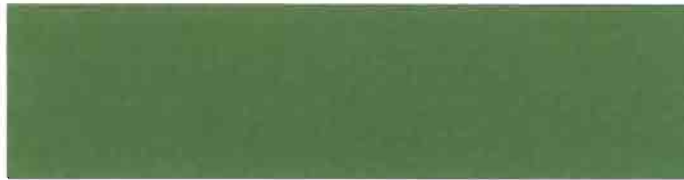




INSTITUT DES
SCIENCES DE LA
TERRE
UNIVERSITE CHEIKH
ANTA DIOP DE DAKAR



INSTITUT DE
RECHERCHE
POUR LE
DEVELOPPEMENT

N° d'ordre 0086 / I.S.T. / 2000

MEMOIRE

présenté pour obtenir le DIPLOME d'Ingénieur Géologue

par

ADAMOU HILIFO Mounkeila

**DETERMINATION PAR METHODE EXPERIMENTALE DES
COEFFICIENTS DE SELECTIVITE DES SOLS :
application aux sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal.**

Soutenu publiquement le 11 Mars 2000 devant le Jury composé de:

MM.	DIA A.	Président	(I.S.T.)
	DIOME F.	Rapporteur	(I.S.T.)
	HAMMECKER C.	Rapporteur	(I.R.D.)
	SARR O.	Examineur	(Dépt Chimie)
	FAYE S.	Examineur	(Dépt Géologie)

A
LA FAMILLE ADAMOU HILIFO
A
NOTRE REGRETE PERE.

Remerciements

Ce travail, fruit de diverses contributions, m'offre une excellente occasion d'adresser mes sincères remerciements:

- Au Professeur DIA A., Directeur de l'Institut des Sciences de la Terre (IST). Monsieur, au delà des responsabilités qui vous sont attribuées, vous avez été pour nous un support indispensable durant toute notre formation d'Ingénieur Géologue.

A travers vous j'adresse mes sincères remerciements aux corps professoral et administratif de l'IST.

- A Monsieur Jean René DURAND, Représentant de l'IRD au Sénégal de m'avoir accueilli dans son Institut.

- A mon directeur de mémoire, Monsieur DIOME F. de m'avoir confié ce travail. Cher professeur votre sens de l'orientation et votre religiosité font de vous un encadreur idéal.

- Au responsable scientifique de ce travail à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Monsieur HAMMECKER C. (Chargé de recherche), de m'avoir accepté, orienté et supporté dans la réalisation de ce document.

- A Monsieur LARVY DELARIVIERE J., de m'avoir initié aux travaux de laboratoire dans une ambiance familiale exemplaire.

- A Monsieur BARBIERO L. (Chargé de recherche), pour son apport et pour son humour.

- Au responsable du laboratoire de chimie de l'IRD Hann, Monsieur CIORNEI G. pour son apport dans la réalisation de ce travail. A travers vous, j'adresse mes sincères remerciement à tout le personnel du Laboratoire de Chimie.

- Au Professeur SARR O. du Département de Chimie (UCAD), pour son abord facile et d'avoir accepté de siéger dans la commission d'examen de ce travail malgré ses multiples sollicitations académiques.

- A notre professeur Monsieur FAYE S. enseignant du Département de Géologie (UCAD) pour ses enseignement et pour avoir accepté de juger ce travail.

- A Monsieur MAEGHT J.L. et Monsieur SAMBA S. pour leur assistance et leur très grande disponibilité.

Je saisis également cette occasion pour remercier Monsieur Augustin D. (Responsable de la bibliothèque Pédologie), Badian, Codou, Faye, Sankaré, Wade, tous les collègues stagiaires en Géophysique et les collègues Ingénieurs IST.

C'est aussi le moment opportun pour moi d'adresser mes remerciements aux familles:

- ABDOULAYE (BCEAO Niamey)
- AMADOU CHEFOU (Dakar)
- AMADOU N'DIAYE (Dakar)
- DIAWARA (Dakar)
- MOUSSA HASSANE (Dakar)
- MOUMOUNI IDRISSE (Niamey)
- RABANI (Dakar)
- SABIYOU GAYA (Dakar).

J'adresse mes remerciements à tous les camarades étudiants Nigériens à Dakar.

Résumé

L'étude expérimentale de l'adsorption cationique par les surfaces réactives des sols de Donaye IT1 et de Guia 4 a été réalisée sur six échantillons, trois de chacun des sols, prélevés à des profondeurs différentes.

Ces sols sont caractérisés par une capacité d'échange cationique composée essentiellement de cations divalents. Ce sont des sols argileux à très faible teneur en matière organique.

Les échanges cationiques ont été effectués sur des prélèvements de cinq grammes de sol avec une solution de chlorure d'ammonium, de calcium, de magnésium, de sodium et de potassium en proportion variée selon les points des isothermes. La concentration totale est constante et égale à 0.1mol/l. Au total 468 échanges ont été effectués, à la température moyenne de 25°C. Les solutions résultantes ont été analysées en milieu pH neutre tamponné. Les isothermes d'échange, ont été déterminés par couple de cations.

Les coefficients de sélectivité ont été déterminés par l'expression de Gaines et Thomas. Leur variation en fonction des proportions relatives des cations en compétition, en solution et sur le complexe adsorbant, a été simulée par l'usage du modèle puissance ($y=ax^b$). Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus par l'expression de Gapon.

La variation des coefficients de sélectivité en fonction de la profondeur est très faible à nulle, témoignant une répartition homogène de la fraction argileuse dans la tranche de prélèvement des échantillons.

Les deux sols présentent plus d'affinité pour le potassium et l'ammonium que pour les cations divalents Ca^{2+} et Mg^{2+} . Ces derniers sont préférés au sodium. Ce comportement des complexes réactifs est bénéfique pour les plantes et contribue également à l'amélioration de la structure des sols. Mais l'accumulation de sodium (formes ionique et/ou minérale) constitue une menace agronomique et pédologique.

Mots clés: activité, alcalinisation, coefficient d'activité, coefficient de sélectivité, complexe réactif, énergie libre de réaction, équivalent, force ionique, modélisation, molarité, molarité, salinisation, sodisation .

Table des matières

RESUME

	Pages
AVANT PROPOS.....	1
INTRODUCTION.....	3
MATERIEL ET METHODES.....	4
I – MATERIEL.....	7
I .1 – Présentation de la zone d’étude (fig 1 et 2).....	7
I .2 – Eau d’irrigation et alcalinisation/sodisation des sols.....	7
I .3 – Origine et caractéristiques des sols.....	9
I .3.1– Origine	9
I .3.2 – Propriétés physiques et chimiques	9
I .3 .2.1 – Donaye IT1 (Fig 2)	10
I .3 .2.2 – Guia 4 (Fig 2)	11
I .4 – Seuils critiques de la sodicité des sols.	11
I .5 – Salinité et sodicité des sols : conséquences sur les cultures.....	14
II – METHODES.....	15
II .1 – Activité et coefficient d’activité ionique.....	15
II .2 – Force ionique d’une solution et coefficient d’activité.....	16
II .3 – Loi d'action de masse des échanges cationiques: l'équation de Kerr's (Kim, 1982).....	17
II .4 – Expressions du coefficient de sélectivité	18
II .4 .1– Le coefficient de sélectivité de Gapon (Kim, 1982).....	18
II .4.2 – Le coefficient de sélectivité de Vanselow (Kim, 1982).....	20
II .4.3 – Le coefficient de sélectivité de Thabet et Sélim (1996).....	21
II .4.4 – Le coefficient de sélectivité de Gaines et Tomas.....	22
II .5 – Modélisation de la variation du coefficient de sélectivité.....	25

II .5.1 – Propriétés des réactions d'échange.....	25
II .5.2 – Le modèle appliqué.....	25

ETUDE EXPERIMENTALE.....29

III – Protocole expérimental.....30

III .1– Forces ioniques des solutions d'échange et coefficients d'activité des ions.....	30
--	----

III .2 – Echanges cationiques entre sol et solution.....	31
--	----

III .3 – Détermination des isothermes d'échange.....	33
--	----

III .4 – Bases échangeables et capacité d'échange cationique.....	33
---	----

IV– Résultats et discussion33

IV.1. Les isothermes d'échange.....	34
-------------------------------------	----

IV.1.1– Les isotherme d'échange M-Ca (M = Mg, K, Na ou NH ₄).....	34
---	----

a) - Echange Mg-Ca	34
--------------------------	----

b) - Echange K-Ca	36
-------------------------	----

c) - Echanges Na-Ca	38
---------------------------	----

d) - Echange NH ₄ -Ca	40
--	----

IV.1.2 – Les isothermes d'échange M-Mg (M = K, Na ou NH ₄).....	42
---	----

a) - Echange K-Mg	42
-------------------------	----

b) - Echange Na-Mg	44
--------------------------	----

c) - Echange NH ₄ -Mg.....	46
---------------------------------------	----

IV.1.3 – Les isothermes d'échange M-K (M = Na ou NH ₄).....	48
---	----

a) - Echange Na-K.....	48
------------------------	----

b) - Echange NH ₄ -K.....	50
--------------------------------------	----

IV.1.4 – Les isotherme d'échange Na-NH ₄	52
---	----

IV.2 – Discussion.....	54
------------------------	----

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....59

V – Conclusion générale.....	60
-------------------------------------	-----------

VI – Perspectives.	61
--------------------------------	-----------

ANNEXES: 1) Figures et tableau dans le texte - 2) Sels utilisés - 3) Résultats en mg/l ; activités et fractions équivalents - 4) Isothermes bruts.

AVANT PROPOS

En Afrique de l'Ouest, l'introduction de la culture irriguée dans le système de production agricole est soumise aux contraintes climatiques et aux pratiques agricoles inadéquates. Près de 200 000 ha de sols du Burkina Faso, du Cameroun, du Mali, de la Mauritanie, du Niger, du Nigeria et du Sénégal sont sous contrôle irrigué (Boivin et al., 1998). Les propriétés physiques et chimiques des sols se dégradent soit par accumulation de sels solubles (salinisation) ou de bases faibles (alcalinisation) dans leurs profils, soit par enrichissement des complexes adsorbant en sodium échangeable (sodisation).

Au Sénégal, des institutions comme l'I.R.D. (Institut de Recherche pour le Développement), l'I.S.R.A. (Institut Sénégalais de Recherche Agronomique), l'O.M.V.S. (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) et l'A.D.R.A.O. (Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest) suivent de près l'impact de l'irrigation sur les sols de la vallée du fleuve Sénégal. De nombreuses études ont été effectuées et un premier bilan a été établi (Boivin et al., 1993). Des axes de recherche ont été dégagés et font l'objet de plusieurs études (les études pédologiques menées par l'I.R.D. ex-O.R.S.T.O.M.) dont les résultats sont périodiquement synthétisés par des chercheurs locaux, et d'ailleurs.

La dégradation des propriétés des sols par salinisation est bien diagnostiquée, dans le delta du fleuve, et la simulation numérique des différentes méthodes de gestion de l'eau propose déjà deux techniques agricoles pour résoudre ce problème (Hammecker et al., 1998). Dans le reste de la vallée les trois mécanismes de dégradation des propriétés physiques et chimiques demeurent inquiétants. Pour Ilou (1995), la sodisation serait la dégradation qui affectera ces sols le plus rapidement du fait de l'accumulation du sodium sur le complexe d'échange suite à la précipitation de la calcite par voie alcaline. Le diagnostic du stock de carbonates, par évaluation, (Schiess, 1995) montre une alcalinisation des sols irrigués (avec ou sans drainage) par accumulation de carbonates et augmentation du pH. D'après les travaux de Guignard (1996) sur l'évolution structurale des sols en relation avec l'évolution du complexe d'échange, l'eau du fleuve Sénégal présente moins de risque d'alcalinisation comparativement à celles du Lac Tchad et du fleuve Niger ; et l'évolution de sa composition chimique par concentration dépend également du contrôle du magnésium. Meyer (1997) spécifie

l'alcalinisation des sols dans la vallée amont, due à l'évolution alcaline des eaux d'irrigation, tandis que dans la région de Podor c'est plutôt la voie saline qui s'impose. Mais cette tendance peut être modifiée dans le futur sous l'influence des barrages (*Diana 1986 et Manantali 1990*).

Dans un cas comme dans l'autre, aucune évidence d'alcalinisation véritable n'est observée sur les sols de la moyenne vallée (Hammecker et al., 1998). Cependant le risque d'alcalinisation des sols demeure et pourrait se prononcer si aucune mesure conservatoire n'est prise. Le risque est plus important sous irrigation inondée sans drainage (Loyer, 1989). Ces inquiétudes sont surtout fondées sur l'évolution de la composition chimique des eaux d'irrigation en corrélation avec les pratiques agricoles inadéquates, sous des conditions climatiques et hydrogéologiques associées à la nature argileuse des sols (perméabilité très faible à nulle). L'application des techniques empiriques de réhabilitation des sols à alcali, amendements calciques par apport de calcium ou par dissolution de la calcite, ne peut apporter des solutions efficaces. En plus, selon la Banque Mondiale, il est 10 à 50 fois moins coûteux d'entretenir les sols que de les réhabiliter après dégradation (Brabant et al., 1997).

INTRODUCTION

Dans l'office du fleuve Niger au Mali, la dégradation des propriétés physiques et chimiques des sols par alcalinisation et sodisation est bien identifiée (N'Diaye M. K., 1987; Bertrand R. et al., 1993). La situation est analogue dans les périmètres irrigués de la vallée du fleuve Niger au Niger (Barbiero L., 1995; Marlet S., 1996).

Dans la moyenne vallée du fleuve sénégal, l'irrigation est encore récente par rapport à celles des sols de l'office du Niger au Mali et au Niger. L'essai de prédiction par un suivi de terrain de six ans par le Laboratoire de Pédologie de l'IRD n'a identifié aucun signe d'alcalinisation ou de sodisation mais simplement une accumulation de carbonates (Schiess S., 1995). Il faut donc passer par la modélisation numérique des transferts couplés avec la géochimie qui prend en compte la porosité du sol, la composition chimique de l'eau d'irrigation et celle de la nappe superficielle et les coefficients de sélectivité du sol. Ce coefficient est la grandeur qui détermine les règles de priorité d'adsorption des cations par couple. Sa connaissance permet de déterminer des constantes thermodynamiques, expérimentales, qui matérialisent l'équilibre entre le sol et l'eau d'irrigation.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail : Détermination par méthode expérimentale des coefficients de sélectivité des sols des périmètres irrigués villageois de Donaye IT1 et Guia 4. Ces sols sont sous irrigation inondée sans drainage. Le risque d'alcalinisation et de sodisation est donc maximisé.

Notre objectif est de déterminer expérimentalement les coefficients de sélectivité des deux sols, par la mesure des isothermes d'échange Mg-Ca, Na-Ca, K-Ca, NH₄-Ca, Na-Mg, K-Mg, NH₄-Mg, Na-K, NH₄-K, NH₄-Na. L'étude de l'adsorption de l'ammonium, rarement évoquée dans la littérature, est motivée par la modification importante de la qualité de la solution du sol suite aux apports d'urée dans les parcelles.

Ainsi, ce travail comportera trois parties :

- la première, **matériel et méthodes**, dans laquelle seront localisés et présentés les sols objet d'étude; la problématique sera détaillée par analyse comparative avant de définir les méthodes d'étude appliquées ;
- la seconde, **l'étude expérimentale des isothermes échange sur des échantillons de sols de Donaye IT1 et de Guia 4**, où seront présentés - décrits et discutés les résultats expérimentaux.
- en fin, la conclusion générale et les recommandations.

MATERIEL ET METHODES

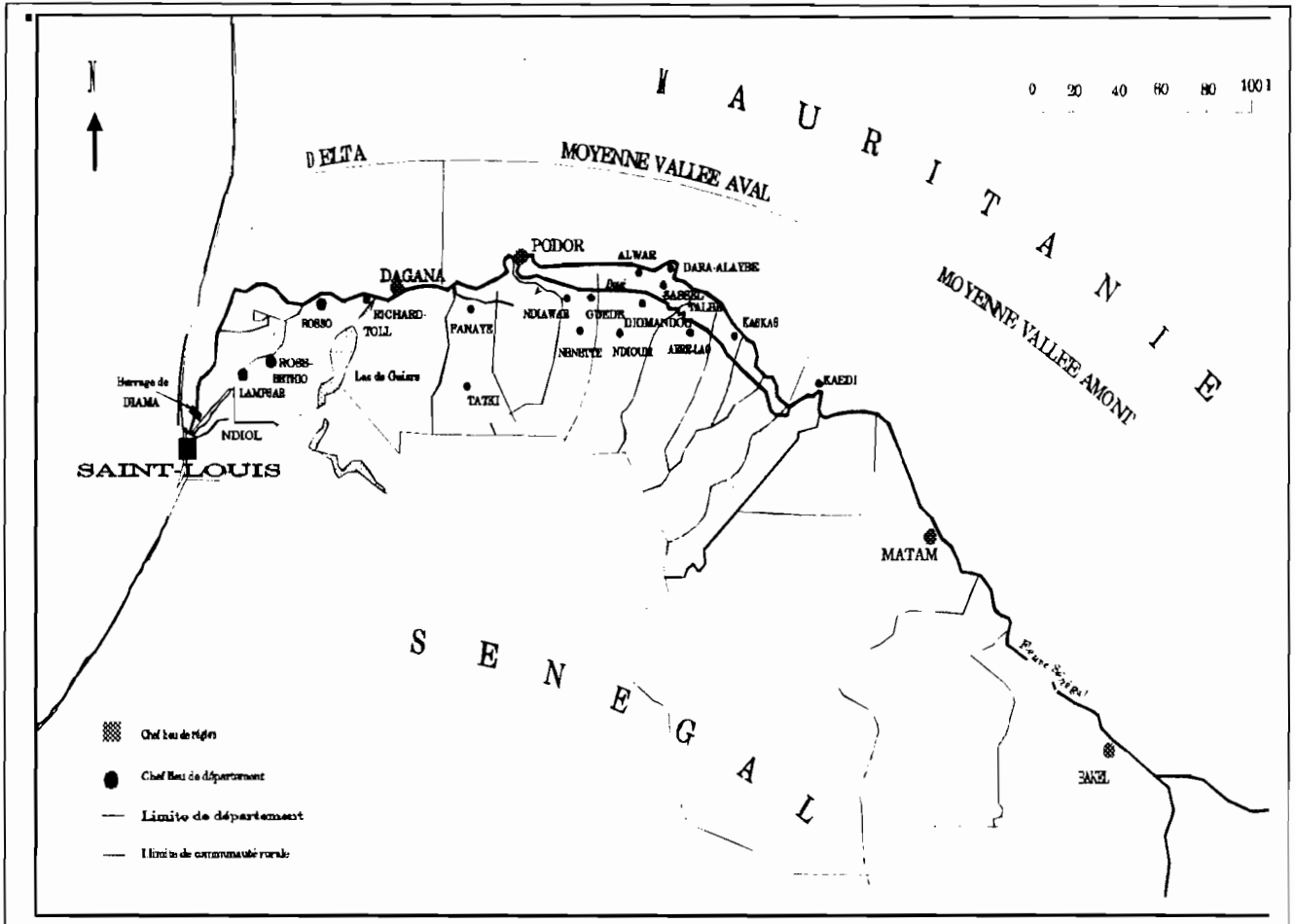


Figure 1: Carte de la vallée du fleuve Sénégal

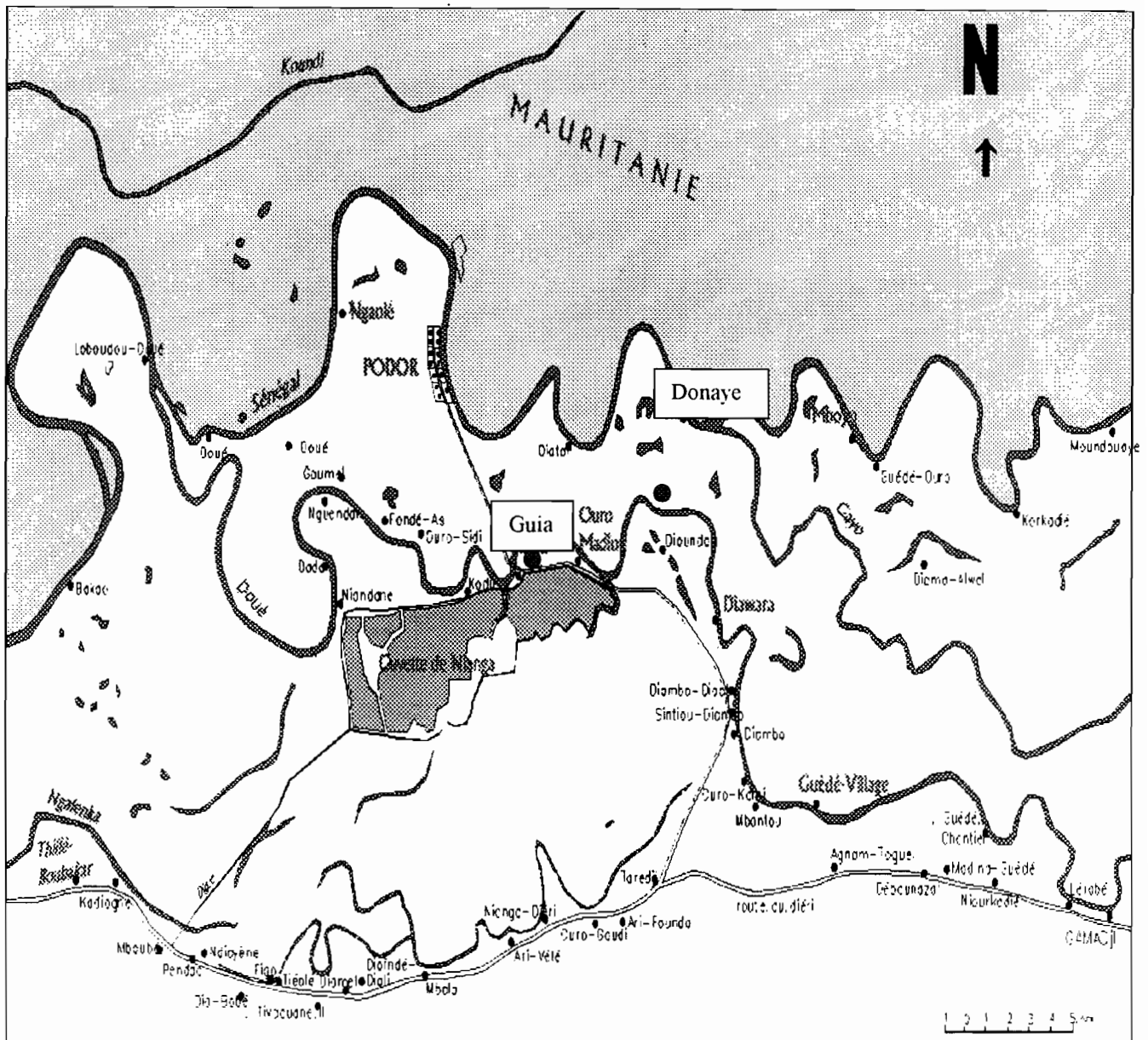


Figure 2: Carte de la région de Podor (ORSTOM, 1995).

Localisation des sites d'échantillonnage

- sites de prélèvement des sols (Donaye IT1 et Guia 4)
- villages Donaye et Guia

I.— MATERIEL

I.1.— Présentation de la zone d'étude (fig 1 et 2)

Les sols sur lesquels porte cette étude ont été prélevés dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, région de Podor. Il s'agit de sols de Donaye IT1 et de Guia 4 (fig 2).

La région est caractérisée par un climat chaud et sec avec des températures variant entre 20 et 40 °C et une évapotranspiration de 5.5 à 8.5 mm / j , soit plus de 2000 mm/an; la pluviométrie annuelle est faible et inefficace pour l'agriculture (une pluie sur deux est inférieure à 5 mm) (Zante, 1994; Boivin et al., 1998). Le réseau hydrographique de la région est composé du fleuve Sénégal et de son défluent.

L'agriculture irriguée sous ces conditions de forte évapotranspiration et d'énergie lumineuse abondante (fort potentiel de production) offre une possibilité de résorption des problèmes liés au déficit céréalier. Elle pourrait donc améliorer l'économie familiale des populations rurales et même urbaines.

Mais ce bilan évaporatoire très fort, associé aux effets de remontée des nappes phréatiques, conduit à une concentration de sels dans les sols sous irrigation inondée sans drainage. Il en résulte d'une part un processus de salinisation et d'autre part une alcalinisation/sodisation des sols dont l'ampleur dépendra de l'évolution de la composition chimique des eaux d'irrigation.

I.2.— Eau d'irrigation et alcalinisation/sodisation des sols

Pendant longtemps, les risques de salinisation et d'alcalinisation des sols sous influence des eaux d'irrigation étaient appréciés par l'usage du diagramme de l'Université de Riverside (Richards, 1954 *in* Guignard, 1996). Malheureusement cette méthode ne tient pas compte de l'évolution de la composition chimique des eaux lorsque celles-ci se concentrent (Vallès et al., 1989). L'appréciation de la qualité des eaux par l'usage du concept d'alcalinité résiduelle a permis de définir cinq familles chimiques d'eau (Vallès et al., 1991) (Tableau I).

Tableau I: les cinq voies d'évolution chimique des eaux d'irrigation par concentration (Vallès et al., 1991).

Alc. < 0 groupe acide	Alc. > 0			
	Alc. > Ca groupe alcalin		Alc. < Ca groupe salin	
	Na > SO ₄	Na < SO ₄	Ca < SO ₄ + Alc	Ca > SO ₄ + Alc
Voie à alc. négative	Voie alcaline sodique	Voie alcaline sulfatée	Voie saline sulfatée	Voie saline calciue

Une analyse comparative de l'évolution chimique des eaux du Doué (défluent du fleuve Sénégal), du fleuve Niger et du Lac Tchad montre que ces eaux, en se concentrant, empruntent la voie alcaline sodique (Tableaux I et II). Les alcalinités résiduelles sont respectivement de 1.2 pour le Lac Tchad ; 0.29 pour le fleuve Niger et 0.23 méq/L pour le Doué (Tableaux II).

La différence des alcalinités résiduelles calcites des eaux du fleuve Niger et celles du Doué est négligeable. L'excédent de carbonates de l'alcalinité induite par campagne d'irrigation serait de 4000 éq/ha, soit 120Kg de CO₃²⁻ (Boivin et al., 1994).

Or, après 50 ans d'irrigation des sols de petites levées (hydromorphes et peu évolués) de l'Office du Niger (au Mali), des pH supérieurs ou égal à 10 sont localement enregistrés, des rapports Na/T supérieurs à 50% et une augmentation de l'indice d'instabilité d'environ 50% sont également relevés. Entre 30 et 50% des surfaces irriguées sont affectées (Bertand, 1985 ; N'Diaye, 1987).

Tableau II : composition chimique des eaux du Doué, du Lac Tchad et du fleuve Niger.

	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Cl méq/l	SO ₄ méq/l	Alc. méq/l	Alc. Rés cal. méq/l	pH	SO ₄ + alc méq/l	Voies	Sources
Lac Tchad (Tchad)	0.80	0.60	0.20	0.60	trace	0.10	2.00	1.20	7.3	2.10	alcaline sodique	Chevery 1974
Fleuve Niger(Mali)	0.13	0.12	0.03	0.13	0.01	0.01	0.42	0.29	6.9	0.43	alcaline sodique	N'Diaye 1987
Doué (Sénégal)	0.34	0.26	0.07	0.20	0.25	0.05	0.57	0.23	6.6	0.62	alcaline sodique	Ihou 1995

Ce triste constat sur les sols de l'office du fleuve Niger au Mali permet de conclure partiellement que, d'un point de vue purement géochimique, l'alcalinisation des sols irrigués de la moyenne vallée est inévitable si des dispositions pratiques nécessaires ne sont pas prises. Sa vitesse dépendra surtout de la résistance du sol pour retarder le processus.

I.3.— Origine et caractéristiques des sols.

I.3.1.— Origine.

Les sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal se sont développés sur des sédiments alluviaux qui proviennent essentiellement des dunes de sables qui bordaient la vallée à l'époque (Michel., 1973).

La géomorphologie actuelle est le résultat de deux événements majeurs:

- les alternances de périodes sèches et de périodes humides durant le Quaternaire ancien et moyen. Ces alternances ont permis l'élargissement du lit du fleuve, favorisé sa ramification et accru les apports sédimentaires dans toute la vallée. Elles ont également activé la dégradation physique (pluviométrie très irrégulière mais à pluies fortes et brutales) et chimique (altération chimique sous climat humide) des substratum métamorphique et cristalline.
- la transgression marine Nouakchottienne (5500 ans BP) qui a intéressé le delta, la basse vallée et la moyenne vallée avale (jusqu'à Boghé); le recul de la mer a permis la formation de lagunes et le piégeage des sels marins dans les sédiments.

Cette géomorphologie se compose de deux principales unités :

- les cuvettes de décantation, caractérisées par des sédiments argileux à argiles gonflantes dominantes: 60% de smectite et montmorillonite, 30% de kaolinite, 5% de d'illite et 5% de chlorite;
- les levées fluviales (et leurs raccordements) à texture sablo-argilo-limoneuse et leurs figures de remaniement (les petites levées) à faciès sableux (Boivin et al., 1993).

Cette origine va déterminer, pour l'essentiel, les propriétés des sols.

I.3.2.— Caractéristiques physiques et chimiques des sols.

L'Atelier O.R.S.T.O.M. (actuel I.R.D.) – I.S.R.A. tenu à Saint-Louis du 19 au 21 octobre 1993, a fait une synthèse sur les sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal;

synthèse qui a été complétée par Boivin et al., (1998) et qui a permis de distinguer deux types de sols :

- les sols argileux (plus de 45% d'argiles) représentent environ 75% des superficies irriguées dans la moyenne vallée aval. Les argiles gonflantes sont prédominantes, la conductivité hydraulique (CH) à la saturation des sols, est de l'ordre de 10^{-8} m.s⁻¹; la capacité d'échange cationique (CEC) est en moyenne de 25 méq/100g. Ces sols sont connus sous le vocable de Holaldés (55-90% d'argiles);
- et les sols sableux filtrants et non hydromorphes qui sont rares. Ils sont caractérisés par une CH à la saturation d'environ 10^{-5} m.s⁻¹; une CEC de l'ordre de 12méq/100g. Ils sont connus sous le terme de Fondés (30-40% de sables).

Pour chacun de ces sols, le complexe adsorbant est essentiellement composé de cations divalents (Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺). En plus ce sont des sols gypseux qui disposent d'une réserve d'acidité d'échange. La conductivité électrique (CE) moyenne sur l'ensemble des périmètres irrigués est de l'ordre de 300 mS.m⁻¹

I.3.2.1.— Donaye IT1 (Fig 2)

Donaye IT1 appartient à un ensemble de quatre aménagements intermédiaires créés à Donaye entre 1985 et 1988 dans le cadre de la coopération italienne et d'un programme de l'O.M.V.S. (Zante, 1994). Chaque IT a une taille de 50 ha.

C'est l'eau du Doué qui est utilisée.

La gestion est assurée par des groupements de production ayant un statut de G.I.E. (Groupement d'Intérêt Economique).

Donaye IT1 est un sol neutre (pH = 6.9), de salinité relativement modérée (EC = 0.19 mS.cm⁻¹) et de texture essentiellement argileuse (65.5 % d'argile, 29.4 % de limon et 8.9% de sable). L'analyse chimique montre une abondance des cations divalents sur le complexe d'échange (13.67 et 9.07 méq/100g respectivement de Ca et Mg) et une proportion non négligeable de Na (1.71méq/100g) (Ilou, 1995). Ces données correspondent à celles d'autres travaux réalisés sur le même sol, à l'exception du Na (Tableau III).

Tableau III: Bases échangeables et capacité d'échange cationique de Donaye IT1
(Fabienne travaux en cours)

Profondeur (cm)	Ca (még/100g)	Mg (még/100g)	Na (még/100g)	CEC (még/100g)
15	13	9.98	0.34	23.30
35	15	12.12	0.66	25.80
50	13	11.70	0.78	25.50

I.3.2.2.— Guia 4 (Fig 2)

Guia 4 appartient à un ensemble d'aménagements financés par le F.E.D. (Fond Européen pour le Développement). D'une taille de 20 ha, l'irrigation de ce sol est assurée par l'eau du Doué (défluent du fleuve Sénégal). Il est moins argileux que Donaye IT1 (45%). C'est un Fondé-hollaldé (travaux de Poussin et al., en cours).

Les sols argileux sont dominants dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Leur irrigation est encore récente (moins de vingt ans) par rapport à ceux de l'Office du fleuve Niger au Mali (cinquantaine d'année).

Ces sols disposent d'une part, d'une réserve de gypse et présentent une acidité d'échange susceptibles de tamponner l'excédent de carbonates, et d'autre part ont une forte capacité d'échange cationique composée essentiellement de calcium et de magnésium. Il s'agit là d'un potentiel de résistance à l'alcalinisation qui ne peut être que temporaire, sous les techniques agricoles actuelles. Son épuisement entraînera une accélération du mécanisme d'alcalinisation/sodisation.

I.4.— Seuils critiques de la sodicité des sols.

L'accumulation de sodium sur le complexe adsorbant du sol conduit à une instabilité de la structure du sol par dispersion des argiles et floculation de la matière organique. Le sol devient de plus en plus compact. Sa perméabilité et sa conductivité hydraulique diminuent.

L'ampleur de la dégradation structurale dépend en particulier de la nature et des proportions des argiles qui généralement sont classées par ordre de capacité de gonflement décroissante: vermiculite > montmorillonite > beidellite > illite > kaolinite (Marlet, 1996).

Dans l'appréciation du degré de sodicité des sols, l'ESP (Pourcentage de Sodium Echangeable) est le paramètre le plus important et le plus fréquemment utilisé. Il est défini par :

$$ESP = \frac{Na}{CEC} 100 \quad (1)$$

Où : Na et CEC représentent respectivement la proportion de sodium échangeable et la capacité d'échange cationique du complexe adsorbant;

ou

$$ESP = \frac{Na}{Ca + Mg + K + Na + Al} 100 \quad (2)$$

avec (Ca + Mg + Na + K + Al) : somme des cations échangeables.

D'autres paramètres comme le SAR (Sodium Adsorption Ratio) sont également utilisés pour établir une relation entre la phase solide et la qualité de la solution du sol:

$$SAR = \frac{(Na)}{\sqrt{(Ca + Mg)/2}} \quad (3)$$

Avec : () = concentration en mmol/L

Ainsi, pour USSL Staff (1954) :

$$ESP = 1.475 SAR / (1 + 0.0147 SAR) \quad (4)$$

Rengazamy et al., (1984) établissent la même relation à partir d'extrait de pâte saturée et obtiennent:

$$ESP = 1.95 SAR + 1.8 \quad (5)$$

La différence entre les relations (4) et (5) est en partie due aux propriétés des sols utilisés.

Les relations (1), (2), (4) et (5) montrent qu'il est difficile d'obtenir des valeurs identiques de l'ESP sur des sols aux propriétés distinctes.

Le tableau IV donne quelques valeurs critiques de l'ESP selon des auteurs différents. Une analyse de ce tableau montre que toute détermination d'un seuil critique unanime de la sodisation des sols est arbitraire et complique d'avantage la compréhension de ses effets sur la structure des sols.

Il est donc judicieux, en plus des paramètres pris en compte dans le tableau ci-après, d'en considérer d'autres comme le SAR et la CET (concentration totale d'électrolytes) de la solution du sol, la conductivité hydraulique (CH), la nature minéralogique du complexe adsorbant, les conditions climatiques (aride) et hydrogéologiques (nappes phréatiques moins profonde). Ainsi, chaque seuil serait spécifique à un sol donné sous des conditions naturelles précisées.

Tableau IV : seuils critiques de l'ESP des sols.

pH	CE dS/m	Texture	ESP %	Source
> 8.5	--	--	> 15	Kelley, 1951 (1)
= 8.5 à 10	< 4	--	> 15	USS Staff 1954 (2)
-- --	-- --	Fine grossière	= 10 = 20	Green et al, 1978 (3)
> 8.3		--	> 15*	Gupta et Abrol 1980
-- -- --	-- -- --	-- -- --	> 5 > 10 > 50	Meyer,** 1997

(): d'après Malcom E. et Sumner (1993)

* : avec carbonates solubles. $\text{Na} \quad [\text{Cl} + \text{SO}_4] \quad 1$

** : valeurs correspondant respectivement par ordre croissant aux sols sensibles, moyens et résistants

I.5.— Salinité et sodicité des sols : conséquences sur les cultures.

La tolérance des plantes au pourcentage de sodium échangeable dépend de leur aptitude à croître dans des sols aux propriétés physiques défavorables (Tableau V).

D'après les travaux de Person et Benstein (Dautrebande-Gaspar, 1982), pour des ESP supérieurs à 20%, sous des conditions non salines, des valeurs nutritionnelles de Ca et Mg de l'ordre du mg/L sont insuffisantes. Sous des conditions saline ($CE > 4$ mmhos/cm) ce même ESP est associé à des valeurs nutritionnelles de Ca et Mg supérieures à 2méc/L et l'influence toxique du sodium diminue ou même disparaît. Les conditions défavorables des sols s'améliorent en raison de l'effet floculant de la salinité et la croissance des plantes est d'avantage influencée par la salinité que la sodicité.

Le tableau V montre qu'il est difficile de dissocier la part d'influence de la sodicité sur les plantes due à la détérioration de la structure des sols et celle liée à la toxicité du sodium. En

Tableau V : tolérance de quelques plantes au pourcentage de sodium échangeable (Dautrebande-Gaspar, 1982).

Valeurs de ESP affectant la croissance des culture	Plantes	Effet sur les cultures in situ.
10 - 20	Haricots (sensibles)	Réduction de la croissance malgré une bonne structure du sol.
20 - 40	Riz (modérément tolérant)	Réduction de la croissance par des facteurs de nutrition et de défectuosité du sol.
40 - 60	Tomate (tolérant)	Réduction de la croissance due généralement à une structure défectueuse du sol.

plus les phénomènes d'intoxication des plantes ne sont pas spécifiques aux seuls ions sodium ; d'autre cations peuvent y être impliqués. De fortes concentrations de calcium dans

les solutions de sol sont préjudiciables à de nombreuses plantes comme le haricot; de même, l'accumulation d'ions magnésium peut être toxique pour certaines plantes (Dautrebande-Gaspar, 1982).

Dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, le cumul des concentrations en calcium et en magnésium des eaux d'irrigation est en moyenne 1.4 méq/l (tableau II); cette valeur nutritionnelle serait insuffisante sous des conditions salines.

II.— METHODES

De nombreuses substances solides, en présence d'une solution aqueuse, échangent certains de leurs constituants avec des espèces similaires de la solution sans modification de leur structure originale. On parle d'échange cationique lorsque ces espèces sont des cations.

Les substances présentant cette propriété sont généralement constituées par un squelette chargé négativement, dont les sites négatifs sont occupés par des cations (Dautrebande-Gaspar, 1982).

Les minéraux argileux, par conséquent les sols argileux objets de cette étude, en constituent un exemple naturel. La capacité d'échange cationique est le paramètre généralement utilisé pour quantifier la garniture cationique de ce complexe argileux. Le coefficient de sélectivité quant à lui, permet d'évaluer l'évolution quantitative des cations, par paire, en fonction de l'affinité que présente ce complexe pour l'un et l'autre. Plusieurs expressions de ce coefficient sont proposées et appliquées à des études expérimentales selon leur conformité aux conditions thermodynamiques des réactions d'échange. Pour la bonne compréhension de ces différentes formulations, il convient de rappeler certaines notions avant de les exposer.

II.1.— Activité et Coefficient d'activité ionique

Dans une solution aqueuse, du fait des interactions ioniques (répulsion et attraction), seule une fraction de la concentration molaire ou molale d'une espèce considérée est efficace (Mahan, 1977). L'activité d'une espèce minérale ou ionique est une mesure de cette concentration efficace.

Le coefficient d'activité est le rapport entre l'activité et la molalité de l'espèce ionique:

$$\frac{a_i}{m_i} = \gamma_i \quad (1)$$

où : a_i , m_i et γ_i représentent respectivement l'activité, la molalité et le coefficient d'activité de l'ion i .

C'est donc une mesure de l'efficacité avec laquelle cette espèce influence l'équilibre auquel elle participe.

Dans les solutions très diluées, l'activité est très voisine de la concentration molale ou molaire ; les γ_i sont donc très proches de l'unité.

Cependant, pour des solutions de concentration d'environ 0.1M, l'activité et la concentration diffèrent de 10 à 50% selon la concentration de la solution et la charge des ions (Mahan, 1977), les γ_i sont donc différents de l'unité.

Les molalités (m_i) seront déterminées par analyse ; connaissant les coefficients d'activité (γ_i), les activités des ions seront calculées à partir de la formule (1).

II.2.— Force ionique d'une solution et coefficient d'activité

Dans les solutions aqueuses règnent essentiellement deux types de forces : les forces d'interaction coulombiennes, inversement proportionnelles au carré de la distance inter-ionique, et celles faisant intervenir des forces d'attraction de London et des phénomènes de dispersion par polarisation qui sont proportionnelles à la distance à une puissance supérieure à 6 (Marlet, 1996). Ces dernières sont dominantes dans les solutions concentrées.

Les effets combinés des activités des différentes espèces ioniques d'une solution constituent sa force ionique. Elle est exprimée par la relation :

$$I = 0.5 \sum m_i z_i^2 \quad (2)$$

où : m_i et z_i sont respectivement la molalité et la charge de l'espèce ionique i .

La relation entre la force ionique et le coefficient d'activité est donnée par l'équation de Debye – Hückel :

$$\log \gamma_i = - \frac{Az_i I^{1/2}}{1 + r_i B I^{1/2}} \quad (3)$$

où : A et B sont des constantes thermodynamiques et r_i le diamètre effectif de l'ion i (Tableau VI).

Cette loi ne prend en compte que les forces d'interaction ionique à distance. Elle donne des valeurs satisfaisantes des coefficients d'activité pour les solutions très diluées, à force ionique inférieures 0.01 (Vallès, 1991). Pour les solutions relativement peu concentrées, de force ionique inférieure à l'unité, on peut utiliser cette loi étendue aux solutions salines par Lietzke et Stoughton (Made, 1991) pour calculer les coefficients d'activité.

$$\log \gamma_i = - \frac{Az_i I^{1/2}}{1 + r_i B I^{1/2}} + CI \quad (4)$$

$$\gamma_i = 10^{(-Az_i I^{1/2} / (1 + r_i B I^{1/2}) + CI)} \quad (5)$$

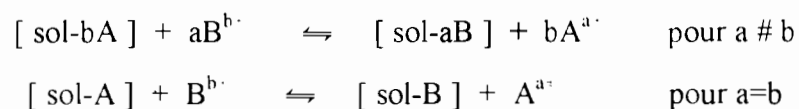
où : C représente l'écart à la loi de Debye – Hückel.

Les coefficients d'activité des ions en solution seront calculés en utilisant la loi étendue aux solutions salines (5).

II.3.— Loi d'action de masse des échanges cationiques: l'équation de Kerr's (Kim, 1982)

Les minéraux argileux ont une structure organisée en feuillets dont les surfaces portent des charges négatives, sites d'échange de cations. Elles offrent en plus une possibilité d'insertion de cations entre les espaces inter-feuillets.

La réaction d'échange entre b moles d'un cation A, de valence a , fixé sur l'échangeur sol et a moles d'un cation B, de valence b , de la solution de contact peut être décrite par:



La constante thermodynamique de l'échange (K_{A-B}) s'écrit alors :

$$K_{A-B} = \frac{(A)^b \{B\}^a}{(B)^a \{A\}^b} \quad (6)$$

$$K_{A-B} = \frac{(A) \{B\}}{(B) \{A\}} \quad (6_{\text{bis}})$$

où : (M) et {M} représentent respectivement les activités des ions en solution (mol/kg de solution) et celles des ions adsorbés (éq /kg de sol).

Plusieurs formulations reliant cette constante thermodynamique et le degré d'adsorption des cations par le complexe actif des sols sont proposées. Le coefficient de sélectivité est l'expression la plus fréquemment utilisée pour apprécier ce degré d'affinité des sols aux cations par couple.

II.4.— Expressions du coefficient de sélectivité

II.4.1.— Le coefficient de sélectivité de Gapon (Kim, 1982)

Gapon considère que les activités des cations adsorbés sont proportionnelles aux équivalents (S_i) des cations en position échangeable. L'équation (6) devient alors :

$$K_{A-B} = \frac{(A \cdot \gamma_A)^b (b \cdot S_B)^a}{(B \cdot \gamma_B)^a (a \cdot S_A)^b} \quad (7)$$

Avec : S_A et S_B les proportions des ions en position échangeable (éq/kg de sol).
A et B = molalité des ions en solution (mol/kg de solution).

Gapon exprime le coefficient de sélectivité en considérant les concentrations molaires des ions en solution et les équivalents des ions en position échangeable :

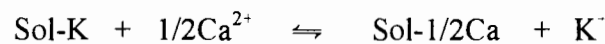
$$K_{A-B} = \left[\frac{A \cdot S_B^{a \cdot b}}{B^{a \cdot b} \cdot S_A} \right]^b \frac{b^a \gamma_A^b}{a^b \gamma_B^a} \quad (8)$$

$$K_{A-B} = K_{G(A-B)} \cdot \frac{b^a \gamma_A^b}{a^b \gamma_B^a} \quad (9)$$

$$K_{G(A-B)} = \frac{A \cdot S_B^{a/b}}{B^{a/b} \cdot S_A} \quad (10)$$

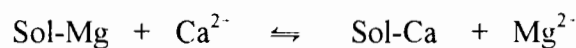
où : $K_{G(A-B)}$ est le coefficient de sélectivité de Gapon ;
 A et B les molarités des espèces A et B en solution (mol/l) ;
 S_A et S_B les équivalentes des espèces A et B adsorbées (ég/kg de sol).

Exemple 3 : (cas où le calcium déplace le potassium)



$$K_{G(K-Ca)} = \frac{K \cdot S_{Ca}^{1/2}}{Ca^{1/2} \cdot S_K}$$

Exemple 4 : (cas où le calcium déplace le magnésium)



$$K_{G(Mg-Ca)} = \frac{Mg \cdot S_{Ca}}{Ca \cdot S_{Mg}}$$

L'étude expérimentale des échanges K-Ca et Mg-Ca de Dolcater, Lotse, Syers et Jackson (1968), sur la montmorillonite et la vermiculite, a permis de comparer l'affinité de ces minéraux pour les cations K, Ca et Mg obtenue à partir des rapports des équivalents ioniques et celle donnée par la formule de Gapon. Les deux formulations sont proportionnelles et les interprétations des résultats aboutissent à la même conclusion. La montmorillonite a plus d'affinité pour le potassium par rapport au magnésium qui est lui même adsorbé davantage

que le calcium. Pour la vermiculite, c'est plutôt le Mg qui est préféré au K et au Ca; la sélectivité du potassium est supérieure à celle du calcium.

L'expression de Gapon est limitée par la concentration de la solution d'échange. Elle donnerait des résultats satisfaisants dans le cas des échanges entre cations de même valence avec des solutions infiniment diluées pour lesquelles les coefficients d'activité des espèces ioniques sont très proches de l'unité. Elle décrit bien la liaison entre les surfaces actives minérale et organique: sam-Ca-sao et sam-Mg-sao.

L'expression améliorée de Gapon sera utilisée à titre comparative:

$$K_{G(A-B)} = \frac{(A).S_B^{a/b}}{(B)^{a/b}.S_A} \quad (10_{bis})$$

II.4.2.— Le coefficient de sélectivité de Vanselow (Kim, 1982)

Vanselow, considère que les activités des cations adsorbés sont proportionnelles aux fractions molaires N_i . La constante thermodynamique peut être exprimée par :

$$K_{A-B} = \frac{(A)^b (S_B / S_A + S_B)^a f_B^a}{(B)^a (S_A / S_A + S_B)^b f_A^b} \quad (11)$$

avec : $N_A = S_A / S_A + S_B$ et $N_B = S_B / S_A + S_B$
 où S_A et S_B sont les proportions de A et de B sur le complexe (mol/kg de sol) et f_{Ni} un coefficient appliqué aux cations en position échangeable.

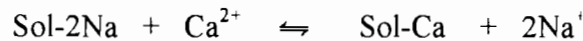
$$K_{A-B} = \frac{(A)^b N_B^a f_B^b}{(B)^a N_A^b f_A^a} \quad (12)$$

$$K_{A-B} = K_{V(A-B)} \frac{f_B^b}{f_A^a} \quad (13)$$

avec, $K_{V(A-B)} = \frac{(A)^b N_B^a}{(B)^a N_A^b} \quad (14)$

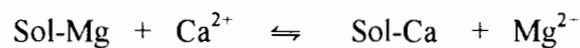
où $K_{V(A,B)}$ est le coefficient de sélectivité de Vanselow.

Exemple1 : (cas où le calcium déplace le sodium)



$$K_{V(\text{Na-Ca})} = \frac{(\text{Na}^+)^2 N_{\text{Ca}}}{(\text{Ca}^{2+}) N_{\text{Na}}^2}$$

Exemple2 : (cas où le calcium déplace le magnésium)



$$K_{V(\text{Na-Ca})} = \frac{(\text{Mg}^{2+}) N_{\text{Ca}}}{(\text{Ca}^{2+}) N_{\text{Mg}}}$$

Sposito et al.(1983) ont appliqué cette expression dans les échanges Na-Ca, Na-Mg et Ca-Mg sur la montmorillonite avec une solution d'échange mixte (0.05mols/l) de MCl et $\text{M}(\text{ClO}_4)_n$; où M représente l'ion alcalin ou alcalino-terreux et n sa valence. Ils notent une préférence du Na au Ca lorsque la fraction équivalente du Na ($S_{\text{Na}}/S_{\text{Na}}+S_{\text{Ca}}$) est comprise entre 0.1 et 0.4 ; au-delà de 0.4, la tendance est inversée, du fait de la forte affinité des complexes adsorbants aux ions CaCl^+ présents dans la solution.

Le Mg est adsorbé de préférence aux Ca et Na

Cette expression du coefficient de sélectivité dépend de la quantification des cations en position échangeable. Elle homogénéise l'adsorption des cations sur le complexe argilo-humique.

II.4.3.— Le coefficient de sélectivité de Thabet et Sélim (1996).

Thabet et Sélim travaillant sur des argiles de Sharkey et des limons silteux de Mahan ont obtenu des résultats satisfaisants des coefficients de sélectivité de ces sols. L'expression utilisée est :

$$K_{A \rightarrow B} = \frac{S_B^a \cdot (A)^a}{S_A^b \cdot (B)^b} \quad (15)$$

$$K_{A \rightarrow B} = \frac{S_B^a \cdot (B)^b}{S_A^b \cdot (A)^a} \quad (16)$$

où : (M) et S_M représentent respectivement les molalités des espèces en solution (mmol/l) et celles des espèces adsorbées exprimées (mol/g).

Pour les deux sols les cations divalents sont adsorbés préférentiellement au cation monovalent (potassium) et ils ont plus d'affinité pour le calcium que pour le magnésium. Mais lorsque la fraction équivalente du calcium est supérieure 0.8, le sol de Mahan a plus d'affinité pour l'adsorption du magnésium; montrant ainsi une dépendance de la sélectivité au degré de saturation du complexe du sol.

Cette formulation n'est pas satisfaisante au point de vue thermodynamique car basée sur les molalités des espèces ioniques en solution et non sur leurs activités respectives. Elle ne donne des résultats satisfaisants que dans le cas des échanges avec des solutions très diluées, comme dans l'étude de Thabet et Sélim où les concentrations totales des médiums d'échange étaient 0.01 et 0.05 mol/l.

II.4.4.— Le coefficient de sélectivité de Gaines et Tomas

Gaines et Tomas proposent une expression plus satisfaisante dans laquelle les limites d'application des formulations précédentes sont négligeables. Ils expriment le coefficient de sélectivité des sols en fonction des activités (M) des espèces ioniques de la solution et des fractions équivalentes E_M des espèces adsorbées :

$$K_{A-B} = \frac{(A)^b \cdot E_B^a \cdot f_B^a}{(B)^a \cdot E_A^b \cdot f_A^b} \tag{17}$$

$$K_{A-B} = K_{GT(A-B)} \frac{f_B^a}{f_A^b} \tag{18}$$

$$K_{GT(A-B)} = \frac{(A)^b \cdot E_B^a}{(B)^a \cdot E_A^b} \tag{19}$$

avec ; $E_A = S_A / S_A + S_B$; $E_B = S_B / S_A + S_B$ et f_M = coefficient appliqué aux cations en position échangeables;

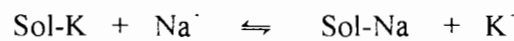
où S_A et S_B sont en éq/kg de sol.

Exemple 4 : (cas où le calcium déplace le magnésium)



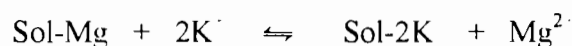
$$K_{GT(\text{Mg-Ca})} = \frac{(\text{Mg}) E_{Ca}}{(\text{Ca}) E_{Mg}}$$

Exemple 5 : (cas où le sodium déplace le potassium)



$$K_{GT(\text{K-Na})} = \frac{(\text{K}) E_{Na}}{(\text{Na}) E_K}$$

Exemple 6 : (cas où le potassium déplace le magnésium)



$$K_{GT(Mg-K)} = \frac{(Mg) E_K^2}{(K)^2 E_{Mg}}$$

Leij et Dane (1990) ont expérimenté cette formulation dans la détermination des isothermes d'échange K-Ca, K-Na et Na-Ca sur des sols sablo-argileux en utilisant comme médium d'échange, une solution de MBr_n (avec $M = K, Ca$ ou Na de valence n) de concentration totale 0.1mol/l. Les résultats obtenus montrent une affinité des deux sols pour l'adsorption des cations monovalents par rapport au calcium et une préférence du potassium au sodium. Seuls les valeurs de K_{A-B} dans l'échange K-Na sont égales à celles d'autres études antérieures.

Dans le cas des échanges homovalents, les coefficients d'activité des ions sont sensiblement égaux; leur rapport est donc très proche de un : les fractions molaire et équivalent sont égales. Les quatre formulations (9), (14), (17) et (20) sont donc analogues et leur application ne dépend que de la concentration du médium d'échange.

Par contre dans le cas des échanges hétérovalents, les coefficients d'activités des deux cations en compétition peuvent être très différents, par conséquent leurs activités respectives seront largement différentes. En plus les fractions équivalentes sont inférieures aux fractions molaires. Les formulations basées sur les fractions molaires des cations en position échangeable sont différentes de celles exprimées en fonction des fractions équivalentes mais varient dans le même sens:

$$1 \text{ équivalent de } A^+ = 1 \text{ moles de } A^+$$

$$1 \text{ équivalent de } B^{2+} = \frac{1}{2} \text{ moles de } B^{2+}$$

$$\text{la fraction équivalente } E_{A^+} = S_{A^+} / S_{A^+} + S_{B^{2+}}$$

$$\text{la fraction molaire } N_{A^+} = M_{A^+} / M_{A^+} + M_{B^{2+}}$$

$$\text{la relation entre } E_{A^+} \text{ et } N_{A^+} : E_{A^+} = M_{A^+} / (1 + 1/N_{A^+}).$$

L'expression de Vanselow et celle de Gaines et Tomas sont les plus conformes aux considérations thermodynamiques. Les cations en position échangeable, tout comme la

CEC étant généralement exprimés en méq/100g, la formulation de Gaines et Thomas est la plus adaptée aux échanges cationiques entre sol et solution.

Dans ce travail, nous déterminerons donc les coefficients de sélectivité à partir de l'équation (19).

II.5.— Modélisation de la variation du coefficient de sélectivité

II.5.1.— Propriétés des réactions d'échange

Les travaux réalisés sur les réactions d'échanges entre sol et solution ont permis de dégager un certain nombre de propriétés considérées comme acquises :

- les travaux récents de Shen, Tu et Kemper (1997) sur la cinétique de l'échange K-NH₄, confirment le caractère instantané des échanges cationiques entre phases solide et liquide du sol. Cependant, pour un souci d'homogénéité la durée de l'échange est de 24 heures et plus ;
- le taux d'adsorption est d'autant plus élevé que la teneur en argile minéralogique du complexe est importante ; ce taux dépend du pH et de la nature des anions du médium d'échange : plus le pH est acide, plus élevé sera ce taux qui, décroît respectivement pour des solutions de (NH₄)₂SO₄, (NH₄)₂HPO₄ et NH₄HCO₃ (Shen, Tu et Kemper, 1997). Il est également fonction de la température dont la hausse ou la baisse induit des variations de ce taux dans le même sens ;
- après la mise en équilibre des phases solide et liquide, l'isotherme d'échange de deux cations en compétition ne dépendrait que de la variation du rapport de ce couple ; les proportions, constantes, des autres espèces ioniques seraient sans influence sur l'échange ;
- les isothermes d'échanges ne sont pas linéaires.

II.5.2.— Le modèle appliqué

La relation entre le (SAR) et l'ESR d'une part et celle du (SAR) et l'EFR d'autre part (Rieu et al., 1991) ont permis de simuler la variation des coefficients de sélectivité des sols :

$$\text{ESR} = \alpha_1(\text{SAR})^{\beta_1} \quad (20)$$

$$\text{EFR} = \alpha_2(\text{SAR})^{\beta_2} \quad (21)$$

avec (SAR) $\equiv 10^{3.2}(\text{Na}^+) (\text{Ca}^{2+})^{-1.2}$ et () = activité des ions en solution (mol/l)

$$\begin{aligned} \text{ESR} &\equiv E_{\text{Na}}(1 - E_{\text{Na}})^{-1} & \text{et } E_{\text{Na}} &= \text{Na} (\text{Na} + \text{Ca})^{-1} \\ \text{EFR} &\equiv E_{\text{Na}}(1 - E_{\text{Na}})^{-1/2} \end{aligned}$$

L'extension de ces relations aux échanges cationiques, d'une manière générale conduit à :

$$\text{ECR} = \alpha_1(\text{CAR})^{\beta_1} \tag{22}$$

$$\text{EFR} = \alpha_2(\text{CAR})^{\beta_2} \tag{23}$$

avec $C = \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{Na}^+$ ou NH_4^+

L'isotherme d'échange A-B sera de la forme:

$$E_A^b / E_B^a = \alpha_{A-B} [(A)^b / (B)^a]^{\beta_{A-B}} \tag{24}$$

$$(A)^b (B)^a = \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} (E_A^b E_B^a)^{\beta_{A-B}} \tag{25}$$

Le coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas s'écrit:

$$K_{GT(A-B)} = \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} (E_A^b E_B^a)^{(1-\beta_{A-B})/\beta_{A-B}} \tag{26}$$

$$K_{GT(A-B)} = \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} [(1-E_B)^b E_B^a]^{(1-\beta_{A-B})/\beta_{A-B}} \tag{27}$$

Ainsi;

pour les échanges homovalents:

$$K_{GT(A-B)} = \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} [(1-E_B)/E_B]^{(1-\beta_{A-B})/\beta_{A-B}} \tag{28}$$

pour les échanges hétérovalents:

$$K_{GT(A-B)} = \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} [(1-E_B)^2 / E_B]^{(1-\beta_{A-B})/\beta_{A-B}} \quad \text{si } a=1 \text{ et } b=2 \quad (29)$$

$$K_{GT(A-B)} = \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} [(1-E_B) / E_B^2]^{(1-\beta_{A-B})/\beta_{A-B}} \quad \text{si } a=2 \text{ et } b=1 \quad (30)$$

Dans la convention de Gaines et Thomas, la relation entre la constante d'équilibre et la variation de l'énergie libre de l'échange est exprimée par:

$$\begin{aligned} \ln K_{(A-B)} &= \frac{-\Delta G_{(A-B)}^0}{RT} = (a-b) + \int_0^1 \ln K_{GT(A-B)} dE_B \\ &= (a-b) + \int_0^1 \ln K_{GT(A-B)} dE_B = \\ &= (a-b) + \left[\ln \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} + \frac{b(1-\beta_{A-B})}{\beta_{A-B}} [(E_B - 1) \ln(1 - E_B) - (1 + E_B)] \right]_0^1 - \frac{a(1-\beta_{A-B})}{\beta_{A-B}} [E_B \ln E_B - E_B]_0^1 \end{aligned} \quad (31)$$

Ainsi:

$$\text{pour } a=b \quad (a-b) + \int_0^1 \ln K_{GT(A-B)} dE_B = \ln \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} \quad (33)$$

$$K_{(A-B)} = \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} \quad \text{et} \quad \Delta G_{A-B}^0 = -RT \ln \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} \quad (34)$$

$$\text{pour } a=1 \text{ et } b=2 \quad \ln K_{A-B} = -1 + \int_0^1 \ln K_{GT(A-B)} dE_B = -1/\beta + \ln \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}} \quad (35)$$

$$K_{A-B} = 2.72^{(-1/\beta_{A-B} + \ln \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}})} \quad \text{et} \quad (36)$$

$$\Delta G_{A-B}^0 = -RT(-1/\beta_{A-B} + \ln \alpha_{A-B}^{-1/\beta_{A-B}})$$

Ainsi, dans ce qui suit, nous déterminerons:

- les isothermes d'échange par l'expression (24);
- les coefficients de sélectivité $K_{GT(A-B)}$ par (28) et (29); ces résultats seront comparés à ceux obtenus par l'expression $K_{G(A-B)}$ de Gapon (10_{bis});
- les constantes d'équilibre $K_{(A-B)}$ et les variations de l'énergie libre des échanges $\Delta G_{(A-B)}^0$ par les formules (34) et (36).

Dans l'analyse descriptive, nous nous baserons sur les valeurs de la constante d'équilibre K_{A-B} ou de la variation de l'énergie libre d'échange pour apprécier la préférence des sols aux différents cations par couple:

pour $K_{A-B} = 1$ ou $\Delta G_{(Mg-Ca)}^0 = 0$, alors il y a équisélectivité de A et B;

pour $K_{A-B} > 1$ ou $\Delta G_{(Mg-Ca)}^0 < 0$, alors le cation B est préféré à A;

pour $K_{A-B} < 1$ ou $\Delta G_{(Mg-Ca)}^0 > 0$, alors le cation A est préféré à B.

**ETUDE EXPERIMENTALE DES ISOTHERMES D'ECHANGE SUR
DES ECHANTILLONS DE SOLS DE DONAYE IT1 ET DE GUIA 4.**

Le coefficient de sélectivité et la capacité d'échange cationique sont les deux paramètres essentiels qui influencent les échanges cationiques entre le complexe adsorbant et la solution du sol, et leur mobilité dans les profils (Thabet et selim, 1996). La capacité d'échange cationique est une grandeur quantitative qui correspond à la quantité totale de cation que le complexe d'échange peut adsorber; cependant elle est souvent assimilée à la somme des bases échangeables.

La détermination du coefficient de sélectivité nécessite la mesure des isothermes d'échange, lesquels décrivent mieux la distribution des cations, par paire, entre les phases solide et liquide du sol.

Nous utiliserons une méthode simple et rapide de détermination des isothermes d'échange, par la mise en contact successive de quantités connues de sol avec des solutions de concentration totale identique et égale à 0.1 mol/l.

III.— Protocole expérimental

L'étude expérimentale est réalisée sur six échantillons, dont trois de chaque sol, prélevés à trois niveaux de profondeur (Tableau VII).

Ces échantillons ont été d'abord séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm et introduits dans six boîtes de carton dans lesquelles ils sont homogénéisés et conservés.

Toutes les analyses ont été effectuées au laboratoire de chimie de l'IRD. Les solutions issues des échanges Ca/Mg et Ca/K ont été dosées au Spectrophotomètre d'Absorption Atomique et en Colorimétrie (méthode au salicylate/nitroprussiate pour NH_4). Par la suite toutes les analyses ont été effectuées en Electrophorèse Capillaire.

III.1.— Forces ioniques des solutions d'échange et coefficients d'activité des ions

Pour une solution de concentration totale 0.1 mol/l, lorsque les ions divalents (Ca^{2+} et Mg^{2+}) sont dans un rapport constant, la force ionique est constante à 10^{-3} près, malgré la variation des concentrations des ions monovalents (Na^+ , K^+ , NH_4^+ et Cl^-). Les coefficients d'activité des ions sont par conséquent constants.

Les ions divalents déterminent donc, pour l'essentiel, la valeur de la force ionique d'une solution (Tableau VI).

En pourcentage, la différence entre concentration totale (molarité en mol/l) et activité (molarité en mol/l) est de 64 - 67% et 25 - 41%, respectivement pour les ions divalents et monovalents.

Ces valeurs sont comprises dans la fourchette moyenne proposée par Mahan (10 - 50%), pour les ions monovalents mais s'en écartent dans le cas des ions divalents.

III.2.— Echanges cationiques entre sol et solution

Les échanges cationiques sont effectués sur des prélèvements de 5g de sols de chaque échantillon, avec deux répétitions; soit 6 x 2 pots de centrifugation nécessaires.

Le médium d'échange employé est un mélange de chlorure de calcium, de magnésium, de potassium, de sodium et d'ammonium en proportion variée en fonction des points de l'isotherme recherché. Sa concentration totale est de 0.1 mol/l.

Pour la détermination des isothermes d'échange de deux cations en compétition, 5 séries de prélèvements de 5g de sol sont effectuées. Soit (6 x 2) x 5 pots nécessaires pour les deux sols. Chacun des 5g de sol est équilibré avec 25ml de solution salée. Ces mélanges sont homogénéisés par agitation pendant 30 minutes. Le contact est maintenu durant 24 heures; une seconde agitation, dans les mêmes conditions que la première, est effectuée avant de procéder à la séparation de l'extrait par centrifugation pendant 10 minutes. Après filtration, par filtre rapide (séparation de la matière organique en suspension de la solution), les solutions recueillies sont analysées pour déterminer les concentrations respectives des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et NH_4^+ .

Tableau VI: Force ionique et Coefficients d'activité des ions en solution

Valeurs des constantes *			T °C	A	Bx10 ⁻⁸	C	
			25	0.510	0.328	0.041	
Valeurs des diamètres efficaces x10 ⁸ cm*		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	
		6	8	3	4	3	
Couples	Rapports	Force ionique	Coefficients d'activité des ions en solution				
		I	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺
M1/M2	50/50	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Ca/Mg	10/90	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Ca/Mg	25/75	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Ca/Mg	75/25	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Ca/Mg	90/10	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Ca/K	10/90	0.15	0.363	0.413	0.731	0.751	0.731
Ca/K	25/75	0.16	0.355	0.407	0.725	0.746	0.725
Ca/K	75/25	0.20	0.334	0.388	0.708	0.732	0.708
Ca/K	90/10	0.21	0.329	0.384	0.704	0.729	0.704
Ca/Na	10/90	0.15	0.363	0.413	0.731	0.751	0.731
Ca/Na	25/75	0.16	0.355	0.407	0.725	0.746	0.725
Ca/Na	75/25	0.20	0.334	0.388	0.708	0.732	0.708
Ca/Na	90/10	0.21	0.329	0.384	0.704	0.729	0.704
Ca/NH ₄	10/90	0.15	0.363	0.413	0.731	0.751	0.731
Ca/NH ₄	25/75	0.16	0.355	0.407	0.725	0.746	0.725
Ca/NH ₄	75/25	0.20	0.334	0.388	0.708	0.732	0.708
Ca/NH ₄	90/10	0.21	0.329	0.384	0.704	0.729	0.704
Mg/K	10/90	0.15	0.363	0.413	0.731	0.751	0.731
Mg/K	25/75	0.16	0.355	0.407	0.725	0.746	0.725
Mg/K	75/25	0.20	0.334	0.388	0.708	0.732	0.708
Mg/K	90/10	0.21	0.329	0.384	0.704	0.729	0.704
Mg/Na	10/90	0.15	0.363	0.413	0.731	0.751	0.731
Mg/Na	25/75	0.16	0.355	0.407	0.725	0.746	0.725
Mg/Na	75/25	0.20	0.334	0.388	0.708	0.732	0.708
Mg/Na	90/10	0.21	0.329	0.384	0.70	0.729	0.704
Mg/NH ₄	10/90	0.15	0.363	0.413	0.731	0.751	0.731
Mg/NH ₄	25/75	0.16	0.355	0.407	0.725	0.746	0.725
Mg/NH ₄	75/25	0.20	0.334	0.388	0.708	0.732	0.708
Mg/NH ₄	90/10	0.21	0.329	0.384	0.704	0.729	0.704
K/Na	10/90	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
K/Na	25/75	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
K/Na	75/25	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
K/Na	90/10	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
K/NH ₄	10/90	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
K/NH ₄	25/75	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
K/NH ₄	75/25	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
K/NH ₄	90/10	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Na/NH ₄	10/90	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Na/NH ₄	25/75	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Na/NH ₄	75/25	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716
Na/NH ₄	90/10	0.18	0.344	0.397	0.716	0.739	0.716

* Constantes tirées de Kim
H. et de Hammecker C.
(1993)

III.3.— Détermination des isothermes d'échange

Chaque isotherme d'échange d'un couple de cations (M_1/M_2) en compétition est déterminé par cinq points correspondant aux échanges avec des solutions salées de concentration totale 0.1mol/l, contenant respectivement 0.004/0.036, 0.010/0.030, 0.020/0.020, 0.030/0.010, 0.036/0.004 M_1 mols/ M_2 mols et 0.020mols/l de chacun des trois autres cations. Ces cinq points correspondent respectivement aux rapports 10/90, 25/75, 50/50, 75/25 et 90/10 de M_1/M_2 .

Les isothermes ont été déterminés de manière indirecte en comparant la solution initiale et la solution d'équilibre.

III.4.— Bases échangeables, capacité d'échange cationique et pourcentage de sodium échangeable

Les bases échangeables (BE) ont été déterminées après extraction par une solution 0.1molaire de chlorure de barium ($BaCl_2$).

La capacité d'échange cationique (CEC) est assimilée à la somme des bases échangeables (BE). Les résultats sont présentés dans le tableau VII.

L'analyse de ce tableau montre que les proportions de calcium et de magnésium croissent avec l'augmentation de la profondeur pour chacun des deux sols. Il en est de même pour le sodium dans Guia 4.

La somme des bases échangeables croît de 23 à 26 méq/100g pour Donaye IT1 et de 11 à 16 méq/100g pour le sol de Guia 4.

Tableau VII: Bases échangeables (BE), capacité d'échange cationique (CEC) et pourcentage de sodium échangeable (ESP).

Sols	Profondeur (cm)		Ca	Mg	Na	K	NH ₄	CEC	ESP
			még/100g	még/100g	még/100g	még/100g	még/100g	még/100g	%
Donaye IT1	surface	D1	13,02	8,97	0,46	0,26	0,27	22,98	1,98
	20 - 25	D2	14,17	9,53	0,37	0,24	0,27	24,58	1,52
	30 - 35	D3	15,02	10,16	0,79	0,21	0,27	26,46	3,00
Guia 4	20	G1	5,88	4,76	0,32	0,16	0,27	11,39	2,82
	40	G2	6,91	5,98	1,24	0,46	0,27	14,85	8,36
	60	G3	8,22	6,11	1,43	0,31	0,27	16,34	8,77

IV.— Résultats et discussion

IV.1.— Les isothermes d'échange

IV.1.1.— Les isotherme d'échange M-Ca (M = Mg, K, Na ou NH₄)

a) - Echange Mg-Ca (Fig 3).

Les courbes représentant le déplacement des cations Mg²⁺ par les ions Ca²⁺, présentent un accroissement rapide pour des rapports E_{Mg}/E_{Ca} ≤ 0.7 = α_{Mg-Ca} pour le sol de Donaye IT1 et E_{Mg}/E_{Ca} ≤ 0.8 = α_{Mg-Ca} pour le sol de Guia 4. Les constantes β_{Mg-Ca} sont homogènes:

0.21 < β_{Mg-Ca} < 0.25 et 0.24 < β_{Mg-Ca} < 0.28 respectivement pour Donaye IT1 et Guia 4.

Corrélativement, les coefficients de sélectivité K_{GT(Mg-Ca)} simulés de l'échange varient de 3.7 à 1.6 pour Donaye IT1 et de 4.7 à 2.1 pour Guia 4. Au delà de ces limites caractéristiques, la croissance des isothermes est moins marquée et les coefficients de sélectivité K_{GT(Mg-Ca)} sont relativement faibles: 1.1 à 0.6 et 1.2 à 0.35 (Tableau IX). Ces coefficients sont sensiblement identiques pour les trois profondeurs de chacun des sols . Les valeurs de K_{GT(Mg-Ca)} simulées et calculées sont égales et identiques à celles déterminées par l'expression de Gapon:

$$K_{GT(Mg-Ca)} \cong K_{G(Mg-Ca)} \text{ (Tableau VIII et IX).}$$

Les constantes d'équilibre déterminées à partir de l'expression (36) sont très peu différentes pour chacun des deux sols: K_{Mg-Ca} = 6 ± 0.5 pour Donaye IT1; 2.25 pour Guia 4 et 4.4 pour Guia 4 surface. La variation de l'énergie libre de l'échange ΔG⁰_{(Mg-Ca) < 0 (Tableau IX).}

Ces valeurs de K_{Mg-Ca} et de ΔG⁰_{(Mg-Ca) montrent l'affinité des deux sols aux cations Ca²⁺ par rapport aux Mg²⁺. Cette affinité est plus élevée pour le sol de Donaye IT1.}

$$K_{GT(Mg-Ca)} \cong K_{G(Mg-Ca)}$$

$$Ca > Mg$$

Tableau VIII: Coefficients de sélectivité de Gaines et Thomas calculés

(Ca) / (Mg) (%)	K _{GT(Mg-Ca)} calculé					
	Donaye IT1			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
10	4.505	4.420	4.046	4.530	4.464	5.101
22	2.674	2.511	2.528	2.815	2.768	3.179
41	1.482	1.692	1.644	1.357	1.334	1.425
72	1.021	0.868	0.905	0.016	0.693	0.810
89	0.664	0.605	0.620	0.471	0.496	0.592

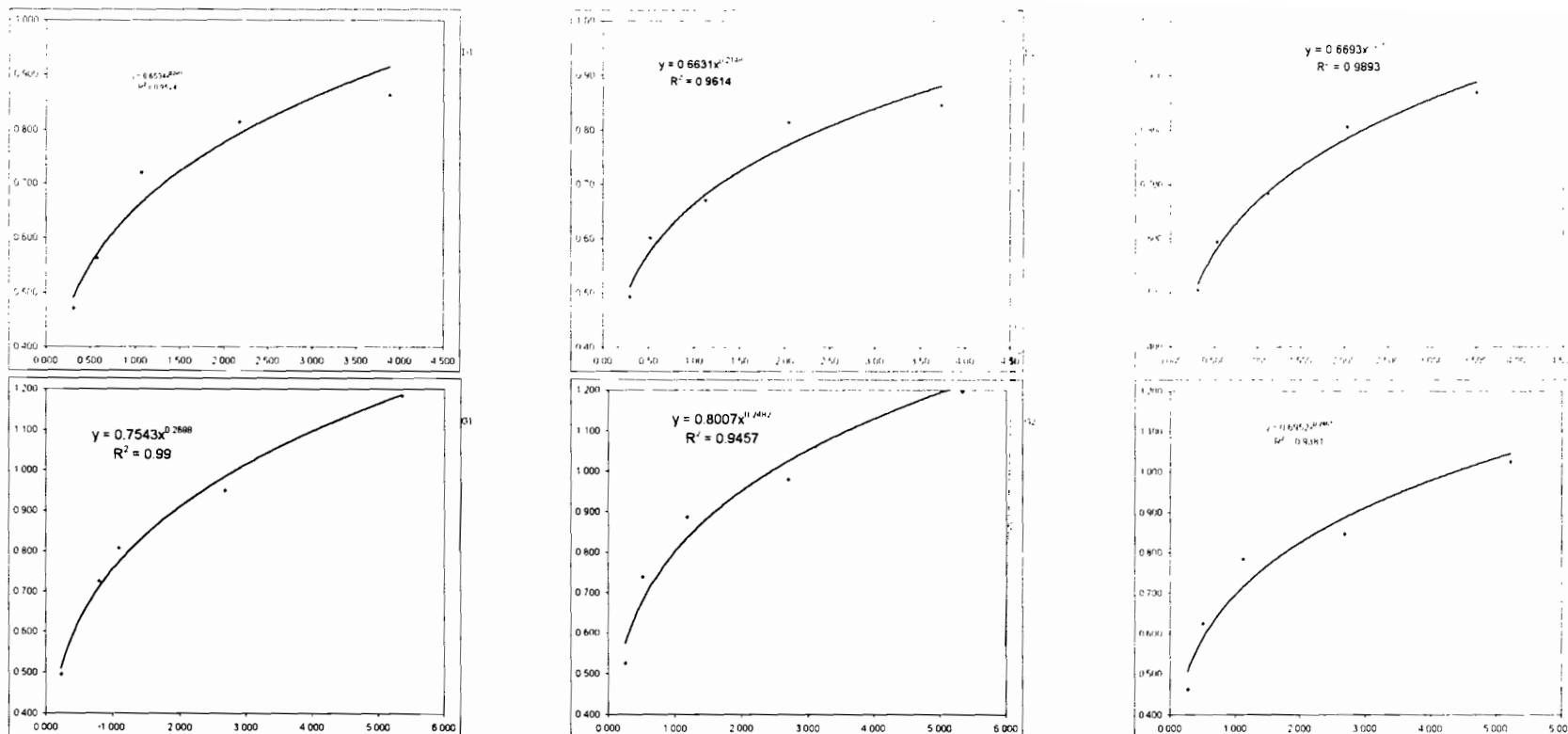


Figure 3: Isothermes d'échanges Mg-Ca

X=(Mg)/(Ca) Y=EMg/ECa

Tableau IX

α_{Mg-Ca}	0.653	0.663	0.669	0.754	0.801	0.695
β_{Mg-Ca}	0.248	0.215	0.225	0.27	0.248	0.247
K_{Mg-Ca}	5.574	6.771	5.952	2.844	2.449	4.365
$\Delta C_{Mg-Ca}^0 (KJ/mo)$	-4.259	-4.741	-4.422	-2.591	-2.220	-3.653

Couple	Rap.(%)	Elit	coefficient de sélectivité $K_{OTMg-Ca}$											
			Donaye IT1			Guia 4			coefficient de sélectivité K_{OMg-Ca}					
			D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3
Ca/Mg	10	Ca	3.562	3.664	3.662	4.488	4.204	4.684	4.504	4.420	4.046	4.526	4.464	5.102
Ca/Mg	22	Ca	2.988	3.201	2.844	2.477	2.308	2.620	2.674	2.510	2.528	2.815	2.766	3.179
Ca/Mg	41	Ca	2.058	1.571	1.604	1.595	1.706	2.086	1.482	1.693	1.644	1.356	1.334	1.424
Ca/Mg	72	Ca	0.973	1.052	0.995	1.188	0.981	1.041	1.021	0.868	0.906	0.016	0.692	0.809
Ca/Mg	89	Ca	0.567	0.509	0.567	0.427	0.349	0.415	0.663	0.604	0.620	0.470	0.496	0.592

b) - Echange K-Ca (Fig 4).

Dans l'échange K-Ca, le déplacement du potassium par le calcium est moins marqué par rapport au cas précédent. Les valeurs de α_{K-Ca} et β_{K-Ca} sont plus élevées et sensiblement identiques à 10^{-1} près: $0.9 < \alpha_{K-Ca} < 1.01$; $0.65 < \beta_{K-Ca} < 0.72$ pour Donaye IT1. Pour le sol de Guia 4, les courbes sont moins précises.

Les coefficients de sélectivité $K_{GT(K-Ca)}$ simulés sont compris entre 0.06 et 0.45 pour Donaye IT1; 0.06 et 0.73 pour Guia 4. Seul Guia 4 montre une légère hausse des $K_{GT(K-Ca)}$ avec l'augmentation de la profondeur. Ces valeurs sont sensiblement identiques à celles calculées pour chacun des deux sols (Tableau X et XI).

Dans cet échange, les coefficients de sélectivité $K_{G(K-Ca)}$ sont largement supérieurs à ceux calculés ou simulés de Gaines et Thomas (Tableau XI).

La constante d'équilibre est sensiblement égale à 0.7 ± 0.1 pour le sol de Donaye IT1 ($\Delta G_{(K-Ca)}^0 > 0$). Elle est hétérogène pour le sol de Guia 4.

Les sols de Donaye IT1 et de Guia 4 présentent plus d'affinité pour le potassium par rapport au calcium.

$K_{G(K-Ca)} \gg K_{GT(K-Ca)}$
 Ca < K pour Donaye IT1
 Ca < K pour Guia 4

Tableau X: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(Ca) / (K) (%)	$K_{GT(K-Ca)}$ calculé					
	Donaye IT1			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
6	0.386	0.465	0.448	0.326	0.582	0.706
14	0.488	0.408	0.444	0.513	0.790	0.976
35	0.195	0.227	0.234	0.165	0.210	0.281
58	0.056	0.069	0.069	0.054	0.058	0.073
81	0.124	0.147	0.155	0.187	0.169	0.350

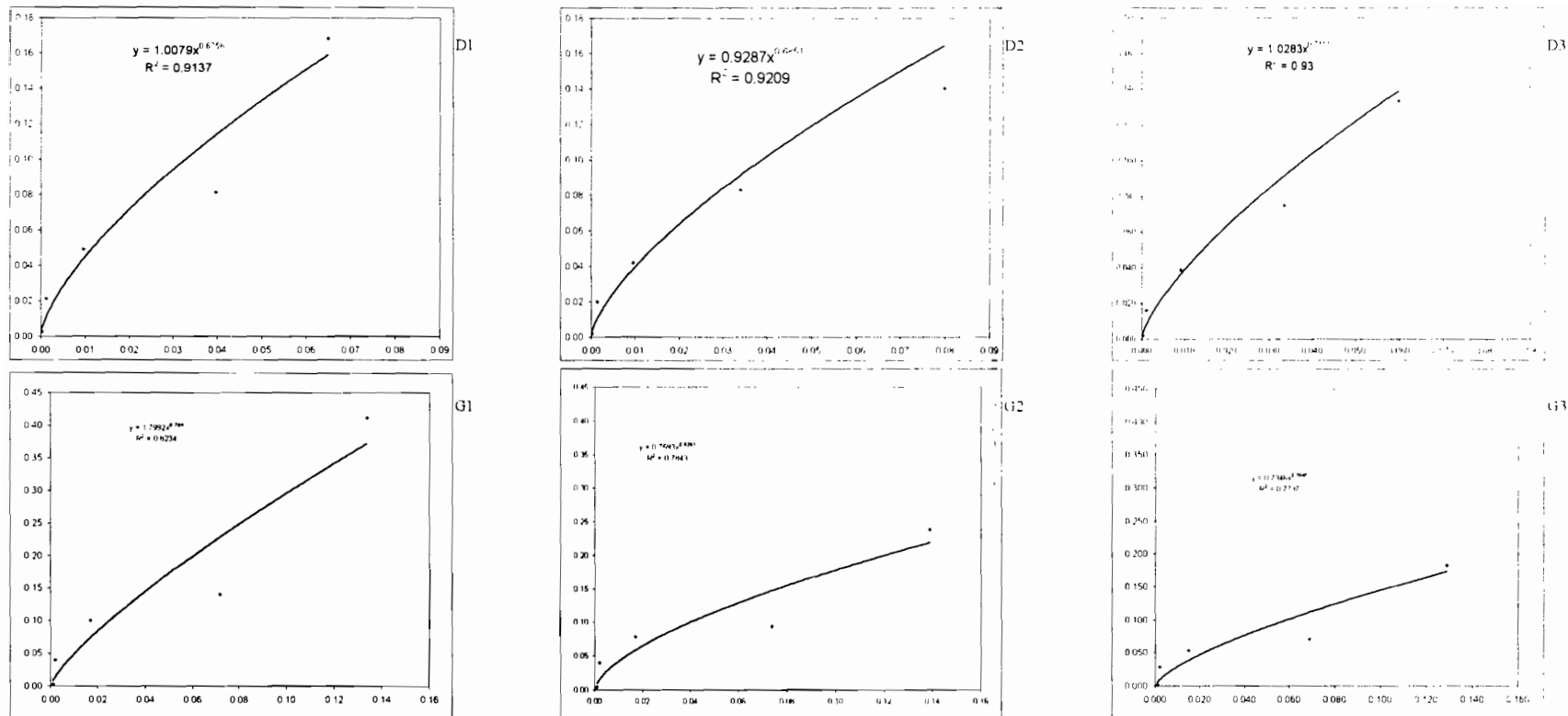


Figure 4: Isothermes d'échanges K-Ca
 $X=(K)^2/(Ca)$ $Y=(Ex)^2/Eca$

Tableau XI

			α_{K-Ca}	1.007	0.929	1.028	1.764	0.779	0.756						
			β_{K-Ca}	0.676	0.685	0.711	0.763	0.628	0.703						
			K_{K-Ca}	0.334	0.365	0.335	0.200	0.416	0.453						
			$\sum_{K-Ca}^p (K_j/mo)$	2.557	2.354	2.553	3.755	2.049	1.846						
			coefficient de sélectivité $K_{Ca/K}$						coefficient de sélectivité $K_{K/Ca}$						
			Donaye IT1			Guia 4			Donaye IT1			Guia 4			
Couple	Rap.(%)	El	D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3	
Ca/K	10	Ca	0.422	0.452	0.425	0.361	0.638	0.726	4.504	4.42	4.046	4.526	4.464	5.102	
Ca/K	25	Ca	0.296	0.354	0.336	0.258	0.366	0.486	2.674	2.51	2.528	2.815	2.766	3.179	
Ca/K	50	Ca	0.234	0.259	0.257	0.232	0.330	0.427	1.482	1.693	1.644	1.356	1.334	1.424	
Ca/K	75	Ca	0.157	0.185	0.181	0.174	0.221	0.326	1.021	0.868	0.906	0.016	0.692	0.809	
Ca/K	90	Ca	0.057	0.066	0.076	0.076	0.055	0.099	0.663	0.604	0.62	0.47	0.496	0.592	

c) - Echanges Na-Ca (Fig 5)

Les isothermes d'échanges Na-Ca, présentent une allure similaire à celles des précédents. Ils sont plus précis pour D₁ et G₂ et G₃.

La constante α_{Na-Ca} est inférieure à β_{Na-Ca} et est comprise entre 0.02 et 0.05 pour les deux sols.

Les valeurs des coefficients de sélectivité $K_{GT(Na-Ca)}$ calculés, simulés et celles des constantes d'équilibre sont très fortes et très hétérogènes pour chacun des deux sols (Tableau XII et XIII).

Les coefficients de sélectivité de Gaines et Thomas ($K_{GT(NaCa)}$) sont inférieurs à ceux de Gapon ($K_{G(Na-Ca)}$).

La variation de l'énergie libre de l'échange $\Delta G_{(Na-Ca)}^0$, dans chacun des échanges est négative et très élevée (Tableau XIII).

Pour les deux sols le calcium est fortement préféré au sodium.

$$K_{G(Na-Ca)} > K_{GT(Na-Ca)}$$

$$Ca > Na$$

Tableau XII: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(Ca) / (Na) (%)	$K_{GT(Na-Ca)}$ calculé					
	Donaye IT1			Gua 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
5	19.254	30.627	16.382	8.445	8.726	12.668
14	10.396	22.307	19.283	12.031	12.473	27.687
32	19.858	16.764	8.396	5.933	3.565	7.459
58	22.914	12.335	12.708	30.797	2.726	10.025
80	8.919	2.937	2.537	1.380	0.816	0.942

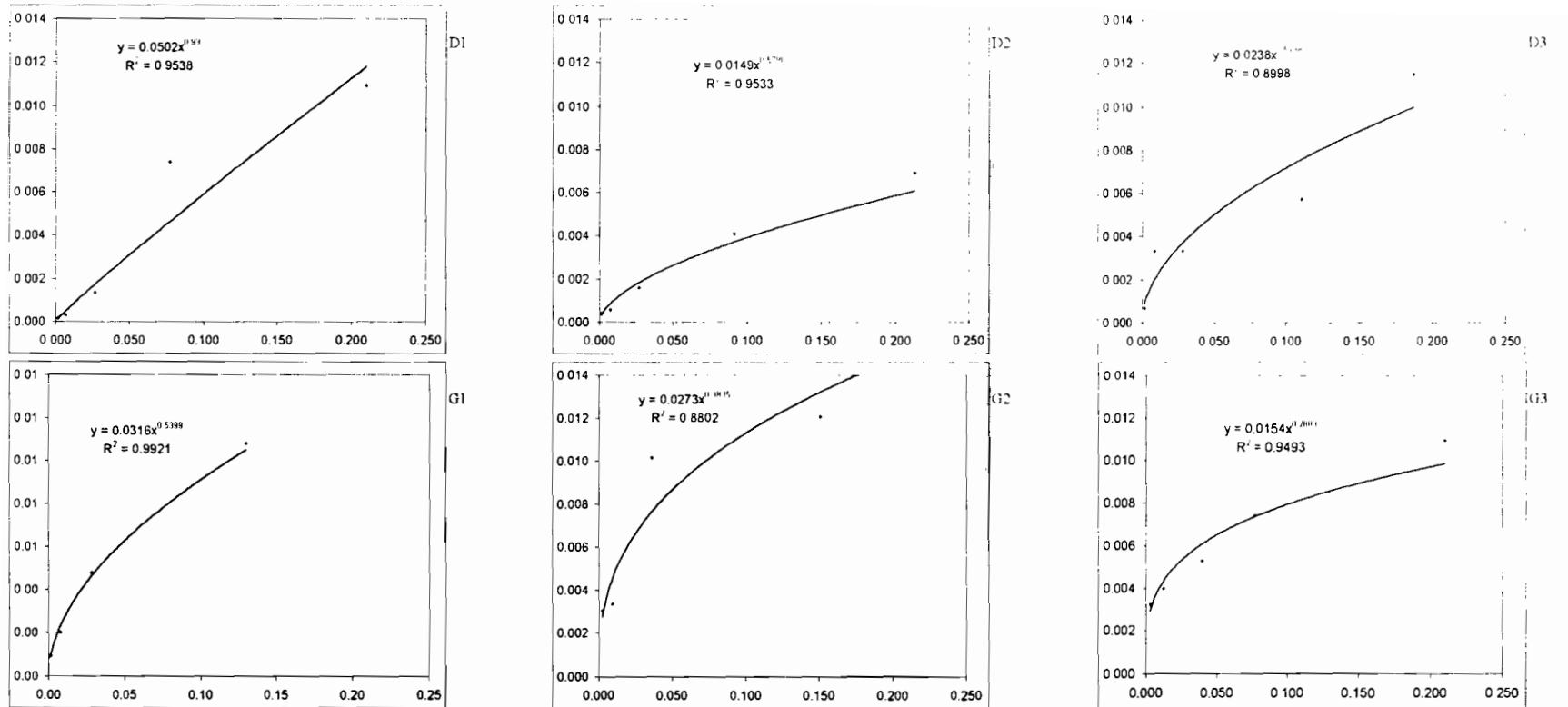


Figure 5: Isothermes d'échanges Na-Ca
 $(Na)^2/(Ca) \quad (E_{Na})^2/E_{Ca}$

Tableau XIII

α_{Na-Ca}	0.050	0.015	0.024	0.032	0.027	0.015
β_{Na-Ca}	0.930	0.579	0.519	0.540	0.384	0.287
K_{Na-Ca}	7.347	20.511	11.709	9.095	7.143	7.134
$\Delta G_{Na-Ca}^0 (KJ/mole)$	-4.655	-7.051	-5.743	-5.153	-4.589	-4.586

Couple	Rap.(%)	Elt	coefficient de sélectivité $K_{GT(Na-Ca)}$						coefficient de sélectivité $K_{GT(Na-Ca)}$					
			Donaye IT1			Guia 4			Donaye IT1			Guia 4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3
Ca/Na	10	Ca	17.760	38.565	21.347	31.867	60.032	215.162	79.273	100.927	68.162	56.258	59.850	70.732
Ca/Na	25	Ca	17.250	26.212	11.232	12.697	9.853	6.404	44.992	67.410	67.559	56.975	57.942	90.206
Ca/Na	50	Ca	15.165	13.220	6.773	6.332	7.473	4.680	48.180	45.063	31.741	27.363	21.471	28.635
Ca/Na	75	Ca	13.549	6.305	1.513	0.518	1.256	0.123	49.599	41.269	40.67	61.197	16.141	28.398
Ca/Na	90	Ca	12.934	4.839	1.525	1.577	1.071	1.376	30.888	17.732	17.115	11.989	9.154	10.01

d) - Echange NH₄-Ca (Fig 6)

Les isothermes d'échange épousent bien les points expérimentaux.

Les constantes $\alpha_{\text{NH}_4\text{-Ca}}$ et $\beta_{\text{NH}_4\text{-Ca}}$ sont homogènes et sensiblement identiques à 10^{-1} près pour les deux sols: $\alpha_{\text{NH}_4\text{-Ca}} = \beta_{\text{NH}_4\text{-Ca}} = 0.6 \pm 0.1$.

Les coefficients de sélectivité $K_{\text{GT}(\text{NH}_4\text{-Ca})}$ de l'échange varient entre 0.75 et 0.09 pour Donaye IT1; 0.99 et 0.05 pour Guia 4; $K_{\text{GT}(\text{NH}_4\text{-Ca})} < K_{\text{G}(\text{NH}_4\text{-Ca})}$ (Tableau 9).

Les constantes d'équilibre sont homogènes pour les deux sols: $0.50 < K_{\text{NH}_4\text{-Ca}} < 0.57$ pour Donaye IT1 et $0.44 < K_{\text{NH}_4\text{-Ca}} < 0.66$ pour Guia 4. Les $\Delta G_{(\text{Mg-Ca})}^0 < 0$ (Tableau 9).

Les deux sols ont plus d'affinité pour l'ammonium que pour le calcium.

$$K_{\text{GT}(\text{NH}_4\text{-Ca})} < K_{\text{G}(\text{NH}_4\text{-Ca})}$$

$$\text{Ca} < \text{NH}_4$$

Tableau XIV: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(Ca) / (NH ₄) (%)	K _{GT(NH₄-Ca)} calculé					
	Donaye IT1			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
5	0.713	0.658	0.576	0.493	0.800	1.050
14	0.485	0.508	0.476	0.462	0.503	0.796
32	0.400	0.440	0.394	0.374	0.787	0.811
58	0.256	0.178	0.203	0.146	0.288	0.315
80	0.070	0.087	0.074	0.034	0.092	0.127

Cette analyse montre que les deux expressions $K_{\text{GT}(\text{NH}_4\text{-Ca})}$ et $K_{\text{G}(\text{NH}_4\text{-Ca})}$ ne sont identiques que dans l'échange Mg-Ca.

Les sols de Donaye IT1 et de Guia 4 ont plus d'affinité pour le potassium et l'ammonium que pour le calcium. Par contre dans le cas des échanges Na-Ca et Mg-Ca, le calcium est préféré au sodium et au magnésium. Cette affinité croît légèrement en fonction de la profondeur pour le sol de Guia4.

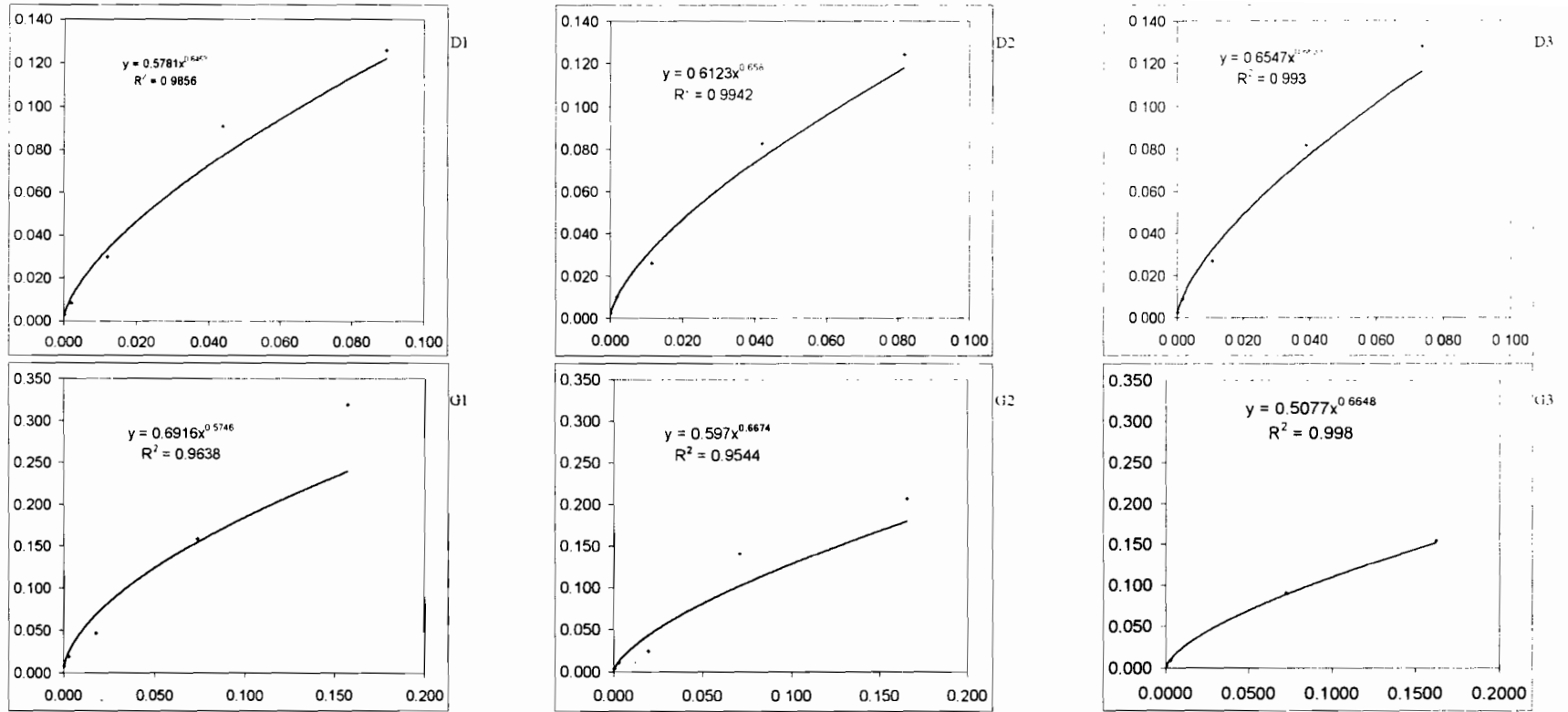


Figure 6: Isothermes d'échanges NH4-Ca
 $(NH_4)^2/(Ca) E_{NH}^2/E_{Ca}$

Tableau XV

			α_{NH_4-Ca}	0.578	0.612	0.655	0.692	0.597	0.51					
			β_{NH_4-Ca}	0.645	0.658	0.663	0.575	0.667	0.67					
			K_{NH_4-Ca}	0.569	0.543	0.509	0.441	0.561	0.658					
			$\chi_{NH_4-Ca}^0 (KJ/mol)$	1.317	1.425	1.575	1.910	1.351	0.977					
			coefficient de sélectivité $K_{Donay-Ca}$						coefficient de sélectivité $K_{Guia-Ca}$					
			Donaye IT1			Guia 4			Donaye IT1			Guia 4		
Couple	Rap.(%)	Elt	D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3
Ca/NH4	10	Ca	0.748	0.713	0.667	0.815	0.988	1.080	10.424	10.029	9.262	9.431	12.864	15.199
Ca/NH4	25	Ca	0.626	0.577	0.532	0.488	0.816	0.829	7.424	7.621	7.308	7.618	8.257	10.695
Ca/NH4	50	Ca	0.340	0.316	0.302	0.198	0.341	0.403	6.062	6.203	5.762	5.686	9.014	8.878
Ca/NH4	75	Ca	0.168	0.192	0.171	0.102	0.227	0.262	4.264	3.638	4.037	3.351	4.895	4.988
Ca/NH4	90	Ca	0.093	0.091	0.089	0.053	0.134	0.142	2.203	2.451	2.268	1.532	2.592	3.032

IV.1.2.— Les isothermes d'échange M-Mg (M = K, Na ou NH₄)

a) - Echange K-Mg (Fig 7)

L'allure des isothermes épouse bien les points expérimentaux. Pour le sol de Guia 4, le pas de variation des courbes est plus marqué lorsque E_K^2/E_{Mg} du sol est inférieur ou égal à 0.15. Au delà de cette valeur, la variation est moindre pour chacune des trois courbes.

Les constantes α_{K-Mg} et β_{K-Mg} varient très peu: $\alpha_{K-Mg} = 1.8 \pm 0.02$ et $\beta_{K-Mg} = 0.7 \pm 0.01$ pour le sol de Donaye IT4; $\alpha_{K-Mg} = 0.8 \pm 0.04$ et β_{K-Mg} prend les valeurs 0.34; 0.48 et 0.40 respectivement pour G₁, G₂ et G₃.

Les coefficients de sélectivité $K_{GT(K-Mg)}$ simulés varient de 0.26 à 0.048 et de 0.265 à 0.00 respectivement pour Donaye IT1 et Guia 4. Les valeurs simulées et calculées de $K_{GT(K-Mg)}$ sont identiques; ces valeurs sont nettement inférieures à celles obtenues par l'expression de Gapon. (Tableau XVI et XVII).

Les constantes d'équilibre correspondantes sont comprises entre 0.18 et 0.19 ($\Delta G_{(K-Mg)}^0 > 0$), pour Donaye IT1 et entre 0.20 et 0.31 ($\Delta G_{(K-Mg)}^0 < 0$), pour Guia 4.

Le sol de Donaye IT1 et celui de Guia 4 présentent plus d'affinité pour le K que pour le Mg. Cette affinité dépend de la profondeur pour le sol de Guia 4.

$K_{GT(K-Mg)} < K_{G(K-Mg)}$
 Mg < K pour Donaye IT1
 Mg < K pour Guia 4

Tableau XVI: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(Mg) / (K) (%)	$K_{GT(K-Mg)}$ calculé					
	Donaye IT1			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
6	0.250	0.281	0.253	0.427	0.577	0.405
16	0.252	0.221	0.199	0.386	1.928	0.305
33	0.143	0.142	0.153	0.303	0.433	0.166
62	0.062	0.064	0.065	0.076	0.168	0.053
83	0.058	0.065	0.048	0.088	0.405	0.116

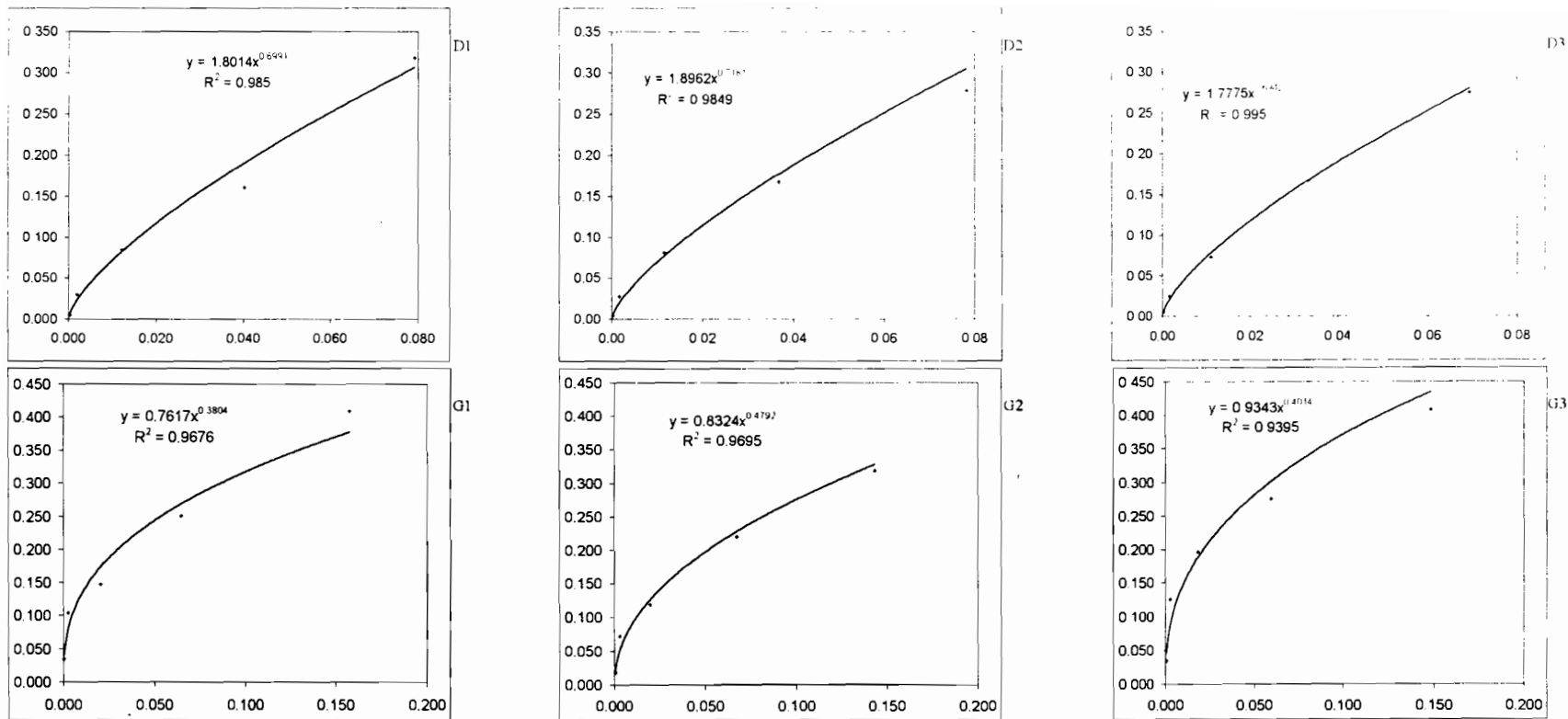


Figure 7: Isothermes d'échanges K-Mg
(K)²/(Mg) EK²/EMg

Tableau XVII

α_{K-Mg}	1.801	1.896	1.778	0.762	0.83	0.93
β_{K-Mg}	0.699	0.718	0.694	0.340	0.479	0.401
K_{K-Mg}	0.190	0.182	0.192	0.204	0.311	0.220
$\sum_{K-Mg}^C (K/mo)$	3.879	3.973	3.856	3.715	2.727	3.531

Couple	Rap.(%)	Elt	coefficient de sélectivité KGT(K-Mg)						coefficient de sélectivité KG(K-Mg)					
			Donayé IT1			Guia 4			Donayé IT1			Guia 4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3
Mg/K	10	Mg	0.263	0.248	0.247	0.322	0.323	0.265	5.922	6.117	5.758	8.709	10.151	8.119
Mg/K	25	Mg	0.196	0.203	0.199	0.070	0.038	0.104	5.135	4.902	4.461	6.681	15.524	5.58
Mg/K	50	Mg	0.149	0.153	0.138	0.012	0.051	0.045	3.48	3.467	3.651	5.338	6.495	3.724
Mg/K	75	Mg	0.095	0.100	0.086	0.003	0.019	0.014	1.918	1.978	2.049	2.188	3.308	1.747
Mg/K	90	Mg	0.044	0.048	0.042	0.000	0.001	0.000	1.863	1.959	1.694	2.299	5.012	2.67

b) - Echange Na-Mg (Fig 8)

Les isothermes d'échange sont plus précis, par rapport à ceux résultant de l'échange Na-Ca. Seule la courbe représentative de Donaye surface se démarque légèrement des autres.

Les constantes β_{Na-Mg} sont supérieures à leurs homologues α_{Na-Mg} , et elles sont toutes relativement supérieures à celles de l'échange Na-Ca. Pour D₁, D₂ et D₃ α_{Na-Mg} prend respectivement les valeurs 0.102; 0.053; 0.067 et pour Guia 4 ces valeurs sont plus homogènes et égales à 0.11 ± 0.02 . Les valeurs de β_{Na-Mg} sont 0.873; 0.574; 0.547 pour D₁ D₂ et D₃ et 0.547; 0.458; 0.350 pour G₁ G₂ et G₃.

Les coefficients de sélectivité $K_{GT(Na-Mg)}$ simulés et calculés sont élevés et varient très fortement. Les coefficients de sélectivité de Gapon sont supérieurs à ceux de Gaines et Thomas: (Tableau XIX).

Les constantes d'équilibre sont également élevées: $3.5 < K_{Na-Mg} < 5.7$ et $1.7 < K_{Na-Mg} < 3.0$ respectivement pour Donaye IT1 et Guia 4. La variation de l'énergie libre pour chacun des échanges est très élevée, montrant la forte préférence des sols à retenir le Mg plus que le Na.

$$K_{GT(Na-Mg)} < K_G(Na-Mg)$$

Mg > Na pour Donaye IT1

Mg > Na pour Guia 4

Tableau XVIII: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(Mg) / (Na) (%)	$K_{GT(Na-Mg)}$ calculé					
	Donaye IT1			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
6	7.808	8.075	6.909	9.386	10.728	4.229
15	6.264	6.210	4.373	3.226	1.954	5.732
35	9.031	5.818	2.545	1.988	1.583	1.787
61	3.739	1.379	1.247	1.091	0.426	0.485
83	4.363	0.912	0.533	0.510	0.271	0.223

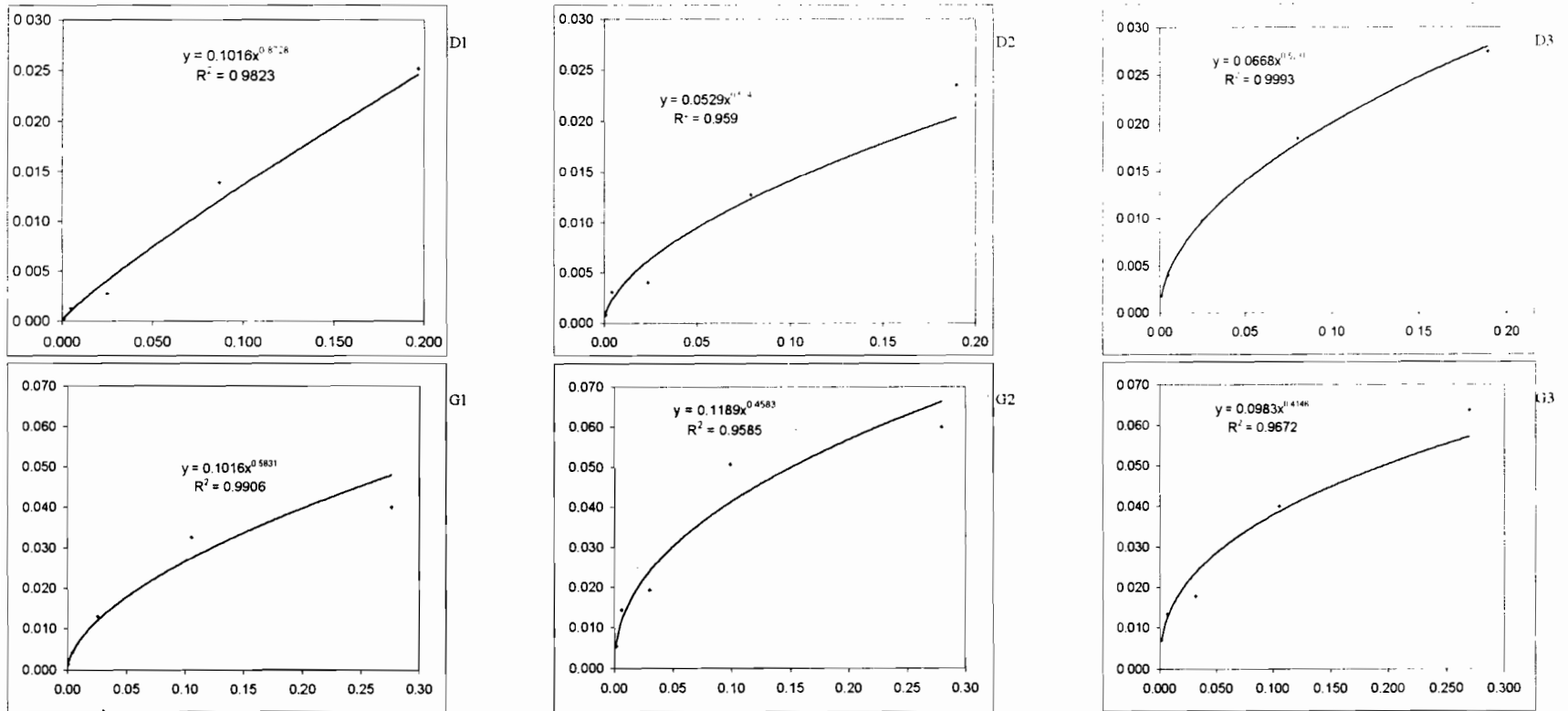


Figure 8: Isothermes d'échanges Na-Mg
 $(Na)^2/(Mg)$ E_{Na}^2/E_{Mg}

Tableau XIX

			α_{Na-Mg}	0.102	0.053	0.067	0.102	0.119	0.098						
			β_{Na-Mg}	0.873	0.574	0.547	0.547	0.458	0.350						
			K_{Na-Mg}	3.575	5.763	4.389	2.882	2.068	1.675						
			ΔG_{Na-Mg}^0	-2.974	-4.088	-3.453	-2.471	-1.696	-1.204						
			coefficient de sélectivité $K_{OTNa-Mg}$						coefficient de sélectivité $K_{OTNa-Mg}$						
			Donaye IT1			Guia 4			Donaye IT1			Guia 4			
Couple	Rap.(%)	El	D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3	
Mg/Na	10	Mg	8.032	10.353	6.652	3.528	1.399	4.543	41.795	42.31	37.954	52.092	53.414	32.067	
Mg/Na	25	Mg	7.365	6.575	4.633	3.840	3.074	0.451	30.255	29.01	24.089	21.002	16.323	28.458	
Mg/Na	50	Mg	5.820	2.811	2.595	1.795	0.981	0.425	31.03	24.903	16.305	14.687	12.845	13.433	
Mg/Na	75	Mg	5.218	2.296	1.150	0.716	0.691	0.247	15.934	9.721	9.256	8.863	5.322	5.632	
Mg/Na	90	Mg	4.003	0.841	0.554	0.297	0.214	0.075	16.052	7.547	5.669	5.562	4.165	3.662	

c) - Echange NH₄-Mg (Fig 9)

Dans l'échange NH₄-Mg, le déplacement de l'ammonium par le magnésium est bien illustré par les isothermes pour les fractions de E²_{NH4} inférieures à 0.14. Au delà de cette limite, les points expérimentaux s'écartent légèrement des courbes simulées surtout pour le sol de Guia4.

Les constantes de l'échange α_{NH4-Mg} et β_{NH4-Mg} sont hétérogènes pour chacun des deux sols (Tableau XXI).

Les coefficients de sélectivité K_{GT(NH4-Mg)} varient de 0.41 à 0.03 pour Donaye IT1 et de 0.92 à 0.05 pour Guia 4 (Tableau XXI). K_{G(NH4-Mg)} > K_{GT(NH4-Mg)}.

Les valeurs des constantes d'équilibre sont hétérogènes: 0.47; 0.36; 0.31 pour D₁ D₂ et D₃ et 0.37; 0.76; 0.58 pour G₁, G₂ et G₃. Les ΔG⁰_(NH4-Mg) correspondantes sont positives.

L'ammonium est de préférence adsorbé au magnésium par les deux sols.

$$K_{GT(NH4-Mg)} < K_{G(NH4-Mg)}$$

Mg < NH₄ pour Donaye IT1
Mg < NH₄ pour Guia 4

Ainsi, pour les deux sols le Mg est de préférence adsorbé au sodium. Le potassium et l'ammonium sont préférés au magnésium.

Les coefficients de sélectivité K_{G(NH4-Mg)} sont largement supérieurs à K_{GT(NH4-Mg)}.

Tableau XX: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(Mg) / (NH ₄) (%)	K _{GT(NH4-Mg)} calculé					
	Donaye IT1			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
6						
16	0.325	0.249	0.259	0.272	0.539	0.450
36	0.176	0.196	0.167	0.264	0.411	0.292
63	0.087	0.108	0.107	0.087	0.160	0.112
83	0.015	0.025	0.030	0.024	0.025	0.025

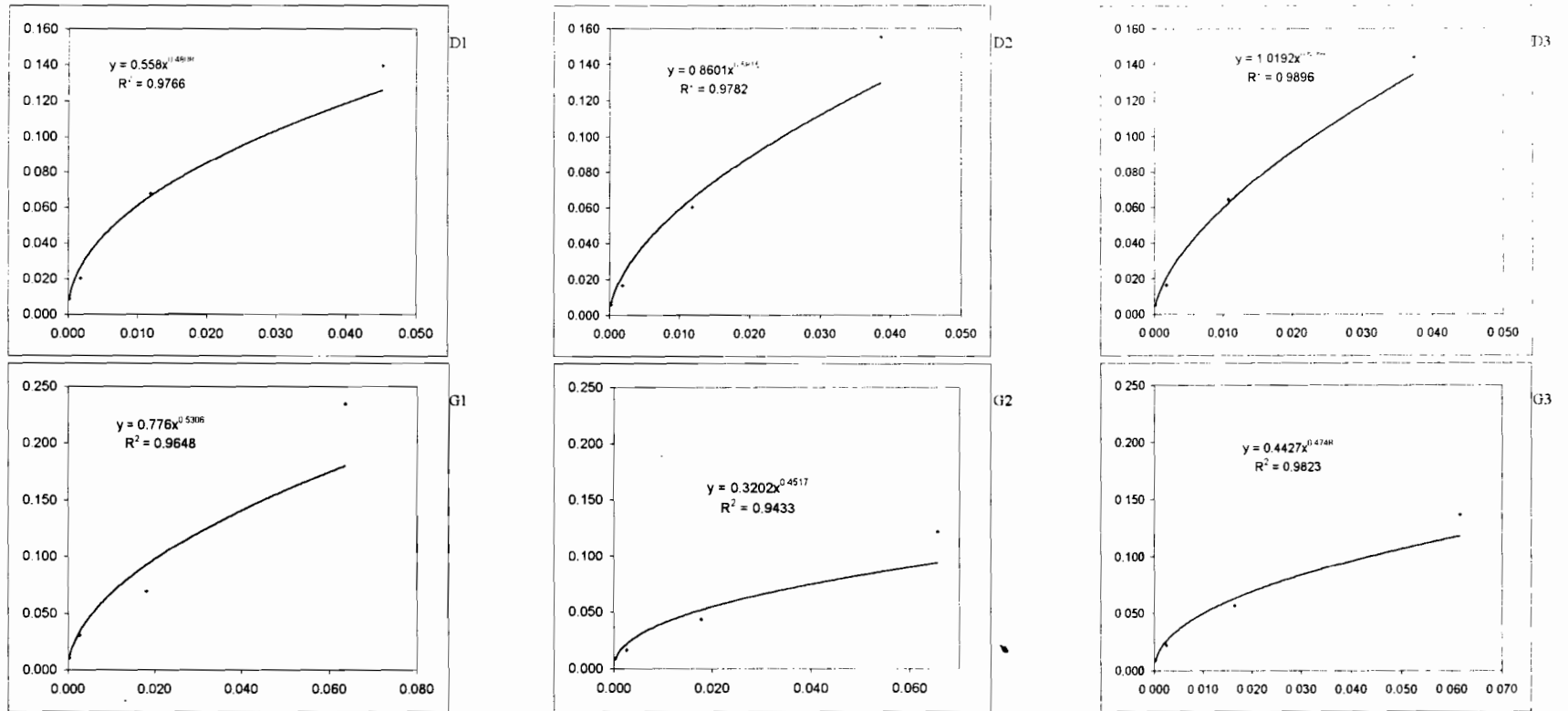


Figure 9: Isothermes d'échanges NH4-Mg
 $(NH_4)^2/(Mg) E_{NH_4^2}/E_{Mg}$

Tableau XXI

			α_{NH_4-Mg}	0.558	0.860	1.019	0.776	0.320	0.443						
			β_{NH_4-Mg}	0.481	0.582	0.616	0.531	0.4517	0.475						
			K_{NH_4-Mg}	0.466	0.358	0.314	0.369	0.755	0.579						
			$\Delta G_{NH_4-Mg}^0$	1.784	2.397	2.704	2.328	0.655	1.277						
			coefficient de sélectivité K_{G1NH_4-Mg}						coefficient de sélectivité K_{G3NH_4-Mg}						
			Donaye IT1			Guia 4			Donaye IT1			Guia 4			
Couple	Rap.(%)	Elt	D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3	
Mg/NH4	10	Mg													
Mg/NH4	25	Mg	0.411	0.321	0.277	0.443	0.918	0.586	6.22	5.032	5.181	5.553	8.358	7.377	
Mg/NH4	50	Mg	0.187	0.186	0.174	0.134	0.253	0.188	3.845	4.081	3.602	4.687	6.071	4.844	
Mg/NH4	75	Mg	0.065	0.088	0.096	0.085	0.145	0.133	2.403	2.735	2.696	2.292	3.351	2.742	
Mg/NH4	90	Mg	0.028	0.040	0.044	0.072	0.066	0.052	0.985	1.277	1.428	1.284	1.283	1.251	

IV.1.3.— Les isothermes d'échange M-K (M = Na ou NH4)

a) - Echange Na-K (Fig 10)

Dans l'échange Na-K, les isothermes, D_{3et1} et G_2 , sont presque linéaires pour les fractions $E_{Na} < 0.3$. Au delà de cette valeur la linéarité est rompue.

Les constantes d'équilibre sont comprises entre 10 et 14 pour Donaye IT1 et égales à 6 ± 0.2 pour le sol de Gui 4 (Tableau XXIII). La variation de l'énergie libre de l'échange pour chacun des sols est négative.

Les deux sols retiennent plus fortement le potassium que le sodium.

$$K_{GT(NH4-K)} \cong K_{G(NH4-K)}$$

K > Na pour Donaye IT1
K > Na pour Guia 4

Tableau XXII: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(Na) / (K) (%)	$K_{GT(Na-K)}$ calculé					
	Donaye IT1			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
10	14.56	12.35	10.27	6.69	8.14	6.52
24	11.43	12.55	10.77	7.89	5.66	6.70
49	12.14	8.74	8.30	4.37	4.83	4.03
74	11.85	7.48	11.24	5.12	3.73	3.09
90						

b) - Echange NH₄-K (Fig 11)

Dans l'échange NH₄-K, les isothermes sont presque linéaires pour tous les sols pour les fractions équivalentes de NH₄ inférieures à 0.7.

Les constantes de l'échange α_{NH_4-K} et β_{NH_4-K} sont très voisines pour chacun des des sols (Tableau XXV).

Les coefficients de sélectivité $K_{GT(NH_4-K)}$ sont très proches de un, pour les deux sols. Ils diminuent de 1.6 à 0.8 lorsque E_K croît de 0.1 à 0.9 pour Donaye IT1. Pour les deux sols les coefficients de sélectivité de Gaines et Thomas $K_{GT(NH_4-K)} \geq K_{G(NH_4-K)}$ (Tableau 14).

Les constantes d'équilibre sont 0.96; 1.22; 1.06 pour D_{1,2et3} et 1.23; 1.30; 1.36 pour G_{1,2et3}. Les valeurs de $\Delta G^0_{(NH_4-K)}$ sont présentées dans le tableau XXV.

Chacun de ces sols présentent légèrement plus d'affinité pour le potassium par rapport au l'ammonium mais cette préférence est inversée pour Donaye surface.

$$K_{GT(NH_4-K)} \cong K_{G(NH_4-K)}$$

$$K > NH_4$$

$$K \cong NH_4 \text{ pour } D_1$$

Le potassium est de préférence adsorbé à l'ammonium et au sodium par les deux sols. Les coefficients de sélectivité $K_{GT(NH_4-K)}$ et $K_{G(NH_4-K)}$ sont sensiblement identiques pour les deux sols et dépendent très légèrement de la profondeur.

Tableau XXIV: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

(NH ₄) / (K) (%)	K _{GT(NH₄-K)} calculé					
	Donaye IT1			Gua 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
10	1.061	1.419	0.960	1.440	1.412	1.381
25	1.079	1.345	1.203	1.271	1.304	1.659
50	1.175	1.326	1.294	1.260	1.435	1.389
75	1.035	1.310	1.178	1.503	1.424	1.473
90	0.578	0.717	0.744	0.722	0.844	0.818

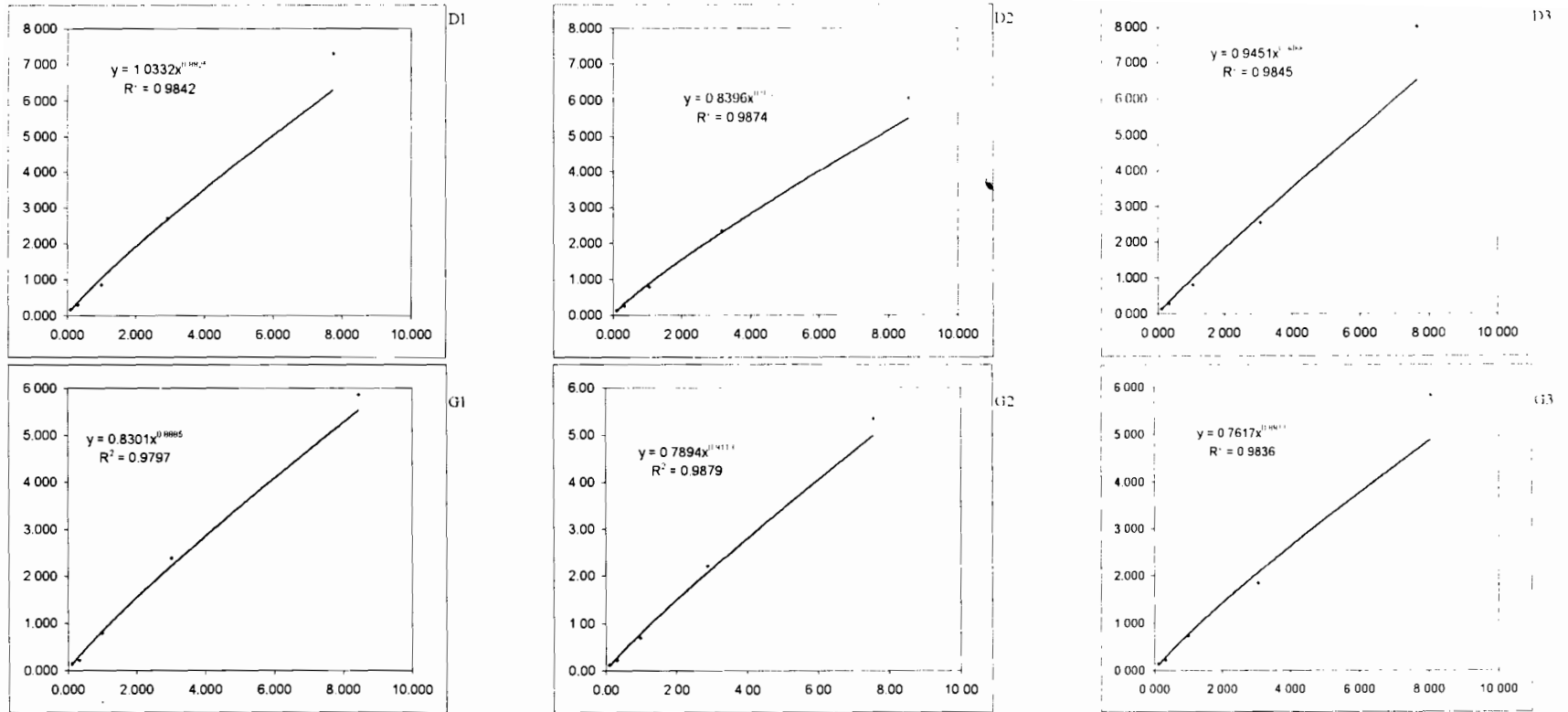


Figure 11: Isothermes d'échanges NH4-K
(NH4)/(K) E_{NH4}/E_K

Tableau XXV

$\alpha_{NH_4 - K}$	1.033	0.84	0.945	0.830	0.840	0.789
$\beta_{NH_4 - K}$	0.883	0.873	0.947	0.889	0.873	0.911
$K_{NN_4 - K}$	0.964	1.222	1.061	1.233	1.296	1.357
$\Delta G_{NH_4 - K}^0$	0.091	-0.497	-0.148	-0.519	-0.643	-0.757

Couple	Rap.(%)	Elit	coefficient de sélectivité $K_{\text{GTONH}_4\text{K}}$						coefficient de sélectivité $K_{\text{GTONH}_4\text{K}}$					
			Donaye IT1			Guia 4			Donaye IT1			Guia 4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3	D1	D2	D3	G1	G2	G3
K/NH4	10	K	1.256	1.589	1.194	1.540	1.526	1.684	1.309	1.492	1.174	2.795	1.854	1.81
K/NH4	25	K	1.100	1.384	1.400	1.375	1.401	1.463	0.457	0.484	0.448	0.866	0.707	0.971
K/NH4	50	K	0.944	1.180	1.184	1.197	1.250	1.304	0.162	0.166	0.16	0.383	0.317	0.309
K/NH4	75	K	0.821	1.001	1.011	1.019	1.120	1.127	0.042	0.045	0.047	0.086	0.084	0.095
K/NH4	90	K	0.753	0.916	0.949	0.968	1.061	1.059	0.012	0.012	0.012	0.021	0.021	0.021

IV.1.4.— Les isotherme d'échange Na-NH₄ (Fig 13)

Seuls les résultats de D_{1et3} et de G_{2et3} sont significatifs. Les courbes ont été établies à partir de trois points seulement, pour chacune. Elle montrent une bonne corrélation avec les points expérimentaux.

Les constantes d'échange α_{Na-NH_4} et β_{Na-NH_4} sont homogènes pour les deux sols et sont respectivement égales à 0.8 ± 0.1 et 0.42 ± 0.01 .

La variation des coefficients de sélectivité $K_{GT(NH_4-K)}$ est très hétérogène. Les $K_{GT(NH_4-K)}$ expérimentaux sont inférieurs aux $K_{G(NH_4-K)}$ théoriques pour les deux sols. (Tableau XXVII).

Les valeurs de K_{Na-NH_4} sont respectivement 2 pour D₁ et D₃ et 1.3 pour G₂ G₃. Les $\Delta G_{(Na-NH_4)}^{*0} < 0$. Ce qui montre l'affinité des deux sols pour l'adsorption du NH₄ par rapport au Na.

$K_{GT(Na - NH_4)} \text{ calculé} < K_{GT(Na-NH_4)} \text{ simulé}$
 $K_{GT(Na - NH_4)} \cong K_{G(Na-NH_4)}$
 NH₄ > Na pour les deux sols

Tableau XXVI: coefficient de sélectivité de Gaines et Thomas calculé

NH ₄ / Na (%)	K _{GT(Na - NH₄)} calculé					
	Donaye ITI			Guia 4		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
10	1.912		2.033		1.450	1.513
25	0.794		1.036		0.772	0.901
50	0.651		0.646		0.415	0.567

Cette étude descriptive permet de conclure partiellement que les cations divalents sont moins adsorbés par rapport au potassium et à l'ammonium par les sols Donaye IT1 et de Guia 4. Le potassium est préféré à l'ammonium et le calcium au magnésium.

Le sodium est le moins adsorbé par les deux sols.

Ces résultats peuvent être présentés par ordre décroissant d'affinité:

$K > NH_4 > Ca > Mg > Na$ pour le sol de Guia 4;

$K > NH_4 > Ca > Mg > Na$ pour le sol de Donaye IT1.

Dans le cas des échanges homovalents, les coefficients de sélectivité de Gaines et Thomas ($K_{GT(A-B)}$), simulés ou calculés, et ceux de Gapon ($K_{G(A-B)}$) sont identiques. Seul le sol de Gui 4 montre une légère dépendance de la variation de ces coefficients à la profondeur.

IV.2.— Discussion

Les isothermes d'échange obtenus par l'usage de la fonction puissance prouvent que le modèle puissance permet une bonne simulation de la variation des coefficients de sélectivité. Par rapport aux modèles paraboliques, trop concaves, la fonction puissance a en plus l'avantage de donner directement deux "constantes d'échange" (α_{A-B} et β_{A-B}) qui, comme la constante d'équilibre, ne dépendent que des états initial et final de la réaction d'échange. Ce qui est conforme à la loi d'action de masse, base des différentes expressions du coefficient de sélectivité des sols. Ce modèle tend à se linéariser dans les échanges où la constante d'équilibre thermodynamique est très proche de un (cas des isothermes NH_4-K).

Les écarts remarquables entre certaines courbes et les points expérimentaux, dans le cas du déplacement du sodium par les cations divalents, sont liés aux faibles proportions du sodium par rapport à celles de ces ions dans les solutions ($Na^+/M^{2+} < 50\%$).

L'usage de la fonction puissance dans l'appréciation du comportement des complexes actifs présente cependant des limites dans le cas des échanges cationiques hétérovalents pour lesquels les isothermes d'échange peuvent présenter une double concavité. Dans ces cas, les modèles paraboliques rendent mieux compte des variations des coefficients de sélectivité et permettent par conséquent d'obtenir des constantes thermodynamiques expérimentales fiables. Les isothermes d'échange $K-Ca$ sur le sol de Guia 4 illustrent bien ce comportement des surfaces réactives des sols que l'on retrouve dans certains travaux comme ceux de Feike et al., (1990).

Le comportement du complexe d'échange, des deux sols caractérisés par leur forte teneur en montmorillonite, est déjà trouvé dans d'autres travaux (Dolcater D.L. et al., 1968; Van Bladel R. et al., 1980; et Thabet G. A. et al., 1996). Les valeurs des constantes d'équilibre K_{A-B} obtenues dans cette étude sont sensiblement identiques à celles déterminées sur des aluminosilicates synthétiques de NH_4 , de Na ou de Ca; et de la bentonite K (Garrels M. R., et al., 1967). Van Bladel et al. (1980) ont trouvé, dans l'échange Ca-Mg, des valeurs de $1/K_{Ca-Mg}$ comprises entre 1.2 et 3.3 sur des sols calcaires à forte teneur en matière organique du Maroc. La très forte affinité des sols pour le calcium par rapport au sodium est également remarquée dans d'autres travaux et cette affinité dépendrait également de la teneur en matière organique de ces sols: Van Bladel R. et al. (1980); Rieu et al. (1991), (tableau XXVIII). Dans le cas des sols de Donaye IT1 et de Guia 4, les fractions organiques sont très faibles avec un maximum de 0.92% pour Guia 4 surface (d'après les travaux en cours de Poussin et al.). Ce qui justifierait les fortes valeurs de la constante thermodynamique dans l'échange Na-divalent (voir schémas interprétatif ci-après).

Robbins et al. (1980) ont obtenu par simulation numérique des coefficients sélectivité sensiblement identiques à ceux de ce travail: 0.29 à 0.46; 0.17 à 0.29 et 13.4 à 19.7 respectivement pour les échanges K-Ca, K-Mg et Na- K.

L'identité entre les coefficients de sélectivité de Gaines et Thomas simulés (ou calculés) et ceux de Gapon, dans le cas des échanges entre cations de même valence, est liée en partie à la presque égalité des coefficients d'activité des deux ions en compétition (Tableau VI).

Par contre dans le cas des échanges hétérovalents la différence entre les valeurs des coefficients de sélectivité est liée d'une part à la différence entre les coefficients d'activité des ions en compétition et d'autre part à la différence entre les deux formulations du coefficient de sélectivité (Equation 10 ; 19 et schémas interprétatif ci-après).

La variation très faible (ou nulle) des coefficients de sélectivité de Gaines et Thomas et ceux de Gapon en fonction de la profondeur serait liée à la très faible teneur en matière organique. L'essentiel des échanges est assuré par les argiles minéralogiques dont la répartition serait homogène dans la tranche d'échantillonnage pour les deux sols.

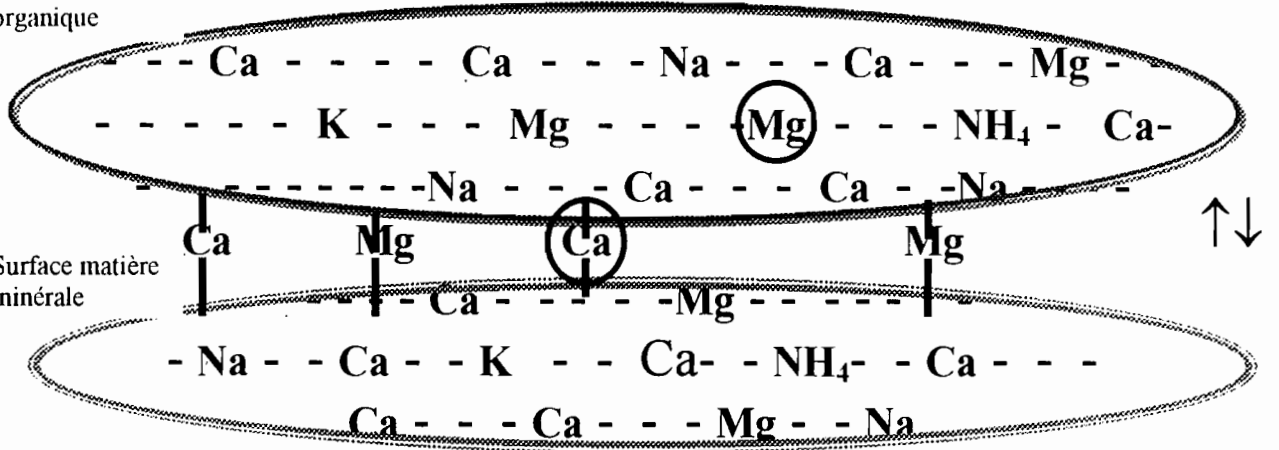
Ainsi, pour les deux sols, les forces d'attraction entre surfaces réactives et électrolytes, et le diamètre effectif déterminent pour l'essentiel les forces d'adsorption cationique. L'influence du paramètre de taille est plus marquée dans le cas des échanges K-divalents et NH_4 -divalents.

Tableau XXVIII: valeurs comparatives de K_{A-B} et de $K_{G(A-B)}$

Sols	K_{Na-Ca}°	K_{Na-Mg}°	$K_{G(Na-Ca)}$	Sources
sols du Brésil	3.2 à 5.8	1.8 à 3.7	35.4 à 71.9	Rieu et al. (1991)
sols calcaires du Maroc à forte teneur en matière organique	1.4 à 10			Van Bladel et al. (1980)
Vertisols du Maroc à forte teneur en matière organique		K_{Ca-Mg}° 1.2 à 3.3		Van Bladel et al. (1980)

Dans cette étude la constante thermodynamique $K_{A-B} = (K_{A-B})^2$

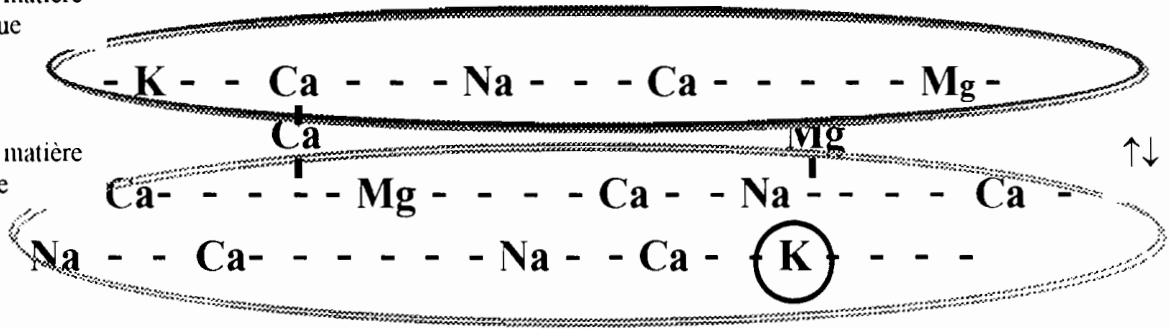
Surface matière organique



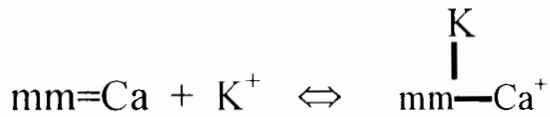
a

Surface matière organique

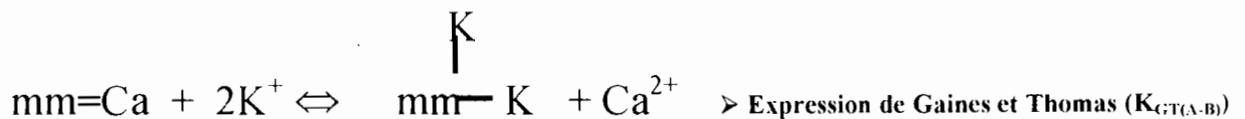
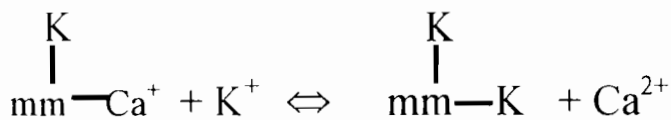
Surface matière minérale



b



> Expression de Gapon ($K_{G(A-B)}$)



Schémas: Interprétation des adsorptions cationiques

a - Cas sol argileux très riche en matière organique

↑↓ Répulsion mutuelle forte

b - Cas sol argileux très pauvre en matière organique

↑↓ Répulsion mutuelle faible

○ - Types de liaisons: mm-K; mo=Mg et mo-Ca-mm .

mm: matière minérale

mo: matière organique

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

V.— CONCLUSION GENERALE

Le potassium et l'ammonium sont de préférence adsorbés aux cation divalents. Ces derniers sont préférés au sodium.

Dans le cas des échanges homovalents, la formulation de Gaines et Thomas et celle de Gapon donnent les mêmes résultats; elles sont identiques. Par contre dans le cas des échanges hétérovalents, les coefficients de sélectivités de Gaines et Thomas (calculés ou simulés) sont inférieurs à ceux obtenus par l'expression de Gapon.

Pour les deux sols, l'abondance des cations divalents sur les complexes réactifs favorise la floculation des argiles par hydratation; ce qui contribue à l'amélioration de la structure de ces sols après déshydratation.

La très forte affinité des deux pour le potassium et l'ammonium est bénéfique pour les cultures.

La très faible affinité pour le sodium aura comme conséquence une augmentation de l'activité de cet ion lorsque l'eau d'irrigation se concentre par évaporation. La précipitation de chlorure de sodium sera donc favorisée.

La qualité de l'eau se détériore progressivement, parallèlement à sa concentration par évaporation.

La concentration de l'eau d'irrigation et celle de l'eau du sol en ions chlorures associée aux conditions d'oxydoréduction des sols vont déterminer l'adjonction de l'alcalinisation/sodisation aux processus de salinisation. Ces mécanismes vont surtout dépendre de la variation de la capacité d'échange cationique et donc de la minéralogie (beidellite, montmorillonite) des sols qui confère un pouvoir tampon à l'alcalinisation (Favre, 2000).

L'appréciation quantitative et qualitative de ces trois mécanismes de dégradation exige l'acquisition d'autres données.

VI.— PERSPECTIVES

Pour une meilleur prédiction des trois mécanismes par simulation numérique, les résultats de ce travail doivent être compléter par:

- ▶ **Une détermination expérimentale des isothermes d'échange Na-(Ca+Mg); ce qui permettrait d'établir une bonne corrélation entre le SAR et l'ESP.**

- ▶ **Une détermination des relations entre la constante d'équilibre thermodynamique ($K_{(A-B)}$) et les constantes de précipitation des sels (K_{ps}) et des carbonates (K_{pc}).**

- ▶ **Une étude complémentaire des caractéristiques géométriques et chimiques des nappes phréatiques.**

- ▶ **Une prise en compte des résultats des travaux de Favre (2000).**

Références bibliographiques

1. **BARBIERO L. (1995)** – Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger: origine de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Thèse, ENSAR, 212p.
2. **BOIVIN P., BRUNET D., GASCUEL C., et N'DIAYE J. P. (1993)** – Les sols lourds de la vallée alluviale, région de Podor : répartition, caractéristiques, aptitudes et risques liés à leur mise en valeur. Atelier « Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal », St-louis, 19-20-21 octobre 1993, I.S.R.A.-O.R.S.T.O.M., Dakar, 9p.
3. **BOIVIN P., MAEGHT J.L., POUSSIN J.C., SERRES T. (1994)** – Bilan hydro-salin et évolution géochimique des sols en rizière irriguée. Campagne de contre saison 1994. Rapport d'avancement des travaux, expérimentation ORSTOM-FED dans la moyenne vallée du fleuve, région de Nianga-Podor.
4. **BOIVIN P., Dia I., Lericollais A., Poussin J.C., Santoir C., et Seck S.D. (1995)** – Laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal. ORSTOM, France, collection colloques et séminaires, 562 p.
5. **BRABANT P., DARRACQ S. et SIMONNEUX V. (1997)** – Togo: état de la dégradation des terres. ORSTOM actualités (54): 29-34.
6. **CHERRY J. C. (1974)** – Contribution à l'étude pédologique des polders du Lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse docteur ès Sciences, ULP, Strasbourg, 275 p.
7. **DAUTREBANDE – GASPARD S., (1982)** – Amélioration des sols salins. Notes de cours, 135p.

8. **DOLCATER D. L., LOTSE E. G., SYERS J. K. and JACKSON M. L. (1968)** – Cation exchange selectivity of some clay-sized minerals and soils materials. Soil Sci. Soc. Am. Proc., vol. 32 (): 795 – 798.
9. **FAVRE F., TESSIER D., LARVY DELARIVIERE J., MAEGHT J. L., ABDELMOULA M., GENIN J. M., HAMMECKER C., GATES W.P. et BOIVIN P. (2000)** –Iron reduction and CEC changes in a temporarily reduced irrigated soil (accepté). European soil. Sci. J.
10. **GARRELS R.M et CHRIST C.L. (1967)** – Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Paris, Gauthier-Villars, 292 p.
11. **GUINARD A. (1996)** – Evolution de l'état structural des sols de la région de Podor (Sénégal) sous des contraintes chimiques de solutions percolantes. Mém. fin d'étude du Département Environnement et Ressources Naturelles, ENSA, 31 p.
12. **HAMMECKER C. (1993)** – Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en œuvre. Thèse, Université de Louis PASTEUR de Strasbourg.
13. **HAMMECKER C., BARBIERO L., BOIVIN P. et SAMBA D. R. (1998)** – Contribution of modelling solute and water transfer to the irrigation of saline soils in the valley of River Senegal. Proceedings of the 16th AISS Symposium, Montpellier, Aout 1998.
14. **HILLEL D. (1988)** – L'eau et le sol: principes et processus physiques. Université Catholique de Louvain, Unité de Génie Rural, 2^e édition revue: 11-53.
15. **ILOU A. (1995)** – Evolution des sols irrigués de la moyenne vallée du fleuve : aspects théoriques et étude par simulation. Mém. fin d'étude de l'Institut des Sciences de la Terre, Université Cheikh Anta Diop, Dakar. Multirg. ORSTOM Dakar, 47 p.
16. **KIM H.T. (1982)** – Cation exchange. Paul A.E. Principles of soil chemistry. Berkeley California: 163-171.

17. **LEIJ J. F. et DANE J. H. (1990)** – Determination of exchange isotherms for modeling cation. Soil Sci. Founded 1916 by Jacob G. L. at Rutgers, the State University. of New Jersey., vol. 150 (5): 8176 - 826.
18. **MAHAN B. H. (1977)** – Equilibre chimique, Equilibres ioniques en solution aqueuse. Inter Editions. Chimie., Paris, S. A: 174 -253.
19. **MALCOM E. SUMNER (1993)** – Sodic soils : New perspectives *in* Aust. J. Soil Res. 31(6): 683-742.
20. **MARLET S. (1996)** – Alcalinisation des sols dans la vallée du fleuve Niger (Niger) : Modélisation des processus physico-chimiques et évolution des sols sous irrigation. *Thèse*, Ecole Normale Supérieure Agronomique de Montpellier, 233 p.
21. **MARLET S. et N'DIAYE M. K. (1998)** – Evolution temporelle et variabilité spatiale des indicateurs de la dégradation des sols par alcalinisation et sodisation à l'office du Niger.
22. **MEYER L. (1997)** – Etude du transport des sels au cours des écoulements et de l'évolution des propriétés physiques du sol au contact de différentes solutions salines. Mém. EPFL. 40p.
23. **MICHEL P. (1973)** – Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie: Etude géomorphologiques. Mém. ORSTOM, Paris, 63, 1170p.
24. **NAIDU R. and RENGASAMY P. (1993)** – National Conference on Sodic Soils : Summary and Conclusions *in* Aust. J. Soil Res. 31(6): 949-956.
25. **N'DIAYE M. K. (1987)** – Evaluation de fertilité des sols à l'office du fleuve Niger (Mali). Contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumari. *Thèse Doct. Ing.*, INP Toulouse, 133p.
26. **RIEU M., TOUMA J. et GHEYI H.R. (1991)** – Sodium-calcium exchange on Brazilian soils: modeling the variations of selectivity coefficients. Soil Sci. Soc. Am. J. 55 (5):1294-1300.

27. **ROBBINS W. C., WAGENET J. R. and JURINAK J. J. (1980)** – Calculating cation exchange in a salt transport model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 ():1195-1200).
28. **SCHIESS S. (1995)** – Alcalinisation des sols irrigués de la moyenne vallée du fleuve Sénégal: diagnostic par évaluation du stock de carbonates. Travail pratique de diplôme EPEL., Département de Génie Rural . IATE. Pédologie: 3 - 27.
29. **SHEN S., TU S. I. and DORAL KEMPER W. (1997)** – Equilibrium and kinetic study of Ammonium adsorption and fixation in Sodium – treated Vermiculite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* vol. 61 (6) : 1611 – 1618.
30. **SO H. B. and AYLMOORE L. H. (1993)** – How do sodic soils behave ? The effects of sodicity on soil physical behaviour. *Aust. J. Soil Res.* 31(6): 761-777.
31. **SPOSITO G., HOLTZCLAW K. M., JOUANY C. and CHARLET L. (1983)** – Cation selectivity: Sodium-Calcium, Sodium-Magnesium and Calcium-Magnesium exchange on Wyoming Bentonite at 298 K. *Soil Sci. Soc. Am. J.* vol. 47 (5): 917 – 921.
32. **SPOSITO G., HOLTZCLAW K. M., JOUANY C. and PAGE A. L. (1983)** – Sodium – Calcium and Sodium – Magnesium Exchange on Wyoming Bentonite in Perchlorate and Chloride Background Ionique Media. *Soil Sci. Soc. Am. J.* vol. 47 (1) : 51 – 56.
33. **THABET A. G. and SELIM H. M. (1996)** – Determination of cation selectivity coefficients of soils materials: A Thin disk Flow method. *Soil Sci. Soc. Am.*, vol. 161 (6): 405 – 410.
34. **USSL STAFF (1954)** – Dianosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S Department of agriculture Handbook, 60 p.
35. **VALLES V., BERTRAND R. BOURGEAT F. et N'DIAYE M. (1989)** – Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et la vallée de l'Oued Medjerdah (Tunisie). *L'agronomie tropicale* 44 (3) : 157-163.

36. **VAN BLADEL et GHEYI H. R. (1980)** – Thermodynamic study of calcium-sodium and calcium-magnesium exchange in calcareous soils. *Soil Sci. Am. J.*, vol. 44 (5): 938 - 942.

37. **ZANTE P. (1994)** – Culture irriguée et évolution des sols argileux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : essai de caractérisation des sols physique. Mém. Stage, DESS, Université Paris XII, Val de Marne, 86 p.

ANNEXE 1

A) Figures - B) Tableaux dans le texte

A) Les Figures

	Pages
<u>Figure 1:</u> Carte de subdivision de la vallée du fleuve Sénégal.....	5
<u>Figure 2:</u> Carte de la région de PODOR (ORSTM, 1995).....	6
<u>Figure 3:</u> Isothermes d'échange Mg-Ca.....	35
<u>Figure 4:</u> Isothermes d'échange K-Ca.....	37
<u>Figure 5:</u> Isothermes d'échange Na-Ca.....	39
<u>Figure 6:</u> Isothermes d'échange NH ₄ -Ca.....	41
<u>Figure 7:</u> Isothermes d'échange K-Mg.....	43
<u>Figure 8:</u> Isothermes d'échange Na-Mg.....	45
<u>Figure 9:</u> Isothermes d'échange NH ₄ -Mg.....	47
<u>Figure 10:</u> Isothermes d'échange Na-K.....	49
<u>Figure 11:</u> Isothermes d'échange NH ₄ -K.....	51
<u>Figure 12:</u> Isothermes d'échange Na-NH ₄	53

B) Les Tableaux

	Pages
<u>Tableau I:</u> Les cinq voies d'évolution chimique des eaux d'irrigation	8
<u>Tableau II:</u> Composition chimique des du Doué, du lac Tchad et du fleuve Niger	8
<u>Tableau III:</u> Bases échangeables (Donayé IT1)	10

<u>Tableau IV</u> : Seuils critiques de l'ESP des sols.....	13
<u>Tableau V</u> : Tolérance de quelques plantes au pourcentage de sodium échangeable.....	14
<u>Tableau VI</u> : Forces ioniques et coefficients d'activité ionique.....	31
<u>Tableau VII</u> : Bases échangeables , capacité d'échange cationique et ESP	32
<u>Tableau VIII - X - XII - XIV - XVI - XVIII - XX - XXII - XXIV - XXVI</u> : Coefficients de sélectivité de Gaines et Thomas calculés.....	34 -51 (pairs).
<u>Tableau IX - XI - XIII - XV - XVII - XIX - XXI - XXIII - XXV - XXVII</u> : Coefficients de sélectivité de Gaines-Thomas (simulés) et de Gapon	35-53 (impairs).

ANNEXE 2

A) Sels utilisés - B) Résultats en mg/l - C) Activités et fraction équivalentes

A) - Sels utilisés dans la préparation des solutions d'échange

Sels utilisés	Masses molaires (g)
$\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$	147.02
$\text{MgCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$	203.31
KCl	74.56
NH_4Cl	53.49
NaCl	58.44

C couple	Rap. %	El.	T. théo	T. dosé	mg/L											
					D 1-1	D 1-2	D 2-1	D 2-2	D 3-1	D 3-2	G 1-1	G 1-2	G 2-1	G 2-2	G 3-1	G 3-2
Ca/NH4	10	Na	460	499	493	513	485	472	483	476	471	470	510	517	520	553
Ca/NH4	25	Na	460	514	503	496	490	473	509	498	485	496	547	508	543	539
Ca/Mg	50	Na	460	458	479	486	475	475	494	488	497	500	546	520	529	534
Ca/NH4	75	Na	460	480	509	495	469	474	478	469	461	475	523	506	537	538
Ca/NH4	90	Na	460	472	477	482	466	470	487	284	276	432	500	507	306	396
Ca/NH4	10	Mg	486	573	595	607	586	600	570	567	552	543	579	545	552	576
Ca/NH4	25	Mg	486	576	614	608	617	595	621	610	591	586	592	554	592	589
Ca/NH4	50	Mg	486	443	546	576	581	573	607	610	553	559	566	534	584	582
Ca/NH4	75	Mg	486	534	646	632	613	621	601	589	551	570	586	564	586	576
Ca/NH4	90	Mg	486	500	580	582	592	591	588	1006	906	504	544	567	984	1271
Mg/K	10	Mg	97	98	241	240	272	254	265	270	183	181	208	195	205	194
Mg/K	25	Mg	243	256	385	380	363	367	409	390	323	364	395	394	388	371
Mg/K	50	Mg	486	443	546	576	581	573	607	610	553	559	566	534	584	582
Mg/K	75	Mg	729	912	903	883	884	861	837	830	843	816	862	828	844	909
Mg/K	90	Mg	875	1010	994	973	1078	954	1012	991	935	1048	983	966	998	969
Mg/K	10	Ca	802	941	1018	1022	1114	1084	1036	1084	965	963	937	938	1055	893
Mg/K	25	Ca	802	756	1042	1068	1063	1044	1150	1119	1021	1060	1146	1124	1089	1005
Mg/K	50	Ca	758	837	1021	1108	1128	1151	1169	1184	1121	1071	976	959	1018	1051
Mg/K	75	Ca	802	972	1137	1100	1134	1117	1090	1179	1024	1041	1003	957	967	1015
Mg/K	90	Ca	802	922	1102	1077	1116	1076	1158	1161	932	976	983	958	979	953
Mg/K	10	K	1408	1456	953	972	1017	982	950	950	1197	1165	1199	1171	1199	1202
Mg/K	25	K	1173	1200	867	868	805	816	808	800	1015	1065	1150	1123	1060	1041
Mg/K	50	K	782	809	565	572	559	548	540	541	718	698	711	689	687	684
Mg/K	75	K	391	448	291	277	275	271	250	263	333	329	352	356	351	330
Mg/K	90	K	156	166	123	114	121	111	110	105	132	144	160	155	151	160
Mg/K	10	Na	460	461	445	455	482	454	466	469	487	471	504	507	526	521
Mg/K	25	Na	460	470	503	502	464	472	504	494	494	511	592	587	573	558
Mg/K	50	Na	460	458	479	486	475	475	494	488	497	500	546	520	529	534
Mg/K	75	Na	460	559	502	506	515	479	498	503	487	494	544	525	541	546
Mg/K	90	Na	460	501	496	477	494	464	513	500	463	484	532	530	543	526
Mg/K	10	NH4	361	361	251	251	272	255	225	257	304	302	299	295	298	300
Mg/K	25	NH4	361	352	276	271	260	261	256	256	311	329	342	343	321	316
Mg/K	50	NH4	361	362	262	275	274	269	265	266	329	332	322	328	320	325
Mg/K	75	NH4	361	404	285	271	283	267	257	259	319	321	324	315	323	326
Mg/K	90	NH4	361	388	270	262	272	253	270	264	308	321	320	314	320	310
Mg/Na	10	Na	828	883	844	839	844	823	856	839	860	868	949	885	902	897
Mg/Na	25	Na	690	734	708	705	699	707	717	707	717	843	716	765	764	803
Mg/Na	50	Na	460	458	479	486	475	475	494	488	497	500	546	520	529	534
Mg/Na	75	Na	230	253	269	260	245	240	265	257	237	249	280	286	276	311
Mg/Na	90	Na	92	100	124	118	107	105	121	124	108	108	148	144	156	152
Mg/Na	10	Mg	97	87	227	225	233	227	240	236	169	171	193	185	188	189
Mg/Na	25	Mg	243	258	362	359	387	398	397	393	334	393	340	356	364	366
Mg/Na	50	Mg	486	443	546	576	581	573	607	610	553	559	566	534	584	582
Mg/Na	75	Mg	729	863	859	960	892	859	871	856	804	792	799	864	852	835
Mg/Na	90	Mg	875	990	1027	992	995	960	985	1003	981	968	946	930	961	958
Mg/Na	10	Ca	802	994	1030	1028	1023	1009	1016	1037	1006	1003	1009	945	931	934
Mg/Na	25	Ca	802	946	1038	1036	1051	1075	1064	1025	957	1025	983	952	975	1000
Mg/Na	50	Ca	758	837	1021	1108	1128	1151	1169	1184	1121	1071	976	959	1018	1051
Mg/Na	75	Ca	802	916	1078	1109	1115	1127	1140	1095	929	937	934	938	935	925
Mg/Na	90	Ca	802	870	1118	1082	1112	1103	1101	1101	985	970	940	901	941	951
Mg/Na	10	K	782	859	525	534	534	520	520	504	663	664	706	649	659	654
Mg/Na	25	K	782	867	553	548	565	559	533	524	681	766	686	708	682	716
Mg/Na	50	K	782	809	565	572	559	548	540	541	718	698	711	689	687	684
Mg/Na	75	K	782	849	565	562	557	539	537	528	665	656	684	693	659	670
Mg/Na	90	K	782	835	599	572	584	564	544	543	664	671	695	665	679	675
Mg/Na	10	NH4	361	382	249	254	252	249	245	243	310	312	315	295	294	298
Mg/Na	25	NH4	361	380	264	253	267	262	253	255	313	344	320	313	304	323
Mg/Na	50	NH4	361	362	262	275	274	269	265	266	329	332	322	328	320	325
Mg/Na	75	NH4	361	374	261	261	263	251	254	251	307	319	318	320	317	320
Mg/Na	90	NH4	361	381	279	281	281	271	271	278	327	325	309	303	324	302

Couple	Rap. %	Elt	T. théo	T. dosé	D 1-1	D 1-2	D 2-1	D 2-2	D 3-1	D 3-2	G 1-1	G 1-2	G 2-1	G 2-2	G 3-1	G 3-2
mg/L																
Mg/NH4	10	Mg	97	59	184	180	189	199	187	186	146	153	147	140	143	168
Mg/NH4	25	Mg	243	230	347	351	410	371	391	381	315	333	317	330	356	319
Mg/NH4	50	Mg	486	443	546	576	581	573	607	610	553	559	566	534	584	582
Mg/NH4	75	Mg	729	783	808	865	820	818	827	836	926	834	830	803	828	878
Mg/NH4	90	Mg	875	956	928	926	886	903	884	897	898	894	906	896	942	928
Mg/NH4	10	NH4	649	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg/NH4	25	NH4	541	556	417	406	397	407	397	389	461	479	474	480	472	473
Mg/NH4	50	NH4	361	362	262	275	274	269	265	266	329	332	322	328	320	325
Mg/NH4	75	NH4	180	176	129	124	128	126	123	127	159	158	152	153	152	148
Mg/NH4	90	NH4	72	68	38	37	36	40	38	40	50	50	46	48	48	48
Mg/NH4	10	K	782	842	480	479	471	477	465	452	650	633	640	630	624	659
Mg/NH4	25	K	782	880	599	603	583	558	539	535	669	674	685	688	656	651
Mg/NH4	50	K	782	809	565	572	559	548	540	541	718	698	711	689	687	684
Mg/NH4	75	K	782	818	536	537	536	537	505	519	648	660	651	674	655	651
Mg/NH4	90	K	782	826	532	540	510	506	495	504	629	635	651	636	657	649
Mg/NH4	10	Na	460	1354	1288	1284	1278	1280	1314	1297	1362	1382	1313	1342	1329	1377
Mg/NH4	25	Na	460	484	482	476	467	457	479	480	470	469	501	529	522	529
Mg/NH4	50	Na	460	458	479	486	475	475	494	488	497	500	546	520	529	534
Mg/NH4	75	Na	460	444	444	449	430	442	444	453	446	444	487	492	488	495
Mg/NH4	90	Na	460	474	475	469	452	458	472	464	456	461	504	508	514	514
Mg/NH4	10	Ca	802	934	950	929	913	922	939	910	854	864	800	797	805	891
Mg/NH4	25	Ca	802	934	1084	1069	1037	1120	1122	1109	981	983	987	980	957	916
Mg/NH4	50	Ca	758	837	1021	1108	1128	1151	1169	1184	1121	1071	976	959	1018	1051
Mg/NH4	75	Ca	802	834	1112	1007	1167	1161	1169	1196	1009	983	952	1063	1007	921
Mg/NH4	90	Ca	802	859	1070	1076	1078	1047	1073	1025	952	954	908	922	943	916
K/NH4	10	K	156	159	119	127	114	113	124	112	136	138	147	142	135	129
K/NH4	25	K	391	393	277	280	261	258	256	259	336	314	328	331	325	335
K/NH4	50	K	782	809	565	572	559	548	540	541	718	698	711	689	687	684
K/NH4	75	K	1173	1183	758	752	753	747	802	769	952	943	972	991	994	983
K/NH4	90	K	1408	1496	975	956	943	921	952	936	1175	1135	1209	1153	1135	1157
K/NH4	10	NH4	649	626	449	447	473	442	418	434	545	542	511	515	498	501
K/NH4	25	NH4	541	539	378	384	398	371	369	373	465	457	451	444	441	509
K/NH4	50	NH4	361	362	262	275	274	269	265	266	329	332	322	328	320	325
K/NH4	75	NH4	180	162	109	110	119	117	118	120	143	150	145	149	152	147
K/NH4	90	NH4	72	71	44	38	46	41	46	44	55	59	64	56	65	51
K/NH4	10	Mg	486	466	516	523	531	533	545	521	523	519	519	486	516	505
K/NH4	25	Mg	541	541	541	541	541	541	541	541	532	526	536	523	535	535
K/NH4	50	Mg	486	443	550	538	546	544	534	538	510	506	514	504	530	514
K/NH4	75	Mg	486	487	511	520	518	508	532	553	513	511	518	532	530	537
K/NH4	90	Mg	486	472	520	515	517	522	536	524	482	489	494	536	520	496
K/NH4	10	Ca	802	901	1063	1072.5	1077	1045	1051.5	1030.5	952.5	947	909	901	918	925.5
K/NH4	25	Ca	802	870	1035	1032.5	1055.5	1037.5	1022.5	1083.5	974.5	969.5	931.5	922	956	941
K/NH4	50	Ca	802	837	1021	1108	1128	1151	1169	1184	1121	1071	976	959	1018	1051
K/NH4	75	Ca	802	852	938.5	961.5	964.5	979	1053	1073.5	917.5	917	899	952.5	979	949
K/NH4	90	Ca	802	854	1024	924	976	997	1006	955	878	878	951	921	953	844
K/Na	10	K	156	171	104	104	99	103	105	105	131	122	139	129	135	133
K/Na	25	K	391	398	258	261	242	242	236	252	306	342	316	321	319	302
K/Na	50	K	782	809	565	572	559	548	540	541	718	698	711	689	687	684
K/Na	75	K	1173	1149	765	759	739	735	731	731	898	898	926	881	876	882
K/Na	90	K	1408	1408	906	941	973	973	967	967	1208	1203	1208	1197	1183	1163
K/Na	10	Na	828	814	783	783	774	758	782	784	757	748	802	795	803	809
K/Na	25	Na	690	698	660	678	662	664	677	679	685	762	714	712	725	743
K/Na	50	Na	460	460	466	460	448	448	468	468	458	454	498	494	520	506
K/Na	75	Na	230	242	254	256	240	234	270	270	241	242	289	282	290	287
K/Na	90	Na	92	92	116	119	121	130	136	126	111	155	156	169	156	164
K/Na	10	Ca	802	845	986	1021	990	1040	1038	1046	929	908	907	918	923	960
K/Na	25	Ca	802	876	1107	1120	1029	1031	1038	1026	977	1042	888	899	931	923
K/Na	50	Ca	802	837	1021	1108	1128	1151	1169	1184	1121	1071	976	959	1018	1051
K/Na	75	Ca	802	1001	1016	970	996	1027	1024	996	946	917	950	898	904	884
K/Na	90	Ca	802	805	959	990	1049	1043	1066	1089	971	967	965	1037	1046	1049

Couple	Rap.%	Elt	T.théo	T.dosé	mg/L											
					D 1-1	D 1-2	D 2-1	D 2-2	D 3-1	D 3-2	G 1-1	G 1-2	G 2-1	G 2-2	G 3-1	G 3-2
K/Na	10	Mg	486	494	526	536	512	519	517	519	496	496	480	490	495	484
K/Na	25	Mg	486	481	516	512	526	527	521	526	496	557	484	492	513	506
K/Na	50	Mg	486	443	550	538	546	544	534	538	510	506	514	504	530	514
K/Na	75	Mg	486	513	524	506	530	520	517	511	469	483	478	486	484	491
K/Na	90	Mg	486	461	502	522	533	521	556	1006	515	496	495	516	506	510
K/Na	10	NH4	361	367	252	250	239	245	245	247	293	292	279	287	282	292
K/Na	25	NH4	361	357	253	254	246	254	232	236	306	340	299	291	285	303
K/Na	50	NH4	361	362	262	275	274	269	265	266	329	332	322	328	320	325
K/Na	75	NH4	361	356	250	236	251	253	235	247	285	292	276	288	279	285
K/Na	90	NH4	361	336	232	252	243	264	250	258	315	296	288	290	286	289
Na/NH4	10	Na	92	120	120	116	181	181	119	119	105	115	150	143	154	154
Na/NH4	25	Na		232	232	232	238	231	248	251	232	239	274	272	279	283
Na/NH4	50	Na		460	479	479	475	475	494	488	497	500	520	520	529	534

Couple	Rap (°a)	El	activité (mol/l)					
			Donayc IT1			Gms 4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Ca/Mg	10	Ca	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
Ca/Mg	22	Ca	0.005	0.006	0.006	0.004	0.004	0.004
Ca/Mg	41	Ca	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008
Ca/Mg	72	Ca	0.010	0.011	0.011	0.450	0.010	0.010
Ca/Mg	89	Ca	0.012	0.011	0.013	0.012	0.012	0.012
Ca/Mg	90	Mg	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013
Ca/Mg	78	Mg	0.012	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012
Ca/Mg	59	Mg	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009
Ca/Mg	28	Mg	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005
Ca/Mg	11	Mg	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003

Couple	Rap (°a)	El	activité (mol/l)					
			Donayc IT1			Gms 4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Ca/K	6	Ca	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
Ca/K	14	Ca	0.005	0.006	0.006	0.004	0.004	0.005
Ca/K	35	Ca	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008
Ca/K	58	Ca	0.011	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011
Ca/K	81	Ca	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013
Ca/K	94	K	0.016	0.016	0.016	0.020	0.020	0.020
Ca/K	86	K	0.015	0.014	0.014	0.018	0.018	0.018
Ca/K	65	K	0.009	0.009	0.009	0.011	0.011	0.011
Ca/K	42	K	0.004	0.003	0.003	0.005	0.005	0.005
Ca/K	9	K	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003

Fraction équivalente(E1-E1-E2)						
Donayc IT1			Gms 4			
D1	D2	D3	G1	G2	G3	
0.517	0.542	0.535	0.458	0.456	0.494	
0.551	0.551	0.553	0.513	0.505	0.542	
0.581	0.599	0.594	0.553	0.530	0.560	
0.640	0.625	0.627	0.580	0.575	0.615	
0.680	0.670	0.664	0.668	0.655	0.684	
0.463	0.458	0.465	0.542	0.544	0.506	
0.449	0.449	0.447	0.487	0.495	0.458	
0.419	0.401	0.406	0.447	0.470	0.440	
0.360	0.375	0.373	0.420	0.425	0.385	
0.320	0.330	0.336	0.332	0.335	0.316	

Fraction équivalente(E1/E1-E2)						
Donayc IT1			Gms 4			
D1	D2	D3	G1	G2	G3	
0.665	0.689	0.695	0.532	0.616	0.654	
0.753	0.751	0.761	0.689	0.717	0.767	
0.801	0.815	0.821	0.730	0.756	0.796	
0.864	0.868	0.880	0.820	0.819	0.847	
0.950	0.955	0.957	0.949	0.940	0.960	
0.115	0.111	0.105	0.468	0.184	0.246	
0.247	0.230	0.239	0.111	0.264	0.233	
0.199	0.185	0.179	0.270	0.244	0.204	
0.136	0.132	0.120	0.180	0.181	0.153	
0.100	0.095	0.083	0.051	0.060	0.080	

Couple	Rap. (%)	Elr	activité (mol/l)					
			Donays IT1			Gua 1		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Ca/Na	5	Ca	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002
Ca/Na	14	Ca	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003	0.003
Ca/Na	32	Ca	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007
Ca/Na	58	Ca	0.008	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007
Ca/Na	80	Ca	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008
Ca/Na	95	Na	0.024	0.024	0.024	0.024	0.026	0.026
Ca/Na	86	Na	0.020	0.021	0.021	0.021	0.022	0.023
Ca/Na	68	Na	0.015	0.014	0.015	0.015	0.016	0.016
Ca/Na	42	Na	0.007	0.007	0.008	0.007	0.009	0.009
Ca/Na	20	Na	0.004	0.003	0.004	0.003	0.005	0.005

Fraction équivalente (F1-F2)					
Donays IT1			Gua 1		
D1	D2	D3	G1	G2	G3
0.901	0.920	0.898	0.837	0.825	0.855
0.918	0.938	0.921	0.901	0.896	0.926
0.964	0.961	0.944	0.933	0.934	0.930
0.983	0.976	0.974	0.984	0.944	0.960
0.987	0.981	0.974	0.970	0.946	0.945
0.999	0.980	0.102	0.163	0.174	0.145
0.082	0.062	0.073	0.099	0.104	0.074
0.036	0.039	0.056	0.067	0.066	0.070
0.017	0.024	0.024	0.016	0.056	0.034
0.013	0.020	0.024	0.030	0.054	0.055

Couple	Rap. (%)	Elr	activité (mol/l)					
			Donays IT1			Gua 1		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Ca/NH4	5	Ca	0.005	0.005	0.005	0.003	0.003	0.003
Ca/NH4	14	Ca	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005
Ca/NH4	32	Ca	0.009	0.010	0.010	0.009	0.008	0.009
Ca/NH4	58	Ca	0.013	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011
Ca/NH4	80	Ca	0.014	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013
Ca/NH4	95	NH4	0.020	0.019	0.019	0.022	0.023	0.021
Ca/NH4	86	NH4	0.017	0.017	0.016	0.020	0.019	0.019
Ca/NH4	68	NH4	0.010	0.011	0.010	0.011	0.013	0.013
Ca/NH4	42	NH4	0.005	0.005	0.004	0.006	0.006	0.006
Ca/NH4	20	NH4	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

Fraction équivalente (E1-E2)					
Donays IT1			Gua 1		
D1	D2	D3	G1	G2	G3
0.703	0.704	0.701	0.573	0.637	0.677
0.741	0.751	0.752	0.673	0.688	0.740
0.841	0.851	0.849	0.805	0.855	0.863
0.913	0.905	0.911	0.871	0.901	0.908
0.948	0.953	0.952	0.914	0.940	0.949
0.297	0.296	0.299	0.427	0.461	0.421
0.259	0.249	0.248	0.327	0.312	0.260
0.159	0.149	0.151	0.195	0.145	0.137
0.087	0.095	0.090	0.129	0.099	0.092
0.042	0.047	0.048	0.086	0.060	0.051

			actives (mol)					
Couple	Rap (%)	Eh	Donayc IT1			Cna 2		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Mg/K	10	Mg	0.004	0.004	0.005	0.003	0.003	0.003
Mg/K	25	Mg	0.006	0.006	0.007	0.006	0.007	0.006
Mg/K	50	Mg	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009
Mg/K	75	Mg	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013	0.014
Mg/K	90	Mg	0.016	0.016	0.016	0.016	0.015	0.016
Mg/K	10	K	0.018	0.019	0.018	0.022	0.022	0.022
Mg/K	25	K	0.016	0.015	0.015	0.019	0.021	0.019
Mg/K	50	K	0.010	0.010	0.010	0.013	0.013	0.013
Mg/K	75	K	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006
Mg/K	90	K	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003

			Fraction equivalente(F1-F2)					
Couple	Rap (%)	Eh	Donayc IT1			Cna 2		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Mg/K	10	Mg	0.573	0.591	0.596	0.530	0.610	0.553
Mg/K	25	Mg	0.672	0.666	0.666	0.666	0.830	0.645
Mg/K	50	Mg	0.748	0.753	0.761	0.771	0.808	0.717
Mg/K	75	Mg	0.842	0.838	0.854	0.828	0.871	0.798
Mg/K	90	Mg	0.911	0.938	0.933	0.935	0.965	0.936
Mg/K	10	K	0.427	0.406	0.404	0.450	0.390	0.449
Mg/K	25	K	0.328	0.334	0.334	0.334	0.170	0.355
Mg/K	50	K	0.252	0.247	0.236	0.227	0.192	0.283
Mg/K	75	K	0.158	0.152	0.146	0.172	0.126	0.202
Mg/K	90	K	0.069	0.062	0.067	0.065	0.035	0.064

			actives (mol)					
Couple	Rap (%)	Eh	Donayc IT1			Cna 2		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Mg/Na	10	Mg	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
Mg/Na	25	Mg	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006
Mg/Na	50	Mg	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009
Mg/Na	75	Mg	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013
Mg/Na	90	Mg	0.016	0.015	0.016	0.015	0.015	0.015
Mg/Na	10	Na	0.027	0.027	0.028	0.028	0.030	0.029
Mg/Na	25	Na	0.023	0.023	0.023	0.025	0.024	0.025
Mg/Na	50	Na	0.015	0.014	0.015	0.015	0.016	0.016
Mg/Na	75	Na	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009
Mg/Na	90	Na	0.004	0.003	0.004	0.003	0.005	0.005

			Fraction equivalente(F1-F2)					
Couple	Rap (%)	Eh	Donayc IT1			Cna 2		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Mg/Na	10	Mg	0.851	0.858	0.847	0.832	0.851	0.851
Mg/Na	25	Mg	0.889	0.893	0.873	0.835	0.799	0.873
Mg/Na	50	Mg	0.939	0.938	0.906	0.892	0.870	0.873
Mg/Na	75	Mg	0.965	0.936	0.939	0.917	0.887	0.891
Mg/Na	90	Mg	0.986	0.972	0.959	0.962	0.930	0.919
Mg/Na	10	Na	0.147	0.142	0.153	0.158	0.149	0.223
Mg/Na	25	Na	0.111	0.107	0.127	0.165	0.201	0.127
Mg/Na	50	Na	0.051	0.062	0.094	0.108	0.130	0.125
Mg/Na	75	Na	0.035	0.054	0.063	0.061	0.111	0.109
Mg/Na	90	Na	0.014	0.028	0.041	0.038	0.070	0.081

Couple	Rap. (%)	El	activité (mol/l)					
			Donnye IT1			Cna-4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
Mg/NH4	10	Mg						
Mg/NH4	25	Mg	0.006	0.007	0.006	0.005	0.005	0.006
Mg/NH4	50	Mg	0.009	0.009	0.010	0.009	0.009	0.010
Mg/NH4	75	Mg	0.013	0.013	0.013	0.014	0.013	0.014
Mg/NH4	90	Mg	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015
Mg/NH4	90	NH4						
Mg/NH4	75	NH4	0.016	0.016	0.016	0.019	0.019	0.019
Mg/NH4	50	NH4	0.010	0.011	0.010	0.013	0.013	0.013
Mg/NH4	25	NH4	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006
Mg/NH4	10	NH4	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002

Fraction équivalente(E1-E1-E2)								
Donnye IT1			Cna-4			Cna-4		
D1	D2	D3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
0.687	0.686	0.696	0.620	0.712	0.698			
0.770	0.772	0.778	0.763	0.818	0.806			
0.852	0.857	0.856	0.828	0.852	0.811			
0.897	0.914	0.919	0.842	0.891	0.886			
0.309	0.326	0.317	0.381	0.294	0.309			
0.229	0.216	0.224	0.233	0.189	0.214			
0.131	0.120	0.118	0.139	0.118	0.134			
0.090	0.074	0.069	0.096	0.089	0.091			

Couple	Rap. (%)	El	activité (mol/l)					
			Donnye IT1			Cna-4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
K/Na	10	K	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
K/Na	25	K	0.005	0.004	0.004	0.006	0.006	0.006
K/Na	50	K	0.010	0.010	0.010	0.013	0.011	0.013
K/Na	75	K	0.014	0.013	0.013	0.016	0.017	0.016
K/Na	90	K	0.017	0.018	0.018	0.022	0.022	0.021
K/Na	90	Na	0.025	0.025	0.025	0.024	0.026	0.026
K/Na	75	Na	0.022	0.021	0.022	0.023	0.023	0.024
K/Na	50	Na	0.015	0.014	0.015	0.015	0.016	0.016
K/Na	25	Na	0.008	0.008	0.009	0.008	0.009	0.009
K/Na	10	Na	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005

Fraction équivalente(E1-E1-E2)								
Donnye IT1			Cna-4			Cna-4		
D1	D2	D3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
0.438	0.497	0.451	0.358	0.385	0.334			
0.722	0.705	0.662	0.671	0.596	0.626			
0.890	0.862	0.817	0.791	0.707	0.766			
0.954	0.924	0.942	0.911	0.869	0.846			
0.992	1.03	0.973	0.995	0.967	0.908			
0.462	0.503	0.549	0.642	0.615	0.666			
0.278	0.295	0.338	0.327	0.404	0.374			
0.11	0.118	0.133	0.209	0.203	0.234			
0.046	0.076	0.058	0.089	0.111	0.154			
0.008	0.01	0.027	0.005	0.033	0.092			

Couple	Rap. (%)	Eh	activité (mol/l)					
			Donayc IT1			Cnaa 4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
KNH4	10	K	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002
KNH4	25	K	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006
KNH4	50	K	0.010	0.010	0.010	0.013	0.013	0.013
KNH4	75	K	0.014	0.014	0.014	0.017	0.018	0.018
KNH4	90	K	0.018	0.017	0.017	0.021	0.022	0.021
KNH4	10	NH4	0.017	0.018	0.017	0.021	0.020	0.019
KNH4	25	NH4	0.015	0.015	0.014	0.018	0.017	0.019
KNH4	50	NH4	0.010	0.011	0.010	0.013	0.013	0.011
KNH4	75	NH4	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006
KNH4	90	NH4	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

Donayc IT1	Fraction équivalente(E1-E1+E2)					
	Cnaa 4					
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
	0.121	0.112	0.111	0.136	0.158	0.136
	0.270	0.299	0.282	0.296	0.311	0.351
	0.519	0.550	0.551	0.550	0.502	0.581
	0.770	0.796	0.785	0.821	0.817	0.821
	0.865	0.878	0.880	0.873	0.886	0.884
	0.879	0.858	0.889	0.854	0.842	0.854
	0.710	0.701	0.718	0.704	0.680	0.640
	0.461	0.441	0.441	0.441	0.408	0.479
	0.230	0.204	0.215	0.179	0.183	0.179
	0.115	0.122	0.120	0.127	0.114	0.116

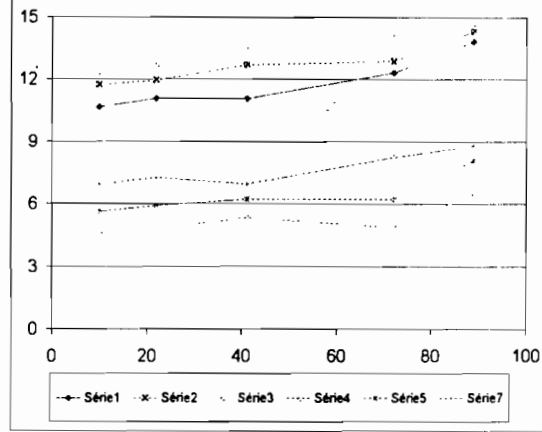
Couple	Rap. (%)	Eh	activité (mol/l)					
			Donayc IT1			Cnaa 4		
			D1	D2	D3	G1	G2	G3
NH4/Na	10	NH4	0.011		0.010		0.013	0.013
NH4/Na	25	NH4	0.016		0.014		0.017	0.016
NH4/Na	50	NH4	0.018		0.018		0.021	0.021
NH4/Na	90	Na	0.019		0.019		0.020	0.021
NH4/Na	75	Na	0.009		0.010		0.010	0.011
NH4/Na	50	Na	0.005		0.005		0.004	0.006

Donayc IT1	Fraction équivalente(E1-E1+E2)					
	Cnaa 4					
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
	0.895		0.840		0.769	0.746
	0.874		0.882		0.820	0.814
	0.927		0.881		0.781	0.787
	0.784		0.791		0.828	0.784
	0.610		0.595		0.625	0.604
	0.364		0.151		0.185	0.177

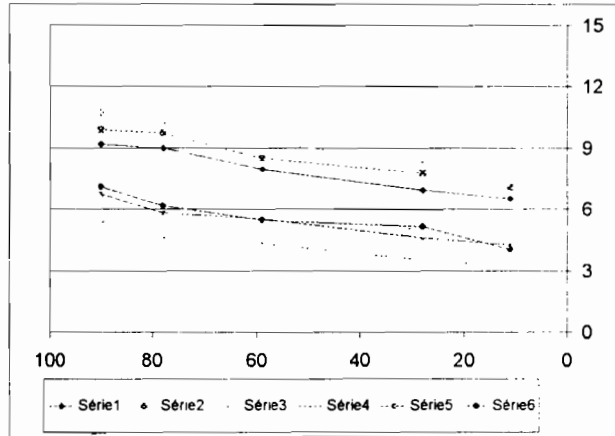
ANNEXE 3

Isothermes bruts

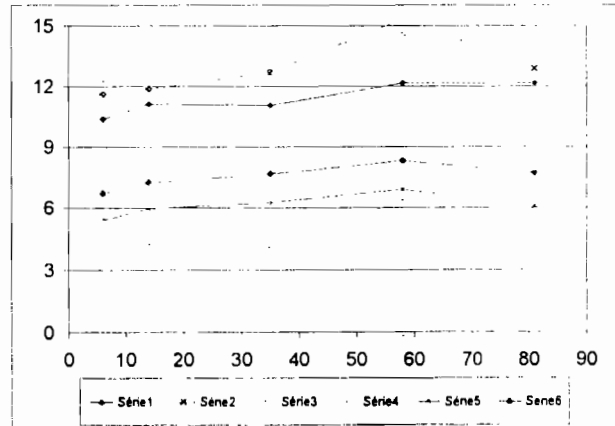
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Ca/Mg	10	Ca	10.66	11.70	12.38	4.60	5.63	6.93
Ca/Mg	22	Ca	11.05	11.94	12.73	4.84	5.93	7.28
Ca/Mg	41	Ca	11.05	12.68	13.58	5.37	6.24	6.95
Ca/Mg	72	Ca	12.31	12.88	14.04	4.87	6.23	8.23
Ca/Mg	89	Ca	13.81	14.32	14.68	6.48	8.09	8.76



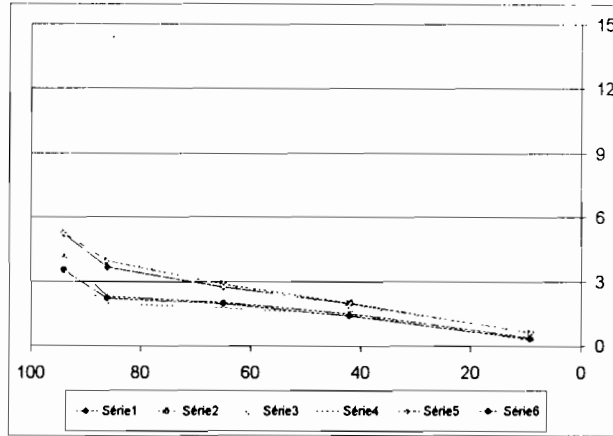
Couple	Rapp.	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Ca/Mg	90	Mg	9.20	9.89	10.75	5.45	6.73	7.09
Ca/Mg	78	Mg	9.00	9.73	10.27	4.60	5.82	6.16
Ca/Mg	59	Mg	7.96	8.50	9.28	4.34	5.54	5.46
Ca/Mg	28	Mg	6.93	7.74	8.35	3.53	4.61	5.15
Ca/Mg	11	Mg	6.51	7.06	7.42	3.22	4.25	4.05



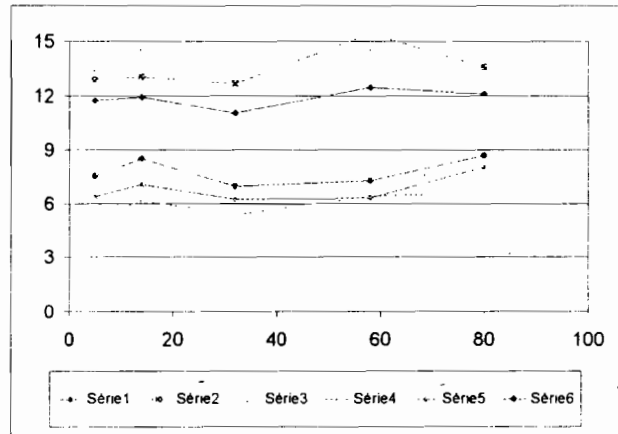
Couple	Rapp.	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Ca:K	6	Ca	10.37	11.58	12.21	3.82	5.42	6.70
Ca:K	14	Ca	11.13	11.88	12.84	4.25	5.97	7.24
Ca:K	35	Ca	11.05	12.68	13.58	4.13	6.27	7.65
Ca:K	58	Ca	12.17	15.36	14.60	6.40	8.89	8.30
Ca:K	81	Ca	12.14	12.86	13.91	4.81	6.07	7.69



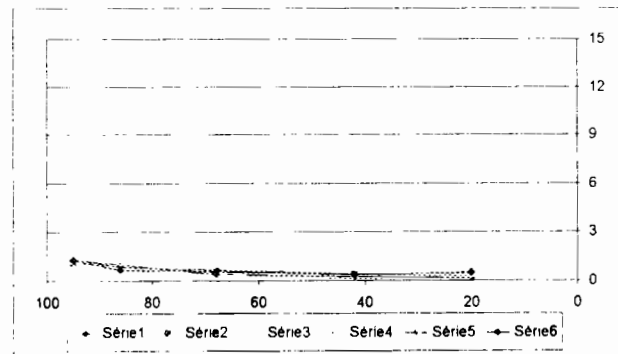
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
					még/100g			
Ca/K	94	K	5.21	5.26	5.35	3.33	4.22	3.54
Ca/K	86	K	3.66	3.95	4.03	1.96	2.28	2.20
Ca/K	65	K	2.74	2.88	2.84	1.79	2.03	1.97
Ca/K	42	K	1.97	2.01	1.87	1.45	1.52	1.39
Ca/K	9	K	0.63	0.61	0.63	0.27	0.39	0.32



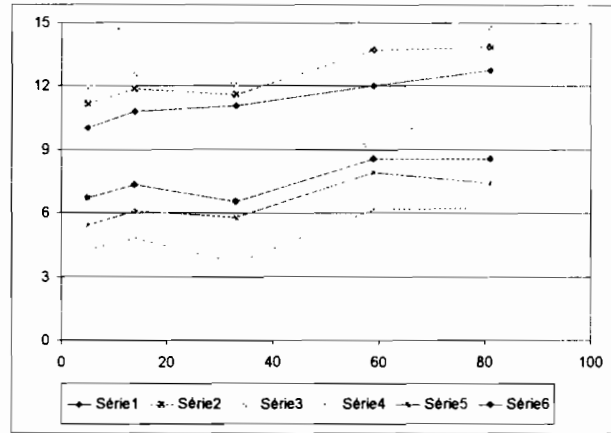
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
					még/100g			
Ca/Na	5	Ca	11.74	12.89	13.35	5.16	6.38	7.54
Ca/Na	14	Ca	11.91	13.02	14.58	6.18	7.05	8.49
Ca/Na	32	Ca	11.05	12.68	13.58	5.37	6.24	6.95
Ca/Na	58	Ca	12.45	15.45	14.44	6.43	6.30	7.28
Ca/Na	80	Ca	12.09	13.58	15.27	6.60	8.04	8.67



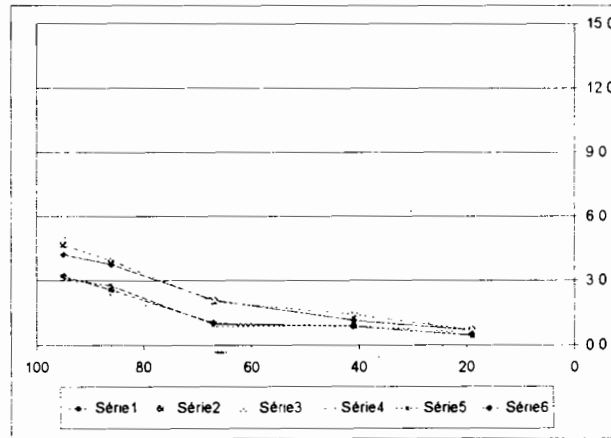
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
					még/100g			
Ca/Na	95	Na	1.29	1.12	1.51	1.01	1.35	1.28
Ca/Na	86	Na	1.00	0.86	1.15	0.68	0.82	0.68
Ca/Na	68	Na	0.41	0.52	0.81	0.38	0.66	0.58
Ca/Na	42	Na	0.23	0.38	0.38	0.11	0.41	0.34
Ca/Na	20	Na	0.15	0.27	0.38	0.21	0.46	0.53



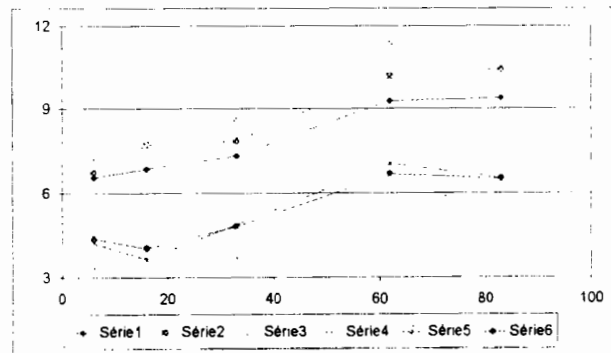
Couple	Rap %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Ca/NH4	5	Ca	10.00	11.16	11.91	4.29	5.42	6.73
Ca/NH4	14	Ca	10.77	11.87	12.59	4.82	6.09	7.33
Ca/NH4	33	Ca	11.07	11.58	12.11	3.66	5.79	6.53
Ca/NH4	59	Ca	12.00	13.70	15.42	6.16	7.92	8.57
Ca/NH4	81	Ca	12.74	13.85	14.82	6.25	7.43	8.55



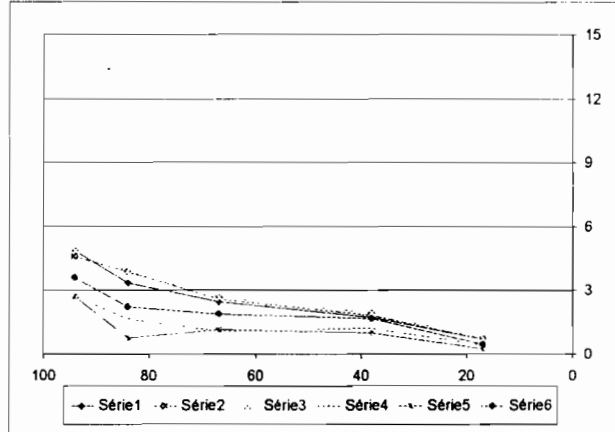
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Ca/NH4	95	NH4	4.23	4.69	5.09	3.20	3.09	3.21
Ca/NH4	86	NH4	3.77	3.94	4.16	2.35	2.75	2.57
Ca/NH4	67	NH4	2.09	2.02	2.15	0.88	0.98	1.04
Ca/NH4	41	NH4	1.15	1.43	1.51	0.91	0.87	0.87
Ca/NH4	19	NH4	0.70	0.69	0.75	0.59	0.47	0.46



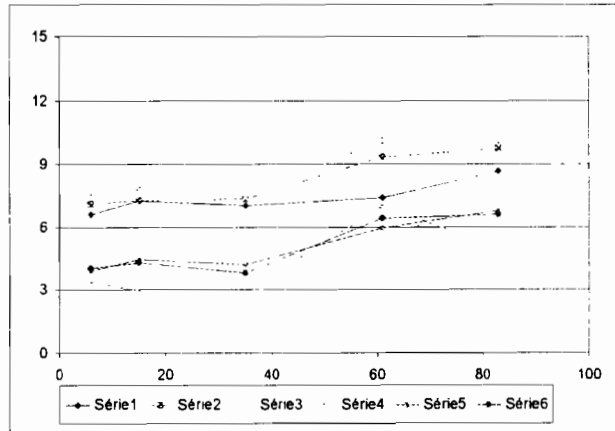
Couple	Rap %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Mg/K	6	Mg	6.55	6.73	7.28	3.33	4.22	4.39
Mg/K	16	Mg	6.85	7.70	7.76	3.29	3.65	4.04
Mg/K	33	Mg	7.31	7.86	8.63	3.69	4.89	4.81
Mg/K	62	Mg	9.27	10.16	11.41	5.85	7.04	6.67
Mg/K	83	Mg	9.38	10.41	10.29	5.94	6.54	6.52



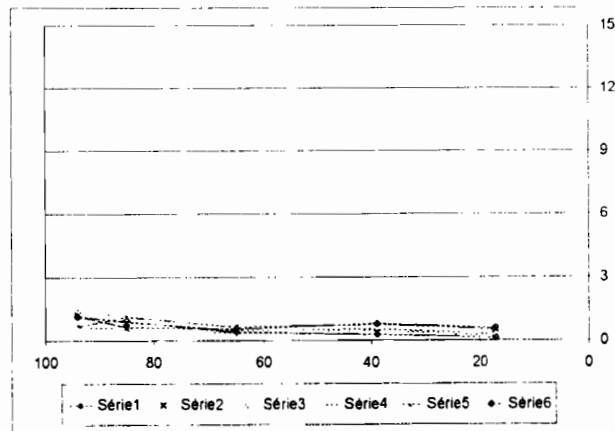
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Mg/K	94	K	4.87	4.60	4.94	2.73	2.69	3.58
Mg/K	84	K	3.35	3.86	3.88	1.65	0.75	2.22
Mg/K	67	K	2.46	2.58	2.67	1.08	1.16	1.90
Mg/K	38	K	1.74	1.82	1.94	1.21	1.01	1.68
Mg/K	17	K	0.69	0.69	0.74	0.41	0.24	0.44



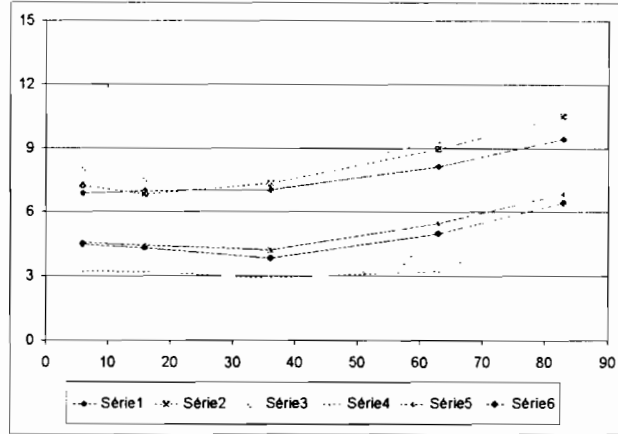
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Mg/Na	6	Mg	6.60	7.10	7.59	3.35	3.89	4.02
Mg/Na	15	Mg	7.25	7.27	7.86	2.98	4.47	4.31
Mg/Na	35	Mg	7.04	7.34	7.45	2.91	4.22	3.82
Mg/Na	61	Mg	7.42	9.33	10.15	7.01	5.96	6.42
Mg/Na	83	Mg	8.67	9.73	10.10	5.01	6.81	6.60



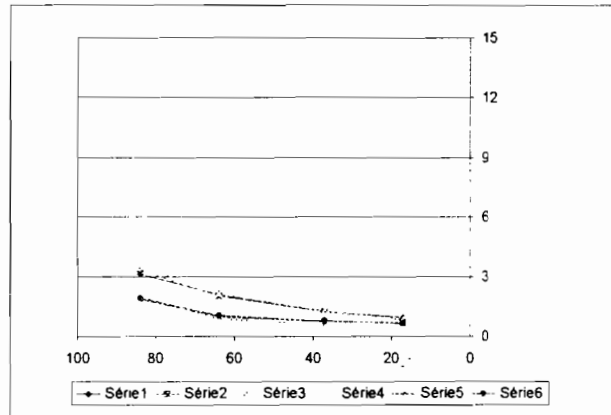
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Mg/Na	94	Na	1.13	1.17	1.37	0.63	0.68	1.15
Mg/Na	85	Na	0.91	0.87	1.14	0.59	1.13	0.63
Mg/Na	65	Na	0.38	0.48	0.77	0.35	0.63	0.55
Mg/Na	39	Na	0.27	0.53	0.66	0.48	0.76	0.79
Mg/Na	17	Na	0.13	0.28	0.44	0.20	0.51	0.58



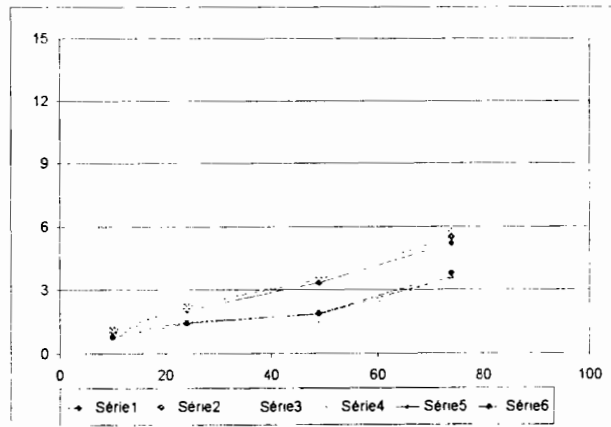
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Mg/NH4	6	Mg	6.87	7.24	7.99	3.22	4.54	4.46
Mg/NH4	16	Mg	6.99	6.85	7.55	3.19	4.42	4.31
Mg/NH4	36	Mg	7.04	7.34	7.45	2.91	4.22	3.82
Mg/NH4	63	Mg	8.12	8.96	9.39	3.22	5.45	4.99
Mg/NH4	83	Mg	9.43	10.51	11.20	5.71	6.85	6.45



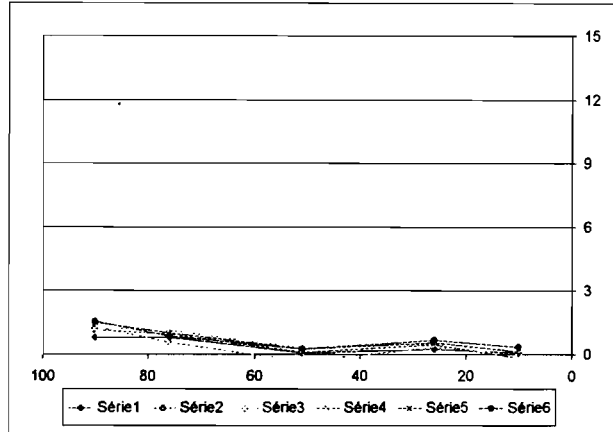
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
Mg/NH4	94	NH4						
Mg/NH4	84	NH4	3.13	3.31	3.50	1.97	1.84	1.93
Mg/NH4	64	NH4	2.09	2.02	2.15	0.88	0.98	1.04
Mg/NH4	37	NH4	1.23	1.22	1.26	0.61	0.73	0.77
Mg/NH4	17	NH4	0.93	0.84	0.82	0.60	0.67	0.64



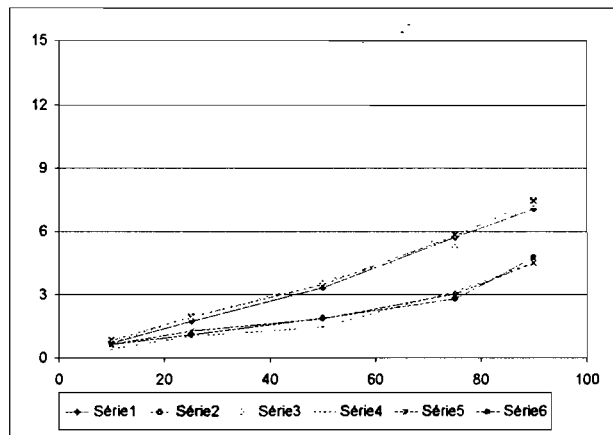
Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
K/Na	10	K	0.99	1.13	1.07	0.73	0.93	0.78
K/Na	24	K	2.03	2.23	2.18	1.11	1.48	1.43
K/Na	49	K	3.34	3.51	3.65	1.45	1.86	1.90
K/Na	74	K	5.21	5.51	5.84	3.66	3.60	3.76
K/Na	90	K						



Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3	
				még/100g					
K/Na	90	Na	0.79	1.14	1.28	1.30	1.49	1.55	
K/Na	76	Na	0.78	0.93	1.11	0.54	1.00	0.85	
K/Na	51	Na	0.07	0.10	0.27	-0.33	0.25	0.25	
K/Na	26	Na	0.25	0.45	0.48	0.33	0.54	0.68	
K/Na	10	Na	0.05	-0.17	0.16	0.01	0.11	0.34	



Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
				még/100g				
K/NH4	10	K	0.71	0.82	0.73	0.44	0.64	0.65
K/NH4	25	K	1.72	1.94	1.94	1.03	1.27	1.11
K/NH4	50	K	3.34	3.51	3.65	1.45	1.86	1.90
K/NH4	75	K	5.73	5.77	5.29	3.17	3.04	2.79
K/NH4	90	K	7.04	7.45	7.27	4.52	4.49	4.79



Couple	Rap. %	Elt	D 1	D 2	D 3	G 1	G 2	G 3
				még/100g				
K/NH4	90	NH4	5.21	4.95	5.82	2.57	3.42	3.78
K/NH4	75	NH4	4.66	4.56	4.93	2.44	2.82	2.05
K/NH4	50	NH4	2.85	2.76	2.94	1.14	1.28	1.36
K/NH4	25	NH4	1.71	1.48	1.45	0.69	0.68	0.61
K/NH4	10	NH4	1.10	1.03	0.99	0.66	0.57	0.63

