont été fortement entamées, malgré l'apport potassique, *Panicum* étant un gros consommateur de ce cation.

Remarque — Si dans le cadre de cette étude, il est possible d'effectuer des bilans des éléments du sol, avec au départ de l'expérimentation un sol entièrement

homogénéisé, il semble illusoire de vouloir réaliser ces mêmes bilans au champ, compte-tenu, pour de nombreux éléments, des faibles prélèvements par la plante, comparés aux teneurs de ces mêmes éléments dans le sol, à moins de répéter l'expérimentation sur plusieurs années (5 ans en principe).

Cette étude portait sur un ensemble de 25.000 données.....il paraît évident que bien des points pourraient être plus développés, entre autres le suivi du prélèvement des éléments (des engrais et du sol) au cours de la croissance de la plante, avant la 1^{ère} coupe afin de comparer les éléments prélevés par la plante en fonction du temps, et de mieux comprendre l'influence des différents volumes de sol sur ces prélèvements. De plus, *Panicum maximum* paraît très intéressante en tant que graminée fixatrice de l'azote atmosphérique, car apparemment dans cette expérimentation, elle se trouvait dans de très bonnes conditions pour que ce phénomène se produise; ce point mériterait d'être largement développé. Enfin, la modélisation, qui nous a permis de relier mathématiquement des paramètres biologiques aux poids de sol exploités par la plante, est un vaste domaine à approfondir, aux milles possibilités.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBER S.A. (1982) -
Nutrient balance and nitrogen use.
in : Nitrogen in crop production (copyright 1984 ASA-CSSA-SSSA- Madison,
U.S.A.)- pp 87-95.

- BODDEY R.M. and DOBEREINER J. (1982) -
Association of *Azospirillum* and other diazotrophs with tropical graminea.
12 th. International Congress of Soil Science. New-Delhi, India.
8-16 February 1982.

- BROADBENT F. E. (1982) -
Plant use of soil nitrogen.
in : Nitrogen in crop production (copyright 1984 ASA-CSSA-SSSA- Madison,
U.S.A.) - pp 171-181.

- DOBEREINER J. and DAY J.M. (1976) -
Proceedings First International Symposium on Nitrogen Fixation.
(ed. W.E. Newton and C.J. Nyman), Washington State Univ. Press,
Pullman, Wash., U.S.A. - pp 518-538.

- FRENEY J.R. and BLACK A.S. (1988) -
Importance of ammonia volatilization as a loss process.
in : Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems. (J.R. Wilson ed.
C.A.B. International 1988) - pp 156-173.

- GIBSON A.H. , ROPER M.M. and HALSALL D.M. (1988) -
Nitrogen fixation not associated with legumes.
in : Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems. (J.R. Wilson ed.
C.A.B. International 1988) - pp 66-88.

- GUIRAUD G. (1984) -
Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote
entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-
plante.
Thèse de doctorat d'Etat. Paris - décembre 1984.

- HAGEMAN R.H. (1982) -
Ammonium versus nitrate. Nutrition of higher plants.
in : Nitrogen in crop production (copyright 1984 ASA-CSSA-SSSA- Madison,
U.S.A.) - pp 67-85.

- HARGROVE W.L. (1989) -
Soil, environmental, and management factors influencing ammonia
volatilization under field conditions.
in : B.R. Bock and D.E. Kissel (ed.). Ammonia volatilization from urea
fertilizers. - pp 17-36.

- HARPER J.E. (1982) -
Uptake of organic nitrogen forms by roots and leaves.
in : Nitrogen in crop production (copyright 1984 ASA-CSSA-SSSA- Madison,
U.S.A.) - pp 165-170.

- MARTIN-PREVEL P., GAGNARD J. et GAUTIER P. (1984) -
L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées
et tropicales.
Technique et Documentation. éd. Lavoisier. - Paris.

- OKON Y. (1982) -
Progrès récents dans la recherche sur la fixation biologique de l'azote par des
cultures non légumineuses.
Phosphore et Agriculture. n° 82 - mars 1982.

- ROBERGE G. et RAFFIN Y. (1974) -
Un cycle d'arrière-effet maïs derrière 3 années de cultures fourragères.
Ferme des cultures irriguées de Tombroko (Côte d'Ivoire).
I.E.M.V.T. Bouaké - 1974 - note n° 6, 31p.

- ROBERGE G. (1980) -
Note technique sur *Panicum maximum*.
Institut Sénégalais de Recherches Agricoles.
Laboratoire National d'Élevage et de Recherches Vétérinaires.
Dakar-Hann - Sénégal. septembre 1980.

- SCHERRER B. (1984) -
Biostatistique.
éd. Morin Gaetan. Québec, Canada.

- TERCINIER G. (1967) -
Mode d'interprétation des résultats d'analyses chimiques des terres,
spécialement adapté à la Nouvelle-Calédonie.
Rapport ORSTOM. Centre de Nouméa - Nouvelle-Calédonie.

- THIERY J.M. (1991) -
"Voyons", programme de simulations conversationnelles en Physico-Chimie et
en Agronomie.
in : Logiciels pour la Chimie. ISBN 2 - 903532 -05 -02. pp 292-293.

- THOMANN Ch. (1988) -
Utilisation de *Panicum maximum* comme plante-test pour l'étude de la fertilité
et de l'évolution sous culture des sols tropicaux. Recherche sur la fumure
optimale de sa culture en serre sur vases de végétation.
Rapport ORSTOM (1988). Centre de Nouméa - Nouvelle-Calédonie.

