

Besoins et utilisation en phosphore de la pomme de terre cultivée en sols saturés en P, Île d'Orléans, été 2007



2^{ème} 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.
Julie Mainguy, professionnelle de recherche, Agr.
Danièle Pagé, tech. agricole



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

février 2008

Liste des intervenants

Réalisation et rédaction du rapport

Christine Landry, biologiste, Agr., M. Sc.,
Julie Mainguy, professionnelle de recherche, Agr.
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 Ève Abel, agronome	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
Pierre Vaillancourt	Producteur	Ferme Valupierre 222 avenue Royale, Saint-Laurent, Île d'Orléans, Québec, Qc, GOA 3Z0

Subvention

Appui financier de \$ 5 700 pour 1 an (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 2007.

Nous remercions également M. Pierre Vaillancourt qui nous a donné accès à ses terres, permettant ainsi la réalisation de ce projet.

En dernier lieu, merci aux divers intervenants du milieu qui ont collaboré avec nous. Leur support fut fort apprécié.

Où s'adresser

Toute demande de renseignements supplémentaires sur ce projet peut être acheminée à :

Christine Landry, biologiste, Agr. M.Sc.
Chercheure en chimie et fertilité des sols
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	8
Sites expérimentaux	8
Traitements	9
Analyses de sols et de végétaux	10
Statistiques	11
Résultats et discussion	13
Développement et nutrition des plants	13
Productivité des plants et qualité des tubercules	18
Fertilité du sol.....	23



Introduction

La culture de la pomme de terre (PdT) est une activité économique importante au Québec, avec plus de 700 entreprises réparties dans toutes les régions. C'est la troisième culture horticole en importance et sa production se chiffrait à 488 709 tonnes en 2006. Environ 80 % des PdT consommées au Québec sont ainsi produites sur son territoire. C'est dans la région de la Capitale Nationale qu'on retrouve une des plus importantes superficies en PdT de la province. En 2006, des 19 209 ha de PdT cultivés au Québec, plus de 20% se retrouvaient ainsi dans cette région. 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, grande consommatrice d'engrais phosphatés. Le phosphore (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, 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 au sol sous forme d'engrais soluble est en fait soumis à plusieurs processus physico-chimiques (précipitation, sorption, réorganisation) qui le font évoluer rapidement vers des formes de moins en moins disponibles pour les plantes. Ceci fait en sorte que le coefficient d'utilisation de l'engrais phosphaté par la PdT durant l'année d'application ne dépasse pas 25%. Ainsi, traditionnellement, une quantité importante de P, dépassant les prélèvements par la culture, était appliquée puisque, de surcroît, les plants de PdT ne développent qu'un système 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 dans l'ensemble du profil cultural, il faut aussi reconnaître qu'il finira par occasionner à long terme une accumulation excessive de P résiduel.

Au fil des décennies, la culture de la PdT a ainsi causé une accumulation non souhaitable de P résiduel dans les sols du Québec. Considérant que l'augmentation de la concentration en P dans le sol se traduit par un accroissement de sa mobilité, une telle accumulation peut en effet être problématique. Le P peut devenir une source de pollution diffuse en migrant des terres agricoles où il est épandu vers les eaux souterraines et de surface adjacentes où, une fois en concentration suffisamment élevée, il entraîne leur eutrophisation puisqu'il en est l'élément limitant. De plus, la concentration en P dans les cours d'eau est aussi corrélée à l'utilisation du territoire, telle que les superficies consacrées à la culture des végétaux et, plus spécifiquement, celles consacrées aux cultures à grands interlignes. Ainsi, plus la proportion d'un bassin versant consacrée aux cultures à grands interlignes est grande, plus le risque de dépasser le critère d'eutrophisation pourrait être élevé. Les producteurs de PdT sont donc d'autant plus concernés par la gestion de la fertilisation P.

En 2002, afin de contrer cet enrichissement excessif, le Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) a adopté le Règlement sur les exploitations agricoles (REA) qui a pour objet d'assurer la protection de l'environnement, particulièrement celle de l'eau et du sol, contre la pollution causée par certaines activités agricoles. Le REA prescrit les doses maximales d'application de P à partir d'un abaque de dépôts maximaux qui tient compte des besoins agronomiques de la plante pour obtenir un rendement de qualité et de la capacité du sol à fixer le P afin d'éviter d'enrichir le sol à des niveaux excessifs. En 2003, une nouvelle grille de référence en fertilisation P a aussi été publiée dans le Guide de référence en

fertilisation du Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Notons ici qu'il faut faire une distinction entre les abaques de dépôts maximaux du REA, qui visent le rendement maximal (quantité de P donnant le plus grand rendement qu'un sol peut produire) et permettent donc des apports de P plus élevés que ceux recommandés par le CRAAQ, qui visent le rendement optimal (quantité de P qui génère le revenu maximal par hectare considérant le coût de l'engrais).



La nouvelle grille de fertilisation du CRAAQ (2003) utilise désormais le concept de taux de saturation en P du sol, plutôt que sa seule richesse en P, afin de tirer profit des plus récentes recherches scientifiques qui démontrent que la quantité de P restant en solution de sol, la plus susceptible d'être perdue dans l'environnement, est d'avantage liée au taux de saturation puisque celui-ci tient compte de la capacité de fixation en P des sols. Les recommandations, élaborées selon une approche agroenvironnementale, permettent de réduire le risque agronomique en sol pauvre en P et le risque environnemental en sol riche en P. Pour trouver la valeur critique environnementale, les chercheurs ont établi quel taux de saturation (P_{M3}/Al_{M3}) dans les sols québécois à PdT engendre le critère néerlandais de $9,7 \text{ mg } P_{\text{Siss}} \text{ L}^{-1}$ dans la solution du sol, valeur limite reconnue avant d'entraîner des impacts négatifs. Dans les sols ayant une teneur en argile inférieure à 20%, cette valeur a été atteinte à un taux de saturation (P_{M3}/Al_{M3}) de 15 % (Khiari et al 2000). Une fois ce seuil dépassé, un producteur ne devrait donc pas appliquer plus de P que les besoins des plantes, soit environ $35 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ pour un rendement de 30 T ha^{-1} . Toutefois, dans la pratique, le seuil cible est en deçà de 15% puisque le REA a fixé à 13,1% (sol avec une teneur en argile < 30 %) la valeur à partir de laquelle l'agronome doit recommander une fertilisation équivalant aux besoins de la culture afin de faire abaisser le taux de saturation en P du sol. Cela représente pour les producteurs une réduction importante des doses employées

antérieurement, 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 précision 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 répétitions statistiques) 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. Ce besoin de vérification ressort particulièrement à l'Île d'Orléans qui est un milieu sensible possédant de fortes pentes avec un sol particulier, 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» a été initié à l'été 2006 dans le cadre du PROGRAMME D'APPUI AU DÉVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE ET DE L'AGROALIMENTAIRE EN RÉGION - 2006-2007 qui visait à soutenir le dynamisme régional, 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). Les objectifs de l'étude préliminaire consistaient à vérifier la précision de la nouvelle grille de fertilisation en sol saturé et à hausser son acceptabilité par les producteurs afin d'aider ceux-ci à rencontrer les exigences du REA du MDDEP. Les résultats obtenus ont fait l'objet d'un rapport préliminaire de recherche 2006. Ils ont permis de constater que les sols saturés à l'étude possédaient en soi une grande capacité à fournir le P à la culture (Landry et al. 2007). Ainsi, les analyses par site n'ont révélé dans l'ensemble aucun effet bénéfique de la fertilisation P sur les paramètres de croissance, de nutrition et de rendement des plants de PdT. Les sols, mêmes non fertilisés, ont permis l'atteinte de hauts rendements et ont soutenu des exportations en P dépassant la dose de fertilisation recommandée de 35 kg de P_2O_5 ha⁻¹. Cependant, les analyses statistiques regroupées, englobant les données de tous les sites de chacun des producteurs, ont fait ressortir une situation légèrement différente. Les analyses révélaient en effet que les plants de certains sites avaient bénéficié significativement de l'apport de P pour leur nutrition et leur croissance. Une légère hausse significative des rendements totaux et vendables était aussi ressortie, portant à penser qu'il se pourrait que dans certaines conditions de sols, la culture bénéficie d'une fertilisation P.

Ces résultats ne portent toutefois pas à la conclusion que l'apport de P supplémentaire à la dose recommandée entraînera systématiquement une hausse des rendements et sont à considérer avec beaucoup de prudence. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une telle réponse et venir moduler la conclusion que l'on peut tirer de telles observations. Certaines conditions spécifiques à l'été 2006, tel le climat, ont pu engendrer cette réponse. De plus, les sites concernés présentaient certaines particularités susceptibles de hausser la réponse au P. Entre autre, le pH qui exerce un contrôle très important sur la disponibilité du P du sol, y était

nettement plus bas. De plus, ces sites étaient non-irrigués. Étant donné que le P se déplace dans le sol par diffusion, il se peut que les plants aient eu plus de difficulté à obtenir le P du sol à ces sites. Il importe donc de vérifier si le lien entre la fertilisation P et ces paramètres est effectif. L'ajout d'années d'étude permettra une analyse plus résistante avec le temps.

C'est dans cet ordre d'idée, considérant l'intérêt et les questionnements soulevés par les résultats de 2006, que les essais ont été reconduits à l'été 2007. Les objectifs de l'étude préliminaire ont été maintenus. Globalement, la poursuite du projet devrait aider les producteurs à adopter une conduite réglementaire tout en gérant le risque de perte de rendement par l'adoption de doses optimales d'application de P. Cependant, la tenue d'une telle recherche sur quelques années permettra en plus de déterminer le rythme auquel les doses de P recommandées entraîneront une réduction du taux de saturation en P des sols saturés. Un certain nombre d'années est en effet requis puisque 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, inférieur ou même légèrement supérieur 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 s'est déroulée à la Ferme Valupierre aux trois sites déjà à l'étude en 2006. Ces sites disposent d'un sol lourd selon la granulométrie effectuée en 2006 et excèdent tous la valeur critique de 13,1% de taux de saturation en P calculée selon le rapport P_{M3}/Al_{M3} (Tableau 1). Les précédents culturaux ont été la céréale grainée en 2004, la prairie de graminées en 2005 et la PdT en 2006 aux trois sites. Jusqu'en 2005, 40 t ha⁻¹ de boues de papetières étaient appliquées au site #4. Depuis 2006, il n'y a cependant eu aucune application de boues de papetières aux trois sites. Aucun site n'a été irrigué au cours de la saison 2007 et n'a subi d'application d'urée foliaire.



Tableau 1. Localisation et caractéristiques des sites à l'étude à l'été 2007, Île d'Orléans.

Localisations	St-Laurent	St-Jean	
# sites	4	5	6
Taux de saturation P_{M3}/Al_{M3} (%)	14,4	24,3	22,7
Granulométrie (argile %)	29,3	26,7	30,3
Dates de plantation	31 mai	22 mai	22 mai
Variétés	Norland	Nordonna	Yukon Gold
Distances de plantation	25 cm	24 cm	25 cm
Espacement entre les rangs	87 cm	87 cm	87 cm

Traitements

Les traitements consistaient en des doses croissantes de P_2O_5 de 0, 35, 70 et $105 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ afin de comprendre 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 (150 kg N ha^{-1}) et potassique ($60 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) ont été appliquées telles que recommandées par le Guide du CRAAQ (2003), en fonction des analyses de sol. L'apport d'N a été fractionné; 100 kg N ha^{-1} ont été appliqués à la plantation. Au site de la Norland, les 50 unités d'N restantes ont été appliquées sous forme 14-0-14 par le producteur lors du buttage du 29 juin. Aux sites de la Nordonna et de la Yukon Gold, l'ajout des 50 unités d'N restantes s'est aussi fait au buttage, le 1^{er} juillet, sous forme de 27-0-0. Les mélanges d'engrais appliqués à la plantation (10:0:6, 10:3.5:6, 10:7:6 et 10:10.5:6) ont été préparés à partir des engrais de base 21-0-0, 27-0-0, 18-46-0 et 0-0-22 (11% Mg). L'application s'est faite en bandes à la main. 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 le producteur 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 avant la plantation afin de caractériser les sites et 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 pourcentage de matière organique, le N total, le P Sissingh (P_{Siss}), le P (P_{M3}) et les éléments mineurs Mehlich-3 (Al_{M3} , Fe_{M3} , Cu_{M3} , Zn_{M3} ...). La granulométrie a fait l'objet d'une analyse lors de la saison d'étude 2006. Les analyses d'automne comprenaient le P_{M3} et les éléments mineurs Mehlich-3, ainsi que le P_{Siss} .



Divers échantillons végétaux ont également été prélevés durant la saison de croissance. Les pétioles de la 4^e feuille mature ont été prélevés sur 40 plants par parcelle au stade de développement des boutons floraux et leur contenu en phosphates ($P-PO_4$) a été analysé. De plus, 4 plants entiers ont été prélevés par parcelle à ce stade (sites #4 et #6 seulement), ainsi qu'au stade 50-75% de floraison (sites #4, #5 et #6), afin d'évaluer les prélèvements en P des plants et de mesurer leur croissance. Enfin, à ces deux mêmes stades, la 4^e feuille mature de 10 plants par parcelle a aussi été recueillie pour l'analyse de son contenu en N, P et K totaux. Le stade boutons se situait entre le 29 juin et le 6 de juillet et le stade 50-75% de floraison entre le 19 et le 23 juillet.



Le rendement a été déterminé à partir des tubercules récoltés sur 6 m de long sur les 2 rangs centraux 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 la masse sèche, le contenu en P (stades boutons et floraison) de la 4^e feuille mature et en P-PO₄ de son pétiole (stade boutons), les prélèvements en P des plants (stades boutons et floraison), les rendements vendable et total, le poids spécifique des tubercules, leur contenu en P et les exportations de P, la richesse P_{M3}, le taux de saturation en P et le P_{Siss} 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 permet de généraliser les conclusions à plus d'un site et à plus d'un cultivar de PdT puisque chaque site produit des cultivars différents. Les effets fixes du modèle étaient les doses de P, les cultivars de PdT et l'interaction entre eux. Le modèle comprenait aussi les effets aléatoires des sites emboîtés dans les types de PdT (cultivars), et des blocs emboîtés dans les sites. De plus, comme le taux initial de saturation en P (P/AI_{init}) des sols variait d'un site à l'autre, cette valeur a été testée comme covariable dans le modèle. Ceci aurait permis de réduire l'erreur en y extrayant la variabilité due au P/AI_{init}, ce qui aurait haussé la précision lors de la comparaison des traitements. Cependant, puisque l'utilisation de la covariable n'a pas réduit la variabilité de façon significative et que son utilisation ne faisait aucune différence au niveau des analyses, elle n'a finalement pas été utilisée. Lors de l'analyse avec les 3 sites, l'examen des variances a cependant fait ressortir que les données du site #5 étaient disparates. Un manque d'uniformité avait d'ailleurs été noté dans les parcelles en ce qui a trait au stade phénologique des plants et à leur espacement. En effet, une émergence inégale des plants et des manques à la levée étaient observés à ce site. Ainsi, au 3 juillet, la plupart des plants étaient au stade boutons, les autres plants étant encore au stade de différenciation du plant, ou pas émergés. Ces données ont donc été écartées pour l'analyse combinée.

Des analyses ont aussi été faites pour chacun des sites séparément afin de permettre au producteur d'obtenir de l'information pour chacun de ses champs. Cependant, étant donné qu'une seule année de données est utilisée, 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. Les conclusions pourraient être différentes pour une autre année de récolte. L'ajout d'années d'étude, tel que prévu initialement au projet, viendra cependant augmenter la puissance de l'analyse par l'ajout d'un facteur (année) dans le modèle et haussera aussi les DDL, permettant une analyse mieux éclairée.



Résultats et discussion :

Cette section présente en détail les résultats des analyses effectuées individuellement par cultivar pour les 3 sites à l'étude. Les résultats découlant des analyses effectuées sur l'ensemble des sites combinés sont également présentés étant donné le caractère plutôt indicatif des analyses par site et considérant que le nombre de données est limité puisqu'une seule année d'étude est utilisée. Il convient donc de considérer les résultats par site avec circonspection. Il demeure toutefois intéressant de considérer ceux-ci puisque un des sites présente un niveau de saturation moindre que les deux autres et beaucoup plus près de la limite de 13.1%. De plus, puisque le but de cette étude est de vérifier l'exactitude de la grille en sol riche en P, il est à propos de vérifier si le comportement du site # 4 sera différent des deux autres sites se situant au-dessus du seuil de richesse excessive de 20%.

À ce sujet, les analyses par site n'ont fait ressortir globalement que peu d'effet de la fertilisation P sur les variables mesurées sur les plants, les tubercules et le sol. Ainsi, les sites #4 et #6 ne présentent chacun que 4 effets significatifs sur une possibilité de 14, tandis que le site #5 n'en présente aucune. Ainsi, le site #4 ne présente pas plus de liens significatifs avec la fertilisation pour les paramètres étudiés que le site #6, beaucoup plus riche. En fait, dans l'ensemble, les sites #4 et #6 ont souvent des comportements similaires. Le regroupement des données des sites #4 et #6 pour les analyses combinées semble donc à propos et a permis de faire ressortir un effet plus important de la fertilisation P. Il est ici intéressant de rappeler qu'à l'été 2006, an 1 de l'étude, alors que les sites plus riches (#5 et #6) ne présentaient aucun lien significatif (excepté le contenu en P des tubercules au site #6), plusieurs impacts significatifs étaient mesurés au site #4. Ceci démontre l'intérêt d'effectuer une telle étude sur plus d'une année.

Les sections qui suivent présentent en détail les analyses des variables étudiées pour chacun des sites à l'essai. Les résultats par site sont donc tous présentés suivi des résultats des analyses combinées rapportées à l'intérieur des mêmes tableaux. La discussion est répartie en trois grands thèmes, soit le développement et la nutrition des plants, la productivité des plants et la qualité des tubercules, ainsi que la fertilité du sol.

Développement et nutrition des plants

Les analyses, tant par site que combinées, indiquent que la fertilisation P n'a aucunement apporté de différence au niveau de la croissance des plants (Tableau 2). Ceux-ci présentaient un bon développement indépendamment de la fertilisation P, avec une masse sèche moyenne de 22,1 et 13,3 g plant⁻¹ aux stades boutons pour la Norland et la Yukon Gold respectivement et de 59,7, 51,5 et 46,3 g plant⁻¹ au stade 50-75% de floraison pour la Norland, la Nordonna et la Yukon Gold respectivement (Tableau 3). Par contre, la fertilisation P a fortement influencé la concentration en P des tissus des plants entiers au premier des deux stades testés (Tableau 2). L'analyse combinée révèle donc au stade boutons une hausse de 17% ($R^2=0,94$) de la concentration en P des plants ayant reçu la plus forte dose de fertilisation (Figure 1). La concentration en P passe ainsi de 4 055 à 4 702 mg kg⁻¹ entre les parcelles non fertilisées et celles ayant reçu 105 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Tableau 4). Par la suite, au stade 50-75% de floraison, les plants présentaient des teneurs en P similaires quelle que soit la dose de P appliquée, avec une valeur moyenne toutes doses confondues de 3 162, 4 217 et 2 731 mg P kg⁻¹ pour la Norland, la Nordonna et la Yukon Gold respectivement (Tableau 4).

Tableau 2. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le développement et le prélèvement en P des plants entiers de pommes de terre en cours de saison.

Source de variation	Stade boutons			50-75% floraison		
	Masse sèche	Contenu P	Prélèvement P	Masse sèche	Contenu P	Prélèvement P
DOSE site # 4	ns [†]	**	ns	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	**	-	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-	-	-
DOSE site # 5	.	.	.	ns	ns	ns
Effet linéaire	.	.	.	-	-	-
Effet quadratique	.	.	.	-	-	-
DOSE site # 6	ns	**	ns	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	**	-	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-	-	-
DOSE sites combinés [‡]	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; données combinées pour tous les sites, n = 9. [‡] Analyses effectuées en combinant les résultats des sites #4 et #6.

Tableau 3. Impact de la fertilisation phosphatée sur la croissance des plants en cours de saison.

Stades	Matière sèche (g plant ⁻¹) [†]					
	Boutons			50-75% floraison		
	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Norland	Nordonna	Yukon Gold
Variétés						
# sites	4	5	6	4	5	6
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	23,0 ± 1,63	.	12,3 ± 1,24	66,4 ± 6,23	64,5 ± 10,39	46,1 ± 4,45
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	23,0 ± 1,63	.	14,0 ± 1,24	56,3 ± 6,23	48,2 ± 10,39	49,6 ± 4,45
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	22,1 ± 1,63	.	13,6 ± 1,24	46,9 ± 6,23	40,4 ± 10,39	47,7 ± 4,45
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	20,2 ± 1,63	.	13,4 ± 1,24	69,2 ± 6,23	52,9 ± 10,39	41,7 ± 4,45
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	14,4	24,3	22,7
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	29,3	26,7	30,3

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

Tableau 4. Impact de la fertilisation phosphatée sur la teneur en P des plants entiers en cours de saison.

Stades	Contenu en P (mg kg ⁻¹) [†]						
	Boutons				50-75% floraison		
	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés	Norland	Nordonna	Yukon Gold
Variétés							
# sites	4	5	6		4	5	6
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4072 ± 213,3	.	4038 ± 108,2	4055 ± 221,0	3259 ± 118,4	4131 ± 142,8	2632 ± 87,2
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4580 ± 213,3	.	4063 ± 108,2	4322 ± 221,0	3023 ± 118,4	4272 ± 142,8	2619 ± 87,2
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4956 ± 213,3	.	4342 ± 108,2	4649 ± 221,0	3475 ± 118,4	4204 ± 142,8	2795 ± 87,2
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4815 ± 213,3	.	4589 ± 108,2	4702 ± 221,0	2892 ± 118,4	4259 ± 142,8	2876 ± 87,2
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	-	14,4	24,3	22,7
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	-	29,3	26,7	30,3

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

Le calcul des prélèvements indique que la hausse de la concentration en P des tissus au stade boutons, due à l'ajout de P, ne s'est pas traduite par des prélèvements accrus en P (Tableau 2). En fait, aux deux stades étudiés, les prélèvements ont été similaires pour tous les taux de P. Au stade boutons, la Norland et la Yukon Gold ont donc prélevé en moyenne respectivement, 4,7 et 2,2 kg P ha⁻¹ (Tableau 5). Les prélèvements en P des parties aériennes atteignaient donc, 36-38 jours seulement après la plantation, au moment où la tubérisation débute, 15% à 31 % de la dose d'application de P recommandée. Au stade suivant, les prélèvements s'élevaient à 4,9 et 8,5 kg P ha⁻¹ pour la Norland et la Yukon Gold respectivement. Ceci signifie que de 33% à 58% de la dose d'application de P recommandée se retrouve dans les fanes, 53-58 jours après la plantation (Tableau 5).

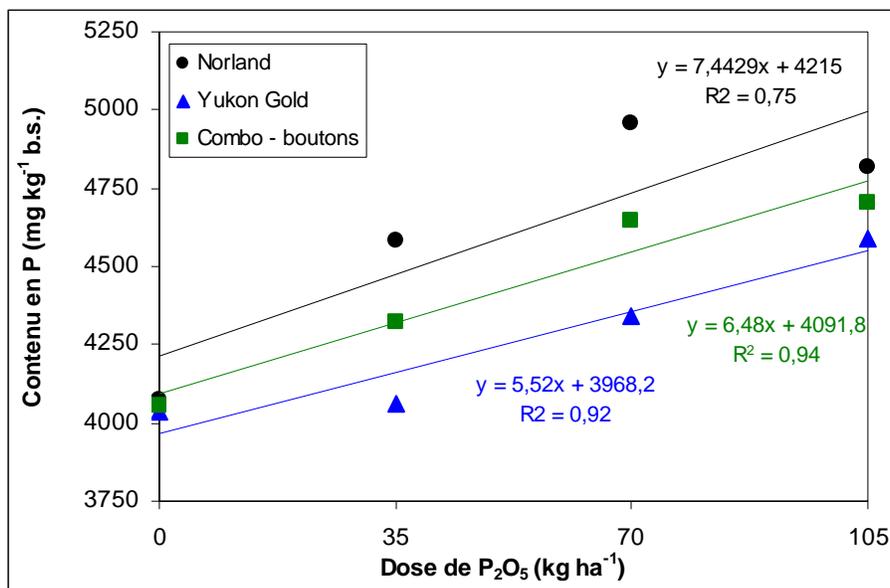


Figure 1. Courbe de régression liant la fertilisation P et le contenu en P des plants entiers de pommes de terre au stade boutons.

Tableau 5. Impact de la fertilisation phosphatée sur le prélèvement en P des plants entiers en cours de saison.

Stades	Prélèvement en P (kg ha ⁻¹) [†]					
	Boutons			50-75% floraison		
Variétés	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Norland	Nordonna	Yukon Gold
# sites	4	5	6	4	5	6
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4,3 ± 0,33	·	1,9 ± 0,20	10,0 ± 0,88	7,1 ± 1,18	4,7 ± 0,58
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4,9 ± 0,33	·	2,2 ± 0,20	7,9 ± 0,88	5,5 ± 1,18	5,0 ± 0,58
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	5,1 ± 0,33	·	2,3 ± 0,20	7,5 ± 0,88	4,6 ± 1,18	5,2 ± 0,58
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4,5 ± 0,33	·	2,4 ± 0,20	9,2 ± 0,88	6,0 ± 1,18	4,7 ± 0,58
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	14,4	24,3	22,7
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	29,3	26,7	30,3

[†] Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

Lorsque l'analyse de la nutrition en P se fait uniquement sur la 4^e feuille mature des plants, partie reconnue comme un bon indicateur du statut nutritionnel, l'impact de la fertilisation sur la nutrition ressort davantage. Tant la concentration en P de la feuille entière, que le contenu en P-PO₄ des pétioles démontrent alors hors de tout doute que la nutrition en P des plants est haussée, aux deux stades étudiés, par la fertilisation P (Tableau 6). Ainsi, les analyses combinées, au stade boutons, montrent des hausses significatives de 17% et 29% de la concentration en P de la feuille entière ($R^2 = 98\%$) (Figure 2) et du contenu en P-PO₄ des pétioles ($R^2 = 99\%$) (Figure 3) respectivement, suivant l'ajout de la plus forte fertilisation P. Cependant, il est important de noter que la nutrition des plants demeure excellente quelle que soit la fertilisation, avec des concentrations en P de la 4^e feuille mature élevées pour tous les traitements, même dans les parcelles non fertilisées, où la concentration s'élève à 4 128 mg P kg⁻¹ (Tableau 7). Cette valeur est bien au-delà du seuil de suffisance de 2 200 mg P kg⁻¹ pour ce stade de croissance (Rowe 1993).

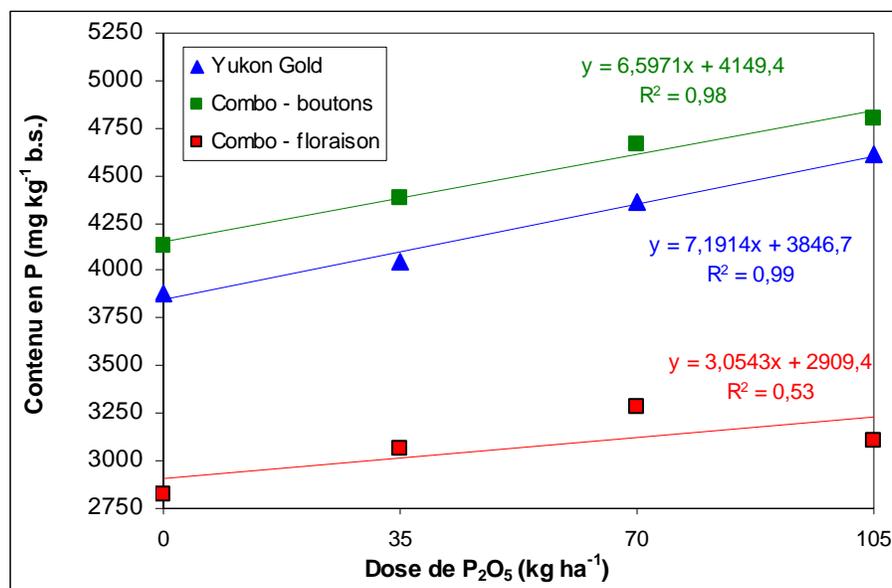


Figure 2. Courbe de régression liant la fertilisation P et le contenu en P de la 4^e feuille des plants de pommes de terre en cours de saison.

La concentration en nutriments change dans les tissus au cours de la croissance. La plupart des nutriments atteignent leur concentration maximale durant l'initiation des tubercules (stade boutons), pour décroître ensuite durant la maturation. Ainsi, si la concentration en nutriments est suffisante au boutons, elle est généralement par la suite plus qu'adéquate pour assurer la croissance des plants. Il est donc tout à fait normal que la concentration en P de la 4^e feuille ait baissé entre le stade boutons et 50-75% de floraison. D'ailleurs, bien que l'effet de fertilisation perdure au stade 50-75% de floraison, il s'estompe avec une hausse linéaire significative de seulement 107 mg P kg⁻¹ ($R^2 = 53\%$) de la concentration en P de la 4^e feuille par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés, comparativement à 231 mg P kg⁻¹ au stade boutons (Figure 2). Les contenus en P-PO₄ mesurés dans les pétioles au stade boutons corroborent les analyses de feuilles entières. Les concentrations sont élevées pour tous les traitements, même dans les parcelles témoins, où la seule richesse du sol en P a permis d'atteindre le seuil de suffisance de 2 250 mg P kg⁻¹ (CPVQ 1985)(Tableau 8).

Tableau 6. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le statut nutritionnel de la 4^e feuille des plants de pommes de terre en cours de saison.

Source de variation	Contenu en P de la 4 ^e feuille		P-PO ₄ pétioles
	Stade boutons	50-75% floraison	Stade boutons
DOSE site # 4	ns [†]	ns	**
Effet linéaire	-	-	***
Effet quadratique	-	-	-
DOSE site # 5	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-
DOSE site # 6	*	ns	ns
Effet linéaire	**	-	-
Effet quadratique	-	-	-
DOSE sites combinés [‡]	***	*	**
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; données combinées pour tous les sites, n = 9. [‡] Analyses effectuées en combinant les résultats des sites #4 et #6.

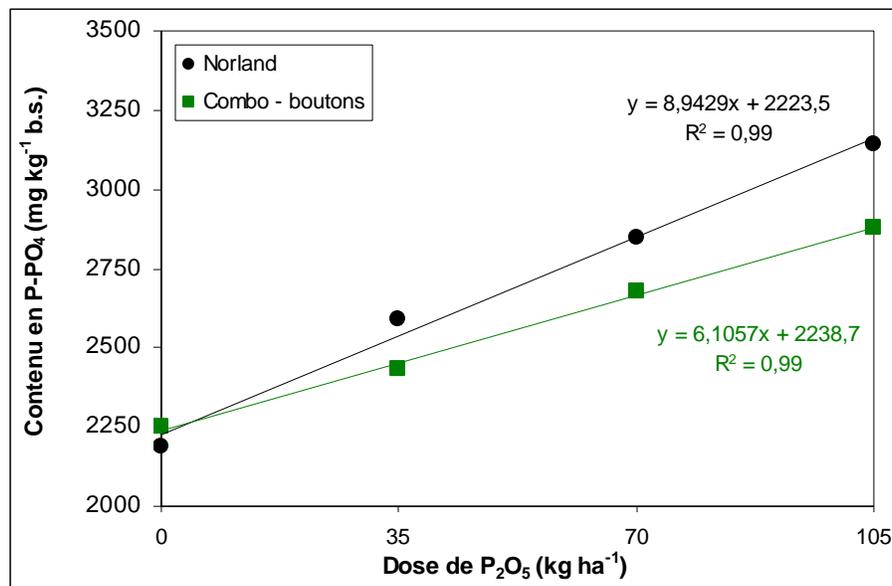


Figure 3. Courbe de régression liant la fertilisation P et le contenu en phosphates des pétioles de la 4^e feuille des plants de pommes de terre au stade boutons.

Tableau 7. Impact de la fertilisation phosphatée sur la teneur en P de la 4^e feuille en cours de saison.

Stades	Contenu en P (mg kg ⁻¹) [†]							
	Boutons				50-75% floraison			
	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés
Variétés								
# sites	4	5	6		4	5	6	
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4379 ± 177,8	4166 ± 274,0	3878 ± 138,0	4128 ± 286,8	2887 ± 191,6	4612 ± 283,0	2760 ± 128,6	2824 ± 139,3
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4725 ± 177,8	4015 ± 274,0	4045 ± 138,0	4385 ± 286,8	3153 ± 191,6	4388 ± 283,0	2974 ± 128,6	3064 ± 139,3
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4969 ± 177,8	4091 ± 274,0	4363 ± 138,0	4666 ± 286,8	3417 ± 191,6	4458 ± 283,0	3150 ± 128,6	3284 ± 139,3
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	4996 ± 177,8	4272 ± 274,0	4611 ± 138,0	4804 ± 286,8	3237 ± 191,6	4507 ± 283,0	2976 ± 128,6	3107 ± 139,3
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	-	14,4	24,3	22,7	-
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	-	29,3	26,7	30,3	-

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

Tableau 8. Impact de la fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphates du pétiole de la 4^e feuille au stade boutons.

Variétés	P-PO ₄ (mg kg ⁻¹) [†]			
	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés
	# sites	4	5	6
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2189 ± 179,1	1856 ± 221,2	2308 ± 130,1	2249 ± 169,3
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2588 ± 179,1	1932 ± 247,3	2274 ± 130,1	2431 ± 169,3
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2850 ± 179,1	2118 ± 221,2	2506 ± 130,1	2678 ± 169,3
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	3145 ± 179,1	2112 ± 221,2	2595 ± 130,1	2870 ± 169,3
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	-
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	-

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

Productivité des plants et qualité des tubercules

Les analyses effectuées par site, autant sur le rendement total que vendable, indiquent que les PdT n'ont pas répondu significativement à l'ajout de P (Tableau 9). Cependant, l'observation des valeurs des rendements totaux mesurés à chacun des sites semblait indiquer une légère hausse, la production passant de 44,8 à 47,5 T ha⁻¹ et de 34,0 à 37,2 T ha⁻¹ pour la Norland et la Yukon Gold respectivement (Tableau 10). Le rendement vendable présentait une hausse similaire de 2,1 et 3,5 T ha⁻¹ entre les parcelles non fertilisées et celles ayant reçu la dose de 105 kg P₂O₅ ha⁻¹ pour la Norland et la Yukon Gold respectivement (Tableau 10). Cependant, il faut noter qu'au site de la Yukon Gold, l'application de la dose recommandée de 35 kg P₂O₅ ha⁻¹ permet d'atteindre un rendement très proche du rendement maximal. Les plants de Norland, cultivés dans un sol beaucoup plus près du seuil de saturation de 13% (Tableau 1, 14,4%), semblent par contre bénéficier davantage des doses plus élevées puisque 2,6 et 2,4 T ha⁻¹ de tubercules séparent les rendements totaux et vendables respectivement, des parcelles ayant reçu la dose de P recommandée et celles fertilisées au taux de 105 kg P₂O₅ ha⁻¹. D'autres études ont aussi démontré que les doses optimales de fertilisation P peuvent varier selon les variétés de PdT. 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.

Tableau 9. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le rendement, la qualité des tubercules des pommes de terre et les exportations de P.

Source de variation	Rendement		Poids spécifique	P tubercule	Exportations P
	Total	Vendable			
DOSE site # 4	ns [†]	ns	ns	*	(0.0614)
Effet linéaire	-	-	-	**	*
Effet quadratique	-	-	-	-	-
DOSE site # 5	ns	ns	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-	-	-
DOSE site # 6	ns	ns	ns	*	**
Effet linéaire	-	-	-	**	***
Effet quadratique	-	-	-	-	-
DOSE sites combinés [‡]	(0.1125)	(0.1585)	ns	**	***
Effet linéaire	*	*	-	***	***
Effet quadratique	ns	ns	ns	**	***

[†]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; données combinées pour tous les sites, n = 9. [‡] Analyses effectuées en combinant les résultats des sites #4 et #6.

Tableau 10. Impact de la fertilisation phosphatée sur les rendements vendable et total en tubercules.

Variétés	Rendement vendable (T ha ⁻¹) [†]				Rendement total (T ha ⁻¹) [†]			
	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés
# sites	4	5	6		4	5	6	
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	41,5 ± 1,78	28,1 ± 5,38	31,4 ± 1,02	36,4 ± 4,79	44,8 ± 1,89	31,5 ± 5,72	34,0 ± 0,92	39,4 ± 5,31
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	41,2 ± 1,78	27,5 ± 5,38	33,5 ± 1,02	37,3 ± 4,79	44,9 ± 1,89	30,8 ± 5,72	36,5 ± 0,92	40,7 ± 5,31
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	43,5 ± 1,78	31,6 ± 5,38	32,5 ± 1,02	38,0 ± 4,79	47,5 ± 1,89	35,8 ± 5,72	35,5 ± 0,92	41,5 ± 5,31
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	43,6 ± 1,78	23,0 ± 5,38	34,9 ± 1,02	39,3 ± 4,79	47,5 ± 1,89	26,7 ± 5,72	37,2 ± 0,92	42,4 ± 5,31
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	-	14,4	24,3	22,7	-
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	-	29,3	26,7	30,3	-

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

Le regroupement des données dans les analyses combinées fait toutefois ressortir une forte tendance ($R^2 = 0,99$, $P = 0,1125$) suggérant une hausse linéaire de 1 T ha⁻¹ de tubercules totaux par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés (Figure 4). Une relation linéaire ($R^2 = 0,98$, $P = 0,1585$) indique aussi une hausse des rendements vendables de 0,94 T ha⁻¹ par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés (Figure 4). Les plants ayant reçu la plus forte dose de P (105 kg de P₂O₅ ha⁻¹) ont donc produit un rendement vendable de 8% supérieur à celui des plants des parcelles non fertilisées, mais de seulement 5% supérieur à celui des parcelles ayant reçu la dose recommandée (35 kg P₂O₅ ha⁻¹). Étant donné que le plateau de production n'a pas été atteint, la dose optimale de fertilisation P ne peut être calculée. Cependant, considérant un prix de vente de 0,22 \$ kg⁻¹ de PdT et d'achat

d'engrais P de 1,30\$ kg⁻¹ de P₂O₅, cette hausse, bien que modeste, est rentable. Il ne faut toutefois pas conclure que l'apport de P supplémentaire à la dose recommandée dans la culture des cultivars de table entraînera systématiquement une hausse des rendements. Il se peut que certaines conditions spécifiques à l'été 2007, tel le climat, aient engendré cette réponse. De plus, il demeure que d'excellents rendements totaux et vendables ont été obtenus à tous les taux de P, même dans les parcelles non fertilisées. Les parcelles non fertilisées présentaient en effet une productivité tout à fait comparable au rendement vendable moyen de la région «Capitale Nationale (03)» de 30,9 T ha⁻¹ (Institut de la statistique du Québec 2006).

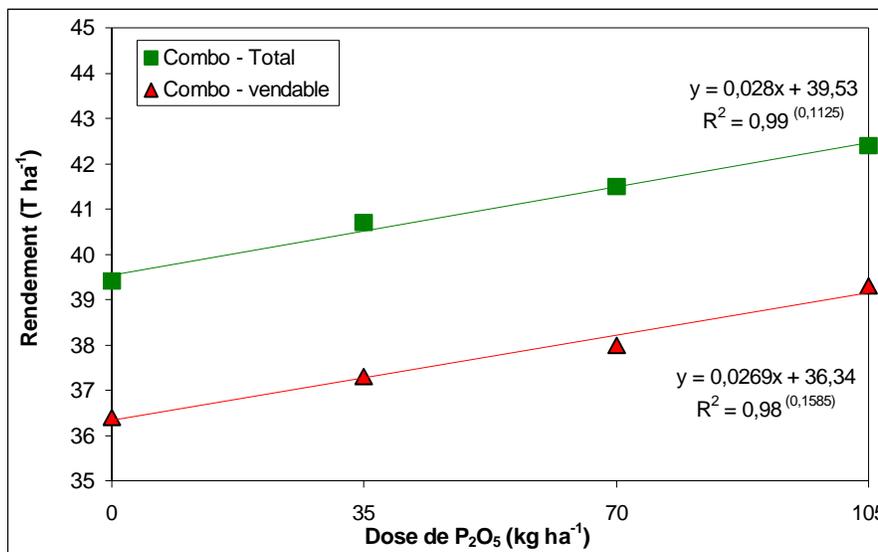


Figure 4. Courbe de régression liant la fertilisation P et les rendements en tubercules à la récolte.

D'autres années d'étude seront donc nécessaires afin de tirer des conclusions définitives étant donné que les résultats obtenus sont difficiles à cerner. D'une part, si il est vrai que les relations mesurées possèdent des R² très élevés, il demeure que le seuil de probabilité (P) des analyses dépasse le seuil usuel de signification de P=0,05 et que les gains sont sous les 10%. Par contre, il faut considérer que l'analyse porte sur des 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. D'ailleurs, une relation significative (seuil de 0.05) entre le taux de fertilisation et le rendement avait été trouvée en 2006 à trois sites voisins possédant le même cultivar mais qui n'étaient pas à l'étude cette année. La fertilisation P avait fait augmenter linéairement (R² = 89%) de 1,3 T ha⁻¹ les rendements totaux par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés. Cependant, le pH qui exerce un contrôle très important sur la disponibilité du P du sol, était nettement plus bas à ces sites comparativement à ceux des sites de cette année. Puisqu'un pH faible entraîne une hausse de l'activité du fer et de l'aluminium des sols qui réagissent alors avec le P, la disponibilité du P a pu être réduite à ces sites. Les analyses faites en 2006 aux mêmes sites que ceux utilisés encore cette année montraient de leur côté d'excellents rendements totaux sans aucune réponse à la fertilisation P.

Tableau 11. Impact de la fertilisation phosphatée sur le contenu en P des tubercules de pommes de terre et les exportations de P à la récolte.

Variétés # sites	P tubercules (mg kg ⁻¹ b.s.) [†]				Exportations P (kg ha ⁻¹ b.h.) [†]			
	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés	Norland	Nordonna	Yukon Gold	Combinés
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2081 ± 80,7	2361 ± 155,6	1295 ± 35,2	1728 ± 451,8	18,1 ± 0,94	15,3 ± 2,77	10,8 ± 0,31	14,9 ± 4,25
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2302 ± 80,7	2493 ± 155,6	1382 ± 35,2	1835 ± 451,8	20,5 ± 0,94	14,9 ± 2,77	12,2 ± 0,31	16,4 ± 4,25
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2335 ± 80,7	2495 ± 155,6	1465 ± 35,2	1910 ± 451,8	21,7 ± 0,94	17,1 ± 2,77	12,5 ± 0,31	16,8 ± 4,25
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2520 ± 80,7	2276 ± 155,6	1489 ± 35,2	1959 ± 451,8	22,6 ± 0,94	11,7 ± 2,77	13,5 ± 0,31	17,8 ± 4,25
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	-	14,4	24,3	22,7	-
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	-	29,3	26,7	30,3	-

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

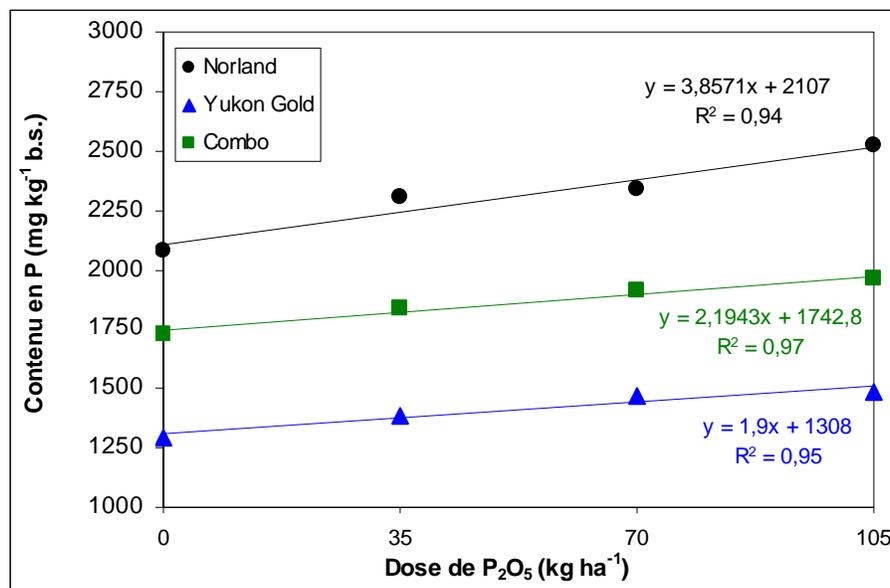


Figure 5. Courbe de régression liant la fertilisation P et le contenu en P des tubercules de pommes de terre à la récolte.

L'analyse du contenu en P des tubercules, aussi bien par site que combinée, montre pour sa part que la fertilisation a significativement haussé leur concentration en P (Tableau 9). Dans tous les cas, il s'agit d'une relation linéaire ayant un R² élevé, entre 0,94 et 0,97, qui indique une hausse de la concentration en P de 135, 67 et 77 mg P kg⁻¹ par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés pour la Norland, la Yukon Gold et l'analyse combinée respectivement (Figure 5). La teneur des tubercules en P pour les sites combinés passe ainsi de 1 728 à 1 959 mg P kg⁻¹, soit une hausse de 13% (Tableau 11). Il n'est donc pas étonnant que les exportations aient aussi été augmentées par la fertilisation P puisque c'est en multipliant les rendements totaux par le contenu en P des tubercules que l'on obtient la quantité de P prélevé du sol et exporté en dehors des champs par la récolte (Tableau 9). Ce paramètre est 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. Les exportations en P des

parcelles ayant reçu la plus forte fertilisation dépassent ainsi de 24%, 23% et 18%, celles des parcelles non fertilisées pour la Norland, la Yukon Gold et l'analyse combinée, respectivement (Figure 6). Pour ces mêmes sites, 3,4, 1,9 et 2,1 kg P₂O₅ ha⁻¹ de plus sont donc exportés par tranche de 35 kg de P₂O₅ apportés. C'est dire que les exportations sont loin de compenser lors d'apports importants de P.

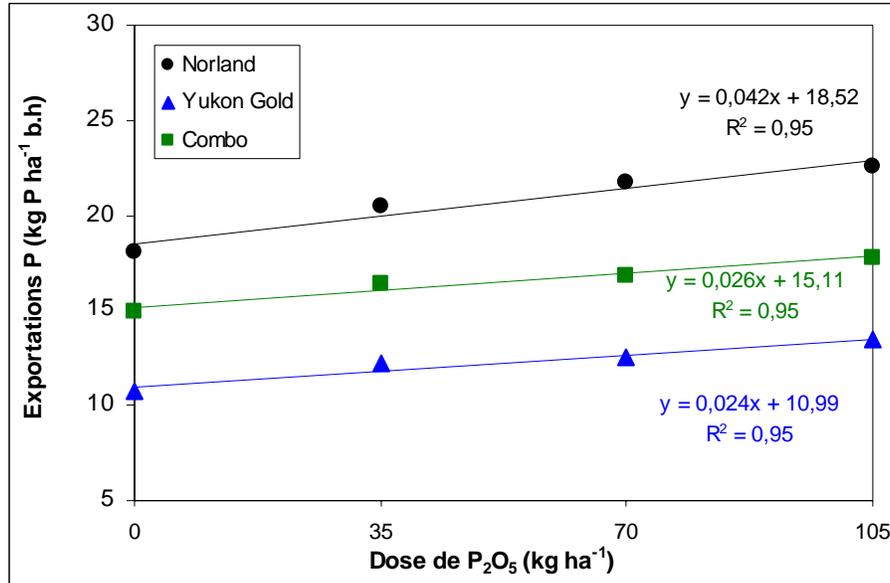


Figure 6. Courbe de régression liant la fertilisation P et les exportations de P à la récolte.

En fait, en se basant sur un bilan de P simplifié calculé avec les données combinées (apports de P sous forme d'engrais - P exporté à la récolte par les tubercules), on constate que les parcelles non fertilisées ont un bilan négatif (-34,1 kg de P₂O₅ ha⁻¹) et que celles ayant reçu la dose de P recommandée ont un bilan presque neutre (-2,6 kg de P₂O₅ ha⁻¹). Par contre, des excès de 31,5 et 64,2 kg de P₂O₅ ha⁻¹ résultent de l'application de 70 et 105 kg de P₂O₅ ha⁻¹. À ces doses, 42% et 61% de l'engrais ajouté se retrouve donc sous forme de P résiduel au niveau du sol, où une partie contribuera à hausser davantage le taux de saturation en P, le reste étant d'autant plus à risque d'être perdu que le sol est déjà saturé. Il sera donc intéressant de suivre l'évolution du P du sol au cours des années. À long terme, il devrait être possible de calculer quel doit être le bilan de P pour faire diminuer la teneur en P_{M3}/Al_{M3} du sol. 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).

Le calcul des exportations fait aussi ressortir clairement que celles-ci sont très similaires de la dose de fertilisation recommandée de 35 kg de P₂O₅ ha⁻¹. Ce calcul renseigne aussi sur la capacité du sol à fournir le P à la culture. Toujours selon les résultats du tableau 11, on constate donc que le sol non fertilisé possède une bonne capacité de fourniture en P puisque les exportations y atteignent 34,1 kg P₂O₅ ha⁻¹. Par ailleurs, la fertilisation n'a eu aucun impact sur la qualité des tubercules (Tableau 9). Le poids spécifique demeure similaire

avec une valeur moyenne toutes doses confondues de 1,073, 1,075 et de 1,095 pour la Norland, la Nordonna et la Yukon Gold respectivement (tableau 12) .

Tableau 12. Impact de la fertilisation phosphatée sur la qualité des tubercules des pommes de terre à la récolte.

Variétés # sites	Poids spécifique [†]		
	Norland 4	Nordonna 5	Yukon Gold 6
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	1,073 ± 0,0014	1,076 ± 0,0008	1,093 ± 0,0012
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	1,075 ± 0,0014	1,074 ± 0,0008	1,095 ± 0,0012
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	1,071 ± 0,0014	1,076 ± 0,0008	1,094 ± 0,0012
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	1,073 ± 0,0014	1,074 ± 0,0008	1,096 ± 0,0012
P _{M3} /Al _{M3} (%)	14,4	24,3	22,7
Argile (%)	29,3	26,7	30,3

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

Fertilité du sol

Tel qu'attendu, étant donné la richesse en P des sites, aucun effet de fertilisation P n'a été mesuré en lien avec le contenu en P du sol (Tableau 13). Les sites présentent donc à la récolte, indépendamment de la fertilisation, un contenu moyen en P_{M3} de 176, 264 et 256 kg ha⁻¹, pour une saturation P_{M3}/Al_{M3} de 14,1%, 23,4% et 21,8% aux sites de la Norland, de la Nordonna et de la Yukon Gold respectivement (Tableau 14). Il ne faut cependant pas conclure que le taux de saturation en P de ces sols ne sera pas haussé suivant des apports de P élevés à long terme. Le taux de saturation en P du sol évolue en effet en « dents de scie » et une tendance générale n'est décelable que sur plusieurs années. Il est plutôt probable que le bilan de P fortement positif occasionné par l'utilisation de la dose de 105 kg P₂O₅ ha⁻¹, pour laquelle 61% de l'engrais ajouté n'est pas exporté, favorisera à long terme la hausse du taux de saturation en P du sol. 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.

Finalement, aucun lien n'a pu être établi entre la fertilisation P et le P disponible dans la solution du sol (P_{Siss}) à aucun des sites (Tableau 13). À ces taux de richesse, la saturation en P du sol a donc été plus déterminante que l'apport de P soluble des engrais. D'ailleurs, les sols plus saturés des sites # 5 et # 6 contiennent effectivement beaucoup plus de P en solution du sol susceptible d'être perdu dans l'environnement et de contribuer à la pollution diffuse. Comparativement au site # 4 qui a un P_{Siss} de 8,0 mg kg⁻¹, les sites # 5 et # 6 présentent des concentrations de 11,8 et 11,2 mg P_{Siss} kg⁻¹, soit 47% et 40% de plus, respectivement. La concentration de P en solution du sol des sites # 5 et # 6 dépasse donc la valeur critique environnementale néerlandaise de 9,7 mg P_{Siss} L⁻¹. Par contre, ce n'est pas le cas du site # 4 dont le taux de saturation est effectivement inférieur au seuil de 15% du Guide de fertilisation du CRAAQ (2003), quoique supérieur à la limite environnementale de 13,1% du REA. De plus, en faisant le graphique du P_{Siss} en fonction du taux de saturation du sol avec les données des sites combinés, on peut visualiser qu'il y a effectivement une relation très forte (R² = 0,86) entre le taux de saturation P_{M3}/Al_{M3} et le P_{Siss}. Ainsi, une hausse de 1% du taux de saturation provoque une augmentation de 2,6 mg P_{Siss} kg⁻¹ (Figure 7).

Tableau 13. Analyse de variance de l'influence du taux de fertilisation phosphatée sur le contenu en P_{M3} , le taux de saturation P_{M3}/Al_{M3} et le P_{Siss} du sol à la récolte.

Source de variation	P_{M3} du sol	P_{M3}/Al_{M3}	P_{Siss}
DOSE site # 4	ns [†]	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-
DOSE site # 5	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-
DOSE site # 6	ns	ns	ns
Effet linéaire	-	-	-
Effet quadratique	-	-	-
DOSE sites combinés [‡]	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; données combinées pour tous les sites, n = 9. [‡] Analyses effectuées en combinant les résultats des sites #4 et #6.

Tableau 14. Impact de la fertilisation phosphatée sur le contenu en P_{M3} et le taux de saturation du sol à la récolte.

Variétés # sites	P_{M3} (mg kg ⁻¹) [†]			P_{M3}/Al_M (%) [†]		
	Norland 4	Nordonna 5	Yukon Gold 6	Norland 4	Nordonna 5	Yukon Gold 6
0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	164,3 ± 18,77	262,3 ± 24,91	252,7 ± 7,59	13,5 ± 1,44	23,9 ± 2,84	21,9 ± 0,76
35 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	176,7 ± 18,77	273,3 ± 24,91	253,7 ± 7,59	14,2 ± 1,44	24,7 ± 2,84	21,2 ± 0,76
70 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	177,7 ± 18,77	264,7 ± 24,91	258,0 ± 7,59	13,8 ± 1,44	22,6 ± 2,84	22,3 ± 0,76
105 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	185,3 ± 18,77	254,7 ± 24,91	258,7 ± 7,59	14,8 ± 1,44	22,3 ± 2,84	21,8 ± 0,76
P_{M3}/Al_{M3} (%)	14,4	24,3	22,7	14,4	24,3	22,7
Argile (%)	29,3	26,7	30,3	29,3	26,7	30,3

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

À l'inverse, cette relation entre le taux de saturation P_{M3}/Al_{M3} et le P_{Siss} permet aussi de calculer quel taux de saturation est lié à l'atteinte du critère de 9,7 mg P_{Siss} kg⁻¹ pour ces sols en particulier. Le taux de saturation critique personnalisé de ces sols serait ainsi de 18,2%. Cette valeur dépasse la valeur seuil de 15% du Guide de fertilisation du CRAAQ (2003) au-delà de laquelle peu de réponse aux engrais est attendu pour la PdT. Elle est également beaucoup plus élevée que le seuil environnemental de 13,1 % du REA dicté en fonction de la texture du sol. Cet écart est d'autant plus intrigant que les sols étudiés contiennent une bonne partie d'argile, supérieure à 20%. Puisque pour un même taux de saturation, les sols contenant plus d'argile libèrent plus de P_{Siss}, les sols étudiés auraient dû libérer la valeur critique de 9,7 mg P_{Siss} kg⁻¹ en deçà du seuil de 15% prédit par la grille (CRAAQ 2003) qui s'applique à des sols contenant moins de 20% d'argile. La tendance des

plants de PdT à répondre à l'application d'engrais découle peut-être de cette libération moindre qu'attendue du P en solution de sol. Il serait donc à propos de regarder la possibilité de faire plus d'une grille pour la PdT, tel que déjà fait pour le maïs grain, où l'on sépare les sols en fonction de leur teneur en argile, ou pour les prairies et pâturages, comprenant trois grilles établies en fonction du contenu en Al_{M3} (CRAAQ 2003).

Tableau 15. Impact de la fertilisation phosphatée sur le contenu en P_{Siss} du sol à la récolte.

Variétés	P_{Siss} dans le sol à la récolte ($mg\ kg^{-1}$) [†]		
	Norland	Nordonna	Yukon Gold
# sites	4	5	6
0 $kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$	7,4 ± 0,81	11,7 ± 1,55	11,4 ± 1,60
35 $kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$	8,4 ± 0,81	11,7 ± 1,55	9,9 ± 1,60
70 $kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$	7,7 ± 0,81	12,4 ± 1,55	12,9 ± 1,60
105 $kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$	8,5 ± 0,81	11,3 ± 1,55	10,6 ± 1,60
P_{M3}/Al_{M3} (%)	14,4	24,3	22,7
Argile (%)	29,3	26,7	30,3

[†]Moyennes et erreurs-types du «lsmean» de SAS.

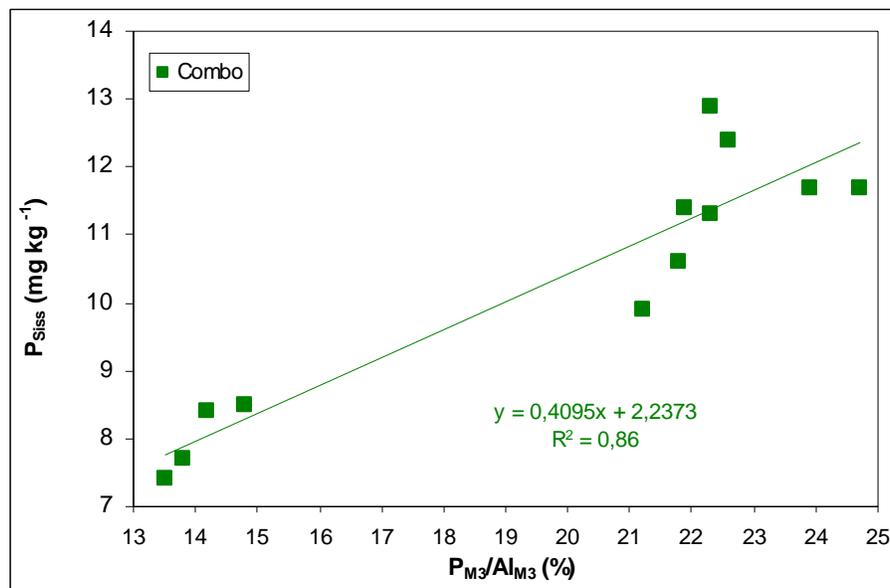


Figure 7. Courbe de régression liant le taux de saturation P et le contenu en P_{Siss} du sol à la récolte.