
Évaluation des besoins en P de la pomme de terre en sol riche en P à l'Île d'Orléans, été 2006

Rapport préliminaire
Version amendée
1^{ère} année d'essais

Présenté au
Programme d'appui au développement de l'agriculture et de
l'agroalimentaire en région 2006-2007

Par

Christine Landry, biologiste, Agr., M.Sc.
et
Danièle Pagé, Tech. agricole



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT EN
AGROENVIRONNEMENT

2700, rue Einstein, D.1.110
Québec (Québec)
G1P 3W8

mars 2007

Liste des intervenants

Réalisation et rédaction du rapport

Christine Landry, biologiste, Agr., M. Sc.,
Danièle Pagé, Tech. agricole

Collaborateurs

Michèle Grenier, Statisticienne	Consultation statistique	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement 2700 rue Einstein, Québec, Qc. G1P 3W8
Jean-François Picard, tech. agricole	Support lors de l'implantation du projet et suivi des traitements, ainsi que prise de données en champs	Club Agroenvironnemental de la Rive-Nord (CARN) 3055 boulevard Wilfrid- Hamel (local 226) Québec, Qc. G1P 4C6
Patrice Thibault, Agr.	Consultant maraîcher RLIO	106 rue de la Licorne, Québec , Qc, G1C 7E6
Bruno Gosselin, Agr.	Conseiller en horticulture (MAPAQ)	1685, boulevard Wilfrid-Hamel Ouest, RC.22 Québec , Qc, G1N 3Y7
Alain Labbé	Producteur	Ferme ACL 469 avenue Royale, Saint-François, Île d'Orléans, Québec , Qc, GOA 3S0
Pierre Vaillancourt	Producteur	Ferme Valupierre 222 avenue Royale, Saint-Laurent, Île d'Orléans, Québec , Qc, GOA 3Z0

Subvention

Appui financier de \$ 6 368 pour 1 an (2006-2007) du Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région 2006-2007 (MAPAQ)

Remerciements

Nous tenons à remercier l'équipe du Club Agroenvironnement de la Rive-Nord (CARN) pour son aide précieuse tout au long de la saison 2006.

Nous remercions également les producteurs Alain Labbé et Pierre Vaillancourt qui nous ont permis de réaliser ce projet à leur ferme.

Merci aussi aux intervenants du milieu qui ont collaboré avec nous.

Où s'adresser

Vous pouvez obtenir plus de renseignements sur ce projet en communiquant avec :

Christine Landry, biologiste, Agr. M.Sc.
Chercheure
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)
2700, rue Einstein, B.1.305.1
Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : (418) 644-6874
Télécopieur : (418) 644-6855
Courriel : christine.landry@irda.qc.ca
www.irda.qc.ca

Table des matières

Introduction	4
Matériel et méthodes	6
Résultats et discussion	11
Annexe I.....	16



Introduction

Dans la région de Québec la culture de la pomme de terre (PdT) est une activité économique importante. On y retrouve dans les faits la plus grande superficie en PdT de la province. En 2004, des 19 300 ha de PdT cultivés au Québec, 23% se retrouvaient dans la région de la Capitale Nationale. L'Île d'Orléans ne fait pas exception et la PdT y est une culture de premier plan.

La culture de la PdT est une culture exigeante pour les sols et qui est grande consommatrice d'engrais phosphatés. Le P contribue notamment au développement de plants vigoureux, ainsi qu'à la maturation des tubercules. La fertilisation P est donc essentielle à l'obtention de hauts rendements en tubercules de qualité. De plus, au Québec, la PdT est principalement cultivée en sols légers acides, souvent podzolisés, donc à contenu élevé en oxydes et hydroxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al), réputés pour leur pouvoir fixateur en P très élevé. Le P apporté sous forme d'engrais minéral est donc rapidement fixé par ces éléments. Ainsi, traditionnellement, une quantité importante de P, dépassant les prélèvements par la culture, était appliquée puisque les plants de PdT ont un développement racinaire limité qui n'explore qu'une petite partie du volume de sol. Cependant, si un apport de P largement supérieur aux exportations de P par la récolte peut contribuer à rehausser le niveau de fertilité des sols déficients en P, il faut aussi reconnaître que l'accumulation de P résiduel peut devenir une source de pollution diffuse des eaux de surface et souterraines et entraîner leur eutrophisation puisqu'il en est l'élément limitant.

Au Québec, la culture à long terme de la PdT a ainsi causé une accumulation non souhaitable du P dans le sol. En 2003, afin de contrer cet enrichissement excessif, une nouvelle grille de référence en fertilisation P a été développée. Cette nouvelle grille, qui tient compte désormais du taux de saturation en P du sol et de sa texture, et non pas seulement de son contenu en P, a été élaborée selon une approche agroenvironnementale qui intègre dans la même recommandation les risques agronomique et environnemental. Plus un sol est saturé, plus la solubilité du P augmente. En conséquence, la quantité de P sous forme très disponible dans la solution du sol augmente aussi, ce qui hausse le risque environnemental de perte de P par ruissellement ou lessivage. Ce modèle permet donc de réduire le risque agronomique en sol pauvre en P et le risque environnemental en sol riche en P. Pour trouver la valeur environnementale critique, les chercheurs ont établi quel taux de saturation (P_{M3}/Al_{M3}) dans les sols québécois engendre la concentration critique néerlandaise de $0,10 \text{ mg L}^{-1}$ de P dans la solution du sol qui est la valeur limite avant d'entraîner des impacts négatifs. Dans les sols ayant une teneur en argile inférieure à 30%, cette valeur a été atteinte à un taux de saturation (P_{M3}/Al_{M3}) de 13,1 %. Une fois ce seuil dépassé, un producteur possédant des sols sableux saturés à plus de 13,1% (P_{M3}/Al_{M3}) ne devrait donc pas appliquer plus de P que les besoins des plantes, soit environ $35 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ pour un rendement de 30 T ha^{-1} . Cela représente pour les producteurs une réduction importante des doses auxquelles ils sont habitués, créant une certaine réticence compréhensible à appliquer la grille. Cette réticence est d'ailleurs renforcée par l'existence d'un questionnement quant à sa précision en sols fortement saturés en P.

Selon les informations disponibles dans le Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2003), la nouvelle grille de fertilisation a été étalonnée à partir de 78 essais de fertilisation minérale effectués depuis une vingtaine d'années au Québec. Cependant, à l'intérieur de ces essais, les sites hautement saturés étaient peu représentés, d'où le doute qui semble subsister quant à la validité de la grille en sols très saturés.

Certains essais d'évaluation des doses réduites en P en sols saturés ont donc été initiés afin de tester la nouvelle grille. Des résultats divergents ont été rapportés. Des essais de validation (sans répétition statistique) menés en sols riches au cours des trois dernières années dans la région de Lanaudière semblaient indiquer une tendance à la baisse dans 25% des champs au niveau des rendements en PdT suivant une réduction de la fertilisation P (Hamel 2006). À l'opposé, des tests de calibration menés en sols très riches en P près de Frédéricton ont démontré statistiquement qu'il n'y avait aucune différence due à l'engrais P au niveau des rendements, du poids spécifique ou du classement des tubercules (Karemangingo et coll. 2004).

Il existe donc un besoin réel de vérification de la grille en condition de sols saturés, renforcé par l'entrée en vigueur, pour les productions maraîchères, du Règlement sur les exploitations agricoles (REA). En effet, ce cadre réglementaire n'autorise plus le dépassement des besoins en P de la culture pour les sols saturés selon l'abaque de dépôts maximum annuels en plus d'exiger que l'agronome, par ses recommandations de fertilisation, fasse en sorte que le niveau de saturation du sol en P soit abaissé à une valeur inférieure à 7,6 % pour un sol avec une teneur en argile supérieure à 30 % et à 13,1 % pour un sol avec une teneur en argile égale ou inférieure à 30 % et qu'il soit maintenu sous cette valeur (annexe 1 du REA). Ce besoin de vérification ressort particulièrement à l'Île d'Orléans qui est un milieu sensible, possédant de fortes pentes, où la richesse des sols en P est répandue, avec des taux de saturation se situant entre 13% et plus de 30% (P_{M3}/AI_{M3}).

C'est dans cette lignée que le projet «Évaluation des besoins en P de la PdT en sols riches en P à l'Île d'Orléans, été 2006» a été initié dans le cadre du PROGRAMME D'APPUI AU DÉVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE ET DE L'AGROALIMENTAIRE EN RÉGION - 2006-2007 qui vise à soutenir le dynamisme régional et l'exploitation de ses potentiels, de même que la croissance des entreprises agroalimentaires dans un contexte d'ouverture des marchés et de concurrence accrue dans une perspective de respect de l'environnement (MAPAQ 2006). Ce projet a donc pour objectifs, tout en permettant de vérifier la précision de la nouvelle grille de fertilisation, de hausser l'acceptabilité de la grille par les producteurs et de contribuer par le fait même à la réduction des niveaux de fertilisation en P dans le but de rencontrer les exigences du REA du ministère de l'Environnement. La tenue d'une telle recherche permettra ainsi aux producteurs d'adopter une conduite réglementaire tout en gérant le risque de perte de rendement par l'adoption de doses optimales d'application de P. De plus, on ne sait pour le moment à quel rythme les doses de P recommandées auront pour effet de diminuer le taux de saturation en P des sols saturés. Cela sera aussi vérifié advenant que le projet soit reconduit pendant quelques années étant donné que les changements bénéfiques au niveau du P du sol prennent un certain temps à se produire. Nous pourrions ainsi savoir si un apport de P égal ou inférieur aux besoins estimés de la culture permet de rajuster à la baisse le taux de saturation en P des sols saturés et à quelle vitesse. Finalement, ce projet permettra de connaître sur le long terme la capacité des sols saturés en P à combler les besoins en P de la PdT sans perte de rendement grâce aux parcelles témoins sans apport de P.

Matériel et méthodes

Sites expérimentaux

L'expérience a été réalisée chez deux producteurs de PdT de l'Île d'Orléans, soit à la Ferme Valupierre et à la Ferme ACL. Le dispositif a été reproduit 3 fois chez chacun des producteurs sur des sites ayant un sol lourd et des taux de saturation en P variables. A priori, sur la base des analyses de sol fournies par les producteurs, les sites ont été sélectionnés dans le but de couvrir les sols ayant des niveaux de saturation en P/AL de 13% à 19%, 20% à 24% et de plus 25% sur chacune des entreprises (Tableau 1). Seule la Ferme Valupierre a irrigué ses champs au cours de l'été (Norland 4 et 14 août, Nordonna 6 et 16 août, Goldrush 6 et 16 août). Les précédents culturaux ont été la céréale grainée en 2004 et la prairie de graminées en 2005 à tous les sites Valupierre. Depuis 2003, aucun amendement organique n'a été appliqué aux sites ACL, tandis que 40 tonnes hectare de boues de papetières ont été appliquées au site de la Norland chez Valupierre. Aux six sites, de l'urée foliaire (5 Kg par hectare) a été appliquée par 3 fois en août. L'engrais utilisé était de formulation 18-0-7. Il a été appliqué au taux de 275 kg ha⁻¹ aux 3 sites ACL et fractionné le 2 juillet. Aux sites Valupierre, l'engrais a été appliqué aux taux de 400 kg ha⁻¹ pour la Goldrush et 275 kg ha⁻¹ pour la Norland et la Nordonna. Le fractionnement a eu lieu le 10 juillet pour la Nordonna et la Norland et le 14 juillet pour la Goldrush.



Tableau 1. Localisation et caractéristiques des sites à l'étude à l'été 2006, Île d'Orléans

Producteur	Ferme ACL (Alain Labbé)			Ferme Valupierre (Pierre Vaillancourt)		
	St-François			St-Laurent	St-Jean	
Localisation	Site #1	Site #2	Site #3	Site #4	Site #5	Site #6
Taux de saturation P/AI (%)	12,9 %	16,7 %	22,4 %	15,5 %	25,6 %	22,8 %
Granulométrie (argile %)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3
Date de plantation	24 mai	24 mai	24 mai	2 juin	2 juin	2 juin
Variété	Croustille	Croustille	Croustille	Norland	Nordonna	Goldrush
Distance de plantation	25 cm	25 cm	25 cm	25 cm	23 cm	28 cm
Espacement entre les rangs	91 cm	91 cm	91 cm	87 cm	87 cm	87 cm

Traitements

Les traitements consistaient en des doses croissantes de P_2O_5 : 0, 35, 70 et 105 kg P_2O_5 ha⁻¹. Ces doses d'application comprennent la dose équivalant aux prélèvements en P de la PdT, la dose recommandée par le CRAAQ (2003) en fonction du taux de saturation du sol et la dose appliquée en moyenne par les producteurs. Les parcelles étaient constituées de 4 rangs de 10 m de longueur. Les fertilisations azotée (100 kg N ha⁻¹) et potassique (60 kg K₂O ha⁻¹) étaient ensuite appliquées tel que recommandé par le Guide du CRAAQ (2003) en fonction des analyses de sol. Les mélanges utilisés de 10 :0 :6, 10 :3.5 :6, 10 :7 :6 et 10 :10.5 :6 ont été préparés avec les formulations suivantes :21-0-0 + 27-0-0 + 18-46-0 + 0-0-22 (11% Mg) . Les engrais étaient appliqués en bandes à la main lors de la plantation. Les bandes étaient ensuite recouvertes de terre. Les tubercules étaient finalement plantés avec un planteur manuel en respectant l'espacement entre les rangs utilisé par les producteurs et l'espacement entre les tubercules requis pour chaque variété (Tableau 1). La régie de la PdT, ainsi que la protection contre le doryphore et le mildiou, ont été réalisées par le producteur selon la régie appliquée à l'ensemble des champs.



Analyses de sols et de végétaux



Des échantillons de sol de la strate 0-20 cm ont été prélevés (1) avant plantation afin de caractériser les sites et (2) à la récolte afin de suivre l'évolution du contenu en P et du taux de saturation en P des sols suivant l'apport de P. Les analyses de printemps comprenaient le pH, le N total, le P Mehlich-3 (P_{M3}) et les éléments mineurs Mehlich-3 (Al_{M3} , Fe_{M3} , Cu_{M3} , Zn_{M3} ...), le pourcentage de matière organique et la granulométrie. Les analyses d'automne comprenaient le P_{M3} et les éléments mineurs Mehlich-3. Le pourcentage de saturation a été calculé par le rapport P_{M3}/Al_{M3} . Ce calcul est celui actuellement reconnu par la réglementation environnementale québécoise. Dans les sols du Québec, l'Al extrait au Mehlich-3 est en effet très bien corrélé à la capacité de fixation en P des sols. L'ajout du fer au modèle, beaucoup moins important que l'Al dans les sols, contribue peu à la valeur de l'estimation de la capacité de fixation du P.

Divers échantillons végétaux ont également été prélevés durant la saison de croissance. Ainsi, les pétioles de la 4^e feuille mature ont été prélevés sur 10 plants de PdT par parcelle au stade de développement des boutons floraux et au stade 50 à 75 % de floraison. Ces pétioles ont été analysés pour leur contenu en phosphates ($P-PO_4$). De plus, 4 plants entiers ont été prélevés par parcelle à ces stades de développement pour mesurer la croissance par la détermination de la matière sèche. Au stade 50 à 75% de floraison, la 4^e feuille mature de 10 plants par parcelle ont aussi été recueillies pour l'analyse de leur contenu en N, P et K totaux.





Le rendement a été évalué sur la base du nombre de tubercules récoltés sur 6 m de long sur les 2 rangs du centre de chaque parcelle. Les tubercules ont été classés pour déterminer les rendements total et vendable, ainsi que le poids et le nombre de tubercules par catégorie. Le rendement vendable est composé de tubercules dont le diamètre varie de 47 mm à 76 mm pour le calibre Canada No 1 et de 77 mm à 114 mm pour le calibre No 1 grosse. Le poids spécifique a été mesuré à partir de tubercules provenant de chaque unité expérimentale. Finalement, des tubercules ont été séchés et leur contenu en P a été analysé afin de pouvoir calculer les exportations en P. Ces exportations ont été calculées en multipliant le rendement total par le contenu en P.

Statistiques

Les dispositifs ont été implantés selon un plan en blocs complets aléatoires. Les traitements étaient répétés 3 fois. Les variables analysées étaient les rendements vendable et total, le poids spécifique, la masse sèche et le contenu en P-PO₄ des pétioles (1^{ère} et 2^e date), le contenu en P total des feuilles (2^e date) et des tubercules (récolte), le contenu et la saturation en P du sol à la récolte. La procédure PROC MIXED de SAS a été utilisée pour effectuer les analyses de variance. Un modèle mixte a d'abord été utilisé avec les données de tous les sites. Une telle analyse aurait permis de généraliser les conclusions à plus d'un site et à plus d'un type de PdT. Les effets fixes du modèle étaient les doses de P, les types de PdT et l'interaction entre eux. Le modèle comprenait aussi les effets aléatoires des sites emboîtés dans les types de PdT (croustilles et table), et des blocs emboîtés dans les sites. De plus, comme le taux initial de saturation en P (P/AI_init) des sols variait considérablement d'un site à l'autre et d'un bloc à l'autre, cette valeur a été utilisée comme covariable. Ceci permet de réduire l'erreur en y extrayant la variabilité due au P/AI_init, ce qui hausse la précision lors de la comparaison des traitements. Ceci a cependant révélé qu'il y avait une forte interaction entre le type de PdT et la covariable (figure 1).

Cette interaction pourrait s'expliquer du fait que la plage des valeurs de taux de saturation des sites où étaient cultivées les PdT de croustilles est décalée par rapport à celle des sites où l'on cultivait les PdT de table (tableau 2). Les données ont donc été analysées par type de PdT. Un modèle mixte a été ajusté pour chaque type, soit le type « croustilles » regroupant les 3 sites de ce type et ceux de type « table » regroupant les sites des cultivars Norland, Goldrush et Nordonna. L'effet fixe des doses, l'effet aléatoire des sites et l'effet aléatoire des blocs emboîtés dans les sites, ont été tenus en compte dans ces modèles. Cela a permis de constater que le site contribue pour beaucoup à la variabilité des données et donc, que les résultats des analyses statistiques ne sont valables que pour ces sites avec une seule année d'étude. Par ailleurs, une analyse de variance a aussi été effectuée pour chacun de sites séparément afin de permettre aux clients d'obtenir de l'information pour

chacun de leurs champs. Cependant, étant donné qu'une seule année de données est présentement disponible, les résultats de ces analyses sont à considérer avec beaucoup de prudence. Il n'y a en effet que 6 degrés de liberté (DDL) à l'erreur. L'ajout d'années d'étude, tel que prévu initialement par le projet, viendra cependant augmenter les DDL, ce qui permettra une analyse par site plus résistante avec le temps.

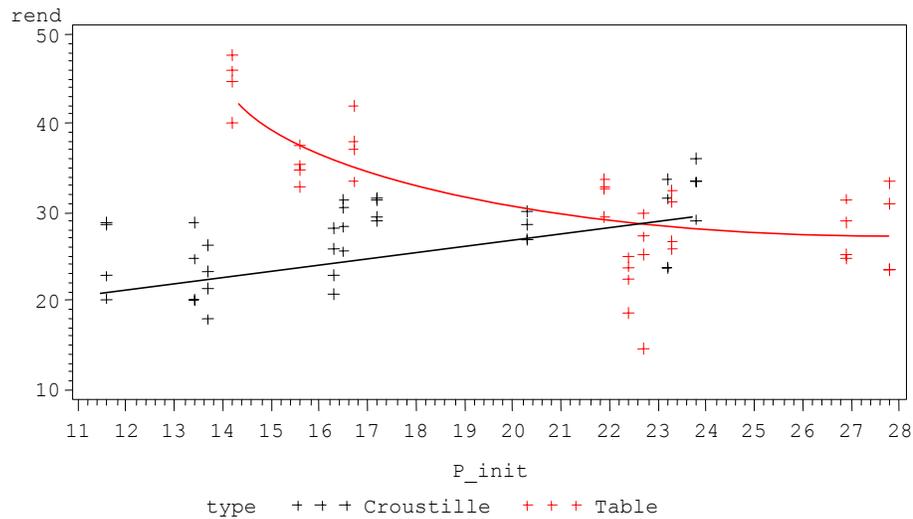


Figure 1. Influence de la covariable P/AL_init sur la réponse des rendements, tous sites confondus (importé du « Means procedure », listing SAS).

Tableau 2. Étendue des valeurs de saturation en P initiale des sites à l'étude.

	Analysis Variable : P/Al_init*				
Type	Minimum	25th Pctl	Mean	75th Pctl	Maximum
Croustille	11,6000000	13,7000000	17,3333333	20,3000000	23,8000000
Table	14,2000000	16,7000000	21,2777778	23,3000000	27,8000000

* Importé du « Means procedure », listing SAS.

Résultats et discussion

Dans cette version amendée du rapport, seuls les résultats des sites en PdT de table de M. Vaillancourt sont présentés étant donné que les résultats se rapportant au type « croustille » ont été enlevés. Les résultats découlant des analyses effectuées pour chacun des 3 sites de PdT de table individuellement sont présentés uniquement à la fin du rapport dans l'Annexe 1. Il n'en est pas fait une discussion détaillée étant donné le caractère plutôt indicatif des résultats considérant que le nombre de données est limité puisqu'une seule année d'étude a été réalisée jusqu'à maintenant. Il convient donc de considérer ces résultats avec prudence. En résumé, nous pouvons toutefois constater que ces analyses n'illustrent aucune tendance significative commune aux 3 sites. Il semble donc que la fertilisation P n'ait eu que très peu d'influence sur la croissance et la nutrition des plants, le rendement et la qualité des récoltes, ou le taux de richesse en P du sol (tableaux 10, 16, 21). En fait, sur les 33 liens analysés (3 sites et 11 variables par site), seulement 5 effets significatifs des doses de P ont été mesurés. Selon le site, la dose de P apportée a contribué à hausser soit la masse sèche ou le contenu en P-PO₄ des pétioles au stade boutons, le contenu en P des tubercules, le contenu en P du sol ou son taux de saturation. L'apport de P n'a donc en aucun cas contribué à augmenter les rendements. Il est toutefois intéressant de noter qu'alors que les sites plus riches ne présentent aucun lien significatif (excepté le contenu en P des tubercules au site #6), plusieurs de ces impacts significatifs ont été mesurés au site #4 qui est de loin le moins saturé en P des sites. À ce site, au stade boutons, l'apport de P a augmenté linéairement la masse sèche des plants ($R^2=88\%$) et le contenu en P-PO₄ des pétioles ($R^2=95\%$) de 2,3 g et 128,3 mg kg⁻¹ respectivement par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés. Autrement dit, dans les parcelles ayant reçu la plus forte dose de P (105 kg de P₂O₅ ha⁻¹) les plants avaient une masse sèche et un contenu en P-PO₄ des pétioles 36% et 27% supérieurs aux plants des parcelles non fertilisées. Le taux de saturation en P du sol y était aussi plus élevé de 0,3% (15,9% au lieu de 15,6%) (tableau 23). La répétition des essais de fertilisation sur quelques années permettra de savoir si le faible impact de la fertilisation P sur les paramètres étudiés est effectif ou simplement dû à la variabilité engendrée par la quantité limitée de données disponibles à chacun des sites puisque nous ne disposons que d'une seule année d'étude pour l'instant.

Développement et nutrition des plants

La fertilisation P n'a aucunement fait de différence au niveau de la croissance des différents cultivars (tableau 3). Les plants présentaient donc un bon développement indépendamment de la fertilisation P avec une masse sèche moyenne de 20,4 et 56,4 g aux stades boutons et 50-75% de floraison respectivement. Le seul effet significatif mesuré, observé au stade boutons, est donc une hausse linéaire du contenu en P-PO₄ des pétioles ($R^2=98\%$) (figure 2) de 162,05 mg kg⁻¹ par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés. Cependant, la concentration en P-PO₄ est élevée pour tous les traitements, même dans les parcelles non fertilisées, avec une concentration dépassant les 2 700 mg P-PO₄ kg⁻¹ (tableau 4). De plus, le contenu en P total de la 4^e feuille est similaire quelle que soit la dose de P appliquée, avec une valeur moyenne élevée toutes doses confondues de 4 609,7 mg kg⁻¹.

Tableau 3. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le développement et la nutrition des plants de pomme de terre de table, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	Masse sèche		P-PO ₄ pétiole		P feuille
	Stade boutons	50-75% floraison	Stade boutons	50-75% floraison	50-75% floraison
DOSE	ns [†]	ns	*	ns	ns
Effet linéaire	-	-	**	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-	-
Effet cubique	-	-	-	-	-

[†]Les niveaux de signification de 0,05, 0,01, 0,001 et non-significatif sont représentés respectivement par les symboles *, **, *** et ns. Données de 3 sites regroupées par type, n = 9.

Tableau 4. Impact du taux de fertilisation phosphatée sur le développement et la nutrition des plants de pomme de terre de table, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	Masse sèche (g)		P-PO ₄ pétiole (mg kg ⁻¹)		P feuille (mg kg ⁻¹)
	Stade boutons	50-75% floraison	Stade boutons	50-75% floraison	50-75% floraison
0 kg/ha de P	19,5 ± 3,3	70,8 ± 13,8	2754,9 ± 323,0	2567,1 ± 427,1	4680,4 ± 585,1
35 kg/ha de P	18,7 ± 3,3	49,8 ± 13,8	2858,7 ± 323,0	2648,3 ± 427,1	4576,7 ± 585,1
70 kg/ha de P	19,8 ± 3,3	53,5 ± 13,8	3015,1 ± 325,6	2537,7 ± 427,1	4735,6 ± 585,1
105 kg/ha de P	23,4 ± 3,3	51,6 ± 13,8	3238,9 ± 323,0	2551,9 ± 427,1	4446,2 ± 585,1

- Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=9.

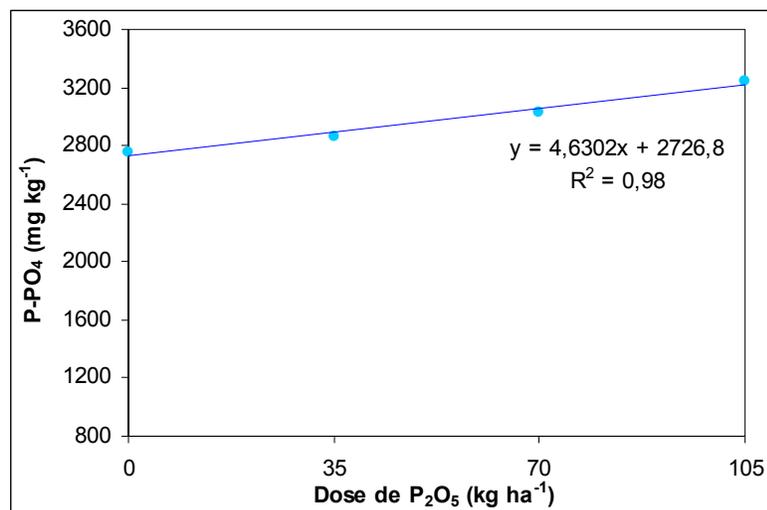


Figure 2. Courbe de régression liant la fertilisation P et le contenu en phosphates des pétioles de pommes de terre de table au stade boutons, Île d'Orléans, 2006.

Productivité des plants et qualité des tubercules

Les analyses effectuées dans cette étude préliminaire ont révélé que les PdT n'ont pas répondu à l'ajout de P. D'excellents rendements totaux ont été obtenus sans aucune réponse à la fertilisation P, pour une production moyenne de 37,1 T ha⁻¹. Il faut toutefois prendre en considération que l'analyse porte sur trois cultivars différents, sans distinction, ce qui peut contribuer à diminuer la précision de l'analyse en haussant l'erreur du modèle puisque la variabilité due au cultivar n'est pas soustraite de celle des sites. Certaines études ont en effet démontré que les doses optimales de fertilisation P variaient selon les variétés. Au Québec, Samson (1998) a déterminé que la dose optimale se situait entre 75-150 kg de P₂O₅ ha⁻¹ pour la variété Goldrush et à près de 100 kg ha⁻¹ pour la variété Chieftain. À l'Île-du-Prince-Édouard, Sanderson et coll. (2002) ont de leur côté démontré qu'il n'y avait pas de justifications économiques à l'application de plus de 150 kg P₂O₅ ha⁻¹ pour les variétés Shepody et Russet Burbank.

Par ailleurs, la fertilisation n'a eu aucun impact sur la qualité des tubercules (tableau 5). Le poids spécifique demeure similaire avec une valeur moyenne toutes doses confondues de 1,076 (tableau 6). L'analyse du contenu en P des tubercules montre pour sa part une situation inverse à celle du rendement (tableau 5). La concentration en P des tubercules (tableau 6) présente une hausse de leur contenu en P suivant l'ajout de P. Le degré de relation est cependant faible (R²=58%) bien que significatif (figure 3).

Tableau 5. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le rendement et la qualité des tubercules des pommes de terre de table, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	Rendement		Poids spécifique	P tubercule
	Total	Vendable		
DOSE	ns [†]	ns	ns	*
Effet linéaire	-	-	-	*
Effet quadratique	-	-	-	-
Effet cubique	-	-	-	-

[†]Les niveaux de signification de 0,05, 0,01, 0,001 et non-significatif sont représentés respectivement par les symboles *, **, *** et ns. Données de 3 sites regroupées par type, n = 9.

Tableau 6. Impact du taux de fertilisation phosphatée sur le rendement et la qualité des tubercules des pommes de terre de table, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	Rendement (T ha ⁻¹)		Poids spécifique	P tubercule (mg kg ⁻¹ b.s.)
	Total	Vendable		
0 kg/ha de P	36,1 ± 4,83	30,5 ± 4,29	1,075 ± 0,001	2238,3 ± 138,8
35 kg/ha de P	37,2 ± 4,83	31,6 ± 4,29	1,075 ± 0,001	2471,4 ± 138,8
70 kg/ha de P	37,7 ± 4,83	31,6 ± 4,29	1,075 ± 0,001	2480,4 ± 138,8
105 kg/ha de P	37,4 ± 4,83	30,9 ± 4,29	1,077 ± 0,001	2467,3 ± 138,8

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=9.

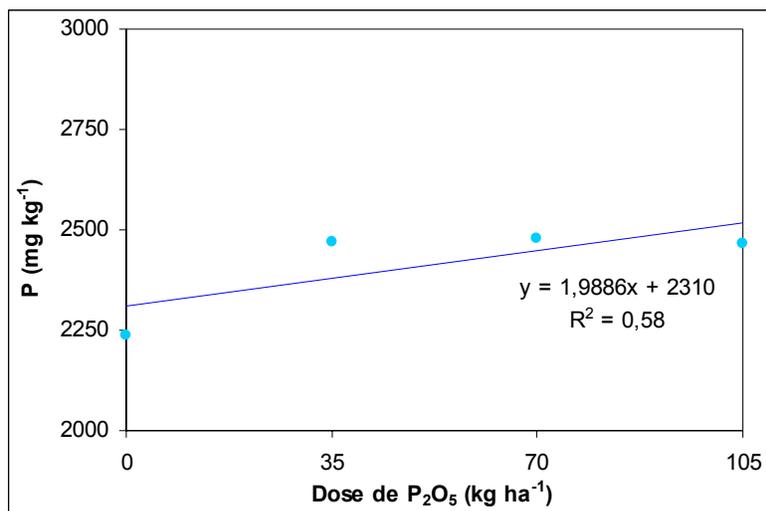


Figure 3. Courbe de régression liant la fertilisation P et le contenu en P des tubercules de pommes de terre de table, Île d'Orléans, 2006.

Tableau 7. Impact du taux de fertilisation phosphatée sur les exportations en P des pommes de terre de table, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	Exportations (kg P ha ⁻¹)	
	Croustille	Table
0 kg/ha de P		16,61
35 kg/ha de P		18,22
70 kg/ha de P		18,51
105 kg/ha de P		18,52

* Moyennes Excel des données, n=9.

L'analyse du contenu en P des tubercules, jumelée à celle des rendements totaux des plants, nous renseigne sur la capacité du sol à fournir le P à la culture. En multipliant les rendements totaux par le contenu en P des tubercules on obtient la quantité de P prélevé du sol et exporté en dehors des champs par la récolte. Selon les résultats du tableau 7, on constate tout d'abord que le sol non fertilisé possède une bonne capacité de fourniture en P. Deuxièmement, il ressort clairement que les exportations en P se rapprochent de la dose de fertilisation recommandée de 35 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (15 kg de P ha⁻¹). Il sera donc intéressant de suivre l'évolution du P du sol au cours des années. Il s'agit d'un paramètre important car les exportations en P de la partie récoltée de la culture servent non seulement de base pour établir la quantité de P pouvant être apportée au champ, mais elles sont aussi déterminantes pour le calcul prévisionnel de l'évolution de la teneur en P du sol. À long terme, il devrait être possible de calculer le nombre de kg de P devant être exportés pour faire diminuer la teneur en P_{M3}/Al_{M3} du sol de 1 kg. Ces données serviront l'agronome qui est maintenant tenu par ses recommandations de fertilisation de faire en sorte que le niveau de saturation du sol en P soit abaissé à une

valeur inférieure à 13,1 % pour un sol avec une teneur en argile égale ou inférieure à 30 % et qu'il soit maintenu sous cette valeur (annexe 1 du REA).

Fertilité du sol

Tel qu'attendu, aucun effet de fertilisation P en regard du contenu en P du sol n'a été observé après seulement une saison de culture. Cela ne signifie pas pour autant qu'aucune variation n'est possible dans le temps. En effet, le taux de saturation en P du sol évolue plutôt en « dents-de-scie », une tendance générale n'étant décelable que sur plusieurs années. Il faudra donc considérer cela avec attention et trouver le juste milieu entre l'atteinte de rendements maximaux et le taux d'enrichissement des sols. De plus, aucun lien n'a pu être établi entre la fertilisation P et le contenu en P_{M3} du sol à aucun des sites (tableaux 8 et 9). Cela peut cependant s'expliquer du fait qu'il est maintenant connu que le taux de saturation est un meilleur indicateur de la disponibilité du P à la plante que le contenu en P total seul sans considération de la capacité de fixation du sol.

Tableau 8. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le contenu en P et le taux de saturation P/AI du sol des sites de pommes de terre de table, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	P du sol	P/AI
DOSE	ns [†]	ns
Effet linéaire	-	-
Effet quadratique	-	-
Effet cubique	-	-

[†]Les niveaux de signification de 0,05, 0,01, 0,001 et non-significatif sont représentés respectivement par les symboles *, **, *** et ns. Données de 3 sites regroupées par type, n = 9.

Tableau 9. Impact du taux de fertilisation phosphatée sur le contenu en P et le taux de saturation P/AI du sol des sites produisant les pommes de terre de table, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	P du sol ($mg\ kg^{-1}$)	P/AI (%)
0 kg/ha de P	280,1 ± 31,2	21,9 ± 2,59
35 kg/ha de P	272,0 ± 31,2	21,5 ± 2,59
70 kg/ha de P	295,6 ± 31,2	22,9 ± 2,59
105 kg/ha de P	266,3 ± 31,2	20,9 ± 2,59

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=9.

ANNEXE I

Développement et nutrition des plants

Tableau 10. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le développement et la nutrition des plants de pomme de terre de chacun des sites à l'étude, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	Masse sèche		P-PO ₄ pétiole		P feuille
	Stade boutons	50-75% floraison	Stade boutons	50-75% floraison	50-75% floraison
DOSE site # 4	*	ns	*	ns	ns
Effet linéaire	**	-	**	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-	-
DOSE site # 5	ns	ns	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-	-
DOSE site # 6	ns	ns	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-	-

†Les niveaux de signification de 0,05, 0,01, 0,001 et non-significatif sont représentés respectivement par les symboles *, **, *** et ns.

Données par site, n = 3.

Tableau 11. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur la croissance des plants au stade boutons, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	Matière sèche (g plant ⁻¹)*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				19,7 ± 1,66	15,4 ± 1,35	23,4 ± 4,89
35 kg/ha de P				20,6 ± 1,66	13,9 ± 1,35	21,6 ± 4,89
70 kg/ha de P				22,2 ± 1,66	14,6 ± 1,35	22,6 ± 4,89
105 kg/ha de P				26,8 ± 1,66	14,1 ± 1,35	29,4 ± 4,89
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 12. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur la croissance des plants au stade 50 à 75 % de floraison, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	Matière sèche (g plant ⁻¹)*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				52,1 ± 4,45	43,6 ± 8,41	116,7 ± 12,95
35 kg/ha de P				40,3 ± 4,45	45,1 ± 8,41	63,9 ± 12,95
70 kg/ha de P				43,2 ± 4,45	38,0 ± 8,41	79,4 ± 12,95
105 kg/ha de P				42,0 ± 4,45	44,4 ± 8,41	68,4 ± 12,95
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 13. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphates du pétiole du 4^e foliole au stade boutons, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	P-PO ₄ (mg kg ⁻¹)*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				2998 ± 324,6	2851 ± 250,4	2416 ± 169,6
35 kg/ha de P				3139 ± 324,6	3224 ± 250,4	2213 ± 169,6
70 kg/ha de P				3280 ± 344,2	3359 ± 250,4	2346 ± 169,6
105 kg/ha de P				3796 ± 324,6	3503 ± 250,4	2417 ± 169,6
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 14. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphates du pétiole du 4^e foliole au stade 50 à 75 % de floraison, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	P-PO ₄ (mg kg ⁻¹)*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				2189 ± 347,5	3452 ± 228,4	2060 ± 119,0
35 kg/ha de P				2155 ± 347,5	3324 ± 228,4	2467 ± 119,0
70 kg/ha de P				1972 ± 347,5	3395 ± 228,4	2247 ± 119,0
105 kg/ha de P				1733 ± 347,5	3389 ± 228,4	2533 ± 119,0
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 15. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur la teneur en P du 4^e foliole au stade boutons, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	P des feuilles (mg kg ⁻¹)					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				3505 ± 169,6	5271 ± 220,8	5265 ± 258,5
35 kg/ha de P				3507 ± 169,6	5160 ± 220,8	5064 ± 258,5
70 kg/ha de P				3660 ± 169,6	5388 ± 220,8	5159 ± 258,5
105 kg/ha de P				3154 ± 169,6	5036 ± 220,8	5149 ± 258,5
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Productivité des plants et qualité des tubercules

Tableau 16. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le rendement et la qualité des tubercules des pommes de terre de chacun des sites à l'étude, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	Rendement		Poids spécifique	P tubercule
	Total	Vendable		
DOSE site # 4	ns	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-
DOSE site # 5	ns	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-
DOSE site # 6	ns	ns	ns	*
Effet linéaire	-	-	-	**
Effet quadratique	-	-	-	-

† Les niveaux de signification de 0,05, 0,01, 0,001 et non-significatif sont représentés respectivement par les symboles *, **, *** et ns. Données par site, n = 3.

Tableau 17. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur la qualité des tubercules des pommes de terre, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	Densité relative*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				1,073 ± 0,001	1,072 ± 0,002	1,080 ± 0,002
35 kg/ha de P				1,075 ± 0,001	1,073 ± 0,002	1,077 ± 0,002
70 kg/ha de P				1,073 ± 0,001	1,074 ± 0,002	1,077 ± 0,002
105 kg/ha de P				1,076 ± 0,001	1,078 ± 0,002	1,077 ± 0,002
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 18. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur le contenu en P des tubercules, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	P dans les tubercules (mg kg ⁻¹ b.s.)*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				2441 ± 110,0	2376 ± 184,6	1898 ± 101,2
35 kg/ha de P				2493 ± 110,0	2702 ± 184,6	2219 ± 101,2
70 kg/ha de P				2575 ± 110,0	2669 ± 184,6	2197 ± 101,2
105 kg/ha de P				2357 ± 110,0	2678 ± 184,6	2367 ± 101,2
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 19. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur le rendement vendable en tubercules à la récolte, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	Rendement vendable (T ha ⁻¹)*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				38,5 ± 3,25	31,4 ± 2,46	21,4 ± 2,91
35 kg/ha de P				40,9 ± 3,25	29,6 ± 2,46	24,4 ± 2,91
70 kg/ha de P				39,6 ± 3,25	28,4 ± 2,46	26,8 ± 2,91
105 kg/ha de P				37,5 ± 3,25	27,3 ± 2,46	28,2 ± 2,91
Saturation P/Al (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 20. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur le rendement total en tubercules à la récolte, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	Rendement total (T ha ⁻¹)*					
	A. Labbé			P. Vaillancourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				44,3 ± 3,13	38,7 ± 2,22	25,2 ± 3,35
35 kg/ha de P				46,6 ± 3,13	36,9 ± 2,22	28,3 ± 3,35
70 kg/ha de P				46,1 ± 3,13	36,6 ± 2,22	30,4 ± 3,35
105 kg/ha de P				44,3 ± 3,13	35,4 ± 2,22	32,5 ± 3,35
Saturation P/AI (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Fertilité du sol

Tableau 21. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le contenu en P et le taux de saturation P/AI du sol de chacun des sites à l'étude, Île d'Orléans, été 2006.

Source de variation	P du sol	P/AI
DOSE site # 4	**	**
Effet linéaire	-	-
Effet quadratique	**	**
DOSE site # 5	ns	ns
Effet linéaire	-	-
Effet quadratique	-	-
DOSE site # 6	ns	ns
Effet linéaire	-	-
Effet quadratique	-	-

† Les niveaux de signification de 0,05, 0,01, 0,001 et non-significatif sont représentés respectivement par les symboles *, **, *** et ns. Données par site, n = 3.

Tableau 22. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur le contenu en P du sol à la récolte, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	P dans le sol à la récolte (mg kg ⁻¹)*					
	A. Labbé			P. Vaillacourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				197,3 ± 14,83	331,3 ± 18,27	311,7 ± 15,67
35 kg/ha de P				215,7 ± 14,83	308,7 ± 18,27	291,7 ± 15,67
70 kg/ha de P				258,3 ± 14,83	335,0 ± 18,27	293,3 ± 15,67
105 kg/ha de P				207,3 ± 14,83	305,7 ± 18,27	286,0 ± 15,67
Saturation P/AI (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.

Tableau 23. Impact des doses de fertilisation phosphatée sur le taux de saturation P/AI du sol à la récolte, Île d'Orléans, été 2006.

Producteurs	P/AI dans le sol à la récolte (%)*					
	A. Labbé			P. Vaillacourt		
Variétés	Croustille			Norland	Nordonna	Goldrush
# sites	1	2	3	4	5	6
0 kg/ha de P				15,6 ± 0,88	26,1 ± 1,79	24,2 ± 0,97
35 kg/ha de P				16,6 ± 0,88	24,4 ± 1,79	23,5 ± 0,97
70 kg/ha de P				19,1 ± 0,88	25,9 ± 1,79	23,7 ± 0,97
105 kg/ha de P				15,9 ± 0,88	23,9 ± 1,79	22,9 ± 0,97
Saturation P/AI (%)	12,9	16,7	22,4	15,5	25,6	22,8
Argile (%)	26,7	32,3	27,0	29,3	26,7	30,3

* Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS, n=3.