

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الحراش - الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
EL-HARRACH - ALGER

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister
en Sciences Agronomiques

Ecole doctorale : Science du sol

THEME

**EVALUATION DU STATUT POTASSIQUE
DES SOLS SALES DU BAS-CHELLIF**

Présenté par : BOUSSOUSSA Yamina

Devant le jury:

<i>Président du jury :</i>	M. DJILI K.	Professeur
<i>Directeur de thèse :</i>	M. DAOUD Y.	Professeur
<i>Examineurs :</i>	M. DRIDI B.	Maître de conférences
	Mme. KOURGLI	Chargé de cours

Année Universitaire 2011-2012

Résumé

Les différentes formes du potassium (total, rétrogradé, échangeable et soluble) ont été déterminées dans 18 échantillons de 3 profils de Solonchaks référence du Bas-Chélif.

Ces échantillons ont des teneurs en potassium total relativement élevées pour 60 % des échantillons, et de faibles teneurs en potassium total pour 40 % des échantillons, des teneurs relativement élevées en potassium rétrogradé, des teneurs en potassium échangeable faibles pour la moitié des échantillons analysés et des teneurs faibles en potassium soluble.

Certaines formes de potassium présentent des corrélations positives. Il s'agit des couples: K soluble / K total, K soluble / K rétrogradé, K échangeable / K rétrogradé et K rétrogradé / K total.

La teneur en potassium échangeable des sols dépend de leur teneur en matière organique et de leur capacité d'échange cationique.

Les différentes formes de potassium ne sont pas corrélées avec la conductivité électrique. Par ailleurs, la sodisation du complexe adsorbant se produit, en partie, au détriment du potassium échangeable.

L'application de quatre modèles d'ajustement de la cinétique de libération du potassium montrent que le modèle de la fonction de puissance est le modèle qui s'ajuste le mieux aux données expérimentales. Le modèle d'Elovich aboutit à des résultats relativement proches de ceux du modèle de la fonction de puissance.

Mots clés : potassium, sols salés, statut potassique, cinétique de libération, modèles d'ajustement.

Abstract

Different forms of potassium (total, fixed, exchangeable and soluble) were determined in 18 samples of three reference profiles Solonchaks of Bas-Chéiff.

These samples have relatively high contents of total potassium for 60% of samples, and low levels of total potassium for 40% of samples, relatively high contents of potassium fixed, low levels of exchangeable potassium for half of the samples analyzed and low concentrations of soluble potassium.

Some forms of potassium show positive correlations. It concern the couples:

soluble K / total K, soluble K / fixed K, exchangeable K / fixed K and fixed K / total K.

The exchangeable potassium content of soils depends on their organic matter content and cation exchange capacity.

Different forms of potassium are not correlated with electrical conductivity. Moreover, the adsorption complex sodification occurs, in part, to the detriment of exchangeable potassium.

The application of the four models fit kinetics of release of potassium show that the model of the power function is the model that best fits the experimental data. The Elovich model provides results relatively close to those of the model of power function.

Key words: potassium, saline soils, potassium status, kinetic of release, fitting models.

ملخص

تم تحديد مختلف أشكال البوتاسيوم (الكلي, المثبت, المتبادل و القابل للذوبان) في 18 عينة من لثلاث مقاطع سولونشاك مرجعية بالشلف السفلي.

هذه العينات لديها محتويات عالية نسبيا من البوتاسيوم الكلي ل 60% من العينات، ومستويات منخفضة ل 40% من العينات، محتويات عالية نسبيا من البوتاسيوم المثبت، مستويات البوتاسيوم المتبادل منخفضة لنصف العينات التي تم تحليلها وتركيز منخفض للبوتاسيوم القابل للذوبان.

بعض أشكال البوتاسيوم تقدم روابط إيجابية. و التي تخص الأزواج: K قابل للذوبان/ K الكلي, K قابل للذوبان/ K المثبت، K المتبادل/ K المثبت، و K المثبت/ K الكلي.

محتوى البوتاسيوم المتبادل للتربة يتوقف على مضمونها من المادة العضوية والسعة التبادلية الكاتيونية. لا ترتبط مختلف أشكال البوتاسيوم مع التوصيل الكهربائي. علاوة على ذلك، نسبة الصوديوم المتبادل الموجود على المركب الإدمصاصي يحدث، في جزء منه، على حساب البوتاسيوم المتبادل.

تطبيق أربعة نماذج تتناسب مع حركية الإفراج عن البوتاسيوم تعرض أن نموذج من الوظيفة الأسية هو النموذج الذي يناسب البيانات التجريبية. نموذج إيلوفيش يوفر نتائج قريبة نسبيا لتلك الواردة في نموذج الوظيفة الأسية.

مفتاح الكلمات: البوتاسيوم, الأتربة المالحة, الوضع البوتاسي, حركية الإفراج, نماذج التناسب.

Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience pour la réalisation de ce mémoire.

Avant d'exposer ce travail, je tiens à remercier toute personne qui de près ou de loin a contribué à la réalisation de ce mémoire et en particulier :

M. DJILI K., professeur et chef du département science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à **M. DAOUD Y.**, professeur au département de science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, pour avoir accepté de diriger ce mémoire, pour son aide, sa disponibilité, ses conseils très utiles, sa patience et ses directives qui m'ont permis de mener à terme ce travail.

Mme KOURGLI N., chargée de cours à l'ENSA d'El – Harrach et **M. DRIDI B.**, maître de conférence au département science du sol à l'INA d'El – Harrach, je les remercie pour avoir accepté de juger ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon profond respect.

Mes plus profonds remerciements vont également :

A l'ensemble des enseignants (es) du département de science du sol, qui ont contribué à ma formation.

A la bibliothécaire du département M^{elle} LARBI, pour son aide et sa gentillesse et tous les techniciens du département (Redouane, Amar, Ahmed et Abd El Rahim) aux prés desquels j'ai trouvé aide et encouragement.

A tous mes camarades de l'Ecole doctorale.

DEDICACES

Je dédie ce travail

*A la mémoire de mon père. Que dieu tout puissant lui accorde sa sainte miséricorde et
l'accueille en son vaste paradis.*

A ma mère, la personne qui n'a jamais cessé de sacrifier rien que pour mon devenir.

*A mes très chers grands parents qui ont toujours été à mes côtés durant tout ce
parcourt.*

A mon frère Mohamed et ma sœur Ikram.

A mon fiancé.

A tous mes oncles et toutes mes tantes.

A tous mes amis.

A tous mes collègues.

A toute personne que j'aime, et qui m'aime.....

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
Chapitre I : Etude bibliographique	
1. Les formes du potassium dans le sol.	3
1.1. Les différents états du potassium dans le sol.....	3
1.2. Les méthodes chimiques d'évaluation des diverses formes de potassium dans le sol.	6
1.2.1. Les méthodes aux extractions acides.	6
1.2.1.1. Les méthodes d'attaque aux acides concentrés.....	6
1.2.1.2. Les méthodes d'attaque aux acides dilués	6
1.2.2. Les méthodes d'extraction aux sels neutres et aux acides organiques	6
1.2.3. Méthodes d'extraction du potassium par le NaTPB.....	7
1.2.4. Mesure du pool labile, notion d'intensité, de quantité et de capacité.....	7
1.2.5. Méthodes d'extraction à l'eau.....	7
1.3. L'approche cinétique de la libération du potassium.....	8
2. La salinité du sol	9
2.1. Définition	9
2.2. Classification des sols salés	9
2.3. Caractéristiques des sols salés.....	10
3. Le potassium dans les sols sales	12
Conclusion.....	12

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Matériel d'étude	13
2. Méthodes d'étude	16
2.1. Les différentes formes du potassium	16
2.2. La cinétique de libération du potassium	16
2.3. Traitements des résultats	17
2.3.1. Les différentes formes du potassium	17
2.3.2. La cinétique de libération du potassium	17

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Les différentes formes de potassium	19
1.1. Le potassium total.....	19
1.2. Le potassium rétrogradé.....	20
1.3. Le potassium échangeable.....	20
1.4. Le potassium soluble	21
1.5. Synthèse et discussion	22
Conclusion.....	23
2. Les profils de distribution des différentes formes du potassium.....	24
2.1. Le potassium total.....	24
2.2. Le potassium rétrogradé.....	24
2.3. Le potassium échangeable.....	25
2.4. Le potassium soluble	26
2.5. Synthèse et discussion	26
Conclusion.....	27
3. Relation entre les différentes formes du potassium	27
3.1. La matrice des corrélations.....	27
3.2. Synthèse et discussion	30
Conclusion.....	30

4. Influences des caractéristiques du sol sur les différentes formes du potassium.....	31
4.1. Les corrélations simples.....	31
4.2. Synthèse et discussion	33
Conclusion.....	33
5. la cinétique de libération du potassium	34
5.1. Le potassium extrait cumulé.....	34
5.1.1. Relation entre le potassium extrait cumulé et les différentes formes du potassium.....	34
5.1.2. Comparaison du potassium extrait cumulé et les différentes formes du potassium.....	35
5.1.3. Evolution des teneurs cumulées en potassium en fonction du temps	36
5.1.4. Synthèse est discussion	36
Conclusion.....	37
5.2. Application des modèles de cinétique de la libération du potassium.....	38
5.2.1. Les modèles utilisés	38
-Le modèle de la fonction de puissance	38
-Le modèle Elovich	38
-Le modèle de diffusion parabolique	39
-Le modèle du premier ordre	39
5.2.2. Allure générale des modèles utilisés	41
5.2.3. La signification des paramètres des modèles.....	41
5.2.4. Synthèse et discussion	55
Conclusion.....	55
6. Synthèse et discusion des résultats	57
Conclusion générale.....	59

Références

Annexes

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Origines des échantillons étudiés.....	14
Tableau II. Caractéristiques analytiques des échantillons	15
Tableau III. La matrice des corrélations entre les différentes formes du potassium.....	27
Tableau IV. Le coefficient de corrélation des différentes formes du potassium avec certaines caractéristiques des sols	31
Tableau V. Le coefficient de corrélation entre le potassium extrait cumulé et les différentes formes du potassium.....	34
Tableau VI. Les teneurs extraites cumulées du potassium pendant 150 minutes et les différentes formes de potassium	35
Tableau VII. Les paramètres des modèles utilisés pour la description de la cinétique de libération du potassium.....	56

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Transformation des micas en minéraux argileux par libération du potassium.....	3
Figure 2. Les interactions entre les formes du potassium du sol.....	4
Figure 3. Les teneurs des échantillons en potassium total	19
Figure 4. Les teneurs des échantillons en potassium rétrogradé.....	20
Figure 5. Les teneurs en potassium échangeable des échantillons	21
Figure 6. Les teneurs des échantillons en potassium soluble.	22
Figure 7. Les profils de distribution du potassium total.....	24
Figure 8. Les profils de distribution du potassium rétrogradé.....	25
Figure 9. Les profils de distribution du potassium échangeable.....	25
Figure 10. Les profils de distribution du potassium soluble.....	26
Figure 11. Relation entre le potassium rétrogradé et le potassium total.....	28
Figure 12. Relation entre le potassium soluble et le potassium total.....	28
Figure 13. Relation entre le potassium échangeable et le potassium rétrogradé.....	29
Figure 14. Relation entre le potassium échangeable et le potassium soluble.....	29
Figure 15. Relation entre le potassium échangeable et le sodium échangeable.	31
Figure 16. Relation entre le potassium échangeable et la capacité d'échange cationique.....	32
Figure 17. Relation entre le potassium échangeable et la matière organique.	32
Figure 18. Evolution des teneurs cumulées en potassium en fonction du temps	40
Figure 19. Application du modèle Elovich sur la libération du potassium du profil 1.....	43
Figure 20. Application du modèle Elovich sur la libération du potassium du profil 2.....	44
Figure 21. Application du modèle Elovich sur la libération du potassium du profil 3.....	45

Figure 22. Application du modèle de la diffusion parabolique sur la libération du potassium du profil 1	46
Figure 23. Application du modèle de la diffusion parabolique sur la libération du potassium du profil 2	47
Figure 24. Application du modèle de la diffusion parabolique sur la libération du potassium du profil 3	48
Figure 25. Application du modèle de la fonction de puissance sur la libération du potassium du profil 1	49
Figure 26. Application du modèle de la fonction de puissance sur la libération du potassium du profil 2	50
Figure 27. Application du modèle de la fonction de puissance sur la libération du potassium du profil 3	51
Figure 28. Application du modèle de premier ordre sur la libération du potassium du profil 1	52
Figure 29. Application du modèle de premier ordre sur la libération du potassium du profil 2	53
Figure 30. Application du modèle de premier ordre sur la libération du potassium du profil 3	54

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Résultats des trois répétitions des analyses des différentes formes du potassium.

Annexe 2. Résultats analytiques des différentes formes du potassium.

Annexe 3. Résultats des trois répétitions des extractions successives du potassium (1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème}).

Annexe 4. Résultats des trois répétitions des extractions successives du potassium (5^{ème}, 6^{ème}, 7^{ème} et 8^{ème}).

Annexe 5. Résultats des trois répétitions des extractions successives du potassium (9^{ème} et 10^{ème}).

Annexe 6. Teneurs en potassium extrait en fonction du temps.

Annexe 7. Evolution des teneurs cumulées en potassium extrait en fonction du temps.

Annexe 8. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle d'Elovich.

Annexe 9. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle de la diffusion parabolique.

Annexe 10. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle de la fonction de puissance.

Annexe 11. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle du premier ordre.

INTRODUCTION

Le potassium est un élément essentiel pour la croissance des plantes (Sparks et Huang, 1985). Il intervient dans la formation du rendement et dans la qualité des produits récoltés (Mengel, 1975).

Il est généralement admis que le potassium du sol se présente sous différentes formes qui sont le potassium de la solution du sol, le potassium échangeable, le potassium non échangeable et le potassium des minéraux (Quemener, 1976). Il existe un équilibre dynamique entre ces différentes formes du potassium (Jalali, 2007).

Le potassium soluble et le potassium échangeable constituent la partie facilement assimilable ou biodisponible, par les plantes (Duthion, 1968). Le potassium non échangeable peut être un réservoir pour la nutrition minérale des plantes, il peut jouer un rôle important dans l'approvisionnement du végétal en potassium lorsque la réserve en potassium soluble et en potassium échangeable est épuisée (Mengel et Uhlenbecker, 1993).

Mutscher (1978) a évalué le statut potassique de 87 profils de sols du Nord de l'Algérie. Il montre que 51.5% des sols étudiés sont pauvres en potassium total, et 60,1% des sols sont bien pourvus en potassium échangeable. Cependant, le travail de Matoub (1994), qui est réalisé sur 2020 profils des sols du Nord de l'Algérie, a donné une conclusion différente dans la mesure où les résultats obtenus montrent que 76% des sols sont mal à moyennement pourvus en potassium échangeable, et 24% des sols sont bien à très bien pourvus en potassium échangeable. Matoub (1994) a noté que les sols des régions humides et sub-humides sont moins pourvus en potassium échangeable que les sols des régions semi-arides et arides. Par ailleurs, Daoud et Dogar (1985) montrent que les sols de la zone aride du Hodna présentent une teneur en potassium total moyenne à élevée dans 74 % des sols étudiés, et que 33% des sols sont pauvres en potassium échangeable et 52% sont moyennement pourvus en potassium échangeable. Le statut potassique des sols d'Algérie présente donc une grande diversité.

Les sols salés occupent de grandes étendues en Algérie (Touaf, 2002). Les plaines du Bas-Cheliff constituent un exemple d'extension et d'intensification de la salinisation des sols (Hadj miloud, 2010). Les sols salés du Bas-Cheliff ont fait l'objet de plusieurs travaux de caractérisation physico-chimique (Hadj miloud, 2010 ; Laoufi, 2010).

En ce qui concerne le statut potassique des sols salés d'Algérie, Ait Mechdal (2011) a constaté que les sols des plaines du Cheliff sont pauvres en potassium total, ils sont faiblement à moyennement pourvus en potassium assimilable, et ils présentent des teneurs en potassium extractible élevées. Laoufi (2010) a montré que les teneurs en potassium soluble des sols salés des plaines du Cheliff sont faibles. La salinisation des sols n'affecterait pas, de façon notable, le comportement du potassium dans ces sols (Ait Mechdal, 2011 ; Laoufi, 2010).

Bien que les sols salés occupent de grandes étendues en Algérie, l'effet de la salinité sur le comportement du potassium et sur la cinétique de libération du potassium dans ces sols reste peu connu.

Le présent travail a pour objectifs :

- de caractériser le régime potassique des sols salés du Bas-Cheliff par l'utilisation des méthodes chimiques pour la spéciation des formes du potassium.
- d'évaluer la cinétique de libération du potassium non échangeable.

Ce document comporte trois chapitres :

- le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur le comportement du potassium dans le sol, la définition des sols salés, et une synthèse du potassium dans les sols salés,
- le second chapitre porte sur la présentation du matériel d'étude et des méthodes utilisées,
- le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus et à leurs interprétations.

Chapitre I

Etude bibliographique

CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. LES FORMES DU POTASSIUM DANS LE SOL

1.1. Les différents états du potassium dans le sol

Le potassium provient essentiellement des minéraux primaires (les feldspaths, les feldspathoïdes et les micas) et des minéraux secondaires (les argiles).

L'altération physique des minéraux primaires peut engendrer une libération du potassium (figure 1). Cette altération aboutit à la diminution de la taille des particules qui augmente leurs surfaces spécifiques. Leur altération chimique est favorisée par l'augmentation de la surface spécifique, elle est réalisée par l'hydrolyse (altération sous l'action de l'eau) et la chélation (formation de complexes solubles d'aluminium et de silicium par les phénols, les cétones, et les acides aliphatiques et aromatiques formés lors de l'humification ou excrétés par les racines) (Schroeder, 1978).

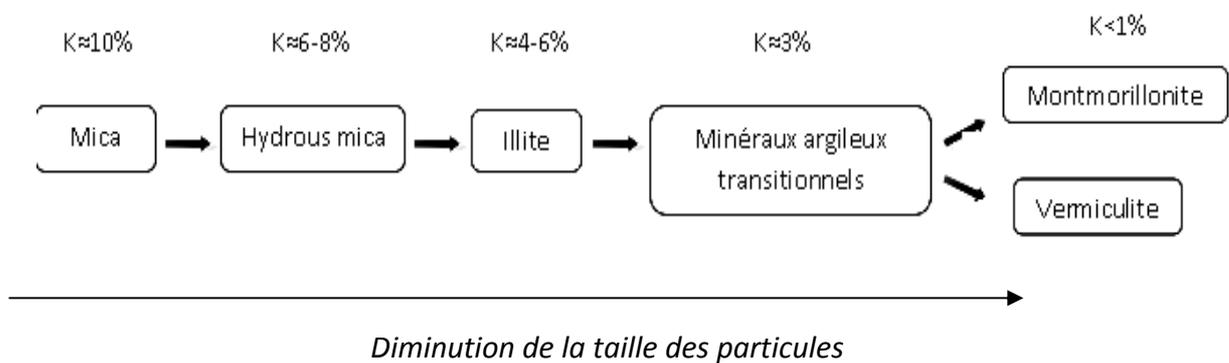


Figure 1. Transformation des micas en minéraux argileux par libération du potassium (Schroeder, 1978)

Cette altération peut produire une quantité considérable de potassium, mais elle est très lente et ne doit donc pas jouer un rôle important dans l'alimentation des végétaux (Rahmatullah et Mengel, 2000).

Le potassium dans le sol se trouve sous forme minérale ou organique. La forme minérale est fractionnée en quatre formes : soluble, échangeable, non-échangeable, et structural (Van Diest, 1978) (figure 2).

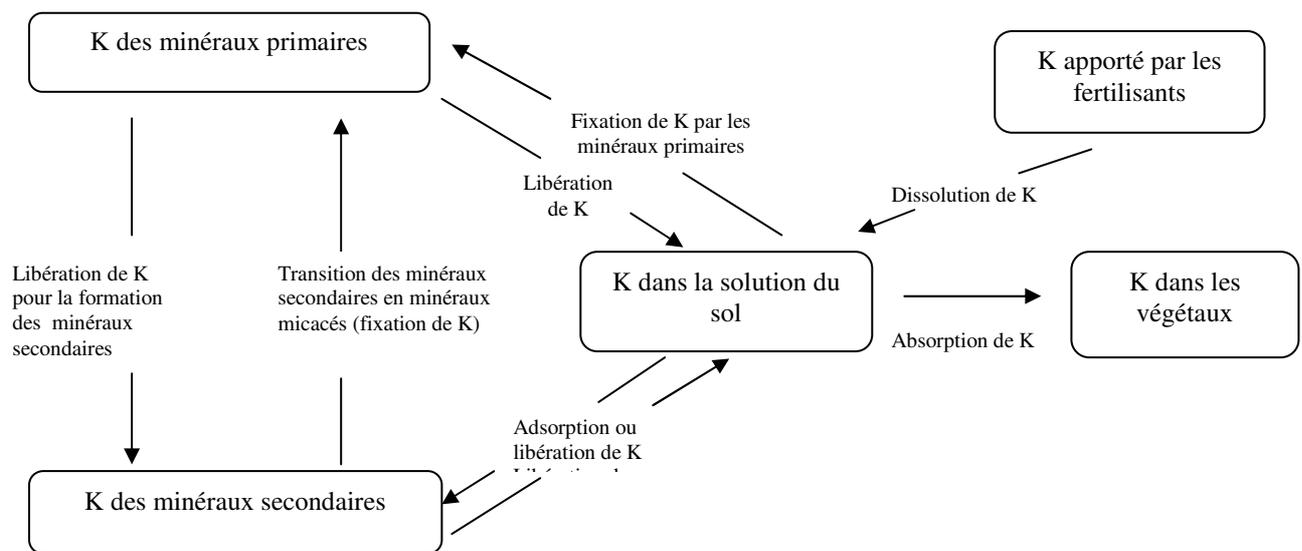


Figure 2. Les interactions entre les formes du potassium du sol (Van Diest, 1978)

Le potassium assimilable constitue la fraction actuellement disponible. Il comprend à la fois le potassium dissous dans la solution libre du sol et le potassium retenu par le complexe adsorbant du sol. Des échanges incessants et rapides ont lieu entre ces deux formes de potassium. La plante se nourrit à partir du potassium de la solution du sol. Ce potassium ne représente qu'une très faible fraction du potassium du sol (Schneider, 1997).

D'après Sparks (1987), les niveaux du potassium dans la solution du sol sont déterminés par l'humidité, les ions bivalents dans la solution et dans la phase solide du sol, et les réactions d'équilibres entre les différentes formes de potassium du

sol. Le potassium échangeable correspond aux cations retenus par attraction électrostatique autour des colloïdes électronégatifs, il peut facilement et rapidement être déplacé et échangé par l'apport d'une solution de sel neutre (Quemener, 1976).

Le potassium non échangeable, ou rétrogradé ou fixé, est une forme qui n'est pas facilement disponible pour les plantes. Cette forme peut constituer un réservoir important de potassium dans les sols (Jalali, 2008). La fixation du potassium est le résultat de l'emprisonnement des ions K^+ entre les feuillets des minéraux de type 2:1, spécialement l'illite. L'alternance de l'humectation et de la dessiccation de ces minéraux peut aider à une lente libération de ce potassium fixé (Sharma et al., 2010). Le taux du potassium non échangeable dans le sol est largement affecté par la distribution de la taille de particule et par la nature des minéraux présents dans le sol. La vermiculite, le mica et l'illite sont les minéraux argileux qui ont la plus grande capacité de rétrogradation du potassium (Jalali, 2006). La libération de cette forme de potassium résulte de l'appauvrissement de la solution du sol en potassium. Ainsi, si la concentration du potassium de la solution du sol diminue à un niveau critique, la libération du potassium non échangeable des positions interfoliaires des minéraux argileux peut se produire pour compenser le potassium échangeable libéré vers la solution du sol. Des facteurs physiques, chimiques, biologiques et climatiques contrôlent ces équilibres de potassium dans le sol. Ils peuvent être liés à la minéralogie des argiles (Barré et al., 2008), la température (Blank, 2010), l'humidité (Burns et Barber, 1961), le pH (Van Diest, 1978), les concentrations des autres ions (Jalali, 2008 ; Agbenin et Yakubu, 2006), la texture et la CEC (Tarafdar et Mukhopadhyay, 1989).

Le potassium organique est particulièrement facile à utiliser par les végétaux car la minéralisation de la matière organique libère facilement le potassium dans la solution du sol (Morel, 1989). Comme le potassium ne forme pas le complexe organique et que la sélectivité de la matière organique est élevée pour les autres cations, sa libération est facilitée par la réaction d'échange pour le potassium adsorbé sur les colloïdes organiques, et par la minéralisation de la substance organique pour le potassium intégré dans la structure des composés organiques (Robert, 1992).

1.2. Les méthodes chimiques d'évaluation des diverses formes de potassium dans le sol

1.2.1. Les méthodes aux extractions acides

1.2.1.1. Les méthodes d'attaque aux acides concentrés

Les acides concentrés sont utilisés pour la détermination du potassium total du sol. Certains auteurs utilisent l'HCl 6N ou concentré pendant 3 heures (Dabin, 1973). Par ailleurs Haylock (1956) propose l'attaque à l'acide nitrique concentré bouillant pendant 5 heures pour extraire le potassium total du sol.

La méthode fluorhydrique-perchlorique ne laisse pratiquement pas de minéraux non solubilisés et donne vraisemblablement une valeur assez correcte du potassium total du sol (Dabin, 1973).

1.2.1.2. Les méthodes d'attaque aux acides dilués

Dabin (1973) recommande l'utilisation de l'acide sulfurique 0.1 N pour extraire le potassium difficilement échangeable ou rétrogradé. Cependant, la technique qui semble avoir été la plus utilisée est une attaque à l'acide nitrique 1N pendant 10 minutes (Haylock, 1956). Ces méthodes aux acides dilués fournissent une mesure du potassium difficilement échangeable.

1.2.2. Les méthodes d'extraction aux sels neutres et aux acides organiques

La méthode la plus employée pour l'extraction du potassium assimilable utilise l'acétate d'ammonium 1N à pH 7 (Dabin, 1973). Nash (1971) utilise également l'acétate d'ammonium très dilué 0,01N, il lessive 5g de sol à raison de 1ml/mn, et le filtrat est analysé périodiquement.

Certains auteurs utilisent un mélange de sel et d'acide organique (exemple le réactif de Morgan composé d'acétate de sodium à 10% et d'acide acétique à 3%).

Il existe une autre méthode pour la détermination du potassium échangeable qui utilise des solutions de calcium ou de magnésium pour déplacer le potassium assimilable (Feigenbaum et Levy, 1977 ; Jalali, 2008).

Rappelons que le potassium assimilable est constitué de la somme du potassium échangeable et du potassium soluble.

1.2.3. Méthode d'extraction du potassium par le NaTPB

Cette méthode permet de préciser les réserves en potassium participant à l'alimentation des plantes (Jackson, 1965). Le potassium extrait au NaTPB (0,1N) inclut le potassium échangeable ainsi qu'un pool dit « libérable » ou intermédiaire correspondant à la différence K/Na et K/NH_4 dans lequel la plante prélèverait fortement. Ces valeurs du potassium extrait au NaTPB (0,1N) obtenues sont souvent corrélées aux quantités assimilées par une culture. Il existe une autre variante de cette méthode qui utilise NaTPB (0,1N) + NaCl (1,9N) pour permettre d'accéder aux réserves potassiques dans lesquelles une plante peut puiser sur différents cycles culturaux (Villemin, 1987).

1.2.4. Mesure du pool labile, notion d'intensité, de quantité et de capacité

La méthode proposée par Beckett (1964) *in* DABIN (1973) consiste à déterminer la composition d'une solution en équilibre avec le sol, par interpolation d'une courbe reliant la quantité de potassium extraite à l'intensité de cette libération. Il s'agit de déterminer les paramètres de la relation quantité/intensité en mettant en équilibre l'échantillon de terre avec des solutions de force ionique constante et de concentrations en potassium variables, est en étudiant ensuite les pertes ou les gains en potassium de ces solutions (Quemener, 1976).

1.2.5. Méthodes d'extraction à l'eau

La détermination du potassium soluble est obtenue par dissolution du potassium soluble dans un extrait de pâte saturée ou dans un extrait aqueux de rapport 1/1, 1/2 ou 1/10 (Quemener, 1976).

1.3. L'approche cinétique de la libération du potassium

Cette approche est basée sur le fait que le potassium échangeable mesuré par NH_4 , qui révèle de bonnes corrélations avec des prélèvements de potassium par la plante, présente des limites (Quemener et Bosc, 1988). Il existe une valeur minimale de potassium échangeable à partir de laquelle la plante n'exploite plus que le potassium non échangeable, ce seuil dépend de l'espèce cultivée (Tabatabai et Hanway, 1969 in Daklia, 1991). Il correspondrait au potassium des sites à très fortes affinités pour le potassium extractible par l'ammonium, mais pouvant difficilement accéder à la solution dans laquelle la plante s'alimente. Quemener (1986) évoque la possibilité de l'établissement d'un transfert à flux constant du potassium interne vers la solution du sol à partir de ces sites. Ce potassium échangeable minimal est mesuré après épuisement cultural, il doit probablement être relié aux sites présentant une constante de sélectivité infinie dans les échanges K/Ca ou K/Mg. L'existence du potassium échangeable minimal est rarement prise en compte dans l'établissement des corrélations entre le potassium échangeable et les exportations du potassium.

Cette approche cinétique de la libération du potassium a été utilisée par de nombreux auteurs (Feigenbaum et Levy, 1977 ; Lopez-Pineiro et Garcia Navarro, 1977, Jalali, 2008). Cette approche permet de tracer des courbes de libération du potassium en fonction du temps et d'établir une différenciation entre le potassium échangeable et le potassium fixé ou rétrogradé, ou difficilement échangeable.

Des modèles de cinétique peuvent être utilisés pour caractériser la libération du potassium (Jalali, 2008).

2. LA SALINITE DU SOL

2.1. Définition

Les sols salés sont ceux dont l'évolution est dominée par la présence de fortes quantités de sels solubles, plus solubles que le gypse ou par la richesse de leur complexe absorbant en ions provenant de ces sels et susceptibles de dégrader leurs propriétés physiques (Aubert, 1983).

Les principaux sels rencontrés sont formés principalement par des anions chlorures, sulfates, carbonates et bicarbonates ; et des cations sodium, potassium, calcium et magnésium.

Les sols salés sont formés à partir de trois processus physico-chimiques qui sont la salinisation, la sodisation et l'alcalisation. Les deux derniers processus sont regroupés sous le vocable d'alcalinisation (Girard et *al.*, 2005).

La salinisation a deux grandes origines. D'abord celle qui concerne la présence naturelle relativement élevée des sels solubles dans le sol, qui est dite salinisation primaire, ces sels peuvent avoir des origines géologiques ou marines. La deuxième origine est anthropique, la salinisation est dite secondaire, elle est provoquée par les activités humaines, notamment l'irrigation.

2.2. Classification des sols salés

Selon la WRB (2006), il existe deux groupes de sols salés qui sont les solonchaks et les solonetz

- *Les solonchaks* (saline soil) : ils se caractérisent par une concentration élevée en sels solubles pendant une période de l'année. Ils se caractérisent par la présence d'un horizon salique dont l'épaisseur dépasse les 15 cm et qui présente une CE >15 dS/m, ou parfois inférieure à 8 dS/m quand le pH est supérieur à 8.5 (sols carbonatés alcalins), ou inférieur à 3.5 (sols sulfatés acides).

- *Les solonetz* (alkaline soil ou sodic soil) : ils sont riches en sodium et en magnésium échangeables et présentent des pH qui dépassent 8.5. Ils sont caractérisés par la présence d'un horizon natrique et par une richesse en argiles dans l'un de leur horizon par rapport aux autres horizons.

2.3. Caractéristiques des sols salés

Les sols salés se caractérisent par un ensemble de paramètres qui sont principalement la salinité globale qui peut être exprimée par la conductivité électrique, le taux de sodium échangeable (ESP), le taux d'absorption du sodium (SAR), et le pH du sol.

- *La conductivité électrique (CE)* : c'est un indicateur de la teneur en sels solubles dans le sol. Elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisables. Cette propriété électrochimique est basée sur le fait que la conductance (inverse de la résistance électrique en ohm Ω) d'une solution s'accroît au fur et à mesure que les concentrations en cations et anions porteurs de charges électriques augmentent (Mathieu et Pieltain, 2003). En science du sol, la CE est exprimée en dS/m à une température de 25°C. La mesure de la CE se fait généralement sur l'extrait de pâte saturée. Plusieurs échelles de salinité ont été établies. L'échelle de l'USSL (1954) est la suivante :

CE < 2 dS/m : sol non salin

2 ≤ CE < 4 dS/m : sol faiblement salin

4 ≤ CE < 8 dS/M : sol modérément salin

8 ≤ CE < 15 dS/m : sol fortement salin

CE ≥ 15 dS/m : sol très fortement salin

- *Le taux de sodium échangeable (ESP)* : ce taux indique le pourcentage de sodium échangeable par rapport à la capacité totale d'échange cationique. Il est calculé par la formule suivante :

$$\text{ESP} = \frac{\text{Na}^+ \text{ (méq/100g)}}{\text{CEC}} \times 100$$

Ce paramètre caractérise la sodisation du complexe adsorbant. Il donne une idée sur les risques d'alcalinisation du sol.

- *Le taux d'absorption du sodium (Sodium Absorption Ratio, SAR) : l'USSL (1954) définit le SAR par la formule suivante :*

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} sont exprimés en méq/l de l'extrait de pâte saturée.

Le SAR évalue le risque de sodisation du complexe adsorbant en équilibre avec la solution du sol (Mathieu et Pieltain, 2003). Le risque de sodisation est évalué par l'échelle de l'USSL (1954) :

$SAR < 10$: faible risque

$10 \leq SAR < 18$: risque moyen

$18 \leq SAR < 26$: risque élevé

$SAR \geq 26$: risque très élevé

Il existe plusieurs relations entre le SAR et l'ESP, la plus utilisée est celle qui a été proposée par l'USSL (1954) :

$$ESP \% = \frac{100 (-0,0126 + 0,01475 SAR)}{1 + (-0,0126 + 0,01475 SAR)}$$

- *Le pH du sol* : le pH du sol peut être utilisé pour caractériser les sols salés. Cependant, ce paramètre reste dépendant d'un certain nombre de caractéristiques du sol, telles que la composition des cations échangeables, la composition et la concentration des sels solubles et la présence ou l'absence de gypse et des carbonates alcalino-terreux.

3. LE POTASSIUM DANS LES SOLS SALES

L'irrigation avec l'eau saumâtre, dans laquelle les concentrations en calcium, en magnésium, et en sodium sont élevées, conduit à une augmentation de la libération et de la désorption du potassium. Ce potassium est potentiellement assimilable par les racines des plantes, mais il est également facilement lixivié loin de la zone racinaire (Feigenbaum et Meiri, 1988 ; Jalali et Merrikhpour, 2008).

Les premières réactions chimiques qui régissent le transport et la disponibilité du potassium pour les plantes sont les échanges avec les autres cations et la rétrogradation par des minéraux argileux. En effet, Laoufi (2010) a montré que le comportement du potassium dans les sols salés est conditionné par le phénomène d'échange ionique ; les phénomènes de précipitation chimique sont secondaires en raison de la forte solubilité des sels du potassium (Daoud, 1993).

La fixation du potassium des sols salés par les minéraux argileux reste peu connue (Sparks, 1987).

Par ailleurs, Bar-Tal et *al.* (1991) ont montré que la croissance de la salinité ne réduisait pas les concentrations du potassium dans la matière sèche du végétal. La salinité n'affecterait pas l'assimilation du potassium par les plantes. En effet, Feigenbaum et *al.* (1990) ont montré que la fertilisation potassique des sols induit une augmentation de la teneur en potassium et une diminution du rapport Na/ K dans les tissus végétaux.

Conclusion

Le potassium est l'un des principaux éléments nutritifs. Il se présente sous plusieurs formes dans le sol. Son comportement dans des conditions salines reste peu connu.

Chapitre II

Matériel et méthodes

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES D'ETUDE

1. MATERIEL D'ETUDE

Ce travail est réalisé sur 18 échantillons de solonchaks référence de la région de Relizane (Hadj Miloud, 2010).

La région de Relizane se trouve à environs 300 Km à l'ouest d'Alger. Le climat de cette région est de type méditerranéen, les précipitations annuelles moyennes sont de l'ordre de 250 mm, l'évapotranspiration potentielle est de l'ordre de 1500 mm/an, et les températures sont très élevées en été (38°C) (Hadj Miloud, 2010). L'écart entre l'évapotranspiration potentielle et les précipitations montre un déficit hydrique important à l'échelle annuelle.

La région de Relizane présente deux grands périmètres irrigués, le périmètre de la Mina et le périmètre du Bas-Chélif.

Dans ces deux périmètres, les sols de la plaine sont formés sur des alluvions quaternaires (Boulaine, 1957 ; Douaoui *et al.*, 2001). Les sols sont confrontés à un problème de salinisation primaire accentuée par une salinisation secondaire qui est due à l'irrigation avec une eau minéralisée, et à la remontée de la nappe à cause d'un système de drainage défaillant (Hadj Miloud, 2010).

Les 18 échantillons ont été prélevés de 3 profils. Le profil 1 se trouve dans la plaine de la Mina qui constitue la limite Ouest du Bas-Chélif. Le profil 2 se trouve à Gaâ, c'est une dépression fermée qui se trouve sur la rive droite de l'oued Mina. Le profil 3 se trouve dans la station de recherche de Hmadna dans la partie Est du Bas-Chélif (tableau I).

Les résultats analytiques des paramètres de caractérisation montrent que (tableau II) :

Le pH : Il varie de 7.49 pour l'échantillon P₃H₂₋₃ à 8.76 pour l'échantillon P₂H₈, Il est modérément alcalin pour la plupart des échantillons.

La granulométrie : La texture de la majorité des échantillons est argilo-limoneuse.

Le gypse : Le taux du gypse varie de 0% pour les échantillons P₂H₈ et P₃H₁ à 4.1% pour l'échantillon P₂H₃.

Le calcaire : Il varie de 14.4% pour l'échantillon P₃H₃ à 22.2% pour l'échantillon P₂H₆.
Les sols sont moyennement calcaires à calcaires.

La matière organique : Le taux de matière organique est faible. Il varie de 0% pour les échantillons P₂H₅, P₂H₆, P₂H₇, P₂H₈ à 1.8% pour l'échantillon P₃H₁.

La CE : Elle varie de 3.65 dS/m pour l'échantillon P₃H₁ à 143 dS/m pour l'échantillon P₂H₁. Les échantillons sont fortement salins, à l'exception de l'échantillon P₃H₁ qui est faiblement salin.

La CEC : Elle varie de 7.52 Cmole(+)/Kg pour l'échantillon P₂H₈ à 24 Cmole(+)/Kg pour l'échantillon P₃H₃

L'ESP : Le taux en sodium échangeable varie de 8% pour l'échantillon P₃H₁ à 56.65 % pour l'échantillon P₂H₈.

Tableau I. Origines des échantillons étudiés (Hadj Miloud, 2010)

Numéro des profils	Coordonnées des profils	Classification du sol (WRB, 2006)	Profondeur des horizons (cm)	Symboles des horizons	Symboles utilisés
1	X : 0° 29' 31.2'' E Y : 35° 44' 17.0'' N Z : 63m	Hypersalic Gleyic Solonchak (Sodic, Chloridic, clayic)	0-17	Anz	P ₁ H ₁
			17-33	BCnz	P ₁ H ₂
			33-45	Cnz1	P ₁ H ₃
			45-110	Cgnz2	P ₁ H ₄
			110-150	Cgnz3	P ₁ H ₅
2	X : 0° 33' 22.0'' E Y : 35° 47' 44.33'' N Z : 55m	Hypersalic Gleyic Solonchak (Sodic, Chloridic, Clayic)	0-10	Anz	P ₂ H ₁
			10-19	ABnz	P ₂ H ₂
			19-28	Cgnz1	P ₂ H ₃
			28-38	Cnz2	P ₂ H ₄
			38-60	Cgnz3	P ₂ H ₅
			60-82	Cgnz4	P ₂ H ₆
			82-103	Cgnz5	P ₂ H ₇
103-150	Cgnz6	P ₂ H ₈			
3	X : 0° 44' 59,6'' E Y : 35° 57' 47,5'' N Z : 48m	Hypersalic Vertic Gleyic Solonchak (Sodic, Chloridic, Clayic)	0-17	A	P ₃ H ₁
			17-50	Bgnz1	P ₃ H ₂₋₁
			50-82	Bgnz2	P ₃ H ₂₋₂
			82-115	Bgnz3	P ₃ H ₂₋₃
			115-150	Cgnz	P ₃ H ₃

Tableau II. Caractéristiques analytiques des échantillons (Hadj Miloud, 2010)

Paramètres Echantillons	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	MO (%)	N (%)	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)	pH	CE (dS/m)	CEC (cmole+/kg)	ESP (%)
P ₁ H ₁	1,1	18,5	1,3	0,03	52,1	42,4	1,3	8,17	43,8	17,83	25,85
P ₁ H ₂	1,2	19,4	0,3	0,1	57,9	35,3	1,7	8,44	61,6	22,13	31,04
P ₁ H ₃	2,6	19,4	0,2	0	48,1	42,3	5,4	8,17	57,5	17,65	21,92
P ₁ H ₄	2,4	20,02	0,03	0	30,6	58,4	5,9	8,25	69,2	16,96	22,56
P ₁ H ₅	2,2	20	0,03	0	22,4	51,1	21	8,41	86,2	12,35	36,62
P ₂ H ₁	0,6	18,9	1,5	0,1	38,8	42	13,5	7,87	143	17,74	22,55
P ₂ H ₂	0,6	18,8	1,3	0,1	42	51,2	2,7	8,01	32	16,48	22,69
P ₂ H ₃	4,1	18,8	0,4	0,05	30	63,2	3,7	8,22	75,1	15,57	15,92
P ₂ H ₄	0,9	19,2	0,1	0	32,9	54,6	8,3	8,32	72	16,3	20,55
P ₂ H ₅	0,6	19,3	0	0	23,4	57,2	15,2	8,62	94,2	12,09	33,45
P ₂ H ₆	0,8	22,2	0	0	34,3	58,9	2,7	8,56	76,6	17,87	25,3
P ₂ H ₇	1,8	21,8	0	0	34,3	59,7	2,9	8,03	80	15,13	34,2
P ₂ H ₈	0	21,6	0	0	8	12,9	76,7	8,76	100	7,52	56,65
P ₃ H ₁	0	17	1,8	0,07	47,7	47,5	0	8,31	3,65	21	8
P ₃ H ₂₋₁	0,5	17,2	1,5	0,06	54	46,5	0	7,67	45,3	19	16
P ₃ H ₂₋₂	0,5	15,9	1,3	0,07	55,8	41	0	7,84	50,3	18	26
P ₃ H ₂₋₃	1,2	17,9	0,1	0	55,5	40	0	7,49	42,2	17	18
P ₃ H ₃	0,8	14,4	0,2	0	57,6	39,2	0	7,5	44,7	24	16

2. METHODES D'ETUDE

2.1. Les différentes formes du potassium

Les analyses ont été effectuées sur la terre séchée, broyée et tamisée à 2mm. Les différentes formes du potassium sont déterminées selon les méthodes qui suivent :

-*Le potassium total* : Attaque à l'acide fluorhydrique et perchlorique bouillants pendant 15mn, filtrer, ensuite passer au spectrophotomètre à flamme (Jackson, 1965).

-*Le potassium extractible* : Extraction par l'acide nitrique 1N bouillant pendant 10mn, filtrer ensuite passer au spectrophotomètre à flamme (Haylock, 1956)

-*Le potassium assimilable* : Extraction à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium neutralisée pendant 1 heure, laisser reposer une nuit. Agiter pendant 5mn, filtrer, ensuite passer au spectrophotomètre à flamme (Quemener, 1988).

-*Le potassium soluble* : Extraction par de l'eau distillée, un rapport sol/solution de 1/10, agiter pendant 4 heures, filtrer ensuite passer au spectrophotomètre à flamme.

Les teneurs en potassium échangeable et en potassium rétrogradé sont calculées à partir de celles du potassium assimilable, soluble et extractible par les formules suivantes :

$$K \text{ échangeable} = K \text{ assimilable} - K \text{ soluble}$$

$$K \text{ rétrogradé} = K \text{ extractible} - K \text{ assimilable}$$

2.2. La cinétique de libération du potassium

La cinétique de la libération du potassium est étudiée par des extractions successives par une solution saline (CaCl_2 0,01M) avec un rapport sol/solution de 1/20, agiter pendant 15mn, centrifuger pendant 15mn, récupérer le surnageant. Répéter l'opération 10 fois sur le même échantillon de terre (Lopez-Pineiro et Garcia Navarro, 1997 ; Jalali, 2008).

2.3. Traitements des résultats

2.3.1. Les différentes formes du potassium

Les résultats des analyses obtenus ont fait l'objet d'analyses statistiques. Une première analyse statistique est basée sur la statistique descriptive qui est une description quantitative des variables étudiées (valeur maximale, minimale, moyenne, écart type et coefficient de variation). Une seconde analyse porte sur le calcul des corrélations entre les différentes formes du potassium et entre les formes du potassium et les caractéristiques du sol.

2.3.2. La cinétique de libération du potassium

La cinétique de libération du potassium a fait l'objet de recherche d'ajustement selon les principaux modèles décrits dans la bibliographie (Jalali, 2008). A cet effet, quatre modèles sont testés :

-Le modèle de diffusion parabolique : $q = a + bt^{1/2}$

-Le modèle de l'équation de la fonction de puissance : $\ln q = \ln a + b \ln t$

-Le modèle d'Elovich : $q = a + b \ln t$

-Le modèle du premier ordre: $\ln (q_0 - q_t) = a - bt$

Avec :

q : la quantité du potassium extrait,

q_t : la quantité cumulée du potassium extrait en temps t ,

t : le temps de l'extraction,

q_0 : la quantité maximale du potassium extrait,

a et b sont des constantes.

Ces modèles mathématiques ont été testé par les analyses de régression des moindres carrées pour déterminer la meilleure équation qui décrit la libération du potassium du sol. Les erreurs standards de l'estimation (SE) ont été calculées par la formule suivante:

$$SE = \left[\frac{\sum (q - q^*)^2}{(n - 2)} \right]^{1/2}$$

q et q* représentent, respectivement, les valeurs mesurées et estimées du potassium extrait.

n : est le nombre de couples de données étudiées.

Chapitre III

Résultats et discussion

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

1. LES DIFFERENTES FORMES DE POTASSIUM

Les résultats obtenus sont présentés dans l'annexe 1 et 2.

1.1. Le potassium total

Les teneurs en potassium total varient de 21,52 à 36,63 meq/100 g de terre (figure 3), soit entre 0,84 % et 1,43 % de K. La moyenne est de 28,44 meq/100g de terre, soit 1,11% de K ou 1,34 % de K₂O.

La majorité des échantillons étudiés, soit 12 échantillons, présentent des teneurs en potassium supérieures à 1 %. Ces échantillons seraient riches en potassium total selon les normes de Schroeder (1978). Le reste des échantillons, soit 6 échantillons, présentent des teneurs en potassium total inférieures à 1%, et ils sont pauvres en potassium total.

La majorité des coefficients de variation obtenus sont faibles (< 10 %), mais certains échantillons présentent des valeurs du coefficient de variation élevées (> 10 %). Les analyses réalisées présentent donc une fiabilité statistiquement acceptable pour la majorité des échantillons (Calot, 1973).

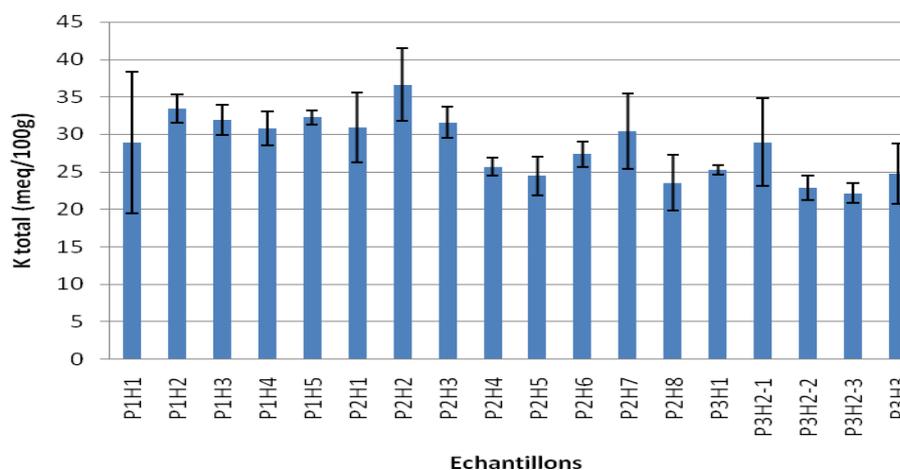


Figure 3. Les teneurs des échantillons en potassium total
(Les barres indiquent l'intervalle de confiance)

1.2. Le potassium rétrogradé

Les teneurs en potassium rétrogradé varient de 0.47 à 5.28 meq/100 g de terre (figure 4). La teneur moyenne est de 2.32 meq/100 g de terre.

D'après Mutcher (1978), il n'existe pas de normes d'interprétation bien établies pour cette forme de potassium.

La majorité des échantillons présente des coefficients de variation faibles (< 10 %). Les analyses réalisées présentent donc une fiabilité statistiquement acceptable pour la majorité des échantillons (Calot, 1973).

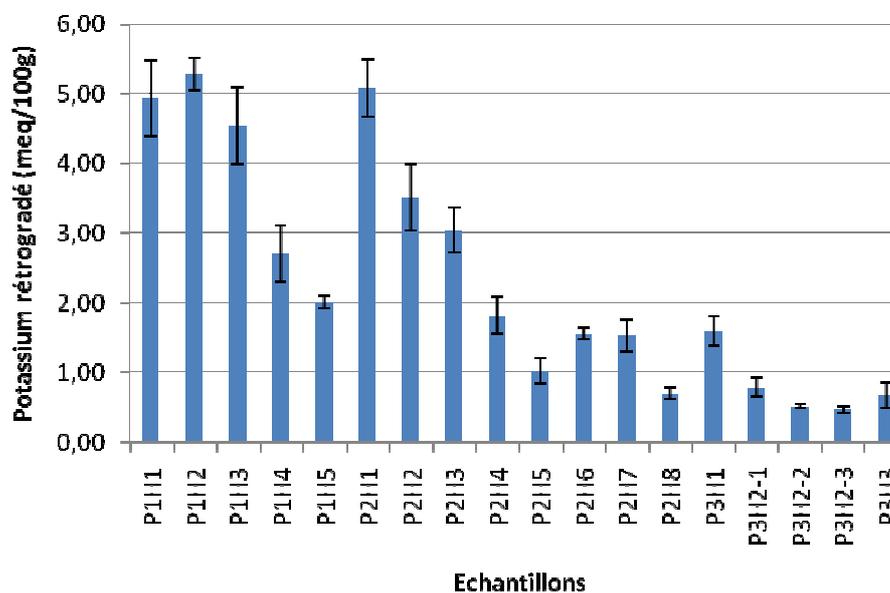


Figure 4. Les teneurs des échantillons en potassium rétrogradé
(Les barres indiquent l'intervalle de confiance)

1.3. Le potassium échangeable

Les teneurs en potassium échangeable varient de 0.07 à 0.68 meq/100 g de terre (figure 5). La teneur moyenne est de 0.29 meq/100 g de terre.

D'après les normes de Diehl (1975) citées par Daoud et Dogar (1985), un sol ayant une teneur en potassium échangeable inférieure à 10 mg/100g sol est un sol pauvre, si elle est entre 10 et 25 mg/100g sol le sol est moyennement pourvu. La moitié des échantillons étudiés (50%) possèdent des teneurs inférieures à 10 mg/100g et sont donc

pauvres en potassium échangeable, 44,44% ont des teneurs qui varient de 10 à 25mg/100g soit 8 échantillons et sont donc moyennement pourvus en potassium échangeable. L'échantillon P₃H₁ a une teneur de 26.35 mg/100g de potassium échangeable. Cet échantillon est bien pourvu en potassium échangeable.

La majorité des coefficients de variation obtenus sont faibles (< 10 %), mais certains échantillons présentent des valeurs du coefficient de variation élevées (> 10 %). Les analyses réalisées présentent donc une fiabilité statistiquement acceptable pour la majorité des échantillons (Calot, 1973).

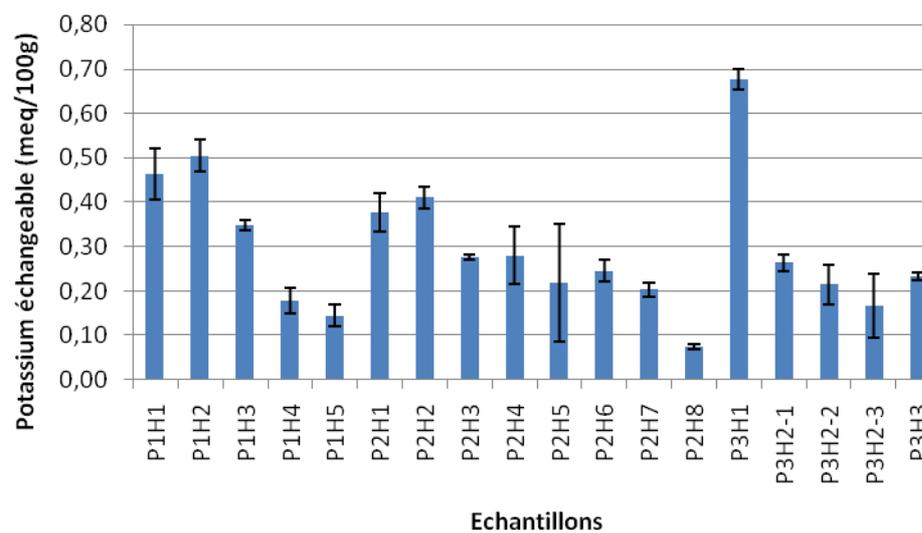


Figure 5. Les teneurs en potassium échangeable des échantillons
(Les barres indiquent l'intervalle de confiance)

1.4. Le potassium soluble

Les teneurs en potassium soluble varient de 0.05 à 0.52 meq/100 g de terre (figure 6). La teneur moyenne est de 0.19 meq/100g.

Les échantillons étudiés présenteraient des teneurs faibles en potassium soluble. Cet état de potassium représente la forme immédiatement assimilable par les racines.

La majorité des coefficients de variation obtenus sont faibles (< 10 %), mais certains échantillons présentent des valeurs du coefficient de variation élevées (> 10 %). Les analyses réalisées présentent donc une fiabilité statistiquement acceptable pour la majorité des échantillons (Calot, 1973).

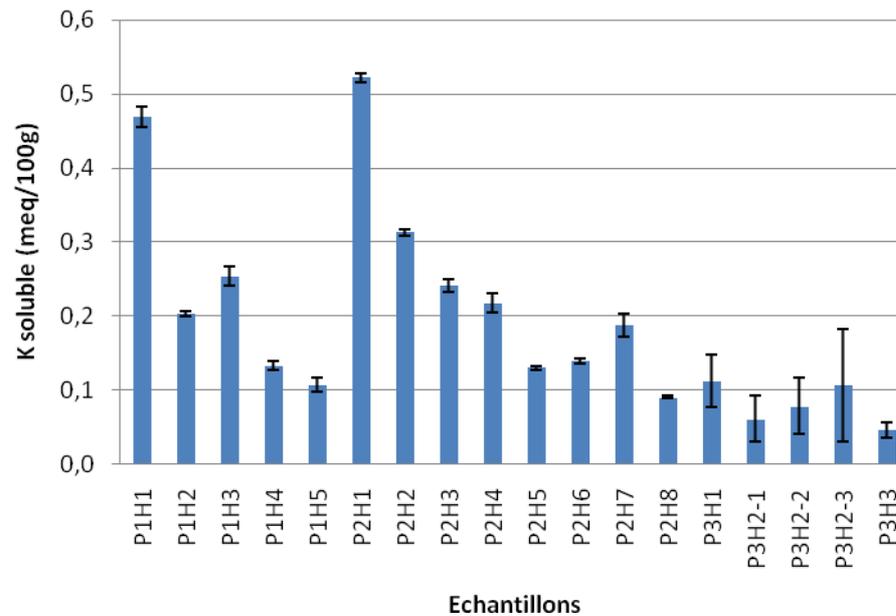


Figure 6. Les teneurs des échantillons en potassium soluble
(Les barres indiquent l'intervalle de confiance)

1.5. Synthèse et discussion

Le régime du potassium des profils étudiés est caractérisé par une réserve hétérogène en potassium total qui varie de 0,84% pour l'échantillon P₃H₂₋₃ à 1,43% pour l'échantillon P₂H₂. 60% de ces échantillons sont bien pourvus en potassium total. En se basant sur les mêmes normes utilisées dans le présent travail, les travaux de Mutcher (1978) ont montré que pour les sols du nord de l'Algérie, 51,5 % des échantillons analysés seraient pauvres en potassium total, 37,1 % sont moyennement pourvus, et le reste soit de 11,4 % sont bien pourvus en potassium total. Cependant le travail de Daoud et Dogar (1985) montre que la réserve en potassium total est moyenne à élevée dans les sols du Hodna, avec 74 % des échantillons présentant une bonne réserve en potassium total ($K_t \geq 1$ %). Par ailleurs, le travail de Cadi (1986) montre que des échantillons des sols de la Mitidja présentent des teneurs en potassium total faibles. Pour Van Diest (1978), la teneur en potassium total du sol dépend de la nature des minéraux primaires, de leur degré d'altération, et des processus pédogénétiques. En ce qui concerne le potassium rétrogradé, sa teneur de 0,47meq/100g pour l'échantillon P₂H₂₋₃ à 5,28meq/100g pour l'échantillon P₁H₂. Les teneurs en potassium

rétrogradé des échantillons étudiés sont nettement supérieures à celles des profils des sols rouges méditerranéens du sahel algérois étudiés par Belouchrani (1997). Cette différence peut être attribuée à la nature minéralogique des argiles qui détermine la capacité de rétrogradation du potassium dans le sol (Duthion, 1968).

Les teneurs en potassium échangeable sont relativement hétérogènes. Elles varient de 0,07meq/100g pour l'échantillon P₂H₈ à 0,68meq/100g pour l'échantillon P₃H₁. Les travaux de Mutcher (1978) utilisent les normes de Pagel (1968) qui considèrent que les teneurs inférieures à 5 mg/100 g sont faibles, et que les teneurs comprises entre 5 et 15 mg/100 g correspondent à des sols moyennement pourvus en potassium échangeable. Sur la base de ces valeurs, Mutcher (1978) montre que 12.9 % des échantillons des sols du nord de l'Algérie sont faiblement pourvus et 26.9 % des échantillons sont moyennement pourvus en potassium échangeable. Le travail de Daoud et Dogar (1985), qui utilise les normes de Diehl (1975), montre que 33 % des échantillons des sols du Hodna sont pauvres en potassium échangeable, 52 % sont moyennement pourvus et 15% sont bien pourvus. Pour le travail de Cadi (1986) qui a utilisé les normes de Diehl (1975), 23.33 % des échantillons des sols de la Mitidja sont moyennement pourvus en potassium échangeable et 76.67 % sont bien pourvus. Cette hétérogénéité dans la réserve du potassium échangeable serait attribuée à l'hétérogénéité des minéraux primaires, leur degré d'altération, et aux pratiques agricoles (Mutcher, 1978).

Enfin, la teneur en potassium soluble varie de 0,05meq/100g pour l'échantillon P₃H₃ à 0,68meq/100g pour l'échantillon P₂H₁. Ces résultats sont proches de ceux obtenus sur les sols du Bas-Cheliff par Ait Mechdal (2011).

Conclusion

Les sols étudiés seraient caractérisés par une teneur en potassium total relativement élevées pour 60 % des échantillons et une faible teneur pour 40 % des échantillons.

Les teneurs en potassium rétrogradées sont relativement élevées.

Les teneurs en potassium échangeable sont faibles pour 50 % des échantillons, et elles sont élevées pour 50 % des échantillons.

Les échantillons étudiés présentent de faibles teneurs en potassium soluble.

2. LES PROFILS DE DISTRIBUTION DES FORMES DU POTASSIUM

2.1. Le potassium total

Le profil de distribution du potassium total présente une allure convexe pour le profil 1, l'allure est irrégulière pour les profils 2 et 3 (figure 7).

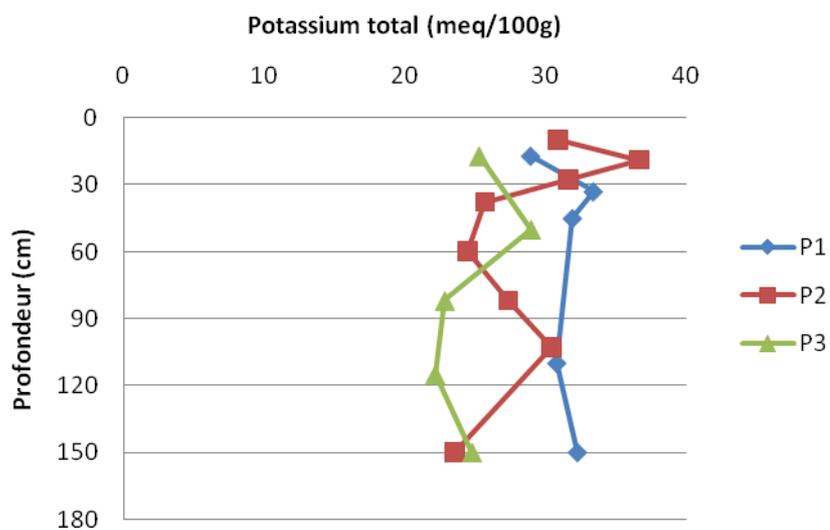


Figure 7. Les profils de distribution du potassium total

2.2. Le potassium rétrogradé

Les profils du potassium rétrogradé présentent une allure ascendante (figure 8). Les horizons de surface sont généralement plus riches en potassium rétrogradé. Globalement, les teneurs en potassium rétrogradé diminuent dans le sens profil 1 > profil 2 > profil 3.

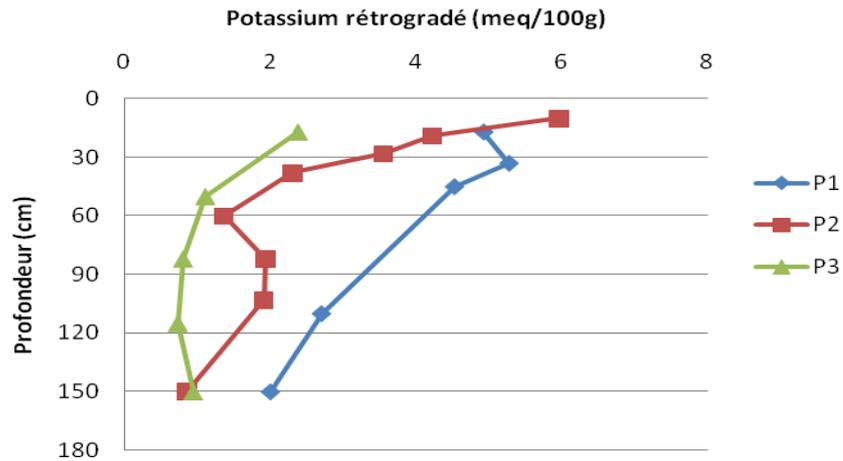


Figure 8. Les profils de distribution du potassium rétrogradé

2.3. Le potassium échangeable

Les profils de distribution du potassium échangeable suivent généralement une allure ascendante (figure 9). Cette distribution verticale du potassium échangeable montre que les horizons de surface sont plus riches en potassium échangeable que les horizons profonds.

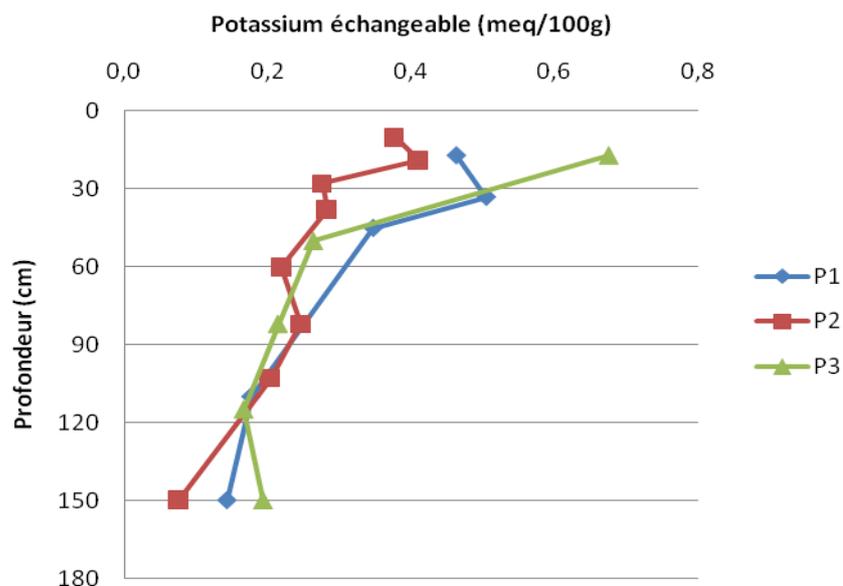


Figure 9. Les profils de distribution du potassium échangeable

2.4. Le potassium soluble

Les profils de distribution du potassium soluble présentent une allure ascendante (figure 10). Les horizons de surface sont donc mieux pourvus en potassium soluble. Les teneurs en potassium soluble du profil 3 sont relativement plus faibles que celles des deux autres profils.

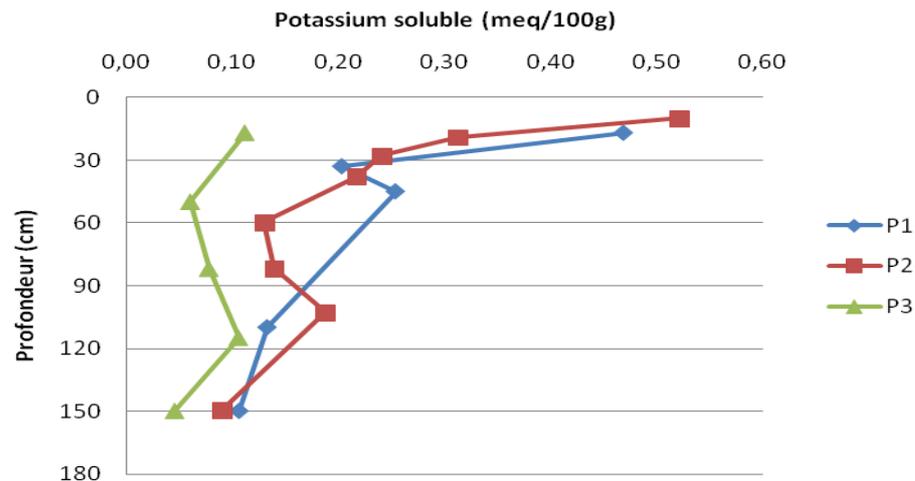


Figure 10. Les profils de distribution du potassium soluble

2.5. Synthèse et discussion

Les profils de distribution du potassium total sont convexes ou irréguliers. Cette irrégularité peut être attribuée à la nature des minéraux apportés par les phases de sédimentation des alluvions (Boulaine, 1957 ; Douaoui *et al.*, 2001).

Les profils de distribution des autres formes du potassium (rétrogradé, échangeable, soluble) présentent une allure ascendante. Les horizons de surface sont donc mieux pourvus en potassium rétrogradé, en potassium échangeable, et en potassium soluble que les horizons profonds.

Les teneurs les plus élevées qui caractérisent certains horizons de surface seraient liées aux teneurs en matière organique qui permettent une accumulation biologique du potassium dans les horizons de surface (Mutcher, 1978).

Conclusion

Le profil de distribution du potassium total est relativement irrégulier. Le potassium rétrogradé, le potassium échangeable et le potassium soluble présentent des profils de distribution ascendants.

3. RELATION ENTRE LES DIFFERENTES FORMES DU POTASSIUM

3.1. La matrice des corrélations

La matrice des corrélations est présentée dans le tableau III. La comparaison du coefficient de corrélation observé par rapport aux valeurs critiques montre que :

- la teneur en potassium rétrogradée est très fortement dépendante de la teneur en potassium total (figure 11).
- la teneur en potassium soluble est fonction de la teneur en potassium total (figure 12).
- la teneur en potassium soluble est très fortement dépendante de la teneur en potassium rétrogradé (figure 13).
- La teneur en potassium échangeable est fonction de la teneur en potassium rétrogradé (figure 14).

Tableau III. La matrice des corrélations entre les différentes formes du potassium

Formes du potassium (meq/100 g)	K-total	K-rétrogradé	K-échangeable	K-soluble
K - total	1			
K - rétrogradé	0.721***	1		
K - échangeable	0.3092	0.5669*	1	
K - soluble	0.484*	0.8209***	0.4470	1

* : Signification au seuil de 5%

*** : Signification au seuil de 1 o/oo

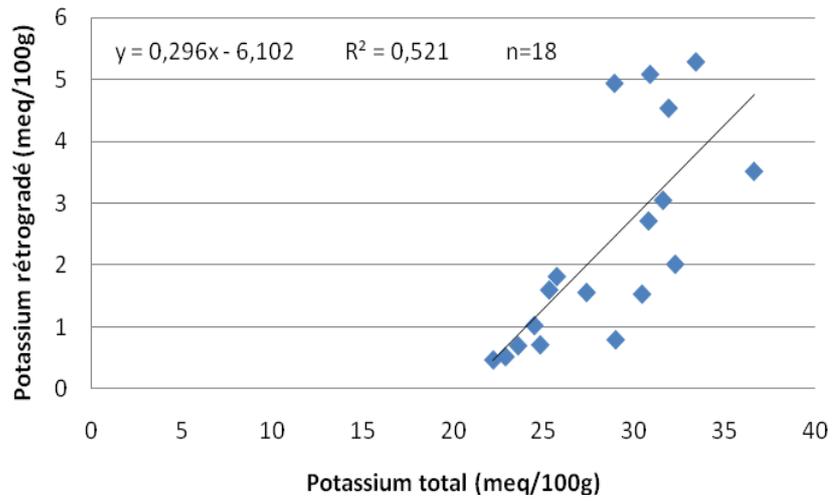


Figure 11. Relation entre le potassium rétrogradé et le potassium total

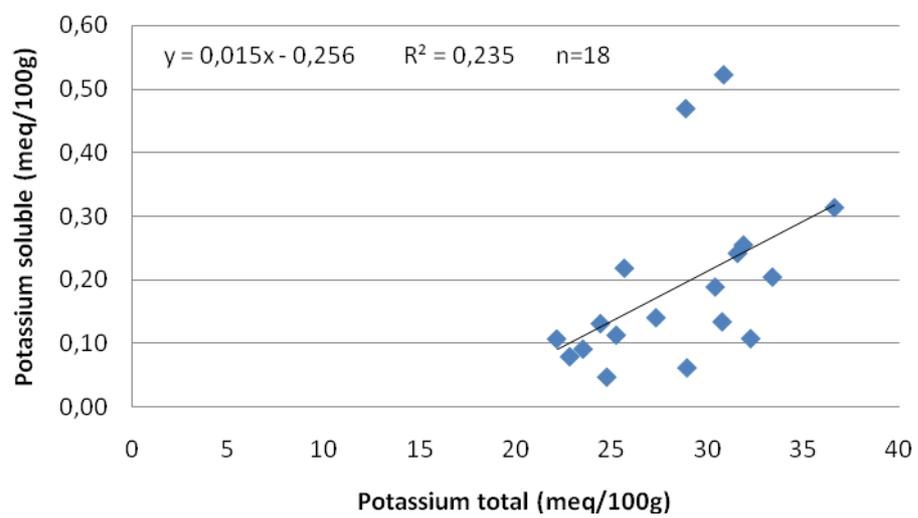


Figure 12. Relation entre le potassium soluble et le potassium total

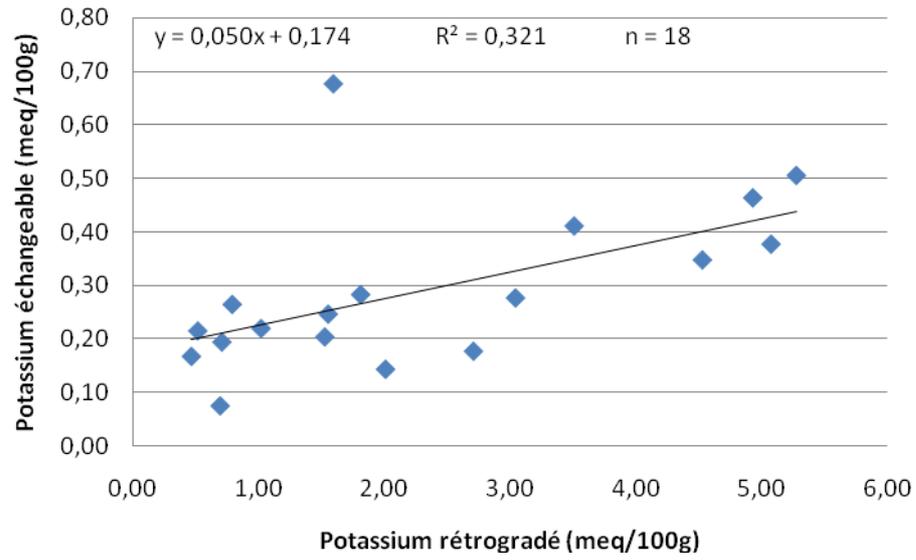


Figure 13. Relation entre le potassium échangeable et le potassium rétrogradé

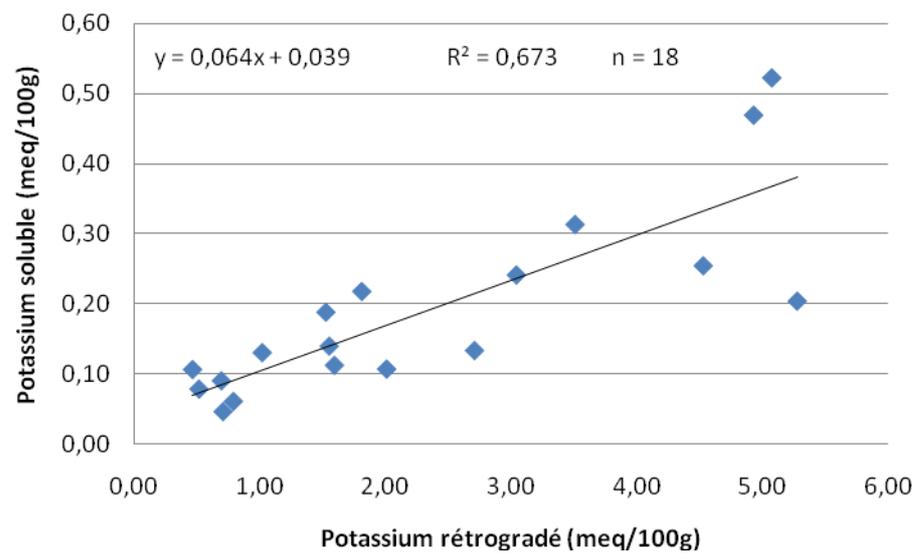


Figure 14. Relation entre le potassium soluble et le potassium rétrogradé

3.2. Synthèse et discussion

Les résultats statistiques montrent qu'il existe certaines corrélations entre les différentes formes du potassium.

Deux corrélations sont positives et très hautement significatives, ce sont celles qui existent entre le potassium rétrogradé et le potassium total et entre le potassium rétrogradé et le potassium soluble. Les deux autres corrélations sont positives et significatives entre le potassium soluble et le potassium total, et entre le potassium rétrogradé et le potassium échangeable. Ces corrélations entre les différentes formes du potassium mettent en évidence l'équilibre dynamique du potassium du sol rapporté par Goulding (1987).

Toutefois, il n'existe pas de corrélation entre le potassium échangeable et le potassium soluble. Cette absence de corrélation signifie que l'équilibre entre la solution du sol et le complexe adsorbant est affecté par d'autres cations qui seraient présents en plus forte concentration par rapport au potassium dans la solution du sol (Laoufi, 2010). Ce résultat est à rapprocher du travail de Daoud et Cadi (1988), qui a porté sur des sols de la Mitidja, qui montre qu'il n'existe pas de corrélation entre le potassium échangeable et le potassium soluble. Pour ces auteurs, les transformations du sol naturel en sol cultivé, les apports d'engrais et d'amendement organiques ont probablement modifié les relations initiales qui auraient existé entre le potassium échangeable et le potassium soluble.

Conclusion

Les calculs statistiques montrent que le potassium soluble est corrélé positivement avec le potassium total et le potassium rétrogradé. Le potassium échangeable est corrélé positivement avec le potassium rétrogradé. Le potassium rétrogradé est corrélé positivement avec le potassium total.

4. INFLUENCES DES CARACTERISTIQUES DU SOL SUR LES DIFFERENTES FORMES DU POTASSIUM

4.1. Les corrélations simples

Les coefficients de corrélations entre les caractéristiques du sols et les différentes formes du potassium sont présentés dans le tableau IV. La comparaison du coefficient de corrélation observé par rapport aux valeurs critiques montre que la teneur en potassium échangeable fortement dépendante de la teneur en matière organique et de la CEC (figures 15 et 16). Elle est négativement corrélée avec le taux de sodium échangeable (figure 17).

Tableau IV. Le coefficient de corrélation des différentes formes du potassium avec certaines caractéristiques des sols.

Paramètres	M.O. %	Calcaire total %	Argile %	CE dS/m	ESP %	CEC meq/100 g
K- total	0.1019	0.2978	-0.0148	0.0854	0.0440	0.0899
K- rétrogradé	0.2197	0.1778	0.1692	0.1741	-0.0757	0.2276
K- échangeable	0.6462**	-0.2323	0.4680	-0.4445	-0.4929*	0.5520*
K- soluble	0.3621	0.1607	0.0543	0.3179	-0.0755	0.0391

* : Signification au seuil de 5%

** : Signification au seuil de 1%

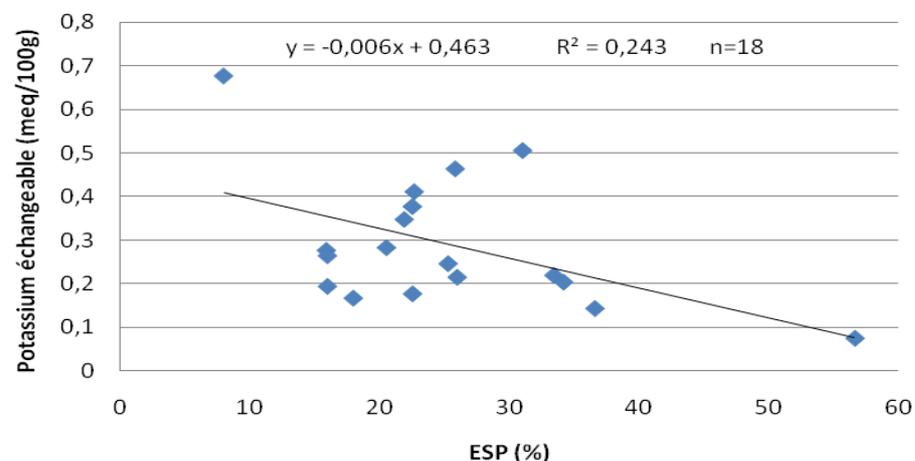


Figure 15. Relation entre le potassium échangeable et le sodium échangeable

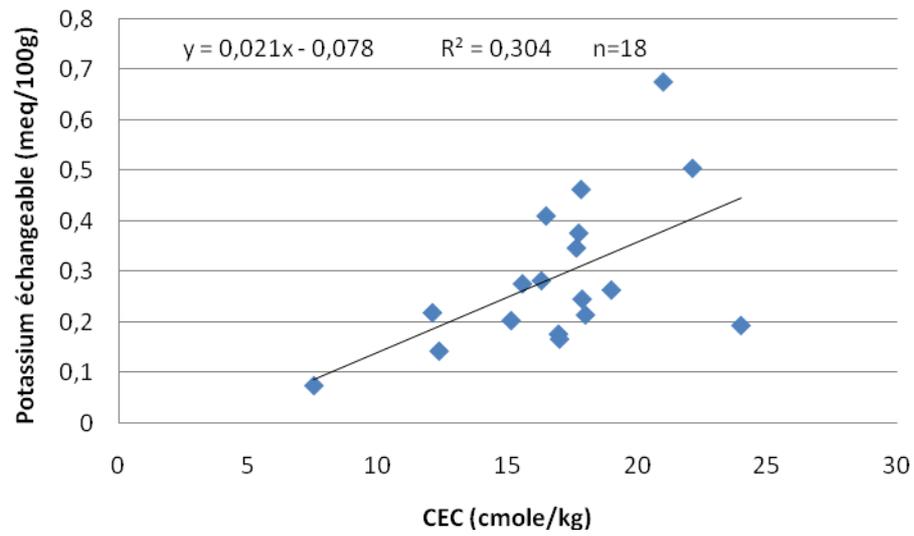


Figure 16. Relation entre le potassium échangeable et la capacité d'échange cationique

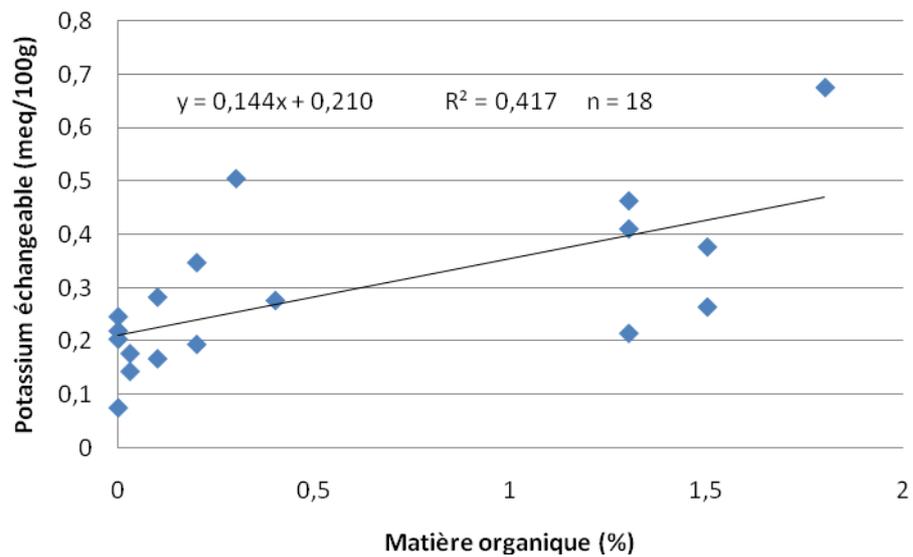


Figure 17. Relation entre le potassium échangeable et la matière organique

4.2. Synthèse et discussion

Ces résultats montrent que le potassium échangeable est corrélé positivement avec la matière organique et la CEC, il est corrélé négativement avec la teneur en sodium échangeable.

Cette corrélation négative entre le potassium échangeable et la sodicité suggère que la sodisation du complexe adsorbant se produirait au détriment du potassium échangeable (Laoufi, 2010).

Les différentes formes de potassium ne semblent pas être corrélées avec la conductivité électrique. La salinisation de la solution du sol n'affecterait pas le statut potassique de ces sols. Le travail de Feigenbaum (1987), qui a étudié la distribution et le mouvement du potassium dans un sol sableux exposé au lessivage par des eaux salines et sodiques, montre que le mouvement descendant du potassium apporté était fonction du niveau de salinité et de la quantité de potassium contenue dans la solution de lessivage. Par rapport au bilan calculé du potassium, une partie du potassium apporté n'a pas été trouvée dans l'extrait à l'acétate d'ammonium. La quantité de potassium disparue augmente quand la salinité de l'eau d'irrigation augmentait. Il semble donc que le potassium soit rétrogradé par les minéraux argileux du sol. Jalali (2008) a montré un effet de salinité sur la libération du potassium.

Conclusion

La teneur en potassium échangeable des sols dépend de leur teneur en matière organique et de leur capacité d'échange cationique.

La sodisation du complexe adsorbant se produit, en partie, au détriment du potassium échangeable.

5. LA CINÉTIQUE DE LIBÉRATION DU POTASSIUM

Les résultats concernant les teneurs extraites du potassium par chaque extraction ainsi que les teneurs cumulées extraites du potassium par les dix extractions successives sont représentés dans les annexes 3, 4, 5, 6 et 7.

5.1. Le potassium extrait cumulé

5.1.1. Relation entre le potassium extrait cumulé et les différentes formes du potassium

Les coefficients de corrélation entre le potassium extrait cumulé pendant 150 minutes et les différentes formes du potassium sont présentés dans le tableau V. La comparaison du coefficient de corrélation observé par rapport à la valeur critique montre que la teneur du potassium extrait cumulé est fortement dépendante de la teneur en potassium rétrogradé, échangeable et soluble :

- Equation de régression entre les teneurs du potassium extrait cumulé et les teneurs en potassium total : $Y = 0.044 X - 0.515$ $R^2 = 0.183$ $n = 18$

- Equation de régression entre les teneurs du potassium extrait cumulé et les teneurs en potassium rétrogradé : $Y = 0.196 X + 0.301$ $R^2 = 0.592$ $n = 18$

- Equation de régression entre les teneurs du potassium extrait cumulé et les teneurs en potassium échangeable : $Y = 2.419 X + 0.052$ $R^2 = 0.704$ $n = 18$

- Equation de régression entre les teneurs du potassium extrait cumulé et les teneurs en potassium soluble : $Y = 2.654 X + 0.253$ $R^2 = 0.676$ $n = 18$.

Tableau V. Le coefficient de corrélation entre le potassium extrait cumulé et les différentes formes du potassium

Formes du potassium (meq/100 g)	K- total	K rétrogradé	K échangeable	K soluble
K extrait cumulé pendant 150 minutes (meq/100 g)	0.4280	0.7695***	0.8393***	0.8223***

*** : Signification au seuil de 1 o/oo

5.1.2. Comparaison du potassium extrait cumulé et les différentes formes du potassium

La comparaison des teneurs du potassium extrait cumulé aux teneurs des différentes formes du potassium montre que (tableau VI) :

- les teneurs du potassium extrait cumulé pendant 150 minutes sont supérieurs aux teneurs en potassium échangeable,
- les teneurs du potassium extrait cumulé pendant 150 minutes sont supérieurs aux teneurs en potassium assimilable,
- Les teneurs du potassium extrait cumulé sont inférieures à la somme des teneurs en potassium assimilable et en potassium rétrogradé.

Ce résultat suggère que la cinétique d'extraction du potassium pendant 150 minutes a permis la libération du potassium soluble, du potassium échangeable et d'une fraction du potassium rétrogradé.

Tableau VI. Les teneurs extraites cumulées du potassium pendant 150 minutes et les différentes formes de potassium.

Echantillons	K échangeable	K assimilable	K extrait cumulé (mg/100g)	K assimilable + K rétrogradé (mg/100g)
P ₁ H ₁	0,463	0,93	1,586	5,86
P ₁ H ₂	0,505	0,71	1,036	5,99
P ₁ H ₃	0,347	0,60	0,869	5,13
P ₁ H ₄	0,177	0,31	0,517	3,02
P ₁ H ₅	0,143	0,25	0,385	2,26
P ₂ H ₁	0,376	0,90	1,648	5,98
P ₂ H ₂	0,410	0,72	1,092	4,23
P ₂ H ₃	0,276	0,52	0,846	3,56
P ₂ H ₄	0,282	0,46	0,671	2,31
P ₂ H ₅	0,219	0,35	0,419	1,37
P ₂ H ₆	0,246	0,39	0,544	1,94
P ₂ H ₇	0,203	0,39	0,543	1,92
P ₂ H ₈	0,075	0,17	0,294	0,86
P ₃ H ₁	0,676	0,79	1,374	2,38
P ₃ H ₂₋₁	0,264	0,32	0,638	1,12
P ₃ H ₂₋₂	0,215	0,29	0,361	0,81
P ₃ H ₂₋₃	0,167	0,27	0,386	0,74
P ₃ H ₃	0,194	0,24	0,409	0,95
Moyenn	0,291	0,48	0,757	2,80

5.1.3. Evolution des teneurs cumulées en potassium en fonction du temps

La quantité cumulée de potassium libérée en fonction du temps par les 10 extractions successives avec le CaCl_2 0,01M sont représentées sur la figure 18. Le potassium cumulé extrait à partir du sol varie de 0.294 meq/100g à 1.648 meq/100g, la moyenne est de 0.757 meq/100 g.

Les résultats montrent que la libération du potassium est initialement rapide, elle est suivie par une phase de libération plus lente. La libération rapide se produirait pendant les 100 premières minutes.

Il faut signaler que les quantités extraites cumulées diminuent avec la profondeur. L'horizon de surface libère nettement plus de potassium que les horizons sous jacents. Les quantités extraites cumulées semblent être indépendantes de la teneur en potassium total des échantillons (tableau V). Elles sont positivement corrélées avec les teneurs en potassium rétrogradé, les teneurs en potassium échangeable, et les teneurs en potassium soluble.

5.1.4. Synthèse est discussion

Les résultats du potassium libéré et cumulé à partir du sol par les dix extractions successives avec le CaCl_2 0,01M sont supérieurs au potassium échangeable et du potassium soluble. Le potassium échangeable extrait avec l'acétate d'ammonium 1M des 18 échantillons étudiés varie de 0.075 à 0.676 meq/100g. L'acétate d'ammonium 1N est généralement utilisé pour l'appréciation le potassium assimilable par les plantes. Les résultats de Jalali (2006) montrent que le potassium échangeable extrait par l'acétate d'ammonium n'est pas corrélé avec le potassium prélevé par le blé. Ce résultat signifie qu'après épuisement du potassium échangeable, la plante commence à prélever de la forme non échangeable pour satisfaire ses besoins en potassium. Par ailleurs, les teneurs cumulées du potassium extrait sont inférieures à celles du potassium rétrogradé. Ce résultat signifie que les dix extractions du potassium avec le CaCl_2 0,01M n'épuisent pas toute la réserve du potassium rétrogradé.

La libération du potassium par les 10 extractions successives avec le CaCl_2 0,01M est caractérisée par une diminution de la libération du potassium du sol avec le temps.

Cette libération est définie par une phase initiale rapide suivie par une phase lente. Le rythme de la première phase rapide peut être lié aux ions potassium fixés sur les sites de surface alors que la phase lente peut être attribuée à la libération du potassium des bordures et des espaces entre les feuillets (Jalali, 2008). Le changement dans l'intensité de la libération du potassium peut être lié aux caractéristiques des deux phases du processus de contrôle de la diffusion du potassium qui a été observé pour les ions similaires à K^+ tel que NH_4^+ (Steffens et Sparks, 1997). Ces deux phases ont été aussi rapportées par Ghosh et Singh (2001) et Jalali (2006). Le précurseur de la force de la libération du potassium qui se trouve entre les feuillets des minéraux argileux du sol est supposé être la diminution de la concentration du potassium dans la solution du sol et dans la rhizosphère (Rahmatullah et Mengel, 2000).

L'intensité élevée de la libération du potassium lors de la phase initiale peut être due également à la substitution de K^+ par Ca^{++} sur les sites de surface des structures argileuses. Par la suite, l'intensité de libération du potassium diminue, le K^+ situé dans les espaces entre les feuillets et dans les cavités hexagonales des minéraux argileux est substitué lentement par Ca^{++} . Ce ralentissement de la libération du potassium serait lié à la difficulté rencontrée par le calcium pour accéder aux sites d'échanges occupés par le potassium en raison du rayon hydraté du Ca^{++} (4.3Å) qui est supérieur à celui du K^+ (3.3Å) (Jalali, 2006).

Conclusion

La cinétique de la libération du potassium est initialement rapide, elle est suivie par une phase de libération plus lente. La libération rapide se produirait pendant les 100 premières minutes.

Les quantités extraites cumulées diminuent avec la profondeur. L'horizon de surface libère nettement plus de potassium que les horizons sous jacents.

Les quantités extraites cumulées semblent être indépendantes de la teneur en potassium total des échantillons. Elles sont positivement corrélées avec les teneurs en potassium rétrogradé, les teneurs en potassium échangeable, et les teneurs en potassium soluble.

La cinétique d'extraction du potassium porterait sur le potassium soluble, le potassium échangeable, et une fraction du potassium rétrogradé.

5.2. Application des modèles de cinétique de la libération du potassium

Quatre modèles de cinétique qui expliquent la libération du potassium du sol sont habituellement utilisés (Jalali, 2008). Il s'agit de l'équation de la fonction de puissance, de l'équation d'Elovich, de l'équation de la diffusion parabolique, et de l'équation du premier ordre (Jalali, 2008).

5.2.1. Les modèles utilisés

-Le modèle de la fonction de puissance : ce modèle est également appelé la fonction d'appauvrissement. L'équation de la fonction de puissance est exprimée comme suit :

$$\ln q = \ln a + b \ln t$$

q : est la quantité de K libérée au temps t,

t : le temps de l'extraction,

a : constante qui représente le taux initial,

b : est la pente de la courbe, elle caractérise l'intensité de la vitesse de la réaction.

-Le modèle Elovich : l'équation d'Elovich appliquée pour la description de la réaction de libération du potassium sous la forme suivante :

$$q = a + b \ln t$$

q : est la quantité de K libérée au temps t,

t : le temps de l'extraction,

a : constante qui représente le taux initial,

b : est la pente de la courbe, elle caractérise l'intensité de la vitesse de la réaction.

-Le modèle de diffusion parabolique : la forme de l'équation de diffusion parabolique appliquée à la désorption du potassium est la suivante :

$$q = a + b t^{1/2}$$

q : est la quantité de K libérée au temps t,

t : le temps de l'extraction,

a : constante qui représente le taux initial,

b : est la pente de la courbe, elle caractérise l'intensité de la vitesse de la réaction.

-Le modèle du premier ordre : l'équation linéaire du premier ordre est de la forme suivante:

$$\ln (q_0 - qt) = a - bt$$

q : est la quantité de K libérée au temps t,

t : le temps de l'extraction,

a : constante qui représente le taux initial,

b : est la pente de la courbe, elle caractérise l'intensité de la vitesse de la réaction,

q_0 : représente la quantité maximale du potassium extrait.

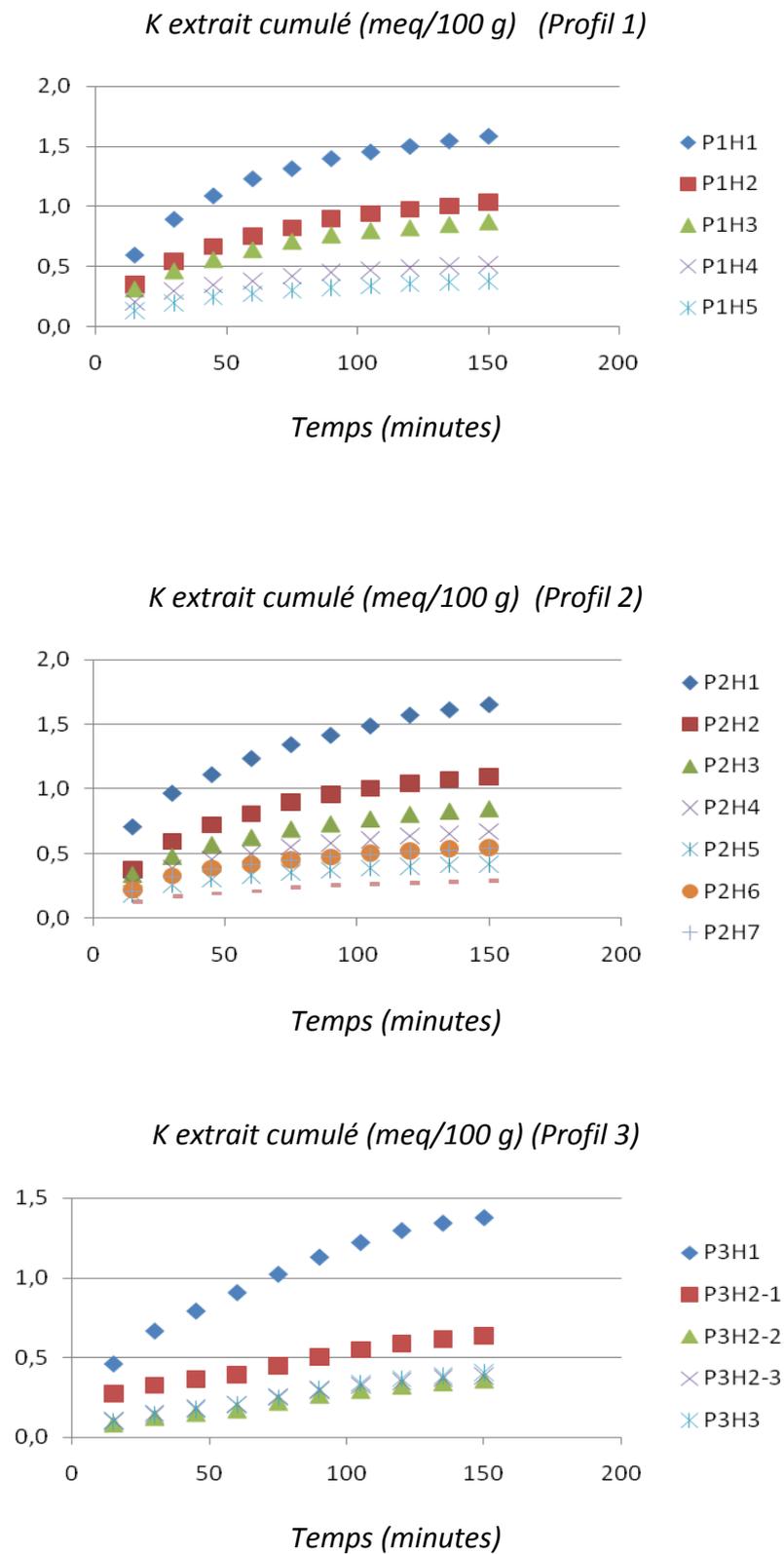


Figure 18. Evolution des teneurs cumulées en potassium en fonction du temps

5.2.2. Allure générale des modèles utilisés

En représentant graphiquement la variation de la teneur en potassium libéré (q ou $\ln q$) par rapport au parcours de la durée de l'extraction ($\ln t$, t ou $t^{1/2}$), des droites sont obtenues (figures 19, 20, 21, 22).

Les droites des modèles de la fonction de puissance, d'Elovich et de la diffusion parabolique suivent généralement la même allure. Ces droites ont des pentes (b) positives. Les interceptions (a) des droites du modèle Elovich sont négatives. Les interceptions (a) des modèles de la fonction de puissance et la diffusion paraboliques sont positives sauf pour les échantillons P_3H_{2-2} , P_3H_{2-3} et P_3H_3 qui ont des interceptions (a) de la fonction parabolique négatives. Par ailleurs, les droites du modèle premier ordre ont des pentes (b) négatives et des interceptions (a) positives.

5.2.3. La signification des paramètres des modèles

Les coefficients de corrélation, les erreurs standards et les paramètres (a et b) pour la description de la cinétique de libération du potassium sont présentés dans le tableau VII.

- **les paramètres a et b** : les paramètres a et b de chaque modèle représentent l'interception et la pente des courbes linéaires résultant du tracé de K^+ en fonction du temps. La constante b reflète la vitesse de libération du K^+ non échangeable. Les valeurs b sont connues pour être bien corrélées avec le potassium extrait par la culture de la phase non échangeable (Havlin et al, 1985; et Mengel et Uhlenbecker, 1993). Lorsque l'absorption par les plantes n'est pas corrélée positivement avec la valeur b , cela peut représenter l'incapacité du sol à répondre à la demande en potassium par la culture. D'autre part, une forte corrélation positive peut être une indication de la libération potassium non échangeable pour répondre aux besoins des cultures.

L'ajustement linéaire de la diffusion parabolique indique que la libération du potassium est un processus de contrôle de diffusion (Jardine et Sparks, 1984). La vitesse de libération (b) varie de 10,51 à 44,14 $\text{mg kg}^{-1} \text{min}^{-1/2}$.

Le paramètre b de l'ajustement des données à l'équation de puissance est inférieur à 1 pour tous les échantillons indiquant ainsi que la vitesse de libération du potassium décroît avec le temps (Jalali, 2008).

Le paramètre b du modèle d'Elovich peut être utilisé comme un indice des vitesses de libération du potassium, il varie de 29,92 à 168,7 $\text{mg kg}^{-1} \text{min}^{-1}$. Cette variation des valeurs de b indique que la force de réapprovisionnement du potassium pour compenser l'absorption des cultures des 18 échantillons étudiés est différente.

Les valeurs de b du modèle premier ordre varient de -0,026 à -0,021 $(\text{mg kg}^{-1})^{-1}$.

- **Les paramètres R^2 et SE** : les coefficients de détermination R^2 des modèles utilisés présentent le niveau de corrélation entre le potassium libéré cumulé et la durée de l'extraction. Les valeurs SE sont les erreurs standards, elles indiquent les écarts qui existent entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées par les modèles.

Les quatre modèles décrivent la cinétique de libération du potassium. La comparaison des valeurs de R^2 et SE indique que :

- L'équation de la fonction de puissance, qui a le coefficient de corrélation R^2 le plus élevé (0,983) et l'erreur standard SE la plus faible (0.006), aboutit au meilleur ajustement des données expérimentales.

- L'équation d'Elovich décrit autant bien que la fonction de puissance la cinétique de libération du potassium. La moyenne de R^2 et SE sont respectivement 0,980 et 0.216. L'équation d'Elovich a affiché les plus grandes valeurs de b avec une moyenne de 82.83 $\text{mg kg}^{-1} \text{min}^{-1}$.

- L'équation de la diffusion parabolique a affiché des valeurs des moyennes du R^2 et SE, respectivement, de 0,977 et 82.391. Le paramètre b est en moyenne de l'ordre de 22.048 $\text{mg kg}^{-1} \text{min}^{-1/2}$.

- L'équation du premier ordre vient en quatrième ordre avec un R^2 de 0,952 et une erreur standard de 0,118.

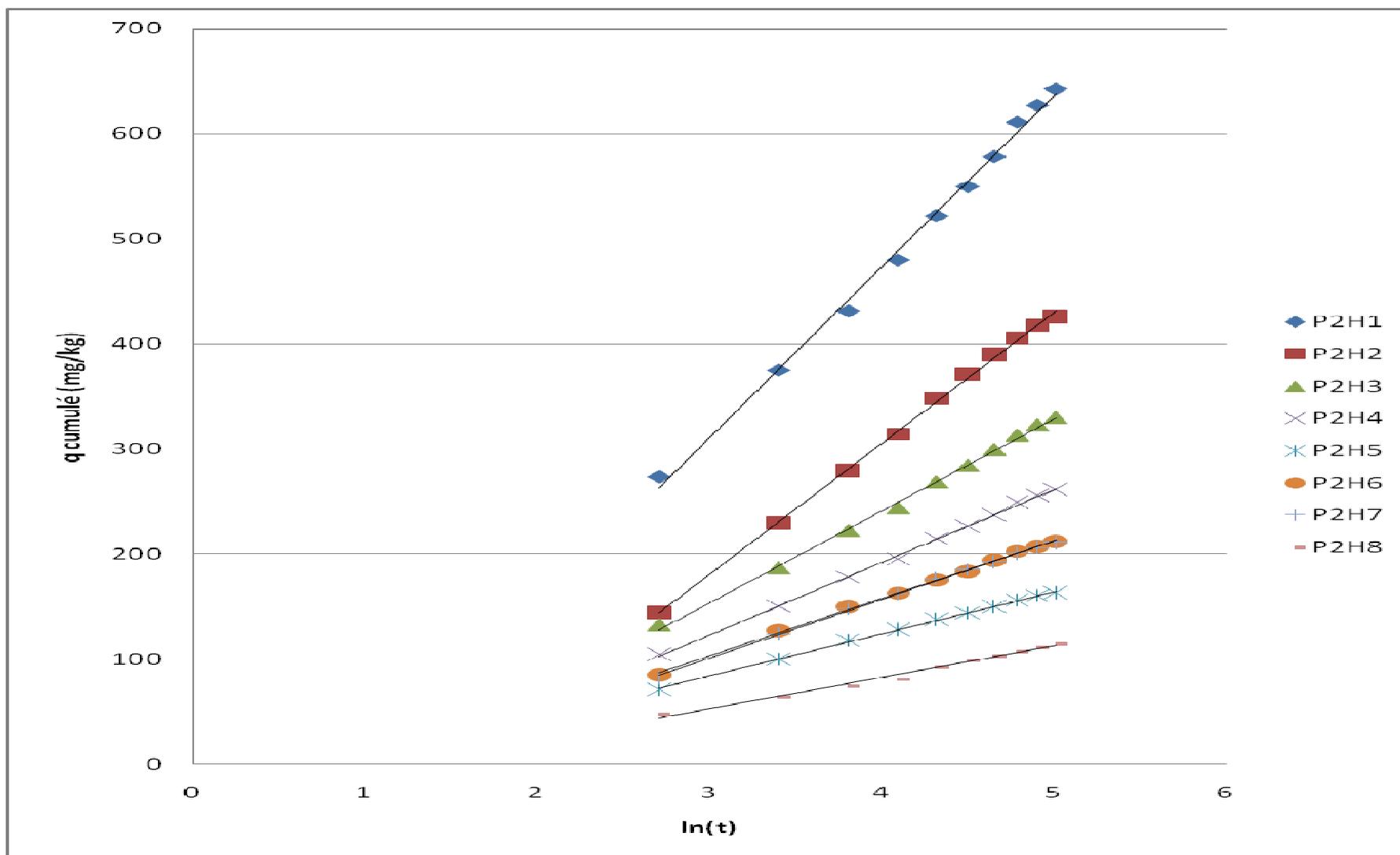


Figure 19. Application du modèle d'Elovich sur la libération du potassium du profil 1

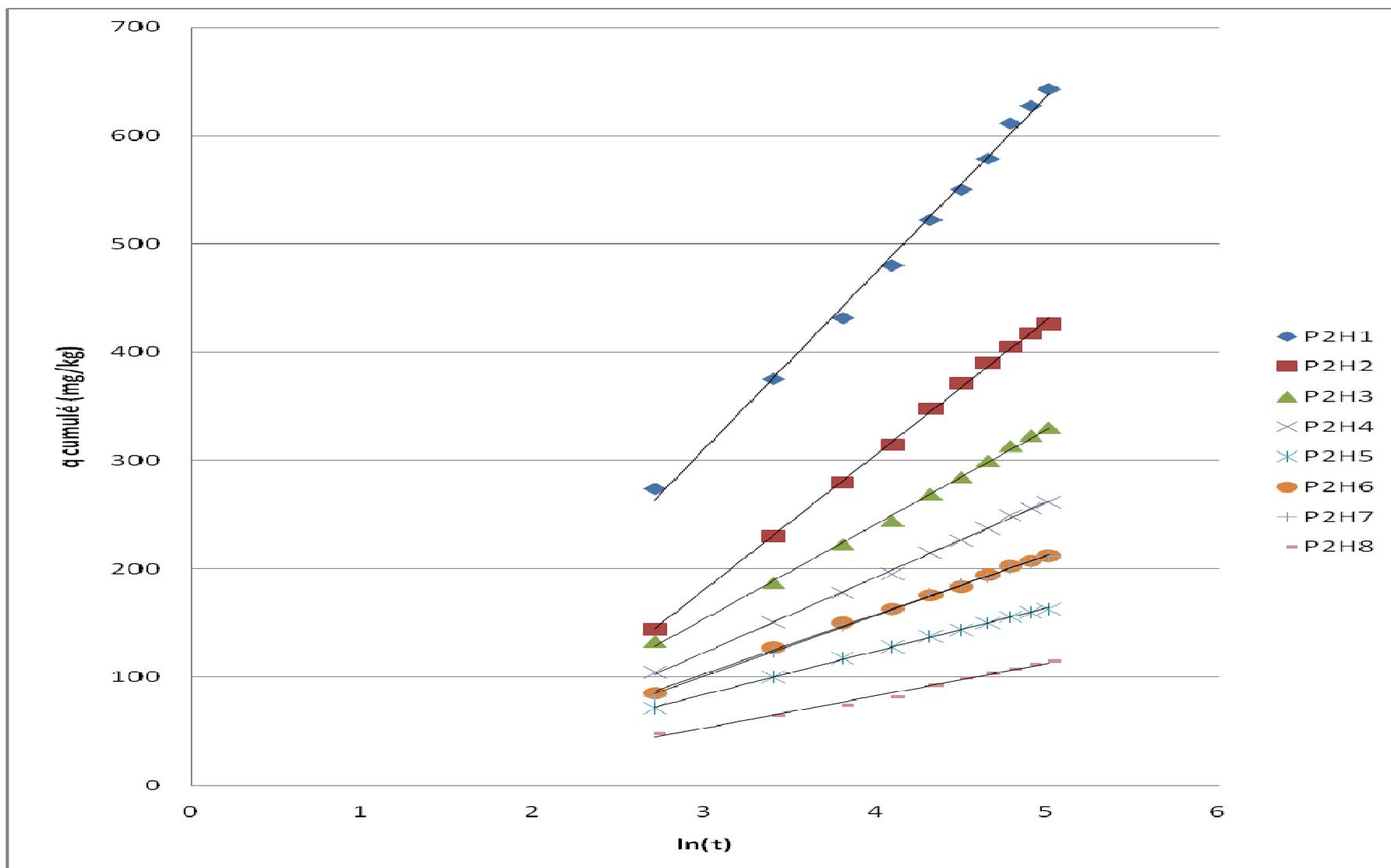


Figure 20. Application du modèle d'Elovich sur la libération du potassium du profil 2

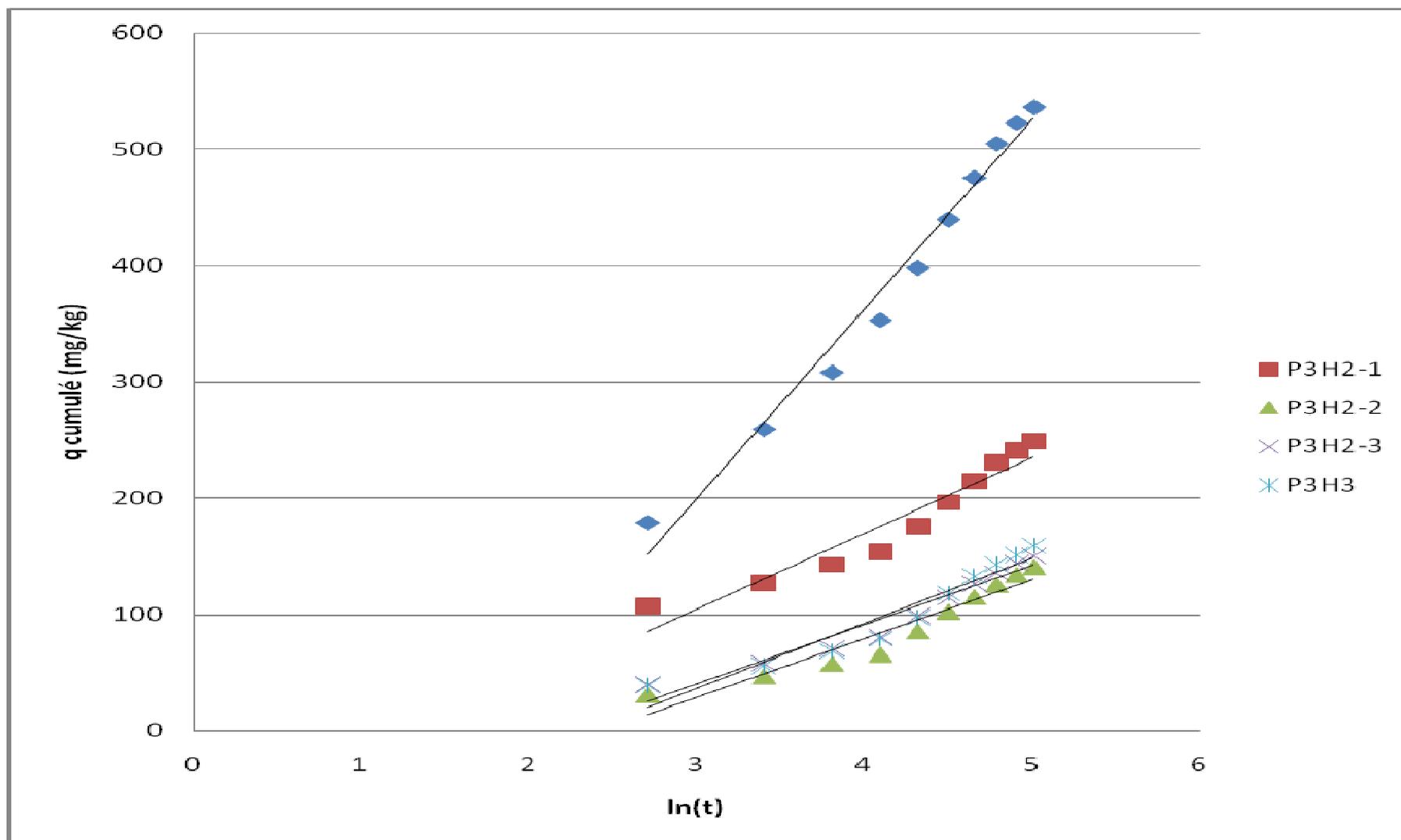


Figure 21. Application du modèle d'Elovich sur la libération du potassium du profil 3

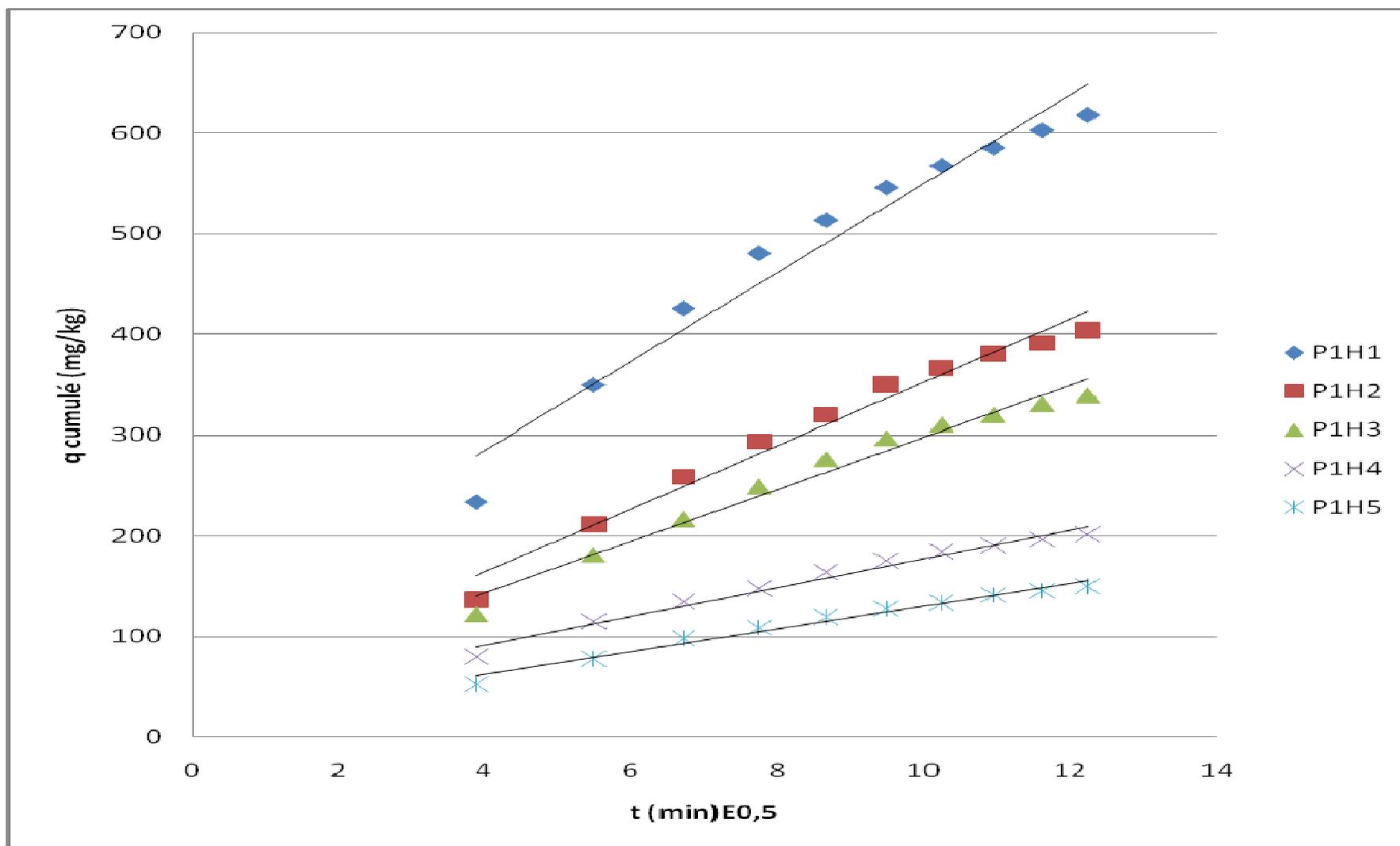


Figure 22. Application du modèle de la diffusion parabolique sur la libération du potassium du profil 1

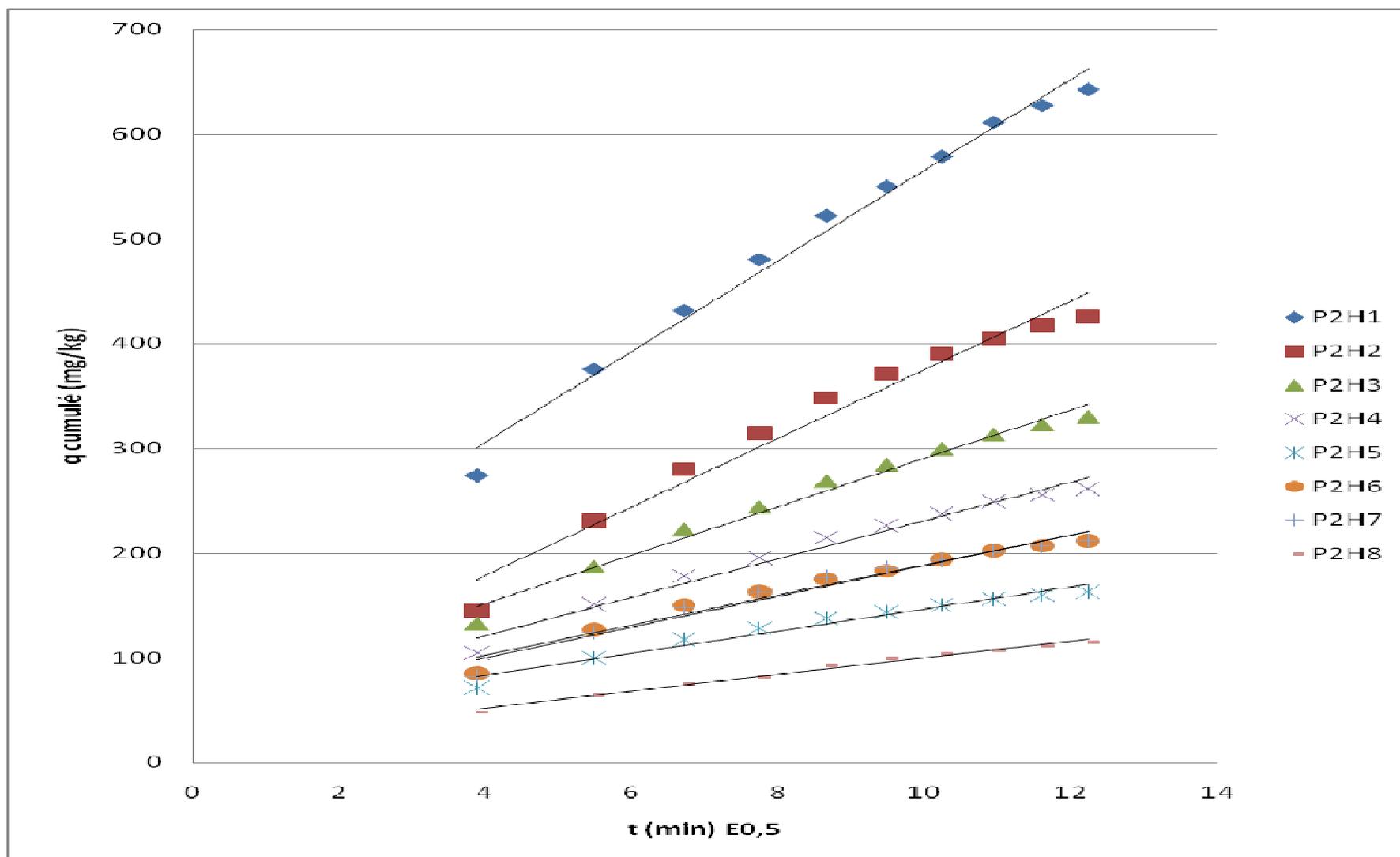


Figure 23. Application du modèle de la diffusion parabolique sur la libération du potassium du profil 2

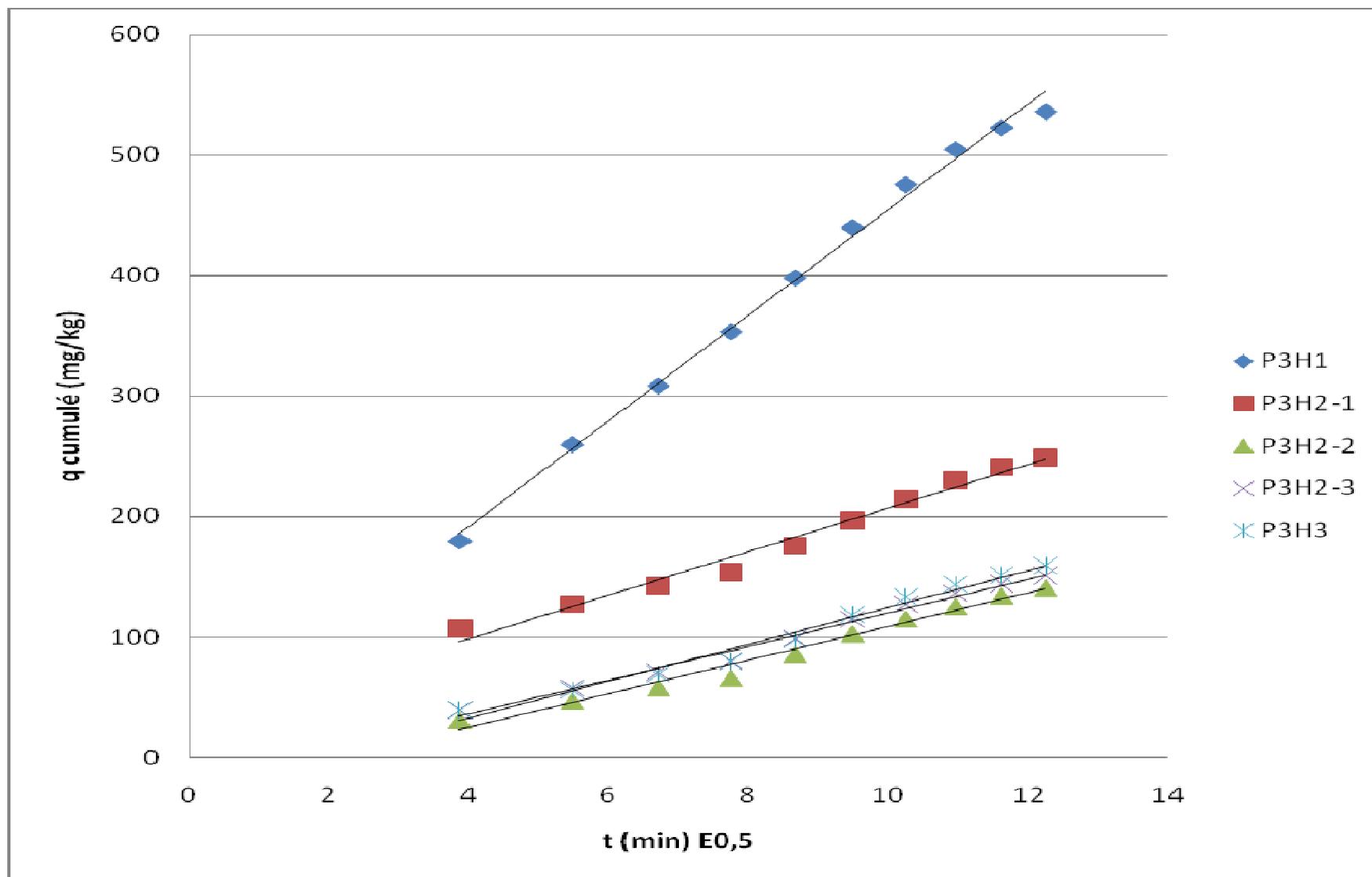


Figure 24. Application du modèle de la diffusion parabolique sur la libération du potassium du profil 3

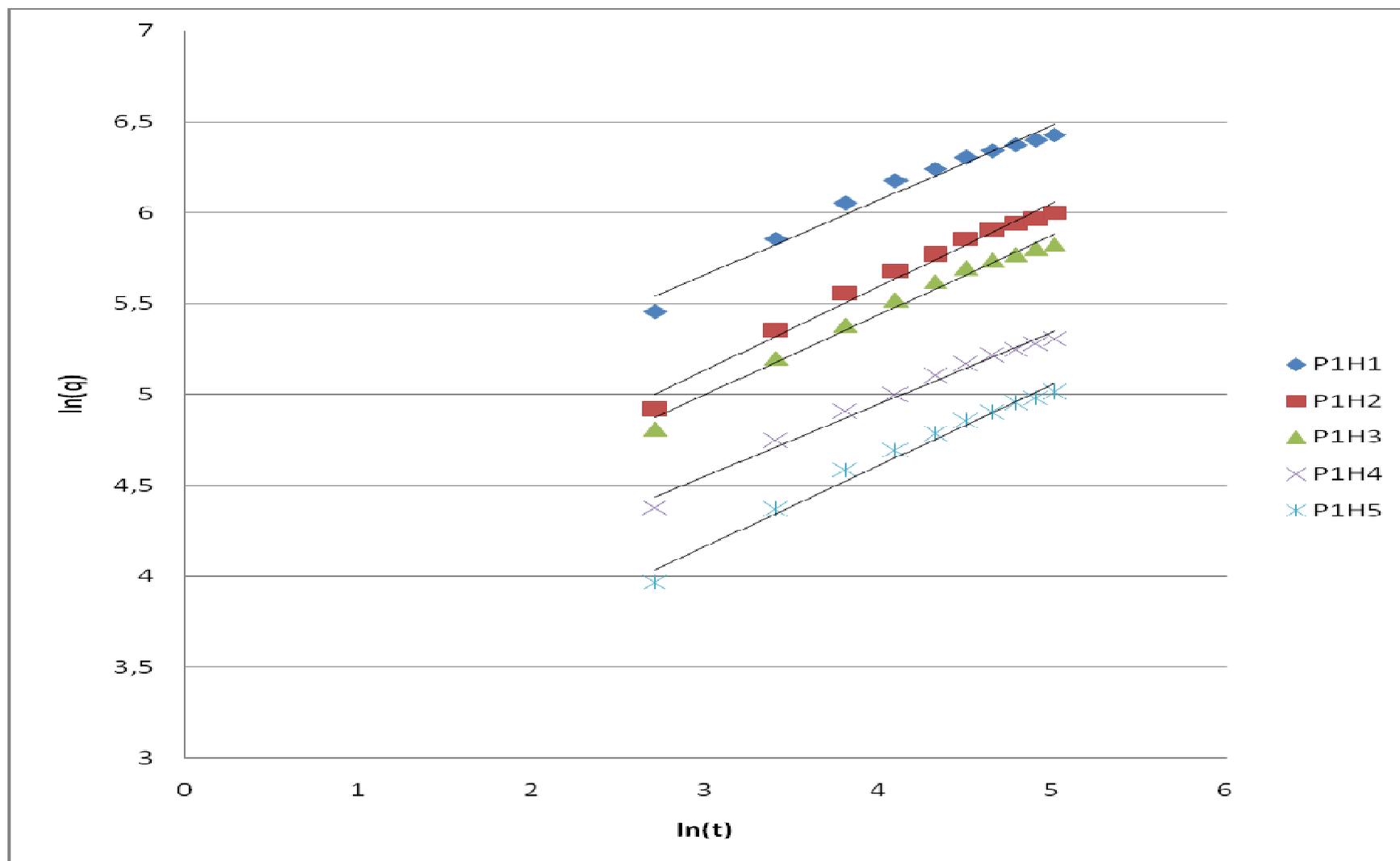


Figure 25. Application du modèle de la fonction de puissance sur la libération du potassium du profil 1

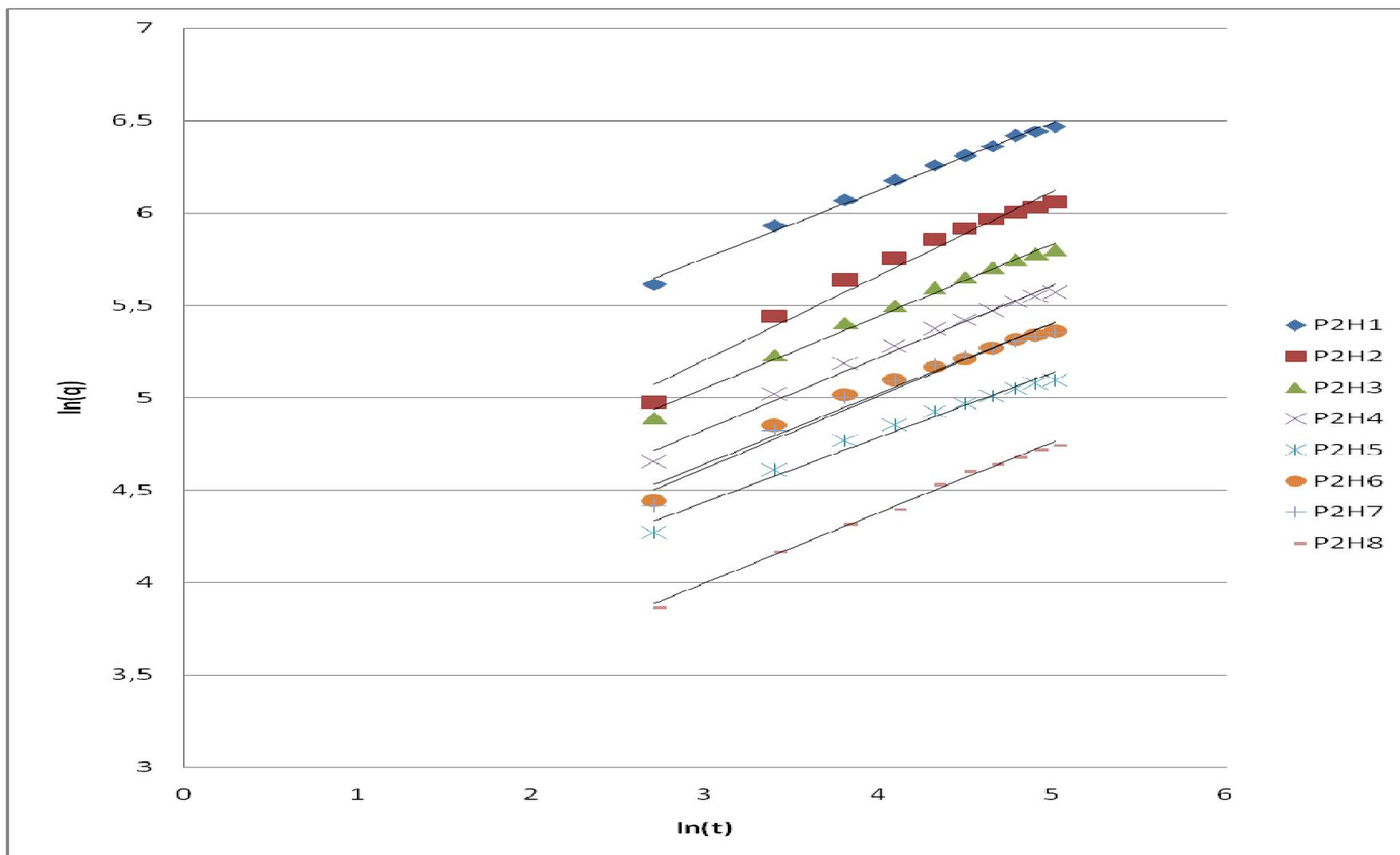


Figure 27. Application du modèle de la fonction de puissance sur la libération du potassium du profil 2

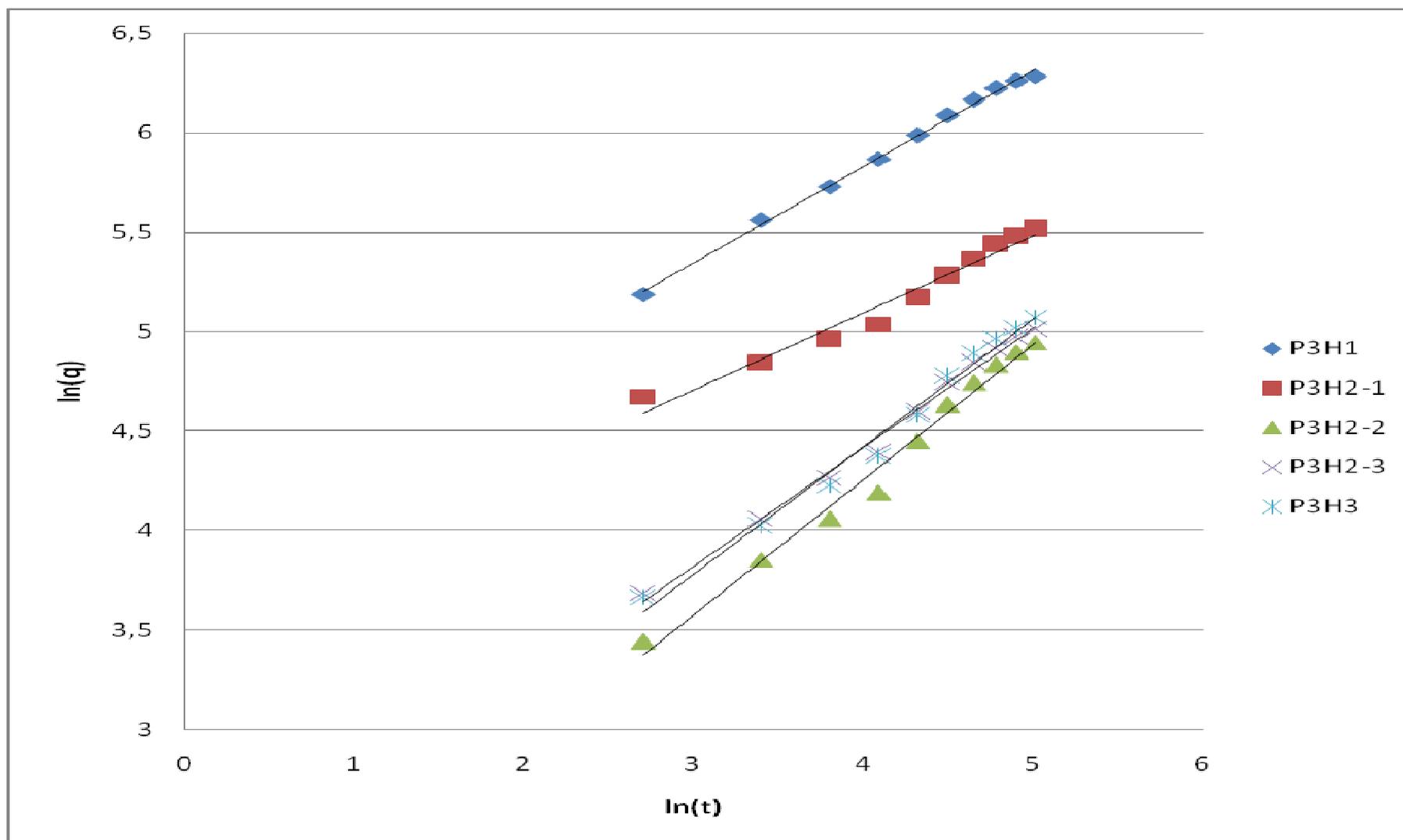


Figure 28. Application du modèle de la fonction de puissance sur la libération du potassium du profil 3

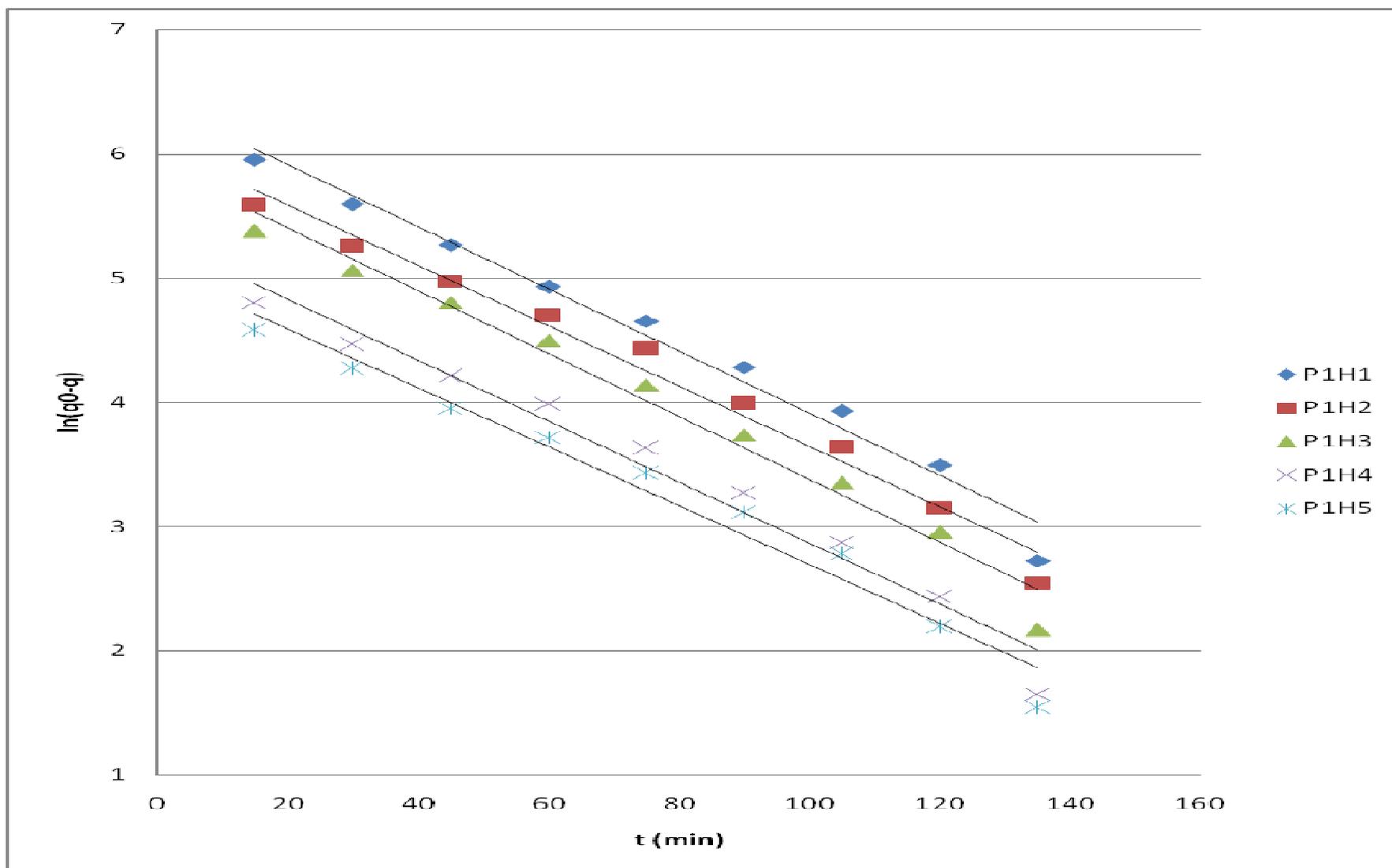


Figure 29. Application du modèle de premier ordre sur la libération du potassium du profil 1

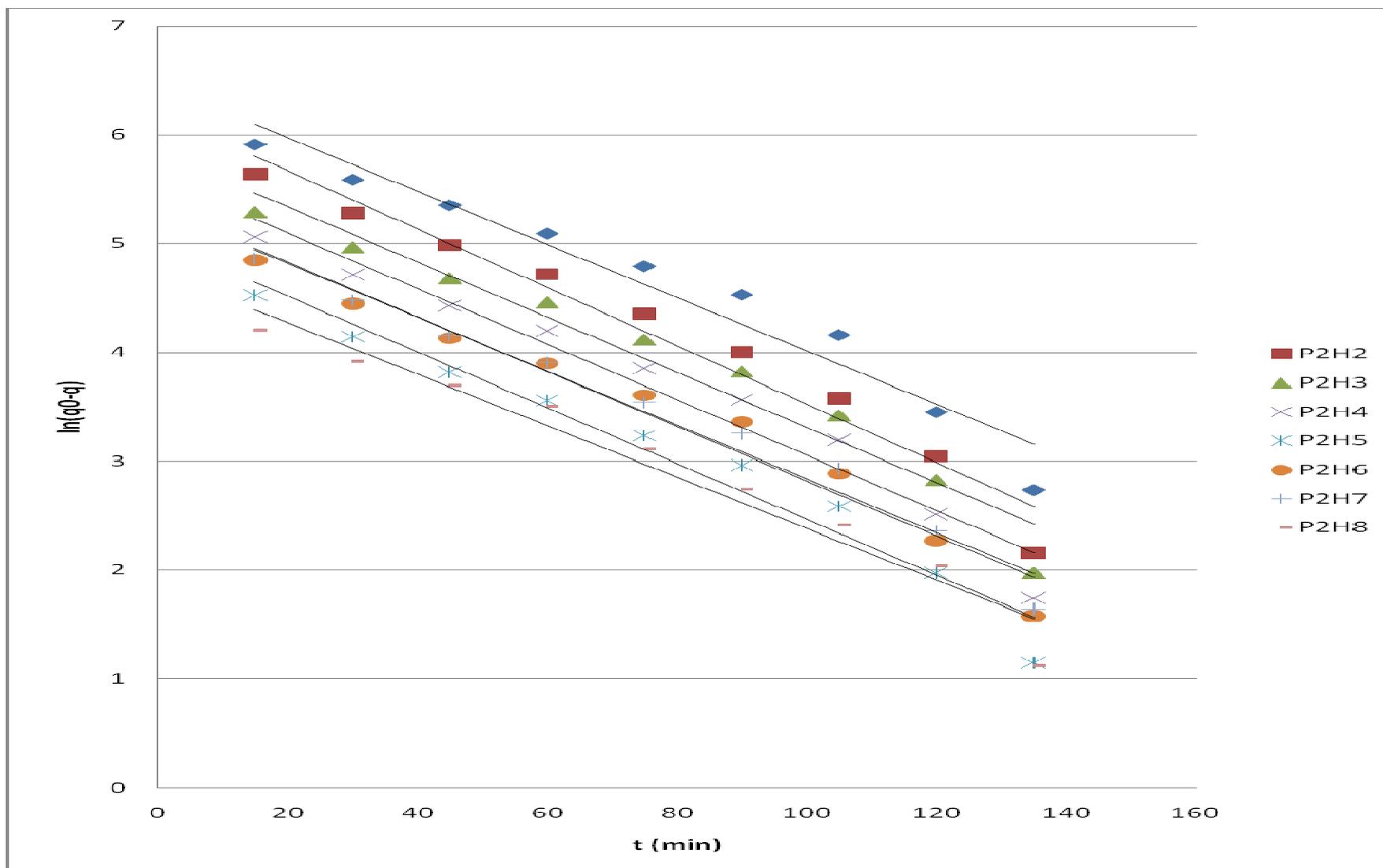


Figure 30. Application du modèle de premier ordre sur la libération du potassium du profil 2

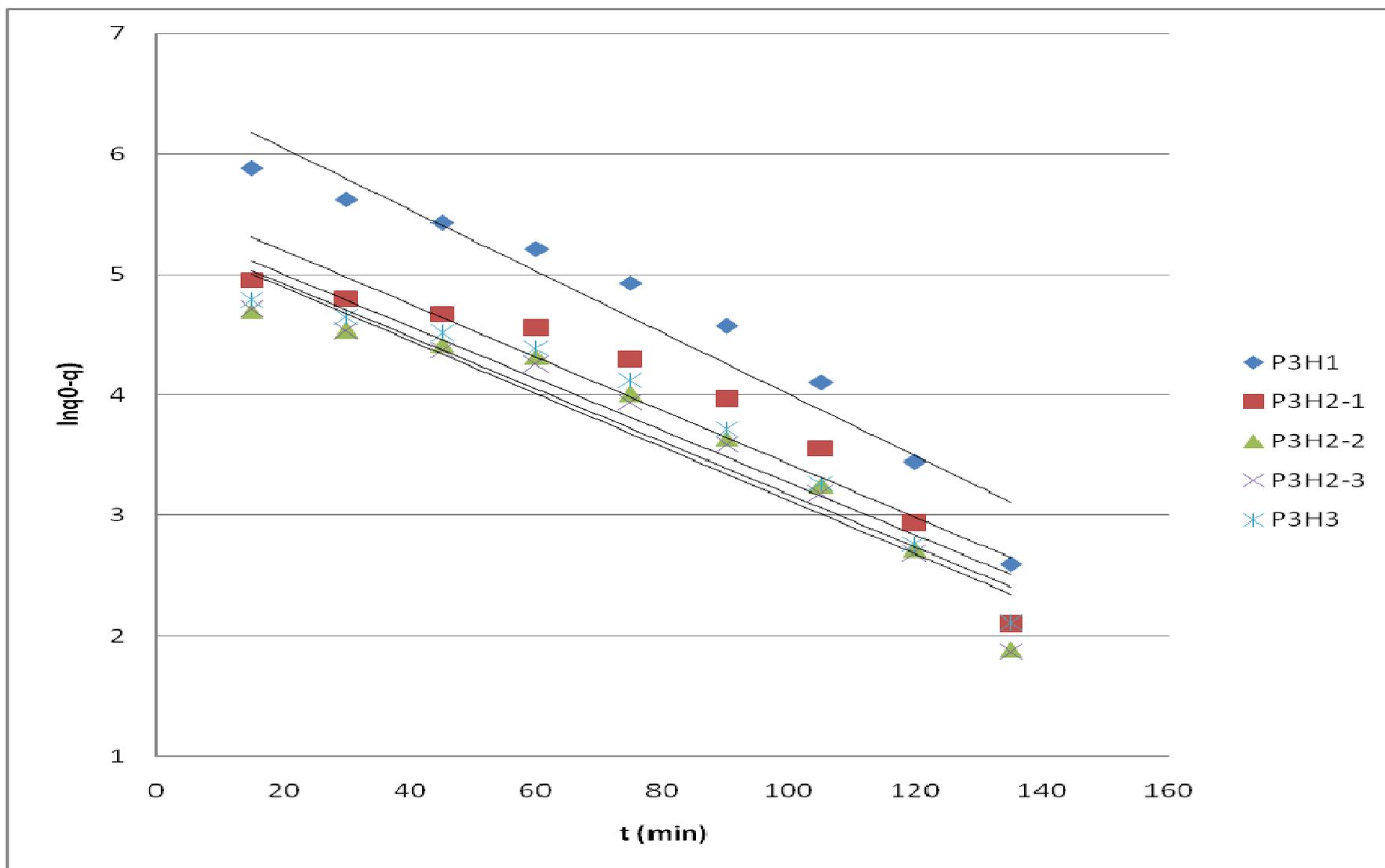


Figure 31. Application du modèle de premier ordre sur la libération du potassium du profil 3

5.2.4. Synthèse et discussion

Sur les quatre modèles utilisés pour décrire la libération du potassium des 18 échantillons étudiés, l'équation de la fonction de puissance a donné le meilleur ajustement. Ce résultat confirme la conclusion de Galadima et Silvertooth (1998).

L'équation d'Elovich aboutit à une qualité d'ajustement très proche de celle de la fonction de puissance. L'équation d'Elovich serait le meilleur modèle pour décrire la cinétique de libération du potassium à partir du sol (Simard et al., 1989).

Pour Dhillon et Dhillon (1992), c'est l'équation de la diffusion parabolique qui décrirait le mieux la cinétique de libération du potassium des sols.

L'équation du premier ordre correspond au modèle qui s'ajuste le moins aux données expérimentales comme l'ont déjà signalé les travaux de résultats Havlin et Westfall (1985) et Mengel et Uhlenbecker (1993) qui ne sont pas confirmés par les travaux de Martin et Sparks (1983).

Conclusion

Les résultats de l'application des quatre modèles d'ajustement de la cinétique de libération du potassium montrent que le modèle de la fonction de puissance est le modèle qui s'ajuste le mieux aux données expérimentales. Le modèle d'Elovich aboutit à des résultats relativement proches de ceux du modèle de la fonction de puissance.

Tableau VII. Les paramètres des modèles utilisés pour la description de la cinétique de libération du potassium

Echantillons	MODELE D'ELOVICH				MODELE DE LA FONCTION DE PUISSANCE				MODELE DU PREMIER ORDRE				MODELE DE LA DIFFUSION PARABOLIQUE			
	<i>b</i>	A	R ²	SE	<i>b</i>	<i>a</i>	R ²	SE	<i>b</i>	<i>a</i>	R ²	SE	<i>b</i>	<i>a</i>	R ²	SE
	mg.kg ⁻¹ min ⁻¹	mg kg ⁻¹			mg.kg ⁻¹ min ⁻¹	mg kg ⁻¹			(mg kg ⁻¹) ⁻¹	mg.kg ⁻¹ min ⁻¹			mg.kg ⁻¹ min ^{-1/2}	mg kg ⁻¹		
P ₁ H ₁	168,700	-219,400	0,997	0,706	0,410	4,431	0,970	0,008	-0,025	6,414	0,981	0,012	44,140	108,400	0,958	766,348
P ₁ H ₂	118,300	-188,000	0,998	0,000	0,460	3,752	0,980	0,008	-0,024	6,077	0,981	0,012	31,260	39,190	0,976	714,289
P ₁ H ₃	97,140	-145,400	0,996	0,006	0,439	3,683	0,984	0,002	-0,025	5,911	0,978	0,089	25,660	40,980	0,975	0,249
P ₁ H ₄	53,920	-68,560	0,997	0,006	0,396	3,360	0,987	0,012	-0,024	5,320	0,970	0,135	14,270	34,670	0,979	0,319
P ₁ H ₅	42,920	-65,360	0,998	0,004	0,444	2,833	0,984	0,009	-0,023	5,064	0,970	0,182	11,350	16,890	0,979	0,234
P ₂ H ₁	162,800	-177,600	0,996	0,074	0,366	4,658	0,994	0,005	-0,024	6,400	0,950	0,125	43,290	132,500	0,986	0,219
P ₂ H ₂	124,600	-193,200	0,998	1,283	0,456	3,836	0,973	0,010	-0,026	6,208	0,965	0,216	32,790	47,300	0,968	0,108
P ₂ H ₃	87,420	-108,300	0,998	0,202	0,390	3,881	0,990	0,009	-0,025	5,848	0,953	0,089	23,160	58,830	0,982	0,201
P ₂ H ₄	69,220	-84,460	0,999	0,005	0,390	3,656	0,985	0,003	-0,025	5,607	0,956	0,130	18,290	48,380	0,977	0,016
P ₂ H ₅	40,060	-36,100	0,999	0,002	0,349	3,389	0,978	0,004	-0,025	5,027	0,962	0,163	10,510	41,430	0,963	0,017
P ₂ H ₆	54,750	-60,830	0,998	0,005	0,379	3,506	0,972	0,001	-0,025	5,330	0,963	0,034	14,370	45,050	0,964	0,122
P ₂ H ₇	55,890	-66,560	0,998	0,072	0,392	3,443	0,970	0,003	-0,024	5,314	0,974	0,197	14,640	41,780	0,960	0,197
P ₂ H ₈	29,920	-36,640	0,989	0,108	0,382	2,851	0,995	0,002	-0,023	4,744	0,956	0,162	7,994	20,040	0,989	0,016
P ₃ H ₁	162,800	-289,400	0,979	0,959	0,483	3,893	0,997	0,015	-0,025	6,555	0,931	0,130	43,850	16,000	0,995	0,220
P ₃ H ₂₋₁	65,350	-92,130	0,918	0,007	0,389	3,535	0,966	0,001	-0,022	5,635	0,894	0,023	18,040	26,520	0,981	0,169
P ₃ H ₂₋₂	50,540	-122,600	0,918	0,157	0,682	1,525	0,986	0,009	-0,021	5,359	0,907	0,224	13,940	-30,810	0,980	0,224
P ₃ H ₂₋₃	50,820	-112,300	0,942	0,071	0,597	2,027	0,992	0,008	-0,022	5,341	0,923	0,041	13,920	-19,060	0,990	0,025
P ₃ H ₃	55,850	-130,900	0,922	0,216	0,643	1,846	0,985	0,004	-0,021	5,436	0,925	0,166	15,390	-29,300	0,981	0,067
Moyenne	82,833	-122,097	0,980	0,216	0,447	3,339	0,983	0,006	-0,024	5,644	0,952	0,118	22,048	35,488	0,977	82,391

6. SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Les sols étudiés sont développés sur les alluvions de la Mina pour les deux premiers profils, et sur les alluvions de l'oued Chélif pour le troisième profil (Hadj Miloud, 2010).

Le régime potassique de ces sols étudiés est caractérisé par une réserve hétérogène en potassium total, 60 % des échantillons sont riches et 40 % des échantillons sont pauvres en potassium total. La distribution verticale du potassium total est irrégulière. Daoud et Dogar (1985) ont montré la réserve en potassium total est moyenne à élevée dans les sols du Hodna, avec 74 % des échantillons présentant une bonne réserve en potassium total. Pour Vandiest (1978), la teneur en potassium total du sol dépend de la nature des minéraux primaires, de leur degré d'altération, et des processus pédogénétiques. Dans ce travail, la variabilité de cette réserve en potassium total peut être attribuée à la nature des minéraux apportés par les phases successives de sédimentation des alluvions provenant des différents bassins versants qui délimitent le Bas-Cheliff (Hadj Miloud, 2010). Cette irrégularité est observée également dans le profil de distribution du potassium total des sols étudiés.

Les teneurs en potassium rétrogradées obtenues sont relativement élevées. Elles sont nettement supérieures à celles des profils des sols rouges méditerranéens du sahel algérois étudiés par Belouchrani (1997). Cette différence peut être attribuée à la nature minéralogique des argiles qui détermine la capacité de rétrogradation du potassium dans le sol (Duthion, 1968).

La moitié des échantillons sont bien pourvus en potassium échangeable. Ce résultat est comparable à ceux de Mutchter (1978) qui a montré que pour les sols du Nord de l'Algérie, 12.9 % des échantillons des sols sont faiblement pourvus et 26.9 % des échantillons sont moyennement pourvus en potassium échangeable.

Les teneurs obtenues en potassium soluble sont faibles et relativement homogènes. Elles sont comparables à celles obtenues par Ait Mechdal (2011) dans les sols du Bas-Cheliff.

Le potassium rétrogradé, le potassium échangeable et le potassium soluble présentent des profils de distribution ascendants. Mutchter (1978) lie cette ascendance aux

teneurs en matière organique qui permettent une accumulation biologique du potassium dans les horizons de surface.

Certaines formes du potassium présentent des relations statistiques entre elles. Ces relations mettent en évidence l'équilibre dynamique du potassium du sol (Goulding, 1987). L'absence de corrélation entre le potassium échangeable et le potassium soluble signifie que l'équilibre entre la solution du sol et le complexe adsorbant est affecté par d'autres cations qui seraient présents en plus forte concentration par rapport au potassium dans la solution du sol. En effet, le calcul statistique a montré que la sodisation du complexe adsorbant se produit, en partie, au détriment du potassium échangeable comme l'a déjà suggéré le travail de Laoufi (2010).

En ce qui concerne l'effet de la salinité sur le statut potassique du sol, les différentes formes de potassium ne sont pas corrélées avec la conductivité électrique. La salinité du sol n'affecterait le statut potassique des sols étudiés.

L'application de quatre modèles pour la description de la cinétique de libération du potassium (l'équation de la fonction de puissance, le modèle d'Elovich, l'équation de la diffusion parabolique, et l'équation du premier ordre) montre que le modèle de la fonction de puissance s'ajuste le mieux aux données expérimentales. Ce résultat confirme les conclusions de Galadima et Silvertooth (1998) et de Simard et *al.*, (1989). L'équation d'Elovich aboutit à une qualité d'ajustement très proche de celle de la fonction de puissance.

CONCLUSION

Le présent travail porte sur la caractérisation des différentes formes du potassium des solonchaks référence du Bas-Chéllif. Il a pour objectif de caractériser le statut potassique des sols, de modéliser la cinétique de libération du potassium, et d'évaluer l'effet de la salinité et de la sodicité des sols sur le comportement du potassium.

Ce travail s'est déroulé en deux étapes. Une première étape a consisté à extraire les différentes formes du potassium des échantillons étudiés afin de caractériser leur statut potassique. La seconde étape consiste en des extractions successives pour décrire la cinétique de libération du potassium et un traitement des données par quatre modèles (fonction de puissance, équation d'Elovich, équation de diffusion parabolique, et l'équation du premier ordre).

Les principaux résultats obtenus ont montré que les sols étudiés seraient caractérisés par :

- des teneurs en potassium total relativement élevées pour 60 % des échantillons, et de faibles teneurs en potassium total pour 40 % des échantillons,
- des teneurs relativement élevées en potassium rétrogradée,
- des teneurs en potassium échangeable faibles pour la moitié des échantillons analysés,
- des teneurs faibles en potassium soluble.

Le profil de distribution du potassium total est relativement irrégulier. Le potassium rétrogradé, le potassium échangeable et le potassium soluble présentent des profils de distribution ascendants.

Le potassium soluble est corrélé positivement avec le potassium total et le potassium rétrogradé. Le potassium échangeable est corrélé positivement avec le potassium rétrogradé. Le potassium rétrogradé est corrélé positivement avec le potassium total.

La teneur en potassium échangeable des sols dépend de leur teneur en matière organique et de leur capacité d'échange cationique.

Les différentes formes de potassium ne sont pas corrélées avec la conductivité électrique. La salinité ne semble pas affecter le comportement du potassium dans ces sols. La sodicité des sols, exprimée par le taux de sodium échangeable, provoque une diminution du taux de potassium échangeable. La sodisation du complexe adsorbant se produit, en partie, au détriment du potassium échangeable.

La cinétique de la libération du potassium a permis d'extraire, en plus du potassium soluble et du potassium échangeable, une fraction du potassium rétrogradé. Les quantités extraites cumulées ne sont pas dépendantes de la teneur en potassium total des échantillons. Elles sont positivement corrélées avec les teneurs en potassium rétrogradé, les teneurs en potassium échangeable, et les teneurs en potassium soluble. Une fraction du potassium rétrogradé dans ces sols est potentiellement libérable dans la solution du sol, et elle est donc potentiellement biodisponible.

Par ailleurs, la cinétique de libération du potassium est un processus qui est contrôlé par le phénomène de diffusion. Elle est caractérisée par une vitesse qui décroît avec le temps. Bien que la capacité des échantillons à libérer du potassium soit très variable, les horizons de surface libèrent davantage de potassium que les horizons profonds.

L'application des quatre modèles d'ajustement de la cinétique de libération du potassium montrent que le modèle de la fonction de puissance est le modèle qui s'ajuste le mieux aux données expérimentales. Le modèle d'Elovich aboutit à des résultats relativement proches de ceux du modèle de la fonction de puissance.

Cette approche cinétique de la libération du potassium par ces sols salés montre que les équilibres entre les différentes formes du potassium nécessitent la prise en considération de la vitesse des phénomènes. Cet aspect cinétique des phénomènes mérite d'être rapproché de l'intensité de la nutrition potassique des plantes.

Références bibliographiques

REFERENCES

AGBENIN J.O. AND YAKUBU S. 2006. Potassium–calcium and potassium–magnesium exchange equilibria in an acid savanna soil from northern Nigeria. *Geoderma*, V. 136, pp. 542–554.

AIT MECHDAL Y., 2011. Caractérisation du statut potassique des sols du Bas-Cheliff. Mémoire ingénieur, ENSA El Harrach, 45p.

AUBERT G., 1983. Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. Congrès de l'Association internationale de science du sol, New Delhi, février 1983. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XX, 1, pp. 73-78.

BARRÉ P., VELDE B., FONTAINE C., CATEL N. and ABBADIE L., 2008. Which 2:1 clay minerals are involved in the soil potassium reservoir? Insights from potassium addition or removal experiments on three temperate grassland soil clay assemblages. *Geoderma*, V. 146, n° 1-2, pp. 216-223.

BAR-TAL A., FEIGENBAUM S. and SPARKS D.L., 1991. Potassium-salinity interactions in irrigated corn, *Irrigation Science* 12, pp. 27–35.

BELOUHRANI A., 1997. Evaluation de l'état de fertilité potassique des sols du Sahel-Est Algérois. Mémoire Magistère, INA El Harrach Alger, 97p.

BLANK R.R., 2010. Effect of temperature on potassium and sodium exchange in a Sierre Nevada Riparian Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, V. 74, pp. 105-106.

BOULAIN J., 1957. Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse d'état de l'Université d'Alger, 582 p.

BURNS A.F. and BARBER S.A., 1961. The effect of temperature and moisture on exchangeable potassium. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, V. 25, pp. 349-352.

CADI N., 1986. Formes et distribution du potassium dans les sols de la station de Mahdi-Boualem (Baraki). Mémoire ingénieur, INA EL Harrach, Alger. 69p.

CALOT G., 1973. Cours de statistique descriptives. Ed. Dunod, Paris, 467p.

C.P.C.S., 1967. Classification des sols. Association Française pour l'étude du sol. I.N.A.P.G., 96p.

DABIN M., 1973. Valeur comparée des différentes méthodes pour la détermination du potassium assimilable des sols. Compte Rendu du 10e Colloque de l'Institut International de la Potasse, Abidjan/Côte d'Ivoire, pp. 103-117.

DAKLIA N. 1991. Libération-fixation du potassium dans les sols cultivés du Nord de la France. Influence de l'enrichissement potassique et des contraintes climatiques simulées, comparaison de réactifs chimiques et biologiques. Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, Paris 6, 286p.

DAOUD, Y., 1993. Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse Doct d'état, INA Alger, 233 p.

DAOUD Y. et CADI A., 1988. Le régime du potassium dans les sols de la station de Mahdi Boualem (Baraki, Algérie). Annales de l'INA El Harrach, V. 12(2), pp. 85-97.

DAOUD Y. et DOGAR A.M., 1985. Le régime du potassium dans quelques types de sols du Hodna (Algérie). Revue de la potasse I.I.P. Berne, n° 6. pp. 1 - 7.

DHILLON S.K. and DHILLON K.S., 1992. Kinetics of release of potassium by sodium tetraphenylboron from some top soil samples of red (Alfisols), black (Vertisols) and alluvial (Inceptisols and Entisols) soils of Indian, Fertil. Res. 32, pp. 135-138.

DIEHL R., 1975. Agriculture générale Ed. J.B.BAILLIERE. Paris 6, pp 205 - 211.

DOUAOUI A., WALTER CH., GAOUAR A. and HAMMOUDI S., 2001. Assessment of the topsoil structural degradation of the Lower Cheliff Valley (Algeria) - Application of multivariate Analysis. 4th conference of the Working Group on Pedometrics (WG-PM), Ghent, pp. 19-21.

DUTHION C. 1968. Le potassium dans le sol. Revue de la potasse. Berne, nov/dec, Section 4, pp. 1-19.

FEIGENBAUM S., 1987. The volcani centre, organisation de recherche agronomique, Bet dagan / Israël, institut international de potasse, n° 2 sujet 1, 15p.

FEIGENBAUM S., BAR-TAL A. and SPARKS D. I., 1990. Dynamics of soil potassium in multicationic systems. 22nd Colloquium Int. Potash Institute, Bern, pp. 145-161.

FEIGENBAUM S. and LEVY R., 1977. Potassium release in some saline soils of Israel.

Geoderma, V. 19, n° 2, pp. 159-168.

FEIGENGAUM, S., R. EDELSTEIN and I. SHAINBERG. 1981. Release rate of potassium and structural cations from micas to ion exchangers in dilute solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. V. 45, pp.501-506.

FEIGENBAUM S. et MEIRI A., 1988. The effect of potassium fertilization on cotton response and potassium distribution under irrigation with saline water, BARD Report I-630-83, pp. 88–110.

GALADIMA A. and SILVERTOOTH J. C., 1998. Mathematical Models of Potassium Release Kinetics for Sonoran Desert Soils of Arizona. Cotton: A College of Ag. Rep. Univ. of Arizona. Series P-103. Ed. Silvertooth J.C., pp. 341-347.

GHOSH B.N. and SINGH R.D. 2001. Potassium release characteristics of some soils of Uttar Pradesh hills varying in altitude and their relationship with forms of soil K and clay mineralogy, Geoderma. 104, pp. 135–144.

GIRARD M., WALTER C., REMY J., BERTHELIN J. and MOREL J., 2005. Sols et environnement. Paris, Ed. Dunod, 675p.

GOULDING K.T.W., 1987. Potassium fixation and release. Proc. 20 th colloqy. IPI, Berne, pp. 137-153.

HADJ MILOUD S. 2010. Morphologie des propriétés des solonchaks référence de la Mina. Mémoire de magister. ENSA, El Harrach, Alger, 110p.

HAVLIN J.L., WESTFALL D.G. and OLSEN S.R., 1985. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 49, pp. 371–376.

HAYLOCK O.F., 1956. A method for estimating the assimilability of non exchangeable potassium. Congress soil science, Paris, pp. 403-408.

JACKSON, M.L., 1965. Soil chemical analysis. New Delhi, 132p.

JALALI M., 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. Geoderma, V. 135, pp. 63-71.

JALALI M., 2007. Spatial variability in potassium release among calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, V. 140, pp. 42-51.

JALALI M., 2008. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, V. 145, n° 3-4, pp. 207-215.

JALALI M. and MERRIKHPOUR H., 2008. Effects of poor quality irrigation waters on the nutrient leaching and groundwater quality from sandy soil, *Environ. Geol.* 53, pp. 1289–1298.

JARDINE, P. M. and SPARKS D. L., 1984. Potassium-calcium exchange in a multi-reactive soil system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, V. 47, pp. 39-45.

LAOUFI, H., 2010. Les processus géochimiques de la salinisation des sols du bas-chellif. Mémoire de magister. ENSA, El Harrach, Alger, 99p.

LOPEZ-PINEIRO A. and GARCIA NAVARRO A., 1997. Potassium release kinetics and availability in unfertilized Vertisols of south western Spain, *Soil Sci.* 162, pp. 912–918.

MAHDI H., 2008. Cartographie de la salinité d'un sol sableux par conductivité électromagnétique. Mémoire ingénieur. I.N.A. El Harrach, Alger. 72p.

MATHIEU C. et PIELTAIN F., 2003. Analyses chimiques des sols : Méthodes choisies. Paris, Ed. Lavoisier, 385p.

MARTIN H.W. and SPARKS D.L., 1983. Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, V. 47, pp. 883–887.

MATOUB N., 1994. Evaluation de l'état de fertilité potassique des sols de l'Algérie du Nord. Mémoire ingénieur. I.N.A. El Harrach, Alger. 60p.

MENGEL K., 1975. The effect of potassium on the quality of plant products. *Revue de la potasse I.I.P.* Berne, n° 3, pp. 1 - 12.

MENGEL K. and UHLENBECKER K., 1993. Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, V. 57, pp. 561–566.

MOREL R., 1989. Les sols cultivés. Ed. Lavoisier, Paris, 373p.

MUTCHER H., 1978. Recherche sur le régime du potassium dans les sols typiques du nord de l'Algérie, Evaluation globale de l'état d'approvisionnement en potassium des sols. *Revue de*

Potasse, Berne, n° 4, pp. 1-17.

NASH V. E. 1971. Potassium release characteristics of some soils of the Mississippi coastal plain as revealed by various extracting agents. *Soil Sci.* 111, n° 5.

QUEMENER J. 1976. Analyse du potassium dans les sols. Au service de l'agriculture, dossier K₂O. S.C.P.A. n° 1, 26p.

QUEMENER, J. 1986. Nutrient balances and need for potassium. International Potash Institute: 13th International Potash Institute Congress. International Potash Institute, Bern, pp. 41-72.

QUEMENER, J. 1988. Commentaire sur l'extraction du potassium des sols par le tétraphényle borate de sodium. Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation. Ed. INRA, pp. 133-163.

QUEMENER J. et BOSCH M., 1988. Remarques sur la détermination du potassium échangeable. Phosphore et potassium dans les relations sol/plante. Ed INRA, Paris, France, pp. 109-132.

RAHMATULAH B.Z. and MENGEL K., 2000. Potassium release from mineral structures by H⁺ ion resin. *Geoderma*, n° 96, pp. 291-305.

ROBERT M., 1992. K fluxes in soil in relation to parent material and pedogenesis in tropical, temperate and arid climate. Proc. 23rd colloquy. IPI, Berne, pp. 25-44.

SCHNEIDER A., 1997. Short term release and fixation of K in calcareous clay soil. Consequence for K buffer power prediction. *European journal of soil science*. n° 48, pp. 499-512.

SCHROEDER D., 1978. Structure and weathering of potassium containing minerals. Potassium Research-Review and Trends. 11th Congress of the International Potash Institute, Bern, pp. 43-63.

SHARMA A., JALALI V.K. and ARORA S., 2010. Non-exchangeable potassium release and its removal in foot-hill soils of North-west Himalayas. *Catena* V. 82, pp.112-117.

SIMARD R. R., DE KIMPE C. R. and ZIZKA J., 1989. The kinetics of nonexchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. *Can. J. Soil Sci.* V.69, pp. 663-675.

SPARKS D.L., 1987. Potassium dynamics in soils, *Adv. Soil Sci.* V. 6, pp. 1–63.

SPARKS D.L. and HUANG P.M., 1985. Physical chemistry of soil potassium. In: R.D. Munson, Editor, *Potassium in Agriculture*, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 202–264.

STEFFENS D. AND SPARKS D.L., 1997. Kinetics of nonexchangeable ammonium release from soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, V. 61, pp. 455–462.

TARAFDAR P.K. and MUKHOPADHYAY A.K., 1989. Influence of fineness of texture and CEC on the K status of soils = Influence du CEC et de la finesse de la texture sur l'état du potassium dans les sols. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, V. 37, n°1, pp. 208-210.

TOUAF L., 2002. Evaluation du niveau de salinité des sols du Nord de l'Algérie. Mémoire de magister, INA, Alger, 71 p.

U.S.S.L., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. US. Depart. Agric. Handb. VIII, n° 60, Washington, 160p.

VAN DIEST, 1978. Factors affecting the availability of potassium in soils. *Potassium Research-Review and Trends*. 11th Congress of the International Potash Institute, Bern, pp. 75-98.

VILLEMIN P., 1987. Conversion des données analytiques en conseil de fertilisation potassique. *Cahier d'Apach le bas*, n°1, pp. 39-53.

WRB, 2006. World Reference Base for soil resources, 2006. Rome, FAO, 145p.

Annexes

Annexe 1. Résultats des trois répétitions des analyses des différentes formes du potassium

Potassium total																		
Echantillons	P₁H₁	P₁H₂	P₁H₃	P₁H₄	P₁H₅	P₂H₁	P₂H₂	P₂H₃	P₂H₄	P₂H₅	P₂H₆	P₂H₇	P₂H₈	P₃H₁	P₃H₂₋₁	P₃H₂₋₂	P₃H₂₋₃	P₃H₃
C1	24,28	31,50	31,48	28,77	33,25	35,63	41,29	29,49	25,00	22,01	29,04	26,59	21,14	24,75	24,53	21,48	21,46	28,67
C2	38,58	34,01	33,87	32,71	31,84	28,55	32,76	32,32	26,90	24,85	26,43	35,27	22,20	25,90	34,71	22,79	21,57	24,07
C3	23,84	34,71	30,36	30,89	31,73	28,44	35,84	32,96	25,21	26,51	26,58	29,42	27,32	25,18	27,64	24,30	23,52	21,61
Moyenne	28,90	33,41	31,90	30,79	32,27	30,87	36,63	31,59	25,70	24,46	27,35	30,43	23,55	25,28	28,96	22,86	22,18	24,78
Ecartype	8,39	1,69	1,79	1,97	0,85	4,12	4,32	1,85	1,04	2,27	1,46	4,43	3,31	0,58	5,22	1,41	1,16	3,58
CV%	29,02	5,06	5,61	6,40	2,62	13,35	11,79	5,85	4,04	9,30	5,35	14,55	14,04	2,31	18,01	6,16	5,22	14,45
Potassium rétrogradé																		
Echantillons	P₁H₁	P₁H₂	P₁H₃	P₁H₄	P₁H₅	P₂H₁	P₂H₂	P₂H₃	P₂H₄	P₂H₅	P₂H₆	P₂H₇	P₂H₈	P₃H₁	P₃H₂₋₁	P₃H₂₋₂	P₃H₂₋₃	P₃H₃
C1	5,37	5,32	5,02	3,10	2,09	4,69	3,20	3,25	1,60	0,84	1,62	1,68	0,78	1,53	0,76	0,50	0,42	0,52
C2	4,42	5,05	4,51	2,64	2,01	5,13	3,36	3,15	2,06	1,07	1,49	1,30	0,66	1,81	0,69	0,55	0,47	0,83
C3	5,01	5,47	4,06	2,39	1,93	5,42	3,98	2,73	1,79	1,15	1,57	1,61	0,65	1,45	0,93	0,50	0,51	0,66
Moyenne	4,93	5,28	4,53	2,71	2,01	5,08	3,51	3,04	1,82	1,02	1,56	1,53	0,70	1,60	0,79	0,52	0,47	0,67
Ecartype	0,48	0,21	0,48	0,36	0,08	0,37	0,41	0,28	0,23	0,16	0,07	0,20	0,07	0,19	0,12	0,03	0,04	0,16
CV%	9,72	3,96	10,68	13,30	4,03	7,28	11,76	9,15	12,67	15,53	4,43	13,39	9,97	11,83	15,79	5,61	9,16	23,12
Potassium échangeable																		
Echantillons	P₁H₁	P₁H₂	P₁H₃	P₁H₄	P₁H₅	P₂H₁	P₂H₂	P₂H₃	P₂H₄	P₂H₅	P₂H₆	P₂H₇	P₂H₈	P₃H₁	P₃H₂₋₁	P₃H₂₋₂	P₃H₂₋₃	P₃H₃
C1	0,47	0,53	0,35	0,15	0,13	0,41	0,43	0,28	0,23	0,35	0,22	0,20	0,07	0,68	0,25	0,19	0,23	0,22
C2	0,41	0,52	0,35	0,19	0,14	0,39	0,41	0,28	0,26	0,16	0,26	0,19	0,08	0,69	0,27	0,26	0,10	0,23
C3	0,51	0,47	0,34	0,20	0,17	0,33	0,39	0,27	0,34	0,15	0,26	0,22	0,08	0,65	0,28	0,19	0,17	0,24
Moyenne	0,46	0,50	0,35	0,18	0,14	0,38	0,41	0,28	0,28	0,22	0,25	0,20	0,07	0,68	0,26	0,68	0,26	0,21
Ecartype	0,05	0,03	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,01	0,06	0,12	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,06	0,01
CV%	11,11	6,50	3,04	14,17	15,19	9,95	5,39	2,02	20,64	53,45	8,97	6,84	7,45	3,07	6,30	5,88	24,02	3,80
Potassium soluble																		
Echantillons	P₁H₁	P₁H₂	P₁H₃	P₁H₄	P₁H₅	P₂H₁	P₂H₂	P₂H₃	P₂H₄	P₂H₅	P₂H₆	P₂H₇	P₂H₈	P₃H₁	P₃H₂₋₁	P₃H₂₋₂	P₃H₂₋₃	P₃H₃
C1	0,47	0,21	0,27	0,14	0,12	0,52	0,31	0,23	0,21	0,13	0,14	0,19	0,09	0,10	0,09	0,10	0,04	0,06
C2	0,48	0,20	0,24	0,13	0,10	0,52	0,31	0,24	0,21	0,13	0,14	0,20	0,09	0,09	0,04	0,04	0,18	0,04
C3	0,46	0,20	0,25	0,14	0,10	0,53	0,32	0,25	0,23	0,13	0,14	0,18	0,09	0,15	0,05	0,10	0,10	0,04
Moyenne	0,47	0,20	0,25	0,13	0,11	0,52	0,31	0,24	0,22	0,13	0,14	0,19	0,09	0,11	0,06	0,08	0,11	0,05
Ecartype	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,03	0,07	0,01
CV%	2,73	1,54	4,55	3,73	8,01	1,08	1,19	3,00	5,13	1,75	2,28	7,33	1,35	28,46	44,89	42,70	63,29	19,88

Annexe 2. Résultats analytiques des différentes formes du potassium

Echantillons	K total	K rétrogradé	K échangeable	K soluble
P1H1	28,90	4,93	0,46	0,47
P1H2	33,41	5,28	0,50	0,20
P1H3	31,90	4,53	0,35	0,25
P1H4	30,79	2,71	0,18	0,13
P1H5	32,27	2,01	0,14	0,11
P2H1	30,87	5,08	0,38	0,52
P2H2	36,63	3,51	0,41	0,31
P2H3	31,59	3,04	0,28	0,24
P2H4	25,70	1,82	0,28	0,22
P2H5	24,46	1,02	0,22	0,13
P2H6	27,35	1,56	0,25	0,14
P2H7	30,43	1,53	0,20	0,19
P2H8	23,55	0,70	0,07	0,09
P3H1	25,28	1,60	0,68	0,11
P3H2-1	28,96	0,79	0,26	0,06
P3H2-2	22,86	0,52	0,68	0,08
P3H2-3	22,18	0,47	0,26	0,11
P3H3	24,78	0,67	0,21	0,05
Minimum	22,18	0,47	0,07	0,05
Maximum	36,63	5,28	0,68	0,52
Moyenne	28,44	2,32	0,32	0,19
Ecartype	4,10	1,69	0,17	0,13
CV%	14,43	72,67	52,00	70,03

Annexe 3. Résultats des trois répétitions des extractions successives du potassium (1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème})

1 ^{ère} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,579	0,351	0,323	0,164	0,117	0,736	0,440	0,359	0,298	0,174	0,226	0,217	0,118	0,441	0,257	0,060	0,089	0,076
C2	0,620	0,351	0,328	0,222	0,115	0,744	0,370	0,355	0,270	0,180	0,244	0,195	0,115	0,452	0,282	0,075	0,107	0,111
C3	0,598	0,347	0,291	0,226	0,175	0,629	0,302	0,307	0,237	0,193	0,184	0,224	0,135	0,485	0,283	0,105	0,111	0,113
Moyenne	0,599	0,350	0,314	0,204	0,135	0,703	0,370	0,341	0,268	0,183	0,218	0,212	0,123	0,459	0,274	0,080	0,102	0,100
Ecartype	0,021	0,002	0,020	0,035	0,034	0,064	0,069	0,029	0,031	0,010	0,031	0,015	0,011	0,023	0,015	0,023	0,011	0,021
CV%	3,461	0,588	6,381	17,152	25,308	9,155	18,660	8,450	11,452	5,381	14,168	7,097	8,847	4,956	5,458	29,016	11,214	20,490
2 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,306	0,198	0,150	0,079	0,061	0,254	0,178	0,128	0,089	0,064	0,085	0,079	0,044	0,222	0,046	0,036	0,043	0,036
C2	0,288	0,200	0,159	0,079	0,050	0,260	0,226	0,144	0,121	0,069	0,097	0,128	0,044	0,201	0,053	0,045	0,046	0,040
C3	0,296	0,182	0,143	0,113	0,087	0,265	0,255	0,144	0,145	0,090	0,143	0,112	0,040	0,195	0,057	0,042	0,050	0,053
Moyenne	0,297	0,193	0,151	0,091	0,066	0,260	0,220	0,139	0,119	0,074	0,108	0,106	0,043	0,206	0,052	0,041	0,046	0,043
Ecartype	0,009	0,010	0,008	0,020	0,019	0,006	0,039	0,009	0,028	0,014	0,031	0,025	0,002	0,014	0,005	0,005	0,004	0,009
CV%	3,057	5,084	5,284	21,565	28,314	2,143	17,766	6,662	23,707	18,459	28,350	23,301	4,558	6,726	10,415	11,103	7,692	19,968
3 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,196	0,121	0,071	0,047	0,033	0,135	0,108	0,073	0,060	0,036	0,048	0,058	0,025	0,115	0,034	0,031	0,032	0,031
C2	0,189	0,123	0,111	0,043	0,035	0,137	0,133	0,092	0,067	0,047	0,057	0,070	0,024	0,129	0,043	0,024	0,032	0,031
C3	0,200	0,121	0,094	0,062	0,084	0,160	0,140	0,108	0,084	0,054	0,071	0,058	0,029	0,131	0,041	0,027	0,037	0,036
Moyenne	0,195	0,122	0,092	0,051	0,051	0,144	0,127	0,091	0,070	0,045	0,058	0,062	0,026	0,125	0,039	0,027	0,034	0,033
Ecartype	0,006	0,001	0,020	0,010	0,029	0,013	0,017	0,018	0,013	0,009	0,012	0,007	0,003	0,009	0,005	0,004	0,003	0,003
CV%	2,820	0,845	22,178	19,761	56,933	9,314	13,375	19,513	18,028	19,114	19,871	11,771	9,962	6,883	12,026	13,333	9,116	9,623
4 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,144	0,084	0,074	0,028	0,030	0,113	0,099	0,053	0,042	0,019	0,032	0,029	0,019	0,112	0,025	0,020	0,025	0,024
C2	0,142	0,091	0,085	0,028	0,021	0,117	0,090	0,060	0,044	0,026	0,028	0,042	0,017	0,115	0,029	0,018	0,023	0,031
C3	0,137	0,089	0,088	0,045	0,033	0,143	0,077	0,052	0,047	0,035	0,039	0,036	0,017	0,119	0,034	0,024	0,023	0,029
Moyenne	0,141	0,088	0,082	0,033	0,028	0,124	0,089	0,055	0,044	0,026	0,033	0,035	0,017	0,115	0,029	0,021	0,024	0,028
Ecartype	0,004	0,004	0,007	0,010	0,006	0,016	0,011	0,005	0,003	0,008	0,005	0,006	0,001	0,003	0,004	0,003	0,001	0,004
CV%	2,657	4,220	8,921	30,478	23,073	13,012	12,218	8,535	6,030	29,408	16,366	17,857	5,587	3,030	15,408	13,478	4,330	13,576

Annexe 4. Résultats des trois répétitions des extractions successives du potassium (5^{ème}, 6^{ème}, 7^{ème} et 8^{ème})

5 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,101	0,055	0,083	0,048	0,028	0,087	0,084	0,055	0,037	0,022	0,023	0,032	0,029	0,108	0,064	0,056	0,052	0,051
C2	0,074	0,089	0,042	0,045	0,033	0,115	0,090	0,066	0,051	0,028	0,034	0,042	0,030	0,119	0,050	0,045	0,052	0,042
C3	0,079	0,061	0,083	0,033	0,018	0,121	0,088	0,069	0,061	0,024	0,039	0,042	0,025	0,119	0,053	0,049	0,039	0,047
Moyenne	0,085	0,068	0,069	0,042	0,026	0,108	0,087	0,063	0,050	0,025	0,032	0,039	0,028	0,115	0,056	0,050	0,048	0,047
Ecartype	0,014	0,018	0,023	0,008	0,007	0,018	0,003	0,007	0,012	0,003	0,008	0,005	0,003	0,006	0,007	0,006	0,007	0,005
CV%	16,888	26,646	33,760	18,778	28,423	16,627	3,139	11,673	24,790	10,657	25,459	13,532	9,165	5,249	13,287	11,042	15,155	9,805
6 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,092	0,069	0,049	0,024	0,019	0,067	0,050	0,034	0,025	0,014	0,009	0,018	0,019	0,105	0,057	0,049	0,050	0,062
C2	0,078	0,100	0,044	0,028	0,024	0,067	0,065	0,048	0,028	0,019	0,025	0,027	0,019	0,106	0,046	0,036	0,034	0,051
C3	0,081	0,059	0,065	0,035	0,020	0,082	0,063	0,039	0,037	0,014	0,028	0,022	0,015	0,110	0,055	0,045	0,036	0,045
Moyenne	0,084	0,076	0,053	0,029	0,021	0,072	0,059	0,040	0,030	0,016	0,021	0,022	0,017	0,107	0,053	0,044	0,040	0,053
Ecartype	0,008	0,021	0,011	0,005	0,003	0,009	0,008	0,007	0,006	0,003	0,010	0,005	0,002	0,003	0,006	0,007	0,009	0,008
CV%	8,986	27,962	20,817	18,693	13,481	11,945	13,209	17,830	21,209	19,245	50,224	20,405	11,175	2,491	10,836	15,023	22,088	15,802
7 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,050	0,046	0,037	0,019	0,019	0,061	0,045	0,034	0,023	0,012	0,014	0,016	0,017	0,099	0,052	0,038	0,041	0,042
C2	0,052	0,043	0,035	0,021	0,016	0,065	0,045	0,043	0,025	0,026	0,018	0,023	0,008	0,087	0,043	0,025	0,025	0,036
C3	0,063	0,036	0,032	0,027	0,015	0,093	0,056	0,039	0,037	0,009	0,051	0,014	0,008	0,089	0,043	0,031	0,027	0,036
Moyenne	0,055	0,042	0,035	0,022	0,017	0,073	0,048	0,039	0,028	0,016	0,028	0,018	0,011	0,092	0,046	0,032	0,031	0,038
Ecartype	0,007	0,005	0,003	0,004	0,002	0,017	0,006	0,004	0,008	0,009	0,021	0,005	0,005	0,007	0,005	0,006	0,009	0,003
CV%	12,345	13,093	7,767	19,387	12,868	23,623	12,830	11,615	27,243	58,794	73,980	26,458	43,301	7,188	11,247	20,261	28,459	8,248
8 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,047	0,041	0,023	0,012	0,017	0,054	0,041	0,034	0,025	0,016	0,014	0,018	0,008	0,078	0,045	0,036	0,032	0,033
C2	0,049	0,039	0,026	0,026	0,019	0,056	0,020	0,037	0,040	0,021	0,019	0,027	0,008	0,077	0,039	0,022	0,020	0,020
C3	0,043	0,032	0,021	0,010	0,019	0,141	0,052	0,034	0,028	0,010	0,030	0,018	0,010	0,070	0,039	0,024	0,020	0,027
Moyenne	0,046	0,037	0,024	0,016	0,018	0,083	0,038	0,035	0,031	0,016	0,021	0,021	0,009	0,075	0,041	0,027	0,024	0,027
Ecartype	0,003	0,005	0,003	0,008	0,001	0,050	0,016	0,002	0,008	0,005	0,008	0,005	0,001	0,005	0,003	0,008	0,007	0,006
CV%	5,951	12,599	11,456	52,317	7,531	59,670	43,644	5,871	26,750	33,333	38,188	24,744	10,825	6,153	7,531	29,059	30,311	23,945

Annexe 5. Résultats des trois répétitions des extractions successives du potassium (9^{ème} et 10^{ème})

9 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,047	0,021	0,028	0,012	0,014	0,050	0,032	0,025	0,018	0,009	0,011	0,014	0,010	0,044	0,027	0,024	0,030	0,025
C2	0,041	0,030	0,023	0,027	0,007	0,046	0,038	0,028	0,018	0,010	0,011	0,014	0,008	0,052	0,025	0,020	0,018	0,016
C3	0,047	0,030	0,030	0,009	0,012	0,028	0,025	0,021	0,016	0,012	0,016	0,013	0,017	0,042	0,030	0,022	0,014	0,016
Moyenne	0,045	0,027	0,027	0,016	0,011	0,041	0,032	0,025	0,017	0,010	0,012	0,014	0,012	0,046	0,027	0,022	0,021	0,019
Ecartype	0,003	0,005	0,004	0,010	0,004	0,012	0,006	0,004	0,001	0,002	0,003	0,001	0,004	0,006	0,003	0,002	0,008	0,005
CV%	6,928	18,827	13,576	61,809	32,301	28,787	19,879	14,286	5,973	16,667	24,744	7,531	37,796	12,207	9,962	8,333	40,507	27,063
10 ^{ème} extraction																		
Echantillons	P ₁ H ₁	P ₁ H ₂	P ₁ H ₃	P ₁ H ₄	P ₁ H ₅	P ₂ H ₁	P ₂ H ₂	P ₂ H ₃	P ₂ H ₄	P ₂ H ₅	P ₂ H ₆	P ₂ H ₇	P ₂ H ₈	P ₃ H ₁	P ₃ H ₂₋₁	P ₃ H ₂₋₂	P ₃ H ₂₋₃	P ₃ H ₃
C1	0,041	0,030	0,023	0,009	0,017	0,045	0,034	0,018	0,016	0,010	0,014	0,018	0,008	0,031	0,020	0,018	0,023	0,022
C2	0,040	0,041	0,023	0,021	0,012	0,041	0,013	0,011	0,016	0,009	0,012	0,011	0,007	0,040	0,020	0,015	0,014	0,024
C3	0,036	0,027	0,021	0,010	0,007	0,033	0,020	0,027	0,012	0,005	0,011	0,011	0,008	0,031	0,023	0,018	0,012	0,018
Moyenne	0,039	0,033	0,022	0,013	0,012	0,040	0,022	0,018	0,015	0,008	0,012	0,013	0,008	0,034	0,021	0,017	0,017	0,021
Ecartype	0,003	0,007	0,001	0,007	0,005	0,006	0,011	0,008	0,002	0,003	0,002	0,004	0,001	0,005	0,002	0,002	0,006	0,003
CV%	7,050	22,709	4,558	50,698	40,939	14,321	49,541	43,638	13,856	32,733	14,286	31,492	12,372	14,678	9,897	12,372	34,442	13,093

Annexe 6. Teneurs en potassium extrait en fonction du temps (meq/100g)

Extractions	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	q (cumulé)
Temps (min)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	
P₁H₁	0,599	0,297	0,195	0,141	0,085	0,084	0,055	0,046	0,045	0,039	1,586
P₁H₂	0,350	0,193	0,122	0,088	0,068	0,076	0,042	0,037	0,027	0,033	1,036
P₁H₃	0,314	0,151	0,092	0,082	0,069	0,053	0,035	0,024	0,027	0,022	0,869
P₁H₄	0,204	0,091	0,051	0,033	0,042	0,029	0,022	0,016	0,016	0,013	0,517
P₁H₅	0,135	0,066	0,051	0,028	0,026	0,021	0,017	0,018	0,011	0,012	0,385
P₂H₁	0,703	0,260	0,144	0,124	0,108	0,072	0,073	0,083	0,041	0,040	1,648
P₂H₂	0,370	0,220	0,127	0,089	0,087	0,059	0,048	0,038	0,032	0,022	1,092
P₂H₃	0,341	0,139	0,091	0,055	0,063	0,040	0,039	0,035	0,025	0,018	0,846
P₂H₄	0,268	0,119	0,070	0,044	0,050	0,030	0,028	0,031	0,017	0,015	0,671
P₂H₅	0,183	0,074	0,045	0,026	0,025	0,016	0,016	0,016	0,010	0,008	0,419
P₂H₆	0,218	0,108	0,058	0,033	0,032	0,021	0,028	0,021	0,012	0,012	0,544
P₂H₇	0,212	0,106	0,062	0,035	0,039	0,022	0,018	0,021	0,014	0,013	0,543
P₂H₈	0,123	0,043	0,026	0,017	0,028	0,017	0,011	0,009	0,012	0,008	0,294
P₃H₁	0,459	0,206	0,125	0,115	0,115	0,107	0,092	0,075	0,046	0,034	1,374
P₃H₂₋₁	0,274	0,052	0,039	0,029	0,056	0,053	0,046	0,041	0,027	0,021	0,638
P₃H₂₋₂	0,080	0,041	0,027	0,021	0,050	0,044	0,032	0,027	0,022	0,017	0,361
P₃H₂₋₃	0,102	0,046	0,034	0,024	0,048	0,040	0,031	0,024	0,021	0,017	0,386
P₃H₃	0,100	0,043	0,033	0,028	0,047	0,053	0,038	0,027	0,019	0,021	0,409

Annexe 7. Evolution des teneurs cumulées en potassium extrait en fonction du temps (meq/100g)

Extractions	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Temps (min)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
P ₁ H ₁	0,599	0,896	1,091	1,232	1,317	1,401	1,456	1,502	1,547	1,586
P ₁ H ₂	0,350	0,543	0,665	0,753	0,821	0,897	0,938	0,976	1,003	1,036
P ₁ H ₃	0,314	0,465	0,557	0,639	0,709	0,762	0,796	0,820	0,847	0,869
P ₁ H ₄	0,204	0,295	0,345	0,379	0,421	0,450	0,472	0,488	0,504	0,517
P ₁ H ₅	0,135	0,201	0,252	0,280	0,306	0,327	0,344	0,362	0,373	0,385
P ₂ H ₁	0,703	0,963	1,107	1,231	1,339	1,410	1,483	1,567	1,608	1,648
P ₂ H ₂	0,370	0,590	0,717	0,806	0,893	0,952	1,001	1,038	1,070	1,092
P ₂ H ₃	0,341	0,479	0,570	0,626	0,689	0,729	0,768	0,803	0,828	0,846
P ₂ H ₄	0,268	0,387	0,457	0,501	0,551	0,581	0,609	0,640	0,657	0,671
P ₂ H ₅	0,183	0,257	0,302	0,329	0,354	0,369	0,385	0,400	0,411	0,419
P ₂ H ₆	0,218	0,327	0,385	0,418	0,450	0,471	0,498	0,519	0,532	0,544
P ₂ H ₇	0,212	0,318	0,380	0,416	0,454	0,477	0,495	0,516	0,529	0,543
P ₂ H ₈	0,123	0,165	0,191	0,209	0,237	0,254	0,265	0,274	0,286	0,294
P ₃ H ₁	0,459	0,665	0,790	0,905	1,020	1,127	1,219	1,294	1,340	1,374
P ₃ H ₂₋₁	0,274	0,326	0,365	0,394	0,450	0,503	0,549	0,590	0,617	0,638
P ₃ H ₂₋₂	0,080	0,121	0,148	0,169	0,219	0,263	0,295	0,322	0,344	0,361
P ₃ H ₂₋₃	0,102	0,149	0,183	0,206	0,254	0,294	0,325	0,349	0,369	0,386
P ₃ H ₃	0,100	0,143	0,176	0,204	0,251	0,303	0,342	0,368	0,388	0,409

Annexe 8. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle d'Elovich

	q cumulé (mg/kg)									
In t (min)	2,708	3,401	3,807	4,094	4,317	4,500	4,654	4,787	4,905	5,011
P ₁ H ₁	233,623	349,380	425,536	480,602	513,642	546,213	567,771	585,815	603,389	618,620
P ₁ H ₂	136,435	211,718	259,204	293,486	320,125	349,774	365,989	380,582	391,238	403,978
P ₁ H ₃	122,576	181,339	217,148	249,284	276,370	297,029	310,572	319,754	330,313	339,035
P ₁ H ₄	79,629	114,960	134,657	147,713	164,132	175,368	184,053	190,302	196,522	201,733
P ₁ H ₅	52,815	78,558	98,254	109,161	119,447	127,671	134,170	141,319	145,586	150,249
P ₂ H ₁	274,166	375,441	431,624	480,091	522,048	550,019	578,473	611,025	627,181	642,614
P ₂ H ₂	144,486	230,150	279,634	314,180	348,259	371,367	390,274	404,980	417,351	425,987
P ₂ H ₃	132,834	186,891	222,468	243,952	268,671	284,380	299,396	313,026	322,728	329,890
P ₂ H ₄	104,592	150,849	178,193	195,511	214,880	226,501	237,439	249,516	256,124	261,821
P ₂ H ₅	71,196	100,169	117,912	128,243	137,901	143,965	150,029	156,093	160,135	163,280
P ₂ H ₆	85,089	127,403	150,170	163,048	175,466	183,515	194,324	202,603	207,432	212,261
P ₂ H ₇	82,598	124,132	148,301	162,145	177,163	185,845	192,885	201,098	206,495	211,657
P ₂ H ₈	47,785	64,444	74,527	81,322	92,282	99,077	103,461	106,968	111,571	114,640
P ₃ H ₁	179,138	259,410	308,163	353,061	397,959	439,682	475,510	504,762	522,676	536,054
P ₃ H ₂₋₁	106,785	127,170	142,458	153,808	175,582	196,198	214,034	230,017	240,673	248,780
P ₃ H ₂₋₂	31,203	47,277	57,914	65,951	85,571	102,590	114,882	125,519	134,029	140,648
P ₃ H ₂₋₃	39,907	58,004	71,229	80,509	99,071	114,616	126,681	135,961	144,082	150,578
P ₃ H ₃	39,037	55,834	68,610	79,493	97,710	118,293	133,198	143,607	151,178	159,459

Annexe 9. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle de la diffusion parabolique

	q cumulé (mg/kg)									
vt (mn)	3,873	5,477	6,708	7,746	8,660	9,487	10,247	10,954	11,619	12,247
P ₁ H ₁	233,623	349,380	425,536	480,602	513,642	546,213	567,771	585,815	603,389	618,620
P ₁ H ₂	136,435	211,718	259,204	293,486	320,125	349,774	365,989	380,582	391,238	403,978
P ₁ H ₃	122,576	181,339	217,148	249,284	276,370	297,029	310,572	319,754	330,313	339,035
P ₁ H ₄	79,629	114,960	134,657	147,713	164,132	175,368	184,053	190,302	196,522	201,733
P ₁ H ₅	52,815	78,558	98,254	109,161	119,447	127,671	134,170	141,319	145,586	150,249
P ₂ H ₁	274,166	375,441	431,624	480,091	522,048	550,019	578,473	611,025	627,181	642,614
P ₂ H ₂	144,486	230,150	279,634	314,180	348,259	371,367	390,274	404,980	417,351	425,987
P ₂ H ₃	132,834	186,891	222,468	243,952	268,671	284,380	299,396	313,026	322,728	329,890
P ₂ H ₄	104,592	150,849	178,193	195,511	214,880	226,501	237,439	249,516	256,124	261,821
P ₂ H ₅	71,196	100,169	117,912	128,243	137,901	143,965	150,029	156,093	160,135	163,280
P ₂ H ₆	85,089	127,403	150,170	163,048	175,466	183,515	194,324	202,603	207,432	212,261
P ₂ H ₇	82,598	124,132	148,301	162,145	177,163	185,845	192,885	201,098	206,495	211,657
P ₂ H ₈	47,785	64,444	74,527	81,322	92,282	99,077	103,461	106,968	111,571	114,640
P ₃ H ₁	179,138	259,410	308,163	353,061	397,959	439,682	475,510	504,762	522,676	536,054
P ₃ H ₂₋₁	106,785	127,170	142,458	153,808	175,582	196,198	214,034	230,017	240,673	248,780
P ₃ H ₂₋₂	31,203	47,277	57,914	65,951	85,571	102,590	114,882	125,519	134,029	140,648
P ₃ H ₂₋₃	39,907	58,004	71,229	80,509	99,071	114,616	126,681	135,961	144,082	150,578
P ₃ H ₃	39,037	55,834	68,610	79,493	97,710	118,293	133,198	143,607	151,178	159,459

Annexe 10. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle de la fonction de puissance

	ln q cumulé (mg/kg)									
ln t (min)	2,708	3,401	3,807	4,094	4,317	4,500	4,654	4,787	4,905	5,011
P ₁ H ₁	5,454	5,856	6,053	6,175	6,242	6,303	6,342	6,373	6,403	6,427
P ₁ H ₂	4,916	5,355	5,558	5,682	5,769	5,857	5,903	5,942	5,969	6,001
P ₁ H ₃	4,809	5,200	5,381	5,519	5,622	5,694	5,738	5,768	5,800	5,826
P ₁ H ₄	4,377	4,745	4,903	4,995	5,101	5,167	5,215	5,249	5,281	5,307
P ₁ H ₅	3,967	4,364	4,588	4,693	4,783	4,849	4,899	4,951	4,981	5,012
P ₂ H ₁	5,614	5,928	6,068	6,174	6,258	6,310	6,360	6,415	6,441	6,466
P ₂ H ₂	4,973	5,439	5,633	5,750	5,853	5,917	5,967	6,004	6,034	6,054
P ₂ H ₃	4,889	5,231	5,405	5,497	5,593	5,650	5,702	5,746	5,777	5,799
P ₂ H ₄	4,650	5,016	5,183	5,276	5,370	5,423	5,470	5,520	5,546	5,568
P ₂ H ₅	4,265	4,607	4,770	4,854	4,927	4,970	5,011	5,050	5,076	5,095
P ₂ H ₆	4,444	4,847	5,012	5,094	5,167	5,212	5,270	5,311	5,335	5,358
P ₂ H ₇	4,414	4,821	4,999	5,088	5,177	5,225	5,262	5,304	5,330	5,355
P ₂ H ₈	3,867	4,166	4,311	4,398	4,525	4,596	4,639	4,673	4,715	4,742
P ₃ H ₁	5,188	5,558	5,731	5,867	5,986	6,086	6,164	6,224	6,259	6,284
P ₃ H ₂₋₁	4,671	4,846	4,959	5,036	5,168	5,279	5,366	5,438	5,483	5,517
P ₃ H ₂₋₂	3,440	3,856	4,059	4,189	4,449	4,631	4,744	4,832	4,898	4,946
P ₃ H ₂₋₃	3,687	4,061	4,266	4,388	4,596	4,742	4,842	4,912	4,970	5,014
P ₃ H ₃	3,664	4,022	4,228	4,376	4,582	4,773	4,892	4,967	5,018	5,072

Annexe 11. Evolution des teneurs en potassium extrait en fonction du temps mesurées par le modèle du premier ordre

ln q ₀ -q (mg/kg)									
t (min)	15	30	45	60	75	90	105	120	135
P ₁ H ₁	5,953	5,596	5,263	4,927	4,654	4,282	3,929	3,491	2,723
P ₁ H ₂	5,589	5,259	4,975	4,705	4,429	3,993	3,637	3,153	2,545
P ₁ H ₃	5,377	5,061	4,803	4,497	4,138	3,738	3,349	2,959	2,166
P ₁ H ₄	4,805	4,463	4,206	3,989	3,627	3,272	2,872	2,436	1,651
P ₁ H ₅	4,579	4,272	3,951	3,716	3,428	3,117	2,778	2,189	1,540
P ₂ H ₁	5,909	5,588	5,352	5,091	4,792	4,528	4,161	3,453	2,736
P ₂ H ₂	5,640	5,277	4,986	4,717	4,353	4,000	3,576	3,045	2,156
P ₂ H ₃	5,283	4,963	4,677	4,454	4,114	3,818	3,418	2,825	1,969
P ₂ H ₄	5,058	4,709	4,426	4,194	3,849	3,564	3,194	2,510	1,740
P ₂ H ₅	4,523	4,145	3,815	3,556	3,234	2,961	2,584	1,972	1,146
P ₂ H ₆	4,846	4,441	4,129	3,896	3,605	3,359	2,887	2,268	1,575
P ₂ H ₇	4,860	4,472	4,149	3,902	3,541	3,251	2,932	2,357	1,641
P ₂ H ₈	4,203	3,916	3,692	3,506	3,107	2,745	2,414	2,038	1,121
P ₃ H ₁	5,878	5,623	5,429	5,209	4,928	4,568	4,103	3,443	2,594
P ₃ H ₂₋₁	4,956	4,801	4,666	4,554	4,293	3,962	3,548	2,932	2,093
P ₃ H ₂₋₂	4,695	4,537	4,416	4,313	4,009	3,639	3,249	2,717	1,890
P ₃ H ₂₋₃	4,707	4,528	4,374	4,249	3,942	3,582	3,174	2,682	1,871
P ₃ H ₃	4,791	4,641	4,509	4,382	4,123	3,718	3,268	2,763	2,114