

Utilisation d'un modèle mathématique pour l'étude de l'exsorption

G HAINNAUX,
Agronome de l'ORSTOM
Adiopodoumé (Côte d'Ivoire)

RÉSUMÉ

L'ajustement à un modèle mathématique simple de diffusion montre que l'exsorption du magnésium par des racines excisées préalablement mises en absorption, peut être considérée comme la résultante : d'une exodiffusion stricte satisfaisant à la loi de Fick, d'une désorption et de la dilution d'une pellicule de la solution d'absorption.

L'étude de l'exodiffusibilité du magnésium en fonction de la durée de l'absorption révèle le caractère non monotone de la courbe d'absorption dans l'« Espace de libre Diffusion » ; caractère qui est mis en relation avec des variations simultanées du coefficient de perméabilité.

ABSTRACT

The fitting to a simple mathematical diffusion pattern shows that the rejection of magnesium through excised roots previously placed in an absorption system can be considered as a consequence of : (1) a strict exodiffusion obeying Fick's law (2) a desorption (3) the dilution of a film of the absorption solution.

The study of the magnesium exodiffusibility in relation to the duration of the absorption reveals the far from monotonous character of the absorption curve in the "Space of free Diffusion", a characteristic which is related to the simultaneous variation of the permeability coefficient.

1. INTRODUCTION.

Deux principaux types de mécanismes sont le plus souvent invoqués pour rendre compte de l'absorption des sels minéraux par les tissus végétaux.

— Les mécanismes de diffusion et d'échange ionique liés à l'existence de gradients chimiques et électrochimiques.

— Les mécanismes de transport actif.

Concernant les premiers, BRIGGS et ROBERTSON (1948) ont introduit le concept « d'Espace libre » : zone d'absorption réversible, auquel fut substitué à la suite des travaux de HOPE et STEVENS (1952) la notion « d'Espace libre apparent » pour indiquer qu'il s'agit plus d'un état d'absorption que d'une localisation stricte.

De nombreuses méthodes ont été proposées pour évaluer « l'Espace libre » ainsi défini et le caractériser. On peut, comme le fit BUTLER (1952) avec des racines excisées mises préalablement en absorption dans un milieu de concentration connue pendant un temps suffisant, les transférer :

— Dans de l'eau distillée auquel cas l'exsorption ne concerne que les éléments ayant diffusé dans une zone où ils se trouvent libres et dissociés comme en solution (« Espace de libre diffusion » ou « Water Free Space » des Anglo-Saxons).

— Dans une solution d'échange, l'exsorption concernant alors également les ions adsorbés au niveau des sites anioniques indiffusibles (« Espace libre de Donnan »).

Cette méthode et celles qui en dérivent se heurtent à une même difficulté expérimentale signalée par LEVITT (1958) : les racines entraînent, lors de leur transfert de la solution d'absorption dans le milieu d'exsorption, une pellicule de la première dans le second.

Dans le cadre d'une étude des mécanismes de diffusion qui se produisent lors de la mise en œuvre d'une méthode de ce type, il a été posé comme hypothèse de travail que la loi de Fick devait pouvoir rendre compte des phénomènes observés.

Le présent travail expose donc sur la base d'un ajustement à un modèle mathématique simple une étude dynamique de l'« Espace de libre diffusion ».

2. MODELE MATHÉMATIQUE DÉRIVÉ DE LA LOI DE FICK.

Lorsqu'il y a simple diffusion entre deux compartiments où pour un élément donné les concentrations sont C_1 et C_2 , la loi de Fick doit être observée et peut, dans ce cas, se mettre sous la forme :

$$dq = K.S. (C_1 - C_2) dt ;$$

dq étant la quantité d'élément passant du compartiment le plus concentré C_1 au compartiment le moins concentré C_2 , à travers la surface S durant le temps dt ; et K la constante de diffusion.

Nous supposons qu'il en est ainsi lors de la mise en exsorption de racines excisées ayant préalablement absorbé du magnésium. Il est alors possible de formuler mathématiquement à l'aide d'un modèle simple le déroulement dans le temps du phénomène.

En effet, si, après l'absorption, une quantité Q de Mg^{++} a pénétré dans l'«Espace de libre diffusion» correspondant à un volume v , il s'établit après transfert de l'échantillon dans un volume V d'eau distillée un flux tel qu'à chaque instant la relation

$$Q = x(t) \cdot v + y(t) \cdot V$$

est vérifiée, $x(t)$ et $y(t)$ représentant à l'instant t les concentrations dans les milieux v et V .

La loi de Fick appliquée à ce système peut alors s'écrire :

$$Vdy = K.S. (x - y) dt$$

ou encore :

$$\frac{dy}{dt} + K.S. \frac{V+v}{V \cdot v} \cdot y = K.S. \frac{Q}{V \cdot v}$$

Ce qui donne, après intégration et compte tenu des conditions, aux limites :

$$y = \frac{Q}{V+v} (1 - e^{-K.S. \frac{V+v}{V \cdot v} t})$$

Si l'on néglige v par rapport à V et sachant d'une part que $y \cdot V$ représente q , la quantité de Mg^{++} exsorbée à l'instant t , et d'autre part que le rapport v/s du volume de libre diffusion à la surface diffusante a les dimensions d'une longueur et traduit à un coefficient près la distance radiale moyenne l de pénétration des ions dans les racines, l'expression précédente devient :

$$q = Q (1 - e^{-K/l \cdot t})$$

ou bien :

$$\log(Q - q) = \log Q - 0,43 K/l \cdot t$$

les quantités Q et q étant aisément accessibles expérimentalement, il est possible de tester ce modèle, la courbe $\log(Q - q) = f(t)$ étant théoriquement une droite de pente $-0,43 K/l$ et d'ordonnée à l'origine $\log Q$.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES.

3.1. CHOIX DU MATÉRIEL VÉGÉTAL, OBTENTION ET PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS.

Les expériences ont toutes été réalisées simultanément avec deux plantes fourragères tropicales :

— une graminée *Panicum maximum* (Jacq.)

— une légumineuse : *Stylosanthes gracilis* *spécies* dont les racines diffèrent tant par leurs caractéristiques morphologiques que par leurs paramètres de structure (densité et taille des cellules) et certaines caractéristiques physiologiques («Espace libre apparent», capacité d'échange en cations) comme il est indiqué dans le tableau I.

TABLEAU I

DONNÉES SUR LES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET PHYSIOLOGIQUES DES RACINES DE *Panicum maximum* ET *Stylosanthes gracilis* DÉTERMINÉES EXPÉRIMENTALEMENT (HAINNAUX, 1969)

Caractéristiques morphologiques ² :	<i>Panicum max.</i>	<i>Stylosanthes</i>
Rapport Poids mg/surface cm ²	6,94	4,47
Surface ¹ en m ² pour 100 g de M.S.	1,46	2,25
Volume en cm ³ pour 100 g de M.S.	1 302	1 099
Rayon moyen en mm	0,58	0,31
<i>Caractéristiques physiologiques</i>		
Capacité d'échange en cations me/100 g de M.S. ²	5,3	12,2
Capacité de saturation en magnésium me/100 g de M.S. ²	3,0	8,3
Magnésium total échangeable me/100 g de M.S. ²	10,6	34,4
Espace libre apparent pour mg ⁺⁺ par rapport au volume total	8,9%	3,8%

¹ Il s'agit de la surface diamétrale mesurée au planimètre photo-électrique (B. BONZON 1964).

² Les coefficients de variation sur cinq répétitions sont de l'ordre de 10% pour les deux plantes.

Pour obtenir un matériel végétal aussi homogène que possible, les plantes ont été cultivées sous abri vitré avec un dispositif classique pour cultures hydroponiques.

Les graines préalablement traitées à l'eau oxygénée à 10% durant un quart d'heure sont semées à raison de 20 par dm² sur un substrat sableux maintenu humide.

Au bout d'environ une semaine, on choisit des plantules aussi semblables que possible afin de les transférer sur des pots de culture en PVC d'une contenance de 6 litres, à raison de 10 plantules par pot. Celles-ci sont repiquées sur un substrat d'environ 2 cm d'épaisseur constitué de particules de sable d'un diamètre compris entre 1 et 2 mm; sable prétraité à l'acide chlorhydrique 2N et abondamment rincé à l'eau déminéralisée. Ce substrat qui sert uniquement de support pour les plantules est maintenu par une étamine plastifiée à mailles carrées de 1 mm au niveau de la solution nutritive dans les pots.

Celle-ci, de faible concentration (environ N/300) est renouvelée tous les deux jours et aérée en permanence par insufflation d'air comprimé filtré. Sa composition est indiquée dans le tableau II.

Au bout d'environ cinq semaines pour *Panicum maximum* et dix semaines pour *Stylosanthes gracilis*, les racines sont excisées à 10 cm de leur apex, triées et réparties en lots aussi semblables que possible. Ces lots d'environ 10 g de matière fraîche, sont maintenus 3 h dans l'eau bi-distillée et aérée. Ils constituent alors les échantillons racinaires prêts à être soumis à l'expérimentation.

2.2. RÉALISATION DES EXPÉRIENCES — MODE OPÉRATOIRE.

Les échantillons ainsi préparés subissent successivement :

— Une phase d'absorption dans 200 ml d'une solution M/20 de nitrate de magnésium pendant des temps dont la durée T varie selon les échantillons de 2 à 60 mn.

— Un rinçage rapide dans 500 ml d'eau déminéralisée, cette phase intermédiaire étant destinée à éliminer la pellicule de solution d'absorption adhérent aux racines.

— Une phase d'exsorption après transfert dans 500 ml d'eau bidistillée aérée et agitée.

Dans ce milieu homogénéisé en permanence, on prélève régulièrement à des instants t 2 ml de solution de façon à suivre l'exsorption de Mg⁺⁺ dont le dosage est effectué par spectrométrie d'absorption atomique.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.

Etant donné le mode opératoire retenu, à chaque échantillon donc à chaque durée T d'absorption cor-

respond une cinétique propre d'exodiffusion donnant la quantité q de Mg⁺⁺ libéré en fonction de la durée t de l'exsorption.

TABLEAU II

COMPOSITION DE LA SOLUTION NUTRITIVE UTILISÉE POUR EFFECTUER LES CULTURES HYDROPONIQUES DE *Panicum maximum* ET *Stylosanthes gracilis*

		NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	PO ₄ H ₂ ⁻
Macro éléments	K ⁺	3	—	2
	Ca ⁺⁺	8	—	—
me/l	Mg ⁺⁺	—	2	—
Oligo éléments	SO ₄ Mn, H ₂ O	6,16	BO ₃ H ₃	5,64
	SO ₄ Zn, 7 H ₂ O	8,82	(NH ₄) 6 Mo 7 024	0,92
mg/l	SO ₄ Cu, 5 H ₂ O	1,96	Citrate de fer	4,00

L'analyse des fonctions $q = f(t)_T$ donne le déroulement de l'exsorption dans le temps, et celles des fonctions $q = f(T)_t$, l'exsorbabilité du magnésium préalablement absorbé.

Le tableau III donne ces quantités exprimées en microéquivalents de Mg⁺⁺ par gramme de racines sèches. Les colonnes représentent les variations de $q = f(t)_T$ et les lignes celles de $q = f(T)_t$ (tabl. III).

TABLEAU III

QUANTITÉS DE MAGNÉSIUM EXSORBÉ EXPRIMÉES EN MICROÉQUIVALENTS PAR GRAMME DE RACINES SÈCHES EN FONCTION DE LA DURÉE T D'ABSORPTION PRÉALABLE ET DU TEMPS t

Durée t/mn de l'exsorption	Durée T/mn de l'absorption préalable						
	2	5	10	15	20	30	60
<i>Panicum max.</i>							
0	0	0	0	0	0	0	0
2	146	194	143	143	180	176	
5	167	203	171	160	211	203	
10	176	218	179	178	237	235	
15	179	221	183	186	252	250	
20	181	223	192	193	260	257	
30	181	224	195	209	270	268	
<i>Stylosanthes grac.</i>							
0		0	0		0	0	0
2		94	126		136	72	98
5		121	163		143	91	116
10		124	166		146	101	132
15		125	168		151	109	137
20		126	170		155	112	141
30		128	176		166	122	151

On effectue leur calcul à partir des résultats y et des dosages par la formule suivante :

$$q = y \gamma / \text{cm}^3 \cdot \frac{V \text{ cm}^3}{P \text{ mg}} \cdot \frac{1\,000}{12,16}$$

12,16 étant l'équivalent gramme de magnésium et p le poids sec de l'échantillon.

Un simple calcul d'erreur permet alors de préciser la significativité des différences observées entre deux mesures successives d'exsorption. On a en effet, d'après la formule précédente :

$$\frac{dq}{q} = \frac{dy}{y} + \frac{dV}{V} - \frac{dp}{p}$$

Sachant que le volume V de l'ordre de 500 cm^3 est mesuré au $1/10^e$ de cm^3 , que le poids P de l'ordre de 500 mg l'est au $1/10^e$ de mg et que les dosages sont faits à $0,01 \gamma/\text{cm}^3$ près pour les faibles concentrations, on peut estimer l'erreur sur q à environ 1 micro-équivalent.

5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.

5.1. DÉROULEMENT DE L'EXSORPTION AU COURS DU TEMPS.

Ajustement au modèle.

Compte tenu des résultats expérimentaux obtenus :
— libération d'abord très rapide du magnésium : entre 75 et 90% du Mg^{++} exsorbable se retrouvent en solution après 5 mn d'exsorption ;

— puis ralentissement de plus en plus sensible du phénomène : moins de 5% (cas de *Panicum max.*) ou 7% (cas de *Stylosanthes grac.*) du Mg^{++} passent en solution lors des 10 dernières minutes, nous supposons pour effectuer l'ajustement au modèle théorique que Q , la quantité maximum exsorbable dans l'eau est effectivement atteinte après 30 mn, quelque soit la durée de l'absorption préalable.

L'analyse des variations de l'expression $\log(Q - q)$ en fonction du temps t d'exsorption montre que les courbes ainsi obtenues (graph. 1 et 2) peuvent être assimilées pour une durée de l'exsorption supérieure à 2 mn à des droites dont les équations calculées figurent dans les tableaux IV et V.

De ces équations, on peut déduire, après extrapolation à l'origine des temps, les valeurs ajustées q_a correspondantes des quantités de magnésium strictement exodiffusé à chaque instant, comme le laisse prévoir le modèle.

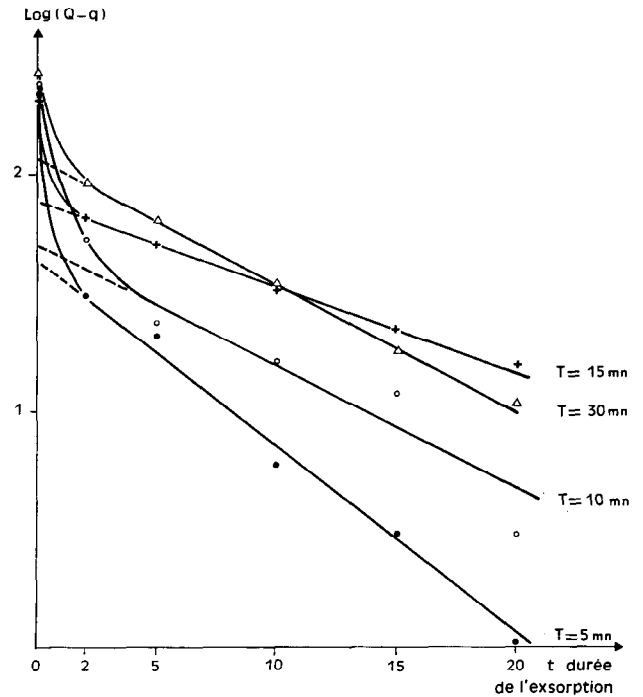


Fig. 1.

TABLEAU IV

ÉQUATIONS CALCULÉES¹ DES DROITES
 $\log(Q - q) = \log Q - 0,43 K/l. t$
DANS LE CAS DE *Panicum maximum*

Durée de l'absorption	Equation	Q_a^2 $\mu\text{e/g MS}$	Q_p $\mu\text{e/g MS}$	K/l
2	$10^2 \log(Q - q) = 161,9 - 8,47 t$	42	139	0,196
5	$10^2 \log(Q - q) = 167,2 - 8,28 t$	47	177	0,190
10	$10^2 \log(Q - q) = 179,6 - 6,01 t$	63	132	0,138
15	$10^2 \log(Q - q) = 186,3 - 3,37 t$	73	136	0,078
20	$10^2 \log(Q - q) = 204,9 - 5,28 t$	111	160	0,121
30	$10^2 \log(Q - q) = 206,8 - 5,29 t$	117	151	0,122

¹ Les coefficients de corrélation négatifs sont supérieurs en valeur absolue à 0,95.

² Ne figurent que les valeurs de Q_a qui représentent les quantités maximum exodiffusibles soient Q_a , de même pour q_p .

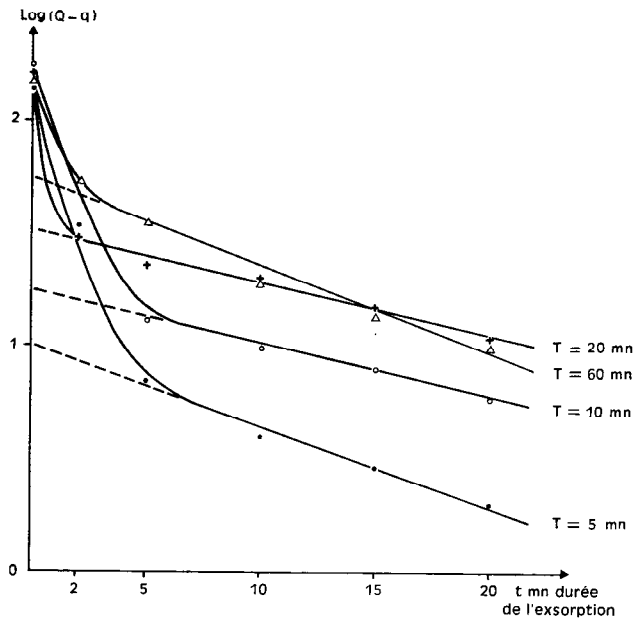


Fig. 2.

TABLEAU V

EQUATIONS CALCULÉES¹ DES DROITES
 $\log(Q-q) = \log Q - 0,43 K/l \cdot t$
 DANS LE CAS DE *Stylosanthes Gracilis*

Durée de l'absorption	Equations	Qa ² µe/g MS	Qp µe/g MS	K/l
5	$10^2 \log(Q-q) = 99,5 - 3,51 t$	10	118	0,081
10	$10^2 \log(Q-q) = 122,2 - 2,21 t$	17	159	0,051
20	$10^2 \log(Q-q) = 150,9 - 2,29 t$	32	134	0,053
30	$10^2 \log(Q-q) = 171,6 - 3,78 t$	52	70	0,087
60	$10^2 \log(Q-q) = 175,4 - 3,99 t$	57	94	0,092

Les différences qp observées entre ces valeurs calculées et les valeurs expérimentales pratiquement constantes au-delà de 2 mn peuvent s'expliquer :

— Soit par une insuffisance du modèle théorique qui, contrairement à l'hypothèse de base, ne décrit

¹ et ² identique au tableau IV.

pas avec assez d'exactitude, compte tenu de la précision des mesures, les phénomènes mis en jeu.

— Soit par l'existence de phénomènes annexes qui se superposent à l'exodiffusion lors des premiers instants de l'exsorption.

On peut en particulier envisager une libération parasite de magnésium résultant de l'entraînement dans la solution d'exsorption d'une pellicule de solution d'absorption. Cette possibilité a été vérifiée en modifiant le mode opératoire de deux façons :

— En substituant au rinçage des échantillons de racines de *Panicum* avant transfert dans l'eau, soit un simple égouttage, soit une centrifugation légère. Les valeurs maxima de qp ainsi obtenues sont alors respectivement de 512 et 214 micro-équivalents par gramme de racines sèches au lieu de 150 environ dans le cas d'un rinçage.

— En modifiant la concentration de la solution d'absorption. Les valeurs obtenues pour des concentrations de M/5, M/20 et M/100 sont respectivement de 743, 215 et 44 microéquivalent par gramme, les racines ayant été centrifugées.

Cette quasi proportionnalité et l'influence de prétraitement confirment bien l'hypothèse de l'entraînement d'un film de surface.

Toutefois, la plus grande efficacité du rinçage par rapport à la centrifugation incite à envisager également pour expliquer la libération parasite une action désorbante de l'eau sur le magnésium fixé au niveau des sites anioniques de surface.

En effet, nous avons constaté que les valeurs de qp obtenues avec des racines centrifugées variaient :

— En fonction de la plante. Elles augmentent avec la capacité d'échange en cations des racines.

— En fonction de l'élément absorbé. Elles sont supérieures pour le magnésium bivalent que pour le potassium monovalent.

Par ailleurs, nous avons vérifié que la libération parasite était supérieure après exsorption en milieu alcoolique (alcool méthylique) que dans l'eau. L'ensemble de ces résultats figurent dans le tableau VI.

Il semble donc que l'exsorption observée puisse être considérée comme résultant :

- d'une exodiffusion satisfaisant à la loi de Fick ;
- d'une désorption due à l'action de l'eau sur le magnésium adsorbé au niveau des sites électro-négatifs ;
- de la dilution d'un film de surface.

L'ajustement au modèle mathématique permet donc dans un intervalle de durée d'exsorption relativement court : 30 mn, de dissocier l'exodiffusion des autres phénomènes qui s'y ajoutent et de n'étudier qu'elle.

TABLEAU VI

VARIATIONS DE LA QUANTITÉ Q_p
EXPRIMÉE EN MICROÉQUIVALENT
PAR GRAMME DE RACINES SÈCHES
EN FONCTION DU PRÉTRAITEMENT
DES ÉCHANTILLONS

Nature du pré-traitement	Plante	Solution d'absorption	Solution d'exsorption	Q_p
Egouttage	<i>Panicum</i>	Mg(NO ₃) ₂ M/20	Eau	151
Rinçage	<i>Panicum</i>	Mg(NO ₃) ₂ M/20	Eau	151
	<i>Stylosanthes</i>	Mg(NO ₃) ₂ M/20	Eau	94
	<i>Stylosanthes</i>	Mg(NO ₃) ₂ M/20	Alcool	128
Centrifugation	<i>Panicum</i>	Mg(NO ₃) ₂ M/20	Eau	214
		Mg Cl ₂ M/20	Eau	226
	<i>Stylosanthes</i>	K Cl M/20	Eau	63
		Mg Cl ₂ M/20	Eau	276
		KCl M/20	Eau	240

5.2. ETUDE DE L'EXODIFFUSIBILITÉ EN FONCTION DE LA DURÉE D'ABSORPTION.

Ayant précédemment défini la composante de l'exsorption qui ne concerne que la fraction strictement exodiffusible du magnésium préalablement absorbé, on étudie maintenant ses variations en fonction de la durée T de l'absorption, ce, pour chaque instant t de l'exsorption.

Un caractère essentiel ressort de l'aspect des courbes $q_a = f(T)$ (graph. 3 et 4) : leur non monotonie. Pour les exsorptions de faible durée, c'est-à-dire qui ne concernent que les ions rapidement diffusibles, les courbes présentent même un minimum relatif. Ce minimum qui traduit une diminution de l'exodiffusibilité du magnésium apparaît après un temps d'absorption voisin de 15 mn dans le cas de *Panicum*, où il est le plus nettement marqué. Il s'estompe ensuite quand augmente la durée de la phase d'exsorption et lorsque celle-ci atteint 30 mn, temps au bout duquel, pratiquement, tout le magnésium exsorbable est libéré, seul subsiste un point d'inflexion.

Dans ce cas, les courbes (graph. 5) représentent les variations en fonction du temps d'absorption de la quantité maximum absorbée récupérable par exodiffusion, c'est-à-dire par définition l'absorption dans « l'Espace de libre diffusion ». Elles rendent bien compte d'une absorption non monotone dans cet espace, l'inflexion traduisant au bout d'un certain temps une accélération dans le déroulement du phénomène.

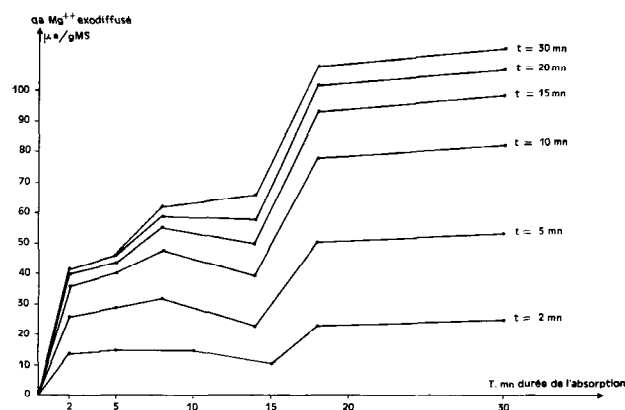


Fig. 3.

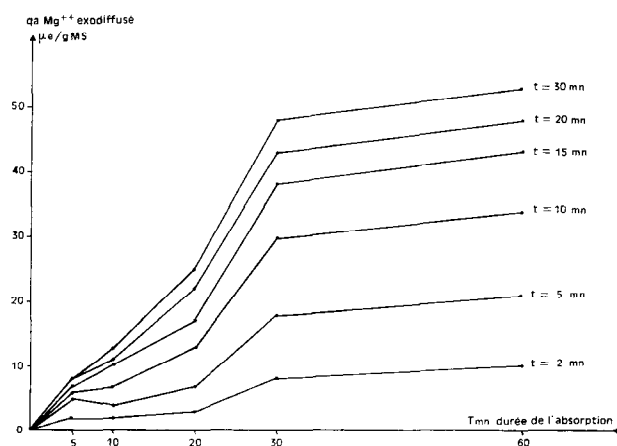


Fig. 4.

Il est par ailleurs remarquable qu'aux points particuliers de ces courbes correspondent des variations spécifiques simultanées du coefficient K/l introduit dans le modèle mathématique. Le graphique 6 donne les variations en fonction de T de ce coefficient aisément déterminable expérimentalement : c'est la pente de la droite $\log(Q - q) = f(t)$.

Si dans un premier temps la diminution de K/l peut s'expliquer comme résultant probablement d'un accroissement de l (la distance radiale moyenne de pénétration des ions dans les racines augmente avec la durée d'absorption) l'augmentation qui suit implique quant à elle :

— Soit une diminution de l qu'il est délicat d'expliquer à moins d'envisager une action particulière des sites d'échange électro-négatifs. En effet, la pénétration des ions dans les racines se fait d'abord sous l'action combinée du gradient de concentration et du champ de forces lié à l'existence d'un potentiel intracellulaire. On peut donc envisager qu'une fraction des ions endo-diffusés soit captée par les sites électro-négatifs provoquant, ainsi, une désaturation temporaire de « l'Espace de libre diffusion » au profit de « l'Espace libre de Donnan », désaturation se traduisant par une diminution apparente de l .

Toutefois, la brutale apparition du phénomène dans le temps ne plaide pas en faveur d'une telle

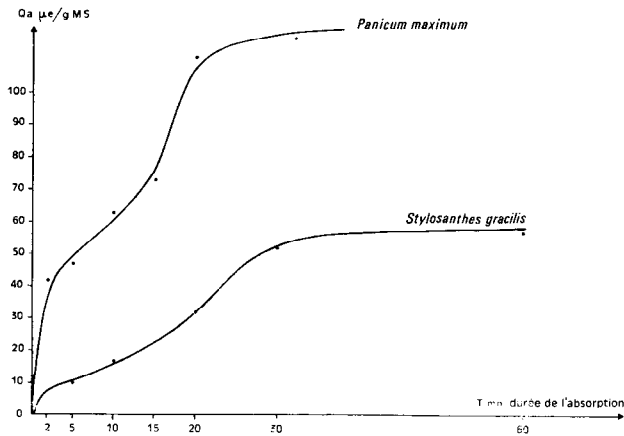


Fig. 5.

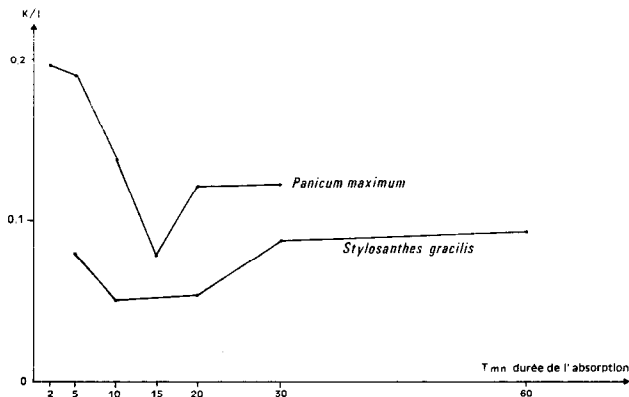


Fig. 6.

interprétation. Il est plus logique de penser que l'action des sites électro-négatifs se manifeste dès le début de l'absorption et se poursuit d'une façon permanente et continue jusqu'à ce qu'ils soient en équilibre avec le milieu environnant.

— Soit une augmentation du coefficient de diffusion K ; augmentation se traduisant par une accélération de l'absorption dans « l'Espace de libre diffusion ». Cette augmentation peut aussi s'expliquer par la présence dans le milieu où pénètrent les ions, de sites électro-négatifs qu'ils doivent saturer ; saturation ayant pour conséquence une diffusion facilitée.

CONCLUSION.

L'ajustement à un modèle mathématique simple de diffusion dérivé de la loi de Fick permet d'isoler de l'ensemble du total exsorbable la fraction strictement exodiffusible.

L'étude de cette fraction rend compte du caractère non monotone de la courbe d'absorption en fonction du temps dans « l'Espace de libre diffusion ». On peut interpréter cette caractéristique comme résultant de l'action des sites électro-négatifs présents dans le substrat sur la dynamique des ions et par leur action sur la perméabilité cellulaire.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 11 février 1971.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie M^{me} Denise BLANC, directeur de la Station d'agronomie et de physiologie végétale INRA d'Antibes, d'avoir bien voulu lire et critiquer son manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BONZON (B.) – 1964 – Description et mode d'utilisation d'un appareil de mesure photoélectrique de surfaces végétales. *Fruits*, 19 (1) : 577-581.
- BUTLER (G. W.) – 1953 – Ion uptake by young wheat plants. II. The apparent Free Space of Wheat roots. *Physiol. Plant.*, 6 : 617-635.
- BRIGGS (G. E.), ROBERTSON (R. N.) – 1957 – Apparent Free Space. *Ann. Rev. plant physiol.*, 8 : 11-30.
- EPSTEIN (E.), LEGGET (J. E.) – 1954 – The absorption of alkaline earth cations by barley roots : Kinetics and mechanism. *Amer. J. Bot.*, 41 (10) : 785-791.
- GRIGNON (C.) – 1969 – Etude de l'incorporation du ^{42}K par des suspensions cellulaires d'érable. *Bull. Soc. Franc. Physiol. végét.*, 15 (2) : 193-211.
- GRIGNON (C.), SALSAC (L.) – 1969 – Sur le caractère non monotone des courbes d'absorption du potassium en fonction du temps, dans les racines et les cellules isolées. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 268 : 73-75.

C. Hainnaux

- HOPE (A. B.), STEVENS (P. G.) - 1952 - Electric potential differences in Bean roots and their relation to salt uptake. *Austral. J. Sci. Res. B.* 5: 335-343.
- LEVITT (J.) - 1958 - The significance of « Apparent Free Space » in ion absorption. *Physiol. Plant* 10: 882-888.
- PITMAN (M. G.) - 1965 - Location of DFS. *Aust J. biol. Sci.*, 18: 547.
- VAKHMISTROW (D. B.) - 1965 - On the magnitude of the AFS of plant roots. *Soviet. plant. physiol.* 12: 705-711.
- VAKHMISTROW (D. B.) - 1967 - Localisation of the Free Space in barley root. *Soviet plant phys.*, 14: 337-343.