



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT
ИИ ВСВОЕИЛІВОИИЕИИ
ET DE DÉVELOPPEMENT

RAPPORT FINAL

VALIDATION DES OUTILS PRÉCONISÉS POUR RÉDUIRE LA SATURATION DES SOLS EN PHOSPHORE PAR UNE ANALYSE DE L'ÉTAT DES SOLS ET DU BILAN DE PHOSPHORE DANS UNE RÉGION À FORTE DENSITÉ ANIMALE

PROJET Innov'Action **IA216665**

Responsable scientifique : Marc-Olivier GASSER, chercheur
Co-auteurs : Marie-Eve TREMBLAY, professionnelle de recherche
Francis ALLARD, professionnel de recherche

Rapport présenté au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

Date : 1^{er} mars 2019

Projet IRDA # : 400034

www.
irda.
qc.ca

L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'Innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

Notre vision

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRES

PROGRAMME

**INNOV'
ACTION**

AGROALIMENTAIRE

Cultivons l'avenir 2
Une initiative fédérale-provinciale-territoriale

Canada

Québec

Validation des outils préconisés pour réduire la saturation des sols en phosphore par une analyse de l'état des sols et du bilan de phosphore dans une région à forte densité animale

Rapport final PROJET IA216665

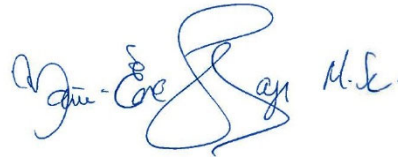
Présenté au :

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
Programme Innov'Action Agroalimentaire – Volet 2

Préparé par :



Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.
IRDA



Marie-Eve Tremblay, agr. M. Sc.
IRDA



Francis Allard, agr. M. Sc
IRDA

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Gasser, M.-O., M.-E Tremblay et F. Allard. 2019. Validation des outils préconisés pour réduire la saturation des sols en phosphore par une analyse de l'état des sols et du bilan de phosphore dans une région à forte densité animale. Rapport final. IRDA. 34 pages + Annexes

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

RESPONSABLE DE L'ÉTABLISSEMENT

Stéphane P. Lemay, ing., P.Eng., agr., directeur de la recherche et du développement, IRDA

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

Responsable scientifique : Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA

Professionnelle de recherche : Marie-Eve Tremblay, agr., M. Sc., IRDA

Professionnel de recherche : Francis Allard, agr. M. Sc., IRDA

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Marc-Olivier Gasser

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec), G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 650

Courriel : marc-o.gasser@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Cette étude a aussi été possible grâce à la participation de nombreuses personnes. Merci tout d'abord aux producteurs pour l'accès à leurs champs ainsi qu'aux données entourant la régie de fertilisation. Merci également aux conseillers et conseillères des clubs-conseils en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches qui ont réalisé la collecte de données sur le terrain. Merci au laboratoire Agro-Enviro-Lab pour sa contribution au projet.

Liste des clubs-conseils participants :

Club agroenvironnemental en horticulture

Club-conseil Agro-Champs

Club-conseil Beauce Agri-Nature

Club Ferti-Conseil Rive-Sud

Coop de fertilisation organique Fertior

Club des Rendements Optimum de Bellechasse

OptiConseils Chaudière-Appalaches

Merci aux membres du comité aviseur qui ont fourni des commentaires constructifs pour l'interprétation des résultats et la révision du rapport.

Organismes présents dans le comité aviseur :

Association des conseillers en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches (ACAC)

Direction régionale de Chaudière-Appalaches, MAPAQ

Direction régionale de Chaudière-Appalaches, MELCC

Fédération de l'UPA de la Chaudière-Appalaches

Agro-Enviro-Lab

Université Laval

RÉSUMÉ

Ce projet a permis de documenter l'évolution des teneurs en phosphore disponible (P M3) du sol en fonction du bilan de phosphore à la surface des sols de 149 champs suivis en Chaudière-Appalaches de 2009 à 2018 et de comparer cette évolution à ce qui avait été observé dans un bilan précédent réalisé entre 2002 et 2010. L'évolution de la teneur en P Mehlich-3 (P M3), ainsi que des autres paramètres du sol analysés, a été mesurée sur des échantillons composites formés d'échantillons de sol prélevés sur au moins 15 endroits géolocalisés dans les champs en 2009 ou 2010 et relocalisés en 2017 ou 2018. Le bilan de P à la surface du sol a été calculé entre les deux dates où les sols ont été échantillonnés, en cumulant les apports de P en provenance des diverses formes d'engrais épandues et déclarées par les producteurs et en y soustrayant les exportations de P reliées aux diverses récoltes.

La plus grande majorité du P épandu provenait de lisiers de porc et de vache laitière, pures ou en mélange, représentant 67 % du P épandu. Les fumiers solides représentaient près de 25 % des apports de P alors que les engrais minéraux ont contribué à 8 % des apports. Les cultures fourragères ont occupé plus de 40 % des superficies cultivées et ont contribué à 47 % des exportations de P estimées. Les grandes cultures (Maïs / Soya / Canola) occupaient la 2^e place avec près de 30 % des superficies et 37 % des exportations de P, alors que les cultures de céréales occupaient 27 % des superficies et comptaient pour 14 % des exportations de P.

En résumé, le bilan annuel de P au sol (Apport – Exportation) était en moyenne légèrement supérieur dans l'exercice de 2009 à 2018 (24 kg P/ha) par rapport à l'exercice précédent de 2002 à 2010 (13 kg P/ha) et présentait des écarts plus importants. Au contraire, la variation annuelle de P M3 dans les sols était en moyenne légèrement inférieure et négative dans l'exercice 2009-2018 (-1,5 kg P M3/ha), par rapport à 2002-2010 (1 kg P M3/ha), mais présentaient des écarts plus faibles. À prime abord, l'évolution du P M3 dans ces sols durant ce deuxième exercice ne semble pas suivre la même influence du bilan de P réalisé à la surface du sol puisque, pour un bilan moyen supérieur de P, la variation annuelle moyenne en P M3 est tombée en valeur négative à -1,5 kg P M3/ha.

De façon générale, la relation entre le bilan de P à la surface du sol et l'évolution de la teneur en P M3 dans les sols est très peu significative ($R^2 = 0,01$), encore moins pour le bilan 2009-2018 qu'elle ne l'avait été lors du bilan précédent de 2002 à 2010 ($R^2 = 0,10$). Seules les teneurs en P M3 des sols du groupe textural G3 semblent influencées à la baisse de façon plus marquée par des bilans de P à la baisse ($R^2 = 0,11$) et leurs ratios P/AI M3 plus élevés semblent avoir joué un rôle dans cette dynamique. Pour certains de ces sols, le niveau de saturation élevé devrait avoir induit des recommandations à la baisse du bilan de P à la surface du sol et par le fait même réduire les niveaux de P M3 dans ces sols. Pour les autres sols, ces relations sont beaucoup plus difficiles à établir. Il demeure dans cet exercice à la ferme une grande part d'incertitude dans plusieurs des variables exploitées qui pourrait rendre difficile l'obtention de relations claires entre le bilan de P à la surface du sol et l'évolution du phosphore disponible (extrait à la solution Mehlich-3) dans ces sols.

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Introduction..... | 8 |
| 2 | Objectifs de l'étude | 10 |
| 3 | Matériel et méthodes..... | 11 |
| 3.1 | Sélection des champs..... | 11 |
| 3.2 | Échantillonnage des sols | 11 |
| 3.3 | Analyses de sol | 11 |
| 3.4 | Informations sur les champs échantillonnés | 12 |
| 3.5 | Analyse statistique | 13 |
| 4 | Résultats | 14 |
| 4.1 | Les apports en phosphore..... | 14 |
| 4.2 | Les exportations de phosphore liées aux parties récoltées des cultures | 16 |
| 4.3 | Les analyses de sol | 18 |
| 4.4 | L'effet du bilan annuel de P sur la teneur en P M3 dans les sols..... | 23 |
| 5 | Discussion | 30 |
| 6 | Conclusion | 32 |
| 7 | Références | 33 |
| | ANNEXE A – Protocole de sélection des Parcelles..... | 35 |
| | Parcelles échantillonnées Lors de l'exercice 2002-2010 | 35 |
| | Critères de sélection des parcelles pour l'Exercice 2010-2018 | 35 |
| | 1.1.1 Critères de sélection d'une parcelle | 36 |
| | Prélèvement des échantillons de sol..... | 37 |
| | Collecte des informations et formulaire | 38 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Superficies, masses d'engrais et masses de P_2O_5 épandues sur les 149 champs agricoles suivis. | 15 |
| Tableau 2 : Superficies, biomasses et exportations de P_2O_5 provenant de la récolte de plantes entières, de grains ou de paille sur les 149 champs suivis. | 17 |
| Tableau 3 : Statistiques descriptives sur les éléments du bilan de surface de phosphore de 149 champs agricoles de 2009 à 2018. | 23 |
| Tableau 4 : Modèle de régression multiple après sélection de variables explicatives en mode <i>stepwise</i> | 25 |
| Tableau 5 : Modèle de régression multiple simplifié après sélection manuelle de variables explicatives | 26 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Emplacements des champs retenus et éliminés | 14 |
| Figure 2 : Comparaison entre les valeurs initiales et finales des teneurs en matière organique du sol (perte au feu) (a) et de pH à l'eau (b) dans les sols prélevés en début et en fin de bilan. | 18 |
| Figure 3 : Comparaison entre les valeurs initiales et finales de potassium (a), de calcium (b), de magnésium (c) et d'aluminium (d) extraits au Mehlich-3 dans les sols prélevés en début et en fin de bilan. | 19 |
| Figure 4 : Comparaison entre les teneurs initiales et finales de phosphore et du ratio P/Al extraits au Mehlich-3 sur une échelle linéaire ou logarithmique dans les sols prélevés en début et en fin de bilan. | 20 |
| Figure 5 : Évolution dans le temps des teneurs en phosphore extrait au Mehlich-3 dans les sols de quelques champs | 21 |
| Figure 6 : Relation entre les apports moyens annuels de P_2O_5 en fonction des teneurs en P M3 dans l'analyse de sol initiale. | 22 |
| Figure 7 : Variation annuelle de P M3 (a) ou P/Al M3 (ISP) (b) en fonction du bilan de surface du P pour deux cas de périodes initiales, soit celle initialement prévue (2009-2010) (A) et une autre provenant d'analyses antérieures à cette période (B). | 24 |
| Figure 8 : Corrélations simples entre les variables explicatives et la variation annuelle de PM3 en fonction des groupes texturaux G1, G2, et G3. | 27 |
| Figure 9 : Régressions linéaires simples entre le bilan annuel de P à la surface du sol (a) ou le ratio P/Al M3 (b) et la variation annuelle de P M3 dans le sol. | 28 |
| Figure 10 : Modèles de régression par Forêts d'arbres décisionnels entre la variation annuelle de P M3 et des variables explicatives : Modèle de calibration avec 75 % des observations (a); modèle de validation avec 25 % des observations (b); modèle final avec 100 % des observations (c). Ordre d'importance des variables explicatives exprimé par la pureté du nœud (d), dépendance partielle de la variation annuelle de P M3 face au ratio P/Al M3 (e); à la teneur en Al M3 (f); au bilan annuel de P à la surface du sol (g); à la teneur en MOS (h) et aux groupes texturaux G1, G2 et G3 (i). | 29 |

1 INTRODUCTION

Au Québec, les résultats de recherche indiquent qu'il faut appliquer généralement entre 2 et 5 kg P/ha, exceptionnellement 7 kg P/ha, en excès des exportations pour enrichir les sols de 1 kg P Mehlich-3/ha (Giroux et al., 2002; Giroux et Royer, 2007). Zhang et al. (1995) ont obtenu des valeurs de 3,2 à 5,3 kg P/ha dans la région de Montréal sur le loam sablo-argileux Chicot. Peck et al. (1971) ont obtenu une valeur de 4 kg P/ha en Illinois. Peterson et Krueger (1980), au Wisconsin, ont obtenu une valeur de 2,3 kg P/ha. Cependant, dans des sols sableux très pauvres en P, Rehm et al. (1984) ont trouvé des apports beaucoup plus élevés qui variaient entre 5,6 et 9,3 kg P/ha pour enrichir les sols de 1 kg P Mehlich-3/ha. Certains sols sont donc plus difficiles à enrichir ou à appauvrir en P en raison de leur nature pédologique et de leur capacité à fixer et à rendre non disponible le P à la plante.

Plusieurs travaux réalisés au Québec ont démontré que la capacité de fixation du phosphore est particulièrement influencée par la teneur en aluminium libre des sols et que l'aluminium extrait à la solution Mehlich-3 donne une bonne indication de la présence de ces formes (Giroux et Tran, 1996; Khiari et al., 2000). La capacité de fixation des sols dépend aussi de la nature pédologique des sols. Vézina et al. (2000) ont établi un premier groupement des séries de sol quant à leur aptitude à fixer le phosphore en faisant intervenir les grands groupes pédologiques – soit les podzols, les brunisols et les gleysols — de même que leur texture. Les engrais phosphatés appliqués réagiraient donc différemment selon les types de sol, seraient plus ou moins labiles ou disponibles aux cultures, et les accumulations en différentes formes de P dans le sol varieraient selon la nature pédologique et, plus spécifiquement, la teneur en aluminium libre du sol.

Depuis 2002, le Règlement sur les exploitations agricoles (REA) oblige à prendre en considération les teneurs et la saturation des sols en phosphore (P) dans la réalisation des plans agroenvironnementaux de fertilisation. Les apports d'engrais de ferme sont ainsi limités dans les sols ayant des teneurs et des saturations élevées en P au profit des sols ayant de plus faibles teneurs. Des abaques déterminent la quantité maximale de P en provenance des engrais qui peut être épandue sur des champs tout en protégeant la qualité de l'eau et sont basés sur les besoins des cultures et la capacité du sol à retenir le phosphore (MDDEP, 2006). Ainsi, pour tenir compte de cette capacité de fixation variable dans les sols, les abaques de dépôts maximums du REA intègrent le contenu en argile de l'horizon cultivé du sol, en plus de l'indice de saturation en P basé sur le rapport des quantités de P et d'Al extraites à la solution Mehlich-3 (Giroux et Tran, 1996; Khiari et al., 2000).

Une étude sur des sols provenant des basses terres de Montréal et du bassin versant de la rivière Boyer a d'ailleurs démontré l'importance de regrouper les sols selon leur nature (texture, substratum) afin d'améliorer la prédiction de la teneur en P de l'eau de drainage à partir d'indices reliés à la richesse en P du sol (Beauchemin et Simard, 2003). Basé sur le seuil critique de 9,7 mg/L de P extrait à l'eau (méthode Sissingh, 1971) proposé par Khiari et al. (2000) et le fait que ce dernier critère serait sensible à la texture des sols (Houba et al., 1986), Pellerin et al. (2006) ont défini des seuils de saturation en P Mehlich-3 de 13,1 % pour les sols de texture grossière (<30 % d'argile) et de 7,6 % pour ceux de texture fine (>30 % d'argile). Ainsi, les abaques du REA intègrent deux classes de teneurs

en argile en plus de l'indice de saturation en P pour déterminer les apports de P qui n'entacheront pas la qualité de l'eau.

Certains se sont questionnés sur l'effet de cette réglementation sur l'état du phosphore dans les sols et sur son évolution dans le temps. Ainsi, en 2009, la Fédération de l'UPA de la Beauce a confié à l'IRDA le mandat de réaliser un premier exercice de comparaison du bilan d'apport de P et de l'évolution de l'analyse du P Mehlich-3 dans les sols de 220 champs cultivés de la région de Chaudière-Appalaches pour la période de 2002 à 2011. Ce premier exercice avait produit des résultats permettant de valider le concept d'évolution de la teneur en P disponible à la plante (P Mehlich-3) en fonction du bilan d'apport, à un rythme moyen concordant avec ce qui avait été rapporté dans la littérature et les travaux réalisés au Québec par Giroux et al. (2002). Toutefois, l'inclusion dans ce modèle de la teneur en Al Mehlich-3, révélatrice de la capacité de fixation du sol ou de l'indice de saturation en phosphore, ne semblait pas tant affecter l'évolution de la teneur en P Mehlich-3 que la teneur initiale en P Mehlich-3 elle-même. Les méthodes d'analyse utilisées par le laboratoire privé avaient toutefois évolué au cours du temps et auraient pu causer une partie du biais. Un nouveau cycle de validation a donc été réalisé par l'IRDA en 2017 et 2018, sur une partie des sites (149 champs) ayant été étudiés en 2011.

2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif général du projet consistait à valider une nouvelle fois la relation entre les bilans d'apport de P et l'évolution des analyses de sol en P Mehlich-3 pour la période 2010 à 2018 dans 150 champs de Chaudière-Appalaches. Ce nouvel exercice était basé sur des échantillons de sols géolocalisés ainsi que sur des méthodes d'analyse de sols comparables en début et fin de bilan, en plus des relevés complets des apports et prélèvements de P, ainsi que des facteurs liés à la régie des cultures et des sols.

Les objectifs spécifiques du projet consistaient à :

- réaliser le bilan phosphore à la surface du sol de parcelles représentatives des différents systèmes culturaux de Chaudière-Appalaches recevant des engrais de ferme en lien avec l'enrichissement ou l'appauvrissement du sol en P;
- sélectionner 150 sites parmi les 220 sites ayant déjà participé à l'exercice de 2011;
- vérifier si l'enrichissement ou l'appauvrissement du sol en P en lien avec le bilan de P est lié aux concepts de fixation et de saturation du sol en P, ainsi qu'aux groupes texturaux des sols;
- vérifier si le bilan de P peut être réalisé à la ferme sur une telle période de temps pour suivre l'enrichissement ou l'appauvrissement des sols en P;
- diffuser les résultats et recommandations aux intervenants et conseillers de la région Chaudière-Appalaches et à l'ensemble du Québec.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 SÉLECTION DES CHAMPS

Le projet a été réalisé sans expérimentation dans 149 champs répartis sur 45 exploitations agricoles suivies par des clubs-conseils de la région de Chaudière-Appalaches. Le protocole détaillé, fourni aux agronomes, est présenté à l'Annexe A. Les champs ont été sélectionnés parmi les 220 champs qui ont déjà fait l'objet d'un suivi de phosphore entre 2000 et 2010. Les champs retenus répondaient aux critères de sélection suivants :

- Les 15 à 30 sous-échantillons de sol qui forment l'échantillon composite avaient été localisés avec succès à l'aide d'un GPS en 2009 ou 2010.
- Le champ a reçu fréquemment des engrais de ferme.
- L'entreprise disposait d'un registre de fertilisation complet (engrais minéraux et organiques) et fiable, de 2009-2010 jusqu'au moment de l'échantillonnage des sols (2017-2018).
- L'entreprise disposait d'informations précises sur le rendement des cultures (champ assuré individuellement à la FADQ), sinon la plus précise possible au cours de la période (2010 à 2017-2018).
- Le champ n'a subi aucun bouleversement majeur récent (chaulage, réaménagement des planches, nivellement important, sous-solage ou labour plus profond que 17 cm menant au mélange des horizons inférieurs avec le sol de surface, division ou remembrement avec une autre parcelle).

3.2 ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS

Les sols ont été échantillonnés à l'aide d'une sonde standard de 0 à 17 cm de la surface du sol et sur 15 à 20 endroits dans le champ préalablement géolocalisés avec un GPS en 2009-2010. On visait ainsi à réduire l'influence de la variabilité spatiale sur l'évolution de l'analyse de sol et améliorer les inférences quant à l'effet du bilan de P sur l'évolution du phosphore dans les sols. Outre la géolocalisation de l'échantillonnage des sols, les recommandations du Guide technique sur l'échantillonnage des sols du CRAAQ ont été suivies (Khiari, 2015). Par exemple, les sols devaient être échantillonnés environ à la même date qu'ils l'avaient été en 2009 et 2010, soit à l'automne 2017 ou au printemps 2018, afin de réduire l'effet de la période d'échantillonnage sur l'analyse (Khiari, 2015).

3.3 ANALYSES DE SOL

Afin de réduire l'effet des méthodes de préparation et d'analyse entre les différentes périodes du bilan, les sols ont été analysés par le laboratoire AgroEnvirolab, soit le même laboratoire ayant analysé les sols en 2011. Les méthodes d'analyses sont demeurées constantes au cours de la période 2009 à 2018, mise à part le conditionnement du sol à son arrivée (séchage, broyage et tamisage à 2 mm) qui a été modifié à partir de 2014,

par des méthodes moins agressives. Les teneurs en éléments P, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn, Zn et Na ont été extraites à la solution Mehlich-3 dans un ratio sol:solution de 1:5 puis dosées par spectrométrie d'émission au plasma d'argon (ICP). La matière organique a été déterminée par incinération.

3.4 INFORMATIONS SUR LES CHAMPS ÉCHANTILLONNÉS

Les conseillers des clubs-conseils étaient responsables d'acheminer les échantillons de sol au laboratoire et de compiler les résultats d'analyses dans un fichier Excel préalablement défini sur quatre feuilles. La première feuille *Entreprise* comprenait des informations de base sur le bilan de phosphore général de l'entreprise.

Les apports de P en provenance des engrais de synthèse, des effluents d'élevage et d'autres matières résiduelles fertilisantes ainsi que les amendements en chaux étaient compilés en termes de doses épandues et de teneurs en phosphore dans la feuille *Amendement*. Pour établir les masses de P_2O_5 appliquées à l'hectare en provenance des engrais ou des amendements, les conseillers ont fourni la concentration en P_2O_5 de l'engrais ainsi que la masse ou le volume d'engrais appliqué au champ. Les concentrations rapportées sont basées soit sur des valeurs de référence issues de la Base de connaissance sur les effluents d'élevage du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), soit sur des valeurs issues de la caractérisation à la ferme des effluents l'année même ou sur des valeurs moyennes établies sur plusieurs années de caractérisation à la ferme. La source de cette information a été consignée. Pour chaque épandage d'engrais, la dose (en tm/ha pour les fumiers et les engrais de synthèse ou en m^3 /ha pour les lisiers) a été calculée à partir des informations contenues dans la feuille *Amendement*. La quantité d'engrais (en tm ou m^3) et la quantité de P_2O_5 (en kg) épandues au champ ont été calculées à partir de la même feuille. Les bilans de masse de P_2O_5 ou d'amendement ont par la suite été calculés par champ et par type d'amendement selon les besoins.

Les rendements des cultures et les parties exportées ont été compilés dans la feuille *Culture*. Les exportations de P hors du champ sont principalement attribuées aux parties récoltées des cultures, soit généralement le grain, les pailles ou encore la partie aérienne de la plante comme dans le cas des fourrages. Aucune exportation de P reliée aux pertes par ruissellement de surface, migration en profondeur dans le sol ou vers les drains n'est comptabilisée. On conçoit généralement que ces pertes sont faibles par rapport au bilan général du P et aux exportations de P liées à la récolte. Le rendement et la teneur en matière sèche des parties récoltées ont été compilés dans la feuille *Culture* par champ, par année, par culture et par type de partie récoltée. Par exemple, l'orge pouvait être récoltée sous forme de grains et de paille ou encore de plante entière lorsqu'ensilée. De même, les rendements en fourrage pouvaient être exprimés pour la 1^{ère} coupe, 2^e coupe, etc. ou encore pour un total de deux coupes, trois coupes, etc. selon l'information disponible. Les exportations de P liées à la récolte ont été calculées à partir des rendements établis sur base sèche ainsi que des teneurs en P_2O_5 estimées pour chaque type de partie récoltée. Les teneurs en P_2O_5 des parties récoltées sont basées sur le tableau 8.6 (« *Éléments nutritifs prélevés par différentes parties de la plante*») du Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2010) et sur des analyses de plantes réalisées par le laboratoire privé Agridirect inc. de 1998-2000.

Finalement, les analyses de sol relevées à partir du dernier projet étaient compilées dans la feuille *Analyses de sol*. Les bilans d'apports et d'exportations de P couvrant la période 2009-2010 à 2017 ou 2018 ont été calculés à l'aide de ces données. Toutes les valeurs extrêmes ont été vérifiées pour détecter des erreurs de transcription ou de saisie. Lorsque nécessaire, les conseillers ont été appelés à valider ou à fournir certaines informations manquantes.

3.5 ANALYSE STATISTIQUE

Les indicateurs de la réglementation et du guide de référence en fertilisation qui servent à estimer l'accumulation du P Mehlich-3 dans les sols en fonction des bilans d'apport de P, soit l'indice de saturation en phosphore (ISP) ou le ration P/Al Mehlich-3, la teneur en argile et les groupes texturaux des sols ont été considérés dans l'analyse des résultats. Mais d'autres propriétés des sols (teneurs en Al, Ca et Fe Mehlich-3, classes texturales) ou du bilan de phosphore (types d'engrais, de cultures, etc.) ont également fait partie de l'analyse (Gasser et al., 2011).

Les données ont été compilées et analysées statistiquement avec le programme R (version 3.4.1) sur RStudio (R Core Team, 1993) et le programme Excel sur Windows. Les régressions multiples linéaires (RML) ont été modélisées avec la fonction LM et choisies en mode *stepwise* avec la fonction stepAIC du package mass. La contribution partielle des facteurs à la variance (R^2 partiel) a été calculée avec le package realimpo (Groemping, 2018). Le package randomForest (Liaw et Wiener, 2002) a été utilisé avec les mêmes variables retenues en RML pour produire des Forêts d'arbres décisionnels. Toutes les observations (149) ont été séparées au hasard dans deux jeux de données, un pour la calibration (75 % des observations) et un pour la validation (25 % des observations), afin de tester la robustesse des modèles.

4 RÉSULTATS

La Figure 1 présente la localisation des 149 champs suivis en 2019 sur le territoire agricole de la région de Chaudière-Appalaches ainsi que des 99 autres champs ayant fait parti du premier exercice en 2009-2010, mais ne répondant plus aux critères de sélection.

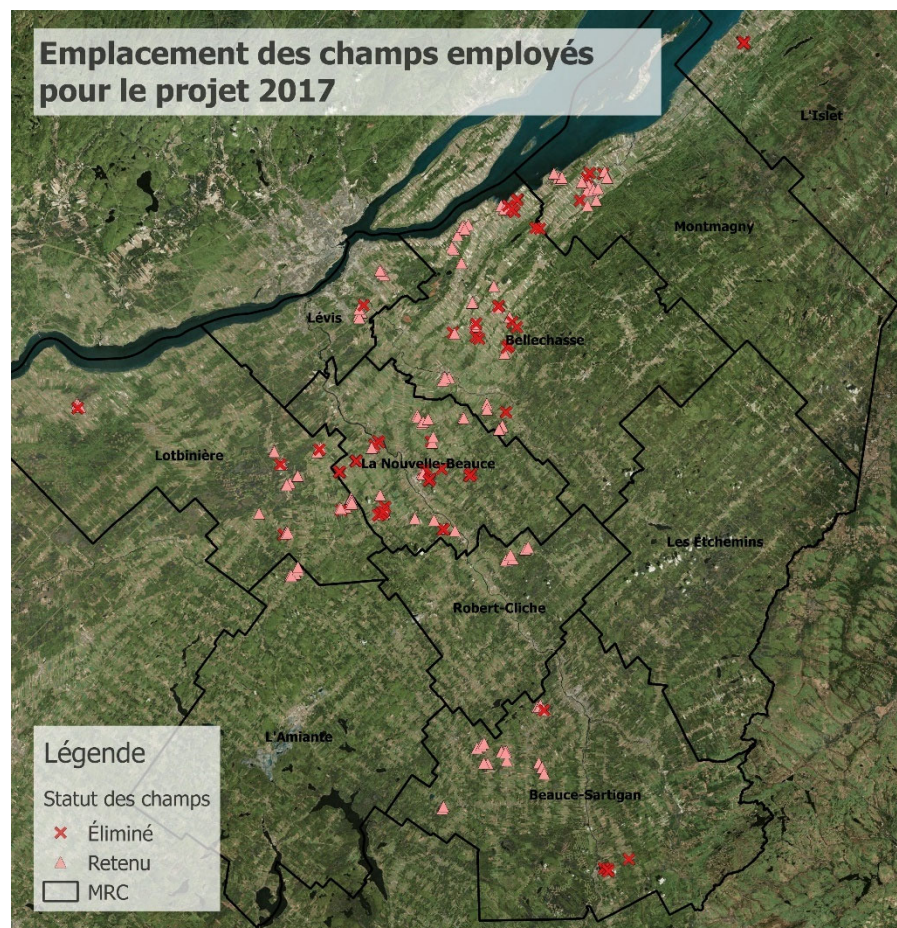


Figure 1 : Emplacements des champs retenus et éliminés

La superficie totale des champs suivis était de 861 ha par rapport à 1 427 ha lors de l'exercice précédent.

4.1 LES APPORTS EN PHOSPHORE

Le Tableau 1 fait état des superficies et des masses d'engrais et de phosphore épandues sur l'ensemble des champs suivis. Sur les 861 ha de champs suivis entre 2010 et 2018, des apports en engrais de synthèse ou organiques ont été réalisés sur une superficie cumulée de 11 486 ha, c'est-à-dire la somme des superficies recevant des engrais au cours de la période d'étude (Somme superficies épandues). Les lisiers de porcs, de vaches

et leurs mélanges sont les effluents d'élevage les plus épandus, représentant 20, 28 et 9 % des superficies épandues respectivement. Les lisiers de porcs et de vaches représentent aussi les plus gros volumes d'engrais épandus. Sur les 149 champs suivis, 94 ont reçu des épandages de lisiers de manière régulière (une application ou plus par année). De ce nombre, 40 % ont reçu plusieurs épandages par année. De fait, la plus grande majorité du P épandu provenait de lisiers de porcs et de vache laitières, pures ou en mélange, soit 62 % du P épandu entre 2010 et 2018, alors qu'ils représentaient 55 % du P épandu entre 2002 et 2010. Les fumiers solides de vaches et de volailles ont été épandus sur 20 % des superficies et représentaient près de 25 % des apports de P. À l'inverse des engrais de synthèse ont été épandus sur 25 % des superficies, mais ne représentent que 8 % des apports de P.

Tableau 1 : Superficies, masses d'engrais et masses de P₂O₅ épandues sur les 149 champs agricoles suivis.

| <i>Type d'engrais ou d'amendement</i> | <i>Somme superficies épandues</i> <i>ha</i> | <i>Somme engrais épandus</i> <i>tm</i> | <i>Somme P₂O₅ épandu</i> <i>kg</i> | <i>Dose moyenne engrais</i> <i>tm/ha</i> | <i>Dose moyenne P₂O₅</i> <i>kg/ha</i> | <i>Concentration moyenne de P₂O₅</i> <i>kg/tm</i> |
|---------------------------------------|--|---|---|---|--|--|
| Lisier de vaches | 3 162 | 92 184 | 98 161 | 29 | 31 | 1,1 |
| Engrais de synthèse | 2 820 | 482 | 34 584 | 0.17 | 12 | 73,2 |
| Lisier de porcs | 2 350 | 59 854 | 104 323 | 26 | 45 | 1,8 |
| Fumier de vaches | 1 382 | 24 039 | 71 616 | 18 | 52 | 3,0 |
| Lisier mélangé 1† | 1 020 | 26 159 | 37 069 | 26 | 36 | 1,4 |
| Fumier de volailles†† | 347 | 1 223 | 23 641 | 3 | 70 | 20,3 |
| Lisier mélangé 2††† | 113 | 3 863 | 10 733 | 34 | 96 | 3,0 |
| Fumier de bovin engraissement | 118 | 1 711 | 4 344 | 14 | 35 | 2,4 |
| Purin de bovins laitiers | 79 | 3 003 | 784 | 36 | 12 | 0,4 |
| Autres‡ | 95 | 1 998 | 3 283 | 21 | 41 | 3,3 |
| Somme Moyenne | 11 486 | 214 516 | 388 538 | 19 | 34 | 19,1 |

† Lisier mélangé de vaches et de porcs

†† Fumier sec de poulets, dindons, poules pondeuses sur litière

††† Lisier mélangé de volaille et de porcs

‡ Fumier de porcs composté; Lisier de veaux; Fumier de vaches + volailles; Boues de papetière; Résidus de houblon.

Les purins de bovins laitiers étaient épandus aux plus faibles doses moyennes (12 kg P₂O₅/ha) en raison de leur concentration en phosphore très faible, tandis que les effluents provenant d'élevages de volailles étaient épandus aux plus fortes doses (70 kg P₂O₅/ha pour les fumiers de volailles et 96 kg P₂O₅/ha pour les lisiers mélangés contenant des effluents de poules pondeuses. En moyenne, chaque épandage d'engrais de synthèse ou d'effluent d'élevage contenant du phosphore était réalisé à raison de 34 kg P₂O₅/ha.

Tout comme dans le premier exercice en 2009-2010, les apports de P₂O₅ sous forme d'engrais de synthèse représentaient près de 10 % des apports totaux de P₂O₅ sur les parcelles même si tous les champs suivis recevaient également des effluents d'élevage. Les engrais de synthèse ont été appliqués dans 109 des 149 champs de l'étude, 65 de ceux-ci en ayant reçu fréquemment (4 applications ou plus) au cours de la période de suivi (2010-2018). La chaux a été appliquée une fois sur 38 champs et deux fois ou plus sur 29 autres champs.

4.2 LES EXPORTATIONS DE PHOSPHORE LIÉES AUX PARTIES RÉCOLTÉES DES CULTURES

Le Tableau 2 fait état des exportations de phosphore liées aux différentes parties récoltées des cultures. Sur les 861 ha de champs suivis entre 2010 et 2017, la somme des superficies cultivées au cours des ans et récoltées sous diverses formes - grains, paille, tiges ou partie aérienne entière (dénommées superficies récoltées) - représentait une superficie cumulée avoisinant les 8 000 ha. Les prairies de graminées et de légumineuses représentaient les cultures les plus répandues (42 % des superficies), suivies par le maïs et le soya (27 % des superficies). Ces quatre cultures combinées représentaient 83 % des prélèvements de phosphore comptabilisés au cours du suivi. Par rapport à l'exercice précédent, les superficies en soya ont augmenté en importance. Les rendements déclarés pour le soya ont aussi augmenté (2,1 t/ha contre 1,7 t/ha entre 2002-2010). Toutefois, le maïs-ensilage demeure la culture prélevant et exportant les plus grandes quantités moyennes de P_2O_5 à l'hectare (64 kg P_2O_5 /ha), suivie du maïs-grain, du soya et des prairies de graminées et de légumineuses (37, 31, 36 et 31 kg P_2O_5 /ha respectivement).

Tableau 2 : Superficies, biomasses et exportations de P₂O₅ provenant de la récolte de plantes entières, de grains ou de paille sur les 149 champs suivis.

| Partie exportée Culture | Somme superficies récoltées <i>ha</i> | Somme biomasse récoltée <i>tm</i> | Somme P₂O₅ exporté <i>kg</i> | Rendement moyen <i>tm BS/ha</i> | Exportation moyenne P₂O₅ <i>kg/ha</i> | Concentration moyenne de P₂O₅ <i>kg/tm</i> |
|-----------------------------------|---|---|--|---|---|--|
| Plante entière | | | | | | |
| Foin graminée sec | 1 404 | 7 089 | 50 566 | 5,1 | 37 | 7,1 |
| Foin légumineuse ensilage | 1 394 | 6 390 | 42 906 | 4,6 | 31 | 6,7 |
| Foin graminée ensilage | 485 | 2 330 | 16 463 | 4,9 | 35 | 7,1 |
| Maïs-ensilage | 428 | 5 526 | 27 631 | 12,8 | 64 | 5,0 |
| Foin légumineuse sec | 64 | 342 | 2 280 | 5,4 | 36 | 6,7 |
| Céréales† | 159 | 493 | 3 985 | 3,0 | 25 | 8,3 |
| Grain | | | | | | |
| Soya | 1 038 | 2 115 | 31 508 | 2,1 | 31 | 14,9 |
| Maïs-grain | 702 | 3 566 | 26 030 | 5,1 | 37 | 7,3 |
| Blé | 593 | 1 188 | 12 114 | 2,0 | 21 | 10,2 |
| Avoine | 277 | 643 | 6 942 | 2,4 | 26 | 10,8 |
| Orge | 199 | 468 | 4 443 | 2,4 | 23 | 9,5 |
| Autres grains†† | 155 | 272 | 3 724 | 1,8 | 24 | 13,7 |
| Paille ou tiges | | | | | | |
| Blé | 400 | 1 041 | 2 393 | 2,6 | 6 | 2,3 |
| Avoine | 202 | 555 | 1 276 | 2,8 | 6 | 2,3 |
| Orge | 190 | 449 | 1 032 | 2,5 | 6 | 2,3 |
| Soya | 45 | 47 | 268 | 1,0 | 6 | 5,7 |
| Autre paille ††† | 137 | 340 | 708 | 2,5 | 5 | 2,1 |
| Légumes ‡ | | | | | | |
| | 110 | 628 | 3 453 | 5,9 | 32 | 5,5 |
| Somme Moyenne | 7 982 | 33 482 | 237 722 | 4,3 | 30 | 7,9 |

† Avoine; Avoine grainée; Avoine-pois grainé; Blé; Blé-avoine-pois; Céréale mélangée; Céréale mélangée grainée; Orge; Orge grainée.

†† Canola; Céréales mélangées; Lin; Seigle; Triticale grainé.

††† Céréales mélangées; Lin; Seigle; Triticale grainé; Panic érigé.

‡ Fraise; Pommes de terre.

4.3 LES ANALYSES DE SOL

Les Figure 2, Figure 3 et Figure 4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustrent la relation entre les éléments analysés dans le sol en début (2009-2010) et en fin (2017-2018) de bilan et permettent de tirer quelques conclusions quant à leur évolution dans le temps.

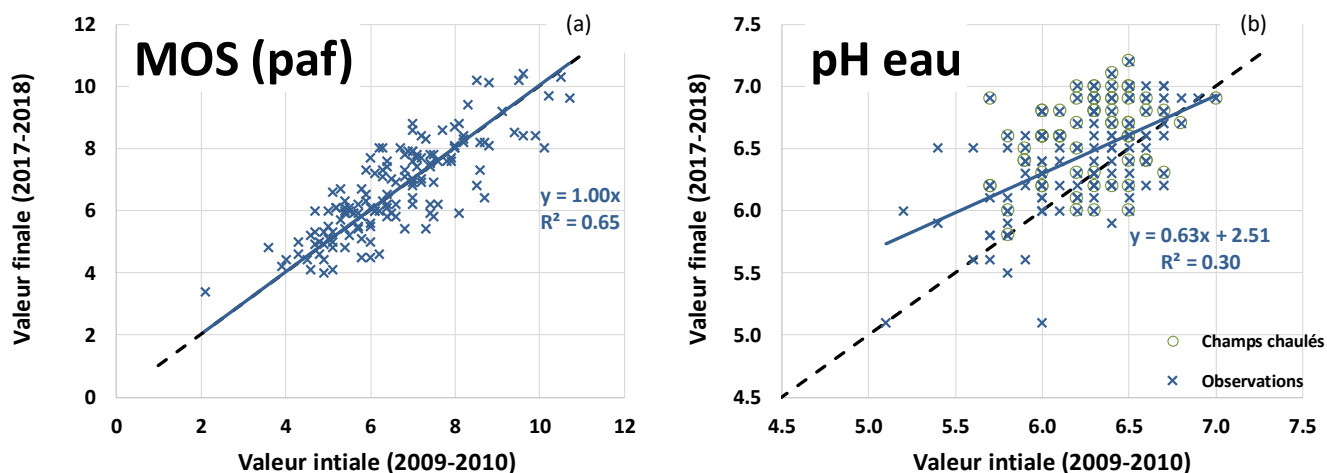


Figure 2 : Comparaison entre les valeurs initiales et finales des teneurs en matière organique du sol (perte au feu) (a) et de pH à l'eau (b) dans les sols prélevés en début et en fin de bilan.

Le trait pointillé représente une relation linéaire parfaite ($y = x$) entre les deux périodes d'analyses. Le trait plein représente la droite de régression entre les deux périodes avec $y = ax + b$. L'intersection de ces deux lignes est obtenue lorsque $y = x$ dans la droite de régression.

La Figure 2a illustre une certaine dispersion (R^2 de 0,65) des observations de la teneur en matière organique entre le début et la fin du bilan. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette variabilité, notamment l'échantillonnage, les apports en matière organique, le travail du sol, etc. Toutefois, la droite de régression obtenue entre les deux périodes indique une pente de 1,00 et qu'en moyenne, la teneur en matière organique du sol semble avoir très peu évoluée au cours de ce bilan. Pour le pH à l'eau, le R^2 est plus faible, dénotant une variation importante entre les valeurs initiales et finales. On observe aussi une augmentation plus importante du pH dans les champs à faible pH, probablement en lien avec des pratiques de chaulage, bien que certains champs n'ayant pas reçu de chaux durant cette période démontraient quand même une augmentation de pH.

À la Figure 3, selon les droites de régression observées, les teneurs en potassium et calcium extraits à la solution Mehlich-3 ont quant à elles eu tendance à diminuer au cours du temps lorsque les teneurs initiales étaient plus élevées et à augmenter lorsqu'elles étaient plus faibles. Les teneurs en magnésium et en aluminium ont quant à elle semblé diminuer au cours du temps peu importe leurs teneurs initiales.

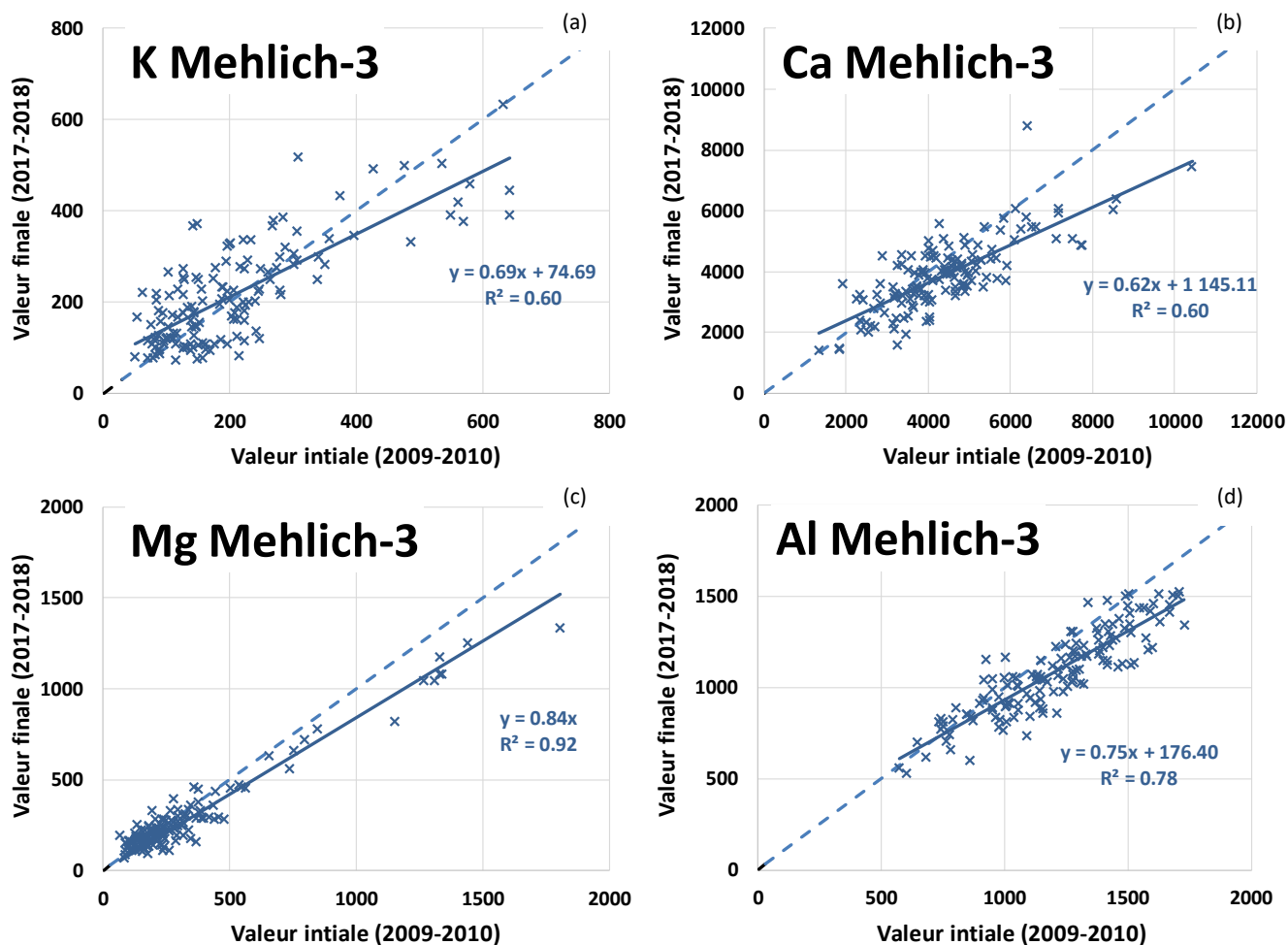


Figure 3 : Comparaison entre les valeurs initiales et finales de potassium (a), de calcium (b), de magnésium (c) et d'aluminium (d) extraits au Mehlich-3 dans les sols prélevés en début et en fin de bilan.

Le trait pointillé représente une relation linéaire parfaite ($y = x$) entre les deux périodes d'analyses. Le trait plein représente la droite de régression entre les deux périodes avec $y = ax + b$ ou $y = ax$, lorsque b , l'ordonnée à l'origine, n'est pas un paramètre significatif.

Les teneurs en P M3 et P/Al M3 ont aussi légèrement diminué entre les deux périodes. Toutefois, sur une échelle linéaire ou logarithmique ces tendances à la baisse ne sont pas cohérentes et donc peu probables. Lors de l'exercice précédent, il avait été observé que la teneur en P M3 évoluait légèrement à la hausse pour les sols ayant des teneurs inférieures à 196 kg P M3/ha et à la baisse pour des sols ayant des teneurs supérieures à 196 kg P M3/ha. Cette tendance n'est plus perceptible. La comparaison des teneurs en P M3 sur une échelle logarithmique donne plutôt l'impression que les sols dont les teneurs en P M3 étaient plus faibles en 2009-2010 (< 100 kg/ha P M3, par exemple) ont évolué à la baisse en 2017-2018.

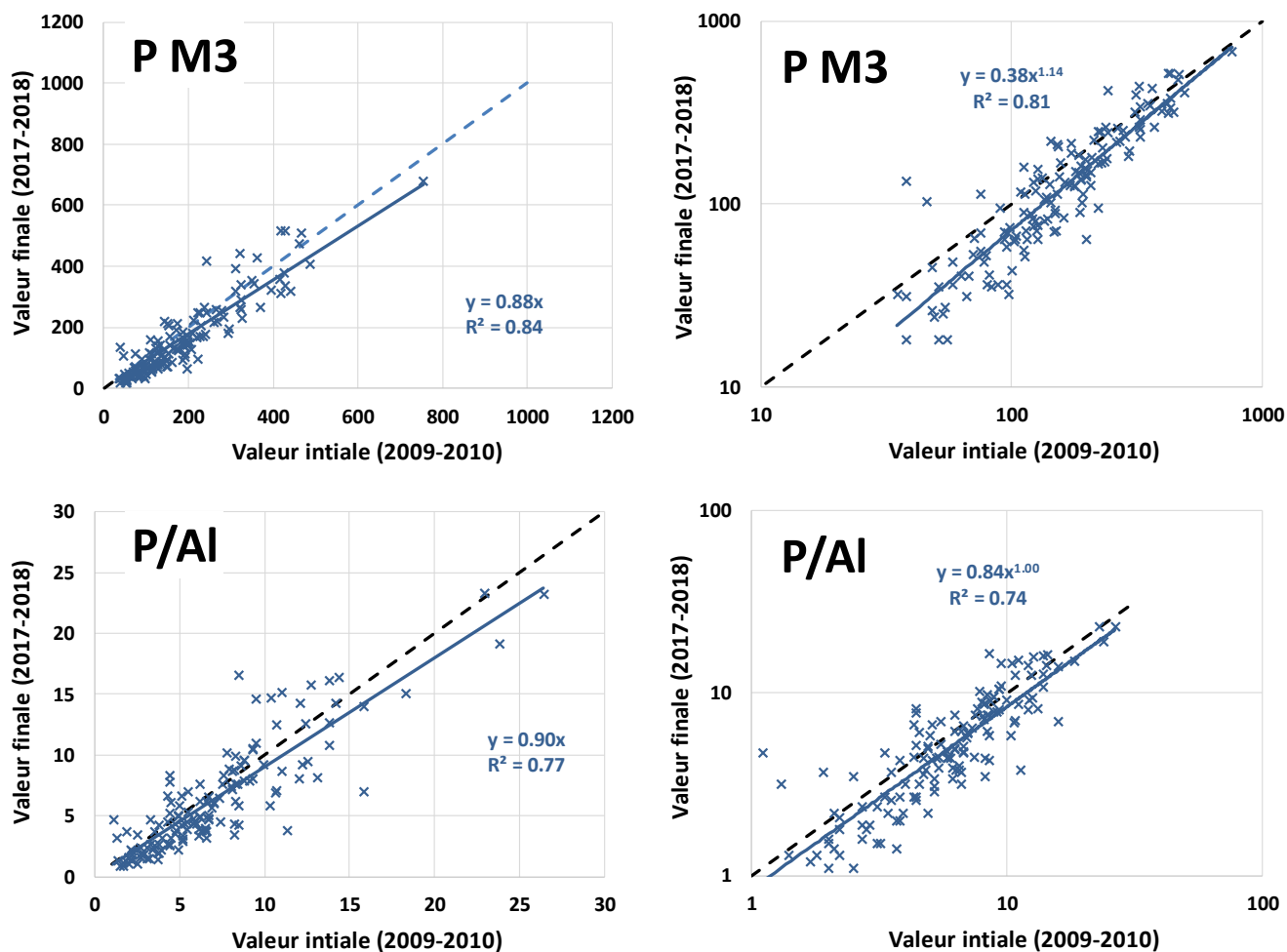


Figure 4 : Comparaison entre les teneurs initiales et finales de phosphore et du ratio P/AI extraits au Mehlich-3 sur une échelle linéaire ou logarithmique dans les sols prélevés en début et en fin de bilan.

Le trait pointillé représente une relation linéaire parfaite ($y = x$) entre les deux périodes d'analyses. Le trait plein représente la droite de régression entre les deux périodes avec $y = ax + b$ ou $y = ax$, lorsque b , l'ordonnée à l'origine, n'est pas un paramètre significatif.

La Figure 5 présente l'évolution des valeurs de P M3 mesurées dans le sol de quelques champs au cours des deux exercices, soit entre 2002 et 2018. Ainsi, on note une augmentation systématique des teneurs en P M3 autour des années 2009-2010 suivie d'une baisse durant les années subséquentes. Ce patron se répèterait pour 76 des 149 parcelles à l'étude. Par ailleurs, ce patron d'évolution n'a pas été observé pour les autres éléments de l'analyse. Les bilans de P aux sols ne sembleraient pas la cause des patrons observés sur ces parcelles. Nous avons noté qu'il avait été recommandé de congeler avant leur analyse, les échantillons de sols prélevés à la fin du dernier exercice en 2009-2010, soit ceux de la valeur initiale de notre présent exercice. D'autre part, les méthodes de préparation des échantillons de sols au laboratoire ont été révisées en 2013-2014 pour réduire l'incidence de méthodes trop agressives sur la mise en solution de certains éléments analysés. Il est donc possible que la

congélation des échantillons de sol ou le changement dans les méthodes de préparation de sols aient eu une incidence sur les variations observées dans les teneurs en P extrait à la solution Mehlich-3.

Pour vérifier si la congélation des échantillons de sol ou le changement de méthodes de préparation a engendré des biais dans l'analyse de l'effet du bilan de P sur la variation de P M3 dans le sol, des bilans ont aussi été calculés avec des analyses de sols antérieures à celles de 2009-2010, mais postérieure à 2007. Ces analyses proviennent d'échantillons de sol qui n'ont pas été géoréférencés de la même manière qu'en 2009-2010 et 2017-2018. Après analyse, les corrélations observées entre les valeurs initiales (2007-2009) et finales (2017-2018) du pH et des divers éléments analysés dans le sol étaient plus faibles que celles présentées dans les figures précédentes.

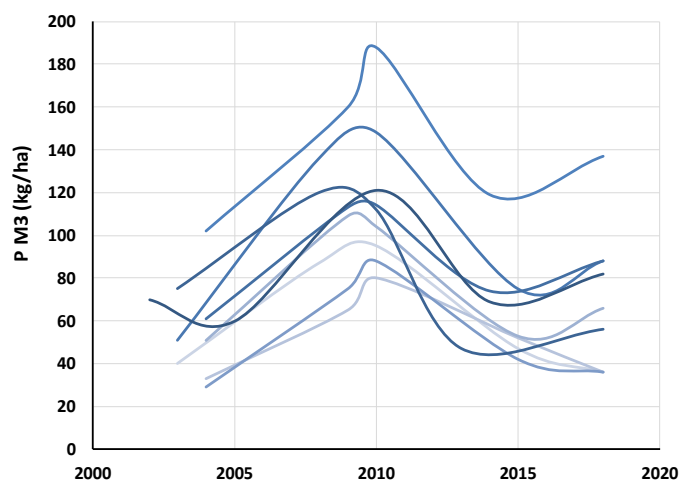


Figure 5 : Évolution dans le temps des teneurs en phosphore extrait au Mehlich-3 dans les sols de quelques champs

Notons par ailleurs que le REA et les recommandations agronomiques qui en découlent semblent avoir une influence sur les pratiques des producteurs agricoles (Figure 6). En effet, la teneur en P M3 du sol ne présente que très peu de liens avec les apports moyens de P_2O_5 pratiqués par les producteurs lorsque les analyses de sol sont inférieures à 300 kg P M3/ha. Au-delà du seuil de 300 kg P M3/ha, les apports moyens de P_2O_5 suivent une courbe décroissante à mesure que les teneurs dans le sol augmentent.

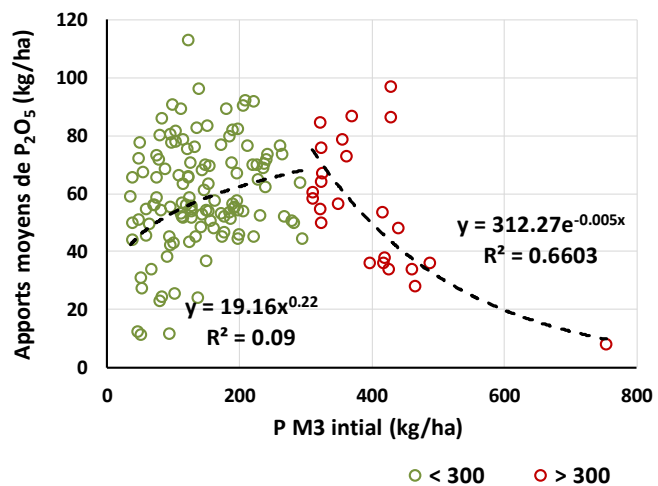


Figure 6 : Relation entre les apports moyens annuels de P₂O₅ en fonction des teneurs en P M3 dans l'analyse de sol initiale.

4.4 L'EFFET DU BILAN ANNUEL DE P SUR LA TENEUR EN P M3 DANS LES SOLS

Comme pour l'exercice précédent réalisé de 2002 à 2009, le bilan annuel de phosphore sur chaque champ a été calculé par différence entre les apports annuels de P liés aux engrais et les exportations annuelles de P liées aux récoltes. Le nombre d'années utilisé pour calculer le bilan annuel correspond à la période de temps entre la première et la dernière analyse de sol rapportées. En général, il y avait moins d'un an d'écart entre la première analyse de sol et les premiers apports ou exportations rapportés. Seulement 17 champs ont terminé la période d'étude avec un bilan négatif alors que 83 champs présentaient un bilan excédentaire de 20 kg P₂O₅/ha par année et plus. Le nombre minimal et maximal d'années pour réaliser le bilan annuel variait de 7,3 à 9 ans, pour une moyenne de 8,0 ans, alors qu'il avait été de 6,5 ans en moyenne lors de l'exercice précédent (Tableau 3). Les apports annuels de P variaient de 8 à 113 kg P/ha, pour une moyenne de 59 kg P/ha, alors qu'ils étaient légèrement supérieurs en moyenne (64 kg P/ha) dans l'exercice précédent. Les exportations annuelles de P sont quant à elles relativement similaires en moyenne (35 kg P/ha) par rapport à l'exercice précédent (34 kg P/ha). Au final toutefois, les bilans annuels de P dans ces champs étaient plus variables (min. de -16 à max. de 78 kg P/ha) et plus élevés en moyenne (24 kg P/ha) dans le présent exercice par rapport à l'exercice précédent où les bilans de P variaient de -11 à 54 kg P/ha avec une moyenne de 13 kg P/ha.

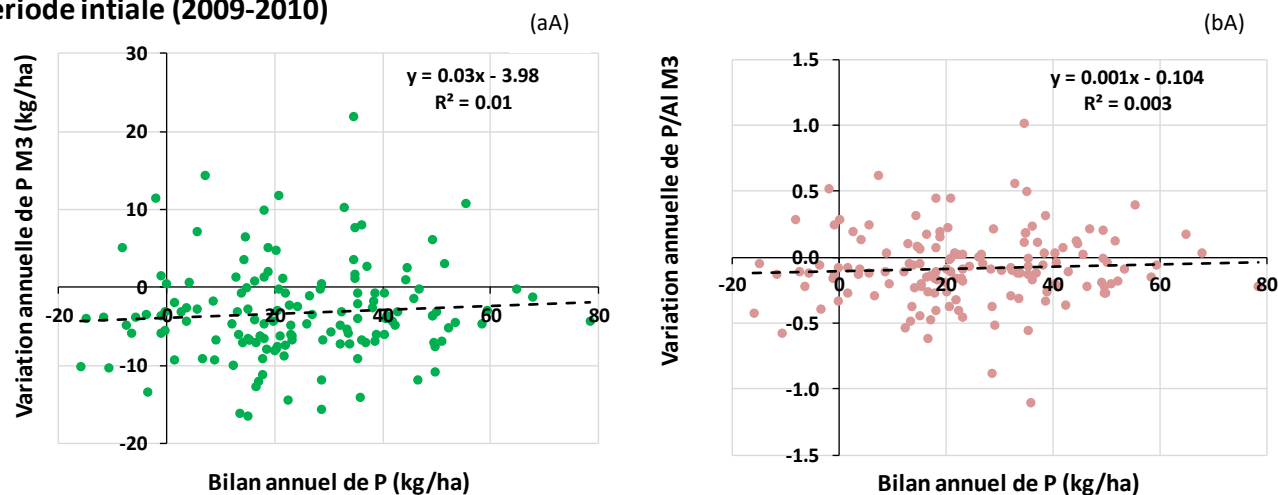
Tableau 3 : Statistiques descriptives sur les éléments du bilan de surface de phosphore de 149 champs agricoles de 2009 à 2018.

| | Nb Année | Apport annuel de P | Exportation annuelle de P | Bilan annuel de P | Variation annuelle de P M3 | Variation annuelle de P/AI M3 |
|----------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| | | kg P/ha | | | | % |
| Minimum | 7,3 | 8 | 7 | -16 | -15,5 | -0,9 |
| 25 ^e percentile | 7,8 | 48 | 30 | 13 | -4,4 | -0,2 |
| Médiane | 7,9 | 56 | 34 | 22 | -1,8 | -0,1 |
| Moyenne | 8,0 | 59 | 35 | 24 | -1,5 | -0,1 |
| 75 ^e percentile | 8,3 | 72 | 40 | 36 | 1,0 | 0,0 |
| Maximum | 9,0 | 113 | 64 | 78 | 16,4 | 0,5 |

La variation annuelle de P M3 dans les 248 champs de l'étude précédente était dans ses extrêmes min.-max. de -58 à 49 kg P M3/ha pour une moyenne de 1 kg P M3/ha. Pour cet exercice, la variation annuelle s'est maintenue dans ses extrêmes entre -15,5 et 16,4 P M3/ha, pour une moyenne de -1,5 kg P M3/ha. Pour 50 % des sols se situant entre les 25^e et 75^e percentiles, la variation annuelle de P M3 était légèrement en baisse, entre -4,4 et 1 kg P M3/ha, par rapport à l'exercice précédent (entre -3 et 8 kg P M3/ha). En résumé, le bilan de P au sol (Apport – Exportation) était légèrement supérieur dans ce nouvel exercice (24 vs 13 kg P/ha) avec des écarts plus importants, mais la variation annuelle moyenne de P M3 dans les sols était en moyenne légèrement inférieure (-1,5 vs 1 kg P M3/ha), mais avec des écarts plus faibles. À prime abord, l'évolution du P M3 dans ces sols durant ce deuxième exercice ne semble pas suivre la même influence du bilan de P au sol, puisque, pour un bilan moyen de P supérieur, la variation annuelle moyenne en P M3 est tombée en valeur négative à -1,5 kg P M3/ha.

Le Tableau 3 rapporte également la variation annuelle de P/AI M3 (ou ISP) calculée pour ce deuxième exercice. Les valeurs min-max sont de -0,9 et 0,5 %, tandis qu'en moyenne, la variation annuelle de P/AI M3 était aussi négative (-0,1 %). Pour vérifier si ces valeurs négatives sont liées à des valeurs anormales de P M3 analysées en 2009-2010 tel que présenté et discuté en hypothèse à la section 4.3, les variations annuelles de P M3 et de P/AI M3 (ISP) ont été comparées en utilisant deux périodes initiales du bilan, soit en partant des analyses de sols provenant de la première campagne de sols géoréférencés en 2009-2010 ou d'analyses antérieures à cette période (Figure 7).

Période initiale (2009-2010)



Analyses antérieures à 2009-2010

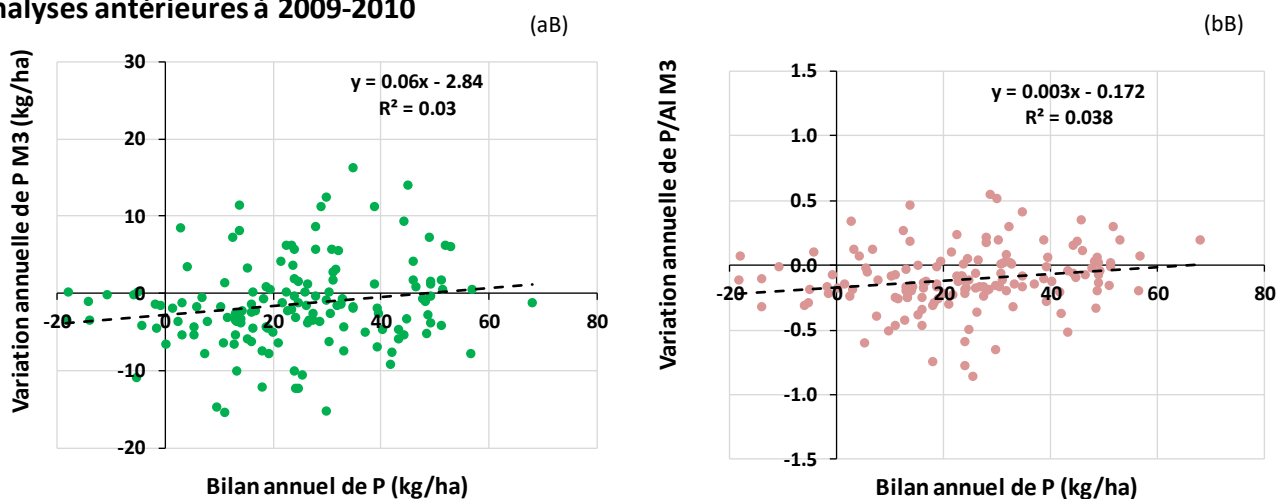


Figure 7 : Variation annuelle de P M3 (a) ou P/AI M3 (ISP) (b) en fonction du bilan de surface du P pour deux cas de périodes initiales, soit celle initialement prévue (2009-2010) (A) et une autre provenant d'analyses antérieures à cette période (B).

La régression simple entre le bilan annuel de P à la surface du sol et la variation annuelle de P M3 ou de P/AI M3 est très peu significative, que le bilan soit réalisé sur des analyses de sols géoréférencés de 2009-2010 ($R^2 < 0.01$) ou sur des analyses de sols prélevés antérieurement ($R^2 < 0,04$). Peu importe la période initiale du bilan, on

observe une très faible augmentation de la variation annuelle de P M3 en fonction du bilan de P. Les pentes enregistrées de 0,03 ou 0,06 kg P M3/ha par kg P/ha en excès dans le bilan sont beaucoup plus faibles que celle de 0,36 rapportée pour le premier exercice entre 2002 et 2010. Les augmentations de P/Al M3 (ISP) en fonction du bilan de P sont aussi très faibles.

Afin d'identifier quels autres facteurs pourraient expliquer davantage ces variations annuelles de P M3, des régressions multiples ont été tentées en intégrant, en plus du bilan de P, des facteurs liés aux conditions initiales de la parcelle (présence de drain, état du drainage), du sol (pH à l'eau, teneur en matière organique-MOS; teneurs en P, Ca, Al, P/Al extraits à la solution Mehlich-3; teneurs en argile, limon et sable, et groupe textural) ainsi que des facteurs liés à la régie agricole (type de culture, fréquence des apports en fumiers, lisiers et engrais minéraux). Différentes régressions multiples ont été utilisées en mode *stepwise* (sous les options *forward*, *backward* ou *both*) pour sélectionner les facteurs les plus influents statistiquement sur la variation de P. Un premier essai incluant toutes les variables en mode *stepwise* a produit un premier modèle retenant les variables présentées au Tableau 4.

Tableau 4 : Modèle de régression multiple après sélection de variables explicatives en mode *stepwise*

| Variation annuelle de P M3 = Bilan annuel de P + fréquence d'apport de fumier solide + MOS initial +Al M3 initial, P/Al M3 initial + Argile + Classe texturale | | | | |
|--|-----------------------|---|-------------|--------------|
| Multiple R-squared: R ² = 0.33 | | Adjusted R-squared: R ² = 0.24 | | |
| F-statistic: 3.622 on 17 and 125 DF, p-value: 1.466e-05 | | | | |
| Residual standard error: 5.004 on 125 degrees of freedom | | | | |
| | Estimé des paramètres | Erreur type | Valeur de t | Prob. de t |
| (Intercepte) | 8,344385 | 9,522179 | 0,876 | 0,382542 |
| Bilan annuel de P | 0,036607 | 0,026249 | 1,395 | 0,165610 |
| Fumier_solide | | | | |
| <i>Jamais</i> | -1,253085 | 1,565573 | -0,800 | 0,424997 |
| <i>Occasionnel</i> | -4,537055 | 1,792180 | -2,532 | 0,012595 * |
| <i>Régulier</i> | -1,315530 | 1,928063 | -0,682 | 0,496308 |
| <i>Plusieurs applications</i> | -0,071451 | 3,879933 | -0,018 | 0,985337 |
| MOS initial | -0,935576 | 0,364109 | -2,569 | 0,011359 * |
| Al M3 initial | 0,007887 | 0,002314 | 3,408 | 0,000882 *** |
| P/Al M3 initial | -0,332862 | 0,127652 | -2,608 | 0,010229 * |
| Argile | -0,201265 | 0,146128 | -1,377 | 0,170875 |
| Classe texturale | | | | |
| <i>argile lourde</i> | 2,693610 | 3,779552 | 0,713 | 0,477372 |
| <i>loam</i> | -7,208814 | 5,208020 | -1,384 | 0,168771 |
| <i>loam argileux</i> | -7,104717 | 4,415327 | -1,609 | 0,110116 |
| <i>loam limoneux</i> | -4,322752 | 5,957320 | -0,726 | 0,469428 |
| <i>loam limono-argileux</i> | -4,532600 | 5,130569 | -0,883 | 0,378689 |
| <i>loam sableux</i> | -11,607100 | 5,954980 | -1,949 | 0,053518 . |
| <i>loam sablo-argileux</i> | -4,098671 | 5,280964 | -0,776 | 0,439143 |
| <i>sable loameux</i> | -11,719623 | 6,915541 | -1,695 | 0,092626 . |

Les codes ., *, ** et *** expriment des probabilités de t comprises entre 0,10 et 0,05; 0,05 et 0,01; 0,01 et 0,001; et inférieures à 0,001, respectivement.

Le modèle de régression multiple obtenu en mode *stepwise* a principalement retenu des facteurs liés à l'état initial du sol et n'a pas retenu d'effet de la présence de drains ou de l'état du drainage. Ce modèle réussit à expliquer 33 % de la variance. Les facteurs les plus significatifs au niveau du sol étant la teneur initiale en AI M3, suivie du rapport P/AI M3 et de la teneur en matière organique du sol (MOS). Le modèle a retenu un seul facteur lié à la région des cultures, soit la fréquence des apports de fumier solide. Toutefois, la fréquence d'apport *occasionnel* de fumier solide a produit un estimé de paramètre plus négatif sur la variation de P M3 que les autres fréquences, ce qui apparaît peu logique et sans fondement. Par conséquent, ce facteur n'a pas été retenu dans les modèles subséquents. Par ailleurs, au niveau de la texture du sol, le modèle a retenu des éléments en contradiction, soit la teneur en argile et les différentes classes texturales. Tous les facteurs retenus ont un effet négatif sur la variation annuelle de P M3, sauf le bilan annuel de P, la teneur en AI M3 et la classe texturale *argile lourde*. Le bilan de P à la surface du sol a généralement un effet positif sur l'évolution du P M3 dans le sol, mais il est plus difficile d'expliquer pourquoi la classe texturale *argile lourde* et la teneur en AI M3 ont aussi un effet positif sur l'évolution du P M3 dans le sol.

Pour faciliter l'interprétation du modèle, tous les facteurs en entrée du modèle ont été conservés, sauf la fréquence d'apport de fumier solide et la classe texturale. Un deuxième modèle beaucoup plus simple a retenu les variables présentées au Tableau 5.

Tableau 5 : Modèle de régression multiple simplifié après sélection manuelle de variables explicatives

| Variation annuelle de P M3 = Bilan annuel de P + MOS initial +AI M3 initial, P/AI M3 initial + groupe texturale | | | | | |
|--|-----------------------|--|-------------|--------------|--------------------|
| Multiple R-squared: R ² = 0,2405 | | Adjusted R-squared: R ² = 0,207 | | | |
| F-statistic: 3,622 on 17 and 125 DF, p-value: 1,466e-05 | | | | | |
| F-statistic: 7,176 on 6 and 136 DF, p-value: 1,154e-06 | | | | | |
| | Estimé des paramètres | Erreur type | Valeur de t | Prob. de t | Variance expliquée |
| (Intercept) | -4,495243 | 2,844363 | -1,580 | 0,116337 | |
| Bilan annuel de P | 0,051210 | 0,024500 | 2,090 | 0,038459 * | 0,0237 |
| MOS initial | -0,943375 | 0,326460 | -2,890 | 0,004489 ** | 0,0234 |
| AI M3 initial | 0,007395 | 0,001930 | 3,832 | 0,000194 *** | 0,0715 |
| P/AI M3 initial | -0,252476 | 0,120917 | -2,088 | 0,038662 * | 0,0758 |
| Groupe texturale | | | | | 0,0461 |
| G2 | -0,470303 | 1,184644 | -0,397 | 0,691990 | |
| G3 | -3,867975 | 1,471523 | -2,629 | 0,009561 ** | |

Les codes ., *, ** et *** expriment des probabilités de t comprises entre 0,10 et 0,05; 0,05 et 0,01; 0,01 et 0,001; et inférieures à 0,001, respectivement.

Le deuxième modèle de régression multiple a encore retenu principalement des facteurs liés à l'état initial du sol en plus du bilan de P au sol. Ce modèle réussit toutefois à expliquer seulement 24 % de la variance. Dans ce deuxième modèle, le bilan annuel de P et la teneur initiale en AI M3 ont un effet positif sur la variation annuelle de P M3, tandis que la teneur en MOS, le ratio P/AI M3 ou indice de saturation en phosphore (ISP) et le groupe textural G3 (sols plus sableux) produisent un effet négatif. Le ratio P/AI M3 produit le plus grand effet en termes de variance expliquée. On peut comprendre que plus les sols sont saturés en phosphore, moins ils ont tendance à accumuler du P sous forme de P M3 ou ils ont tendance à en perdre ou en fixer davantage dans des formes non

disponibles. La teneur initiale en Al M3, le facteur le plus significatif (Prob $t < 0,001$), favorise au contraire une augmentation des teneurs en P M3 au cours du temps. Ce qui indiquerait que les sols à teneurs élevées en Al M3 ont tendance à s'enrichir davantage en P M3. Il se pourrait que s'ils sont moins saturés en P M3, ils reçoivent plus souvent des engrais de ferme et s'enrichissent plus fréquemment. Comme dans le modèle précédent, la teneur en MOS a un léger effet négatif sur l'évolution des teneurs en P M3.

La Figure 8 illustre comment les variables explicatives sont corrélées entre elles et avec la variation annuelle de P M3 ainsi qu'en fonction des groupes texturaux G1, G2 et G3. Les courbes pleines illustrent la distribution des observations dans chaque groupe textural. Ainsi, les sols du groupe G1 plus argileux ont des teneurs plus faibles en Al M3 et sont aussi moins saturés en phosphore (P/Al M3 plus faible) que les groupes G2 et G3.



Figure 8 : Corrélations simples entre les variables explicatives et la variation annuelle de PM3 en fonction des groupes texturaux G1, G2, et G3.

La dernière ligne illustre et la dernière colonne chiffre la corrélation simple entre chaque variable explicative et la variation annuelle de P M3. Le ratio P/AI M3 provenant des sols du groupe textural G3 présente la meilleure corrélation avec la variation annuelle de P M3 ($R = -0,539$). Ce groupe textural présente d'ailleurs les ratios P/AI M3 les plus élevés, sous lesquels les variations de P M3 sont les plus négatives, ou sous lesquels les teneurs en P M3 ont le plus diminué au cours du temps. Cette évolution à la baisse du P M3 des sols G3 avec des ratios P/AI M3 élevés correspond aussi à des bilans de P à la surface du sol plus faibles inversement corrélés au ratio P/AI M3 des sols ($R = -0,353$). À l'inverse, la corrélation positive entre AI M3 et la variation de P M3, de façon générale ($R = 0,244$) et dans chaque groupe textural ($R = 0,298$ à $0,346$), indique que les teneurs en P M3 ont tendance à évoluer à la hausse lorsque les teneurs initiales en AI M3 sont plus élevées. De façon attendue, les teneurs en AI M3 et le ratio P/AI M3 sont inversement corrélés entre eux, toutefois mieux pour les sols des groupes G1 ($R = -0,474$) et G3 ($R = -0,403$), que G2 ($R = -0,247$). En dernier lieu, la teneur en MOS présente des corrélations simples inverses avec la variation de P M3, plus particulièrement pour les sols du groupe textural G1 ($R = -0,213$).

La Figure 9 illustre comment certains groupes texturaux (G3 en particulier) sont davantage corrélés dans les relations entre le bilan annuel de P à la surface du sol (Figure 9a) ou le ratio P/AI M3 (Figure 9b) et la variation annuelle de P M3.

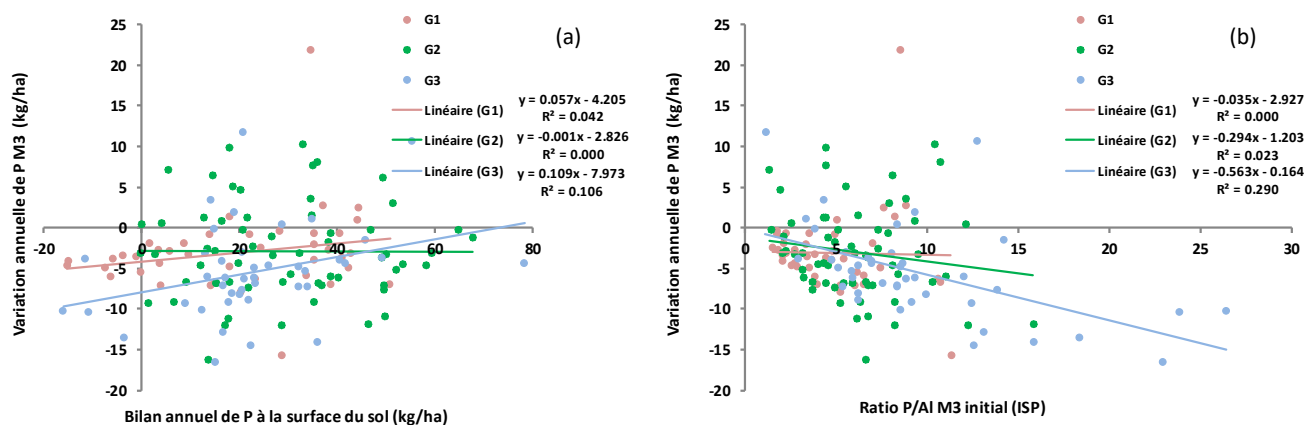


Figure 9 : Régressions linéaires simples entre le bilan annuel de P à la surface du sol (a) ou le ratio P/AI M3 (b) et la variation annuelle de P M3 dans le sol.

Une technique d'apprentissage machine, soit celle des Forêts d'arbres décisionnels (FAD) a aussi été utilisée pour comprendre les relations entre les mêmes variables explicatives et la variation annuelle du P M3 dans le sol (Figure 10). Le modèle final retenu peut expliquer 95 % de la variance obtenue, mais le modèle utilisant 25 % des observations en vérification ne pouvait expliquer que 28 % de la variance, dénotant ainsi un certain manque de pouvoir prévisionnel du modèle final. Les FAD ont retenu les mêmes variables explicatives que la régression multiple linéaire (RML) et l'ordre d'importance de ces variables est similaire dans les deux modèles. Comme en RML, le ratio P/AI M3 (ISP) est la première variable explicative en importance dans le modèle suivie de la teneur en AI M3. Le ratio P/AI M3 est inversement corrélé avec la variation annuelle de P M3 dans le sol tandis que la teneur en AI M3 est corrélée positivement avec cette variation de P M3. Le bilan annuel de P est relié positivement

tandis que la teneur en MOS est reliée négativement. Finalement, les groupes texturaux des sols sont corrélés selon un effet croissant inverse dans l'ordre des sols G3 > G2 > G1, à une évolution à la baisse des teneurs en P M3. Finalement, le modèle obtenu en Forêts d'arbres décisionnels présente des résultats très similaires à ceux obtenus sous la régression linéaire multiple.

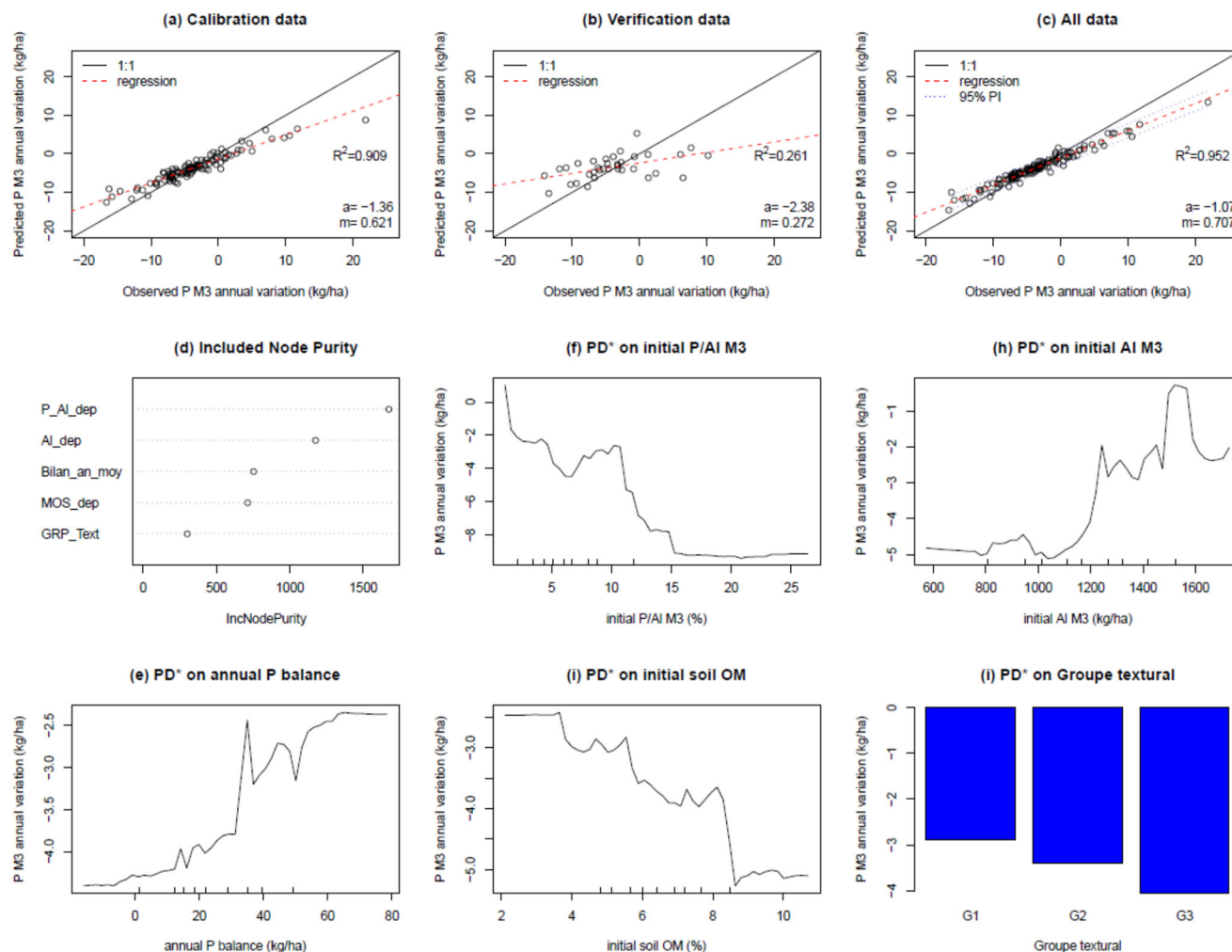


Figure 10 : Modèles de régression par Forêts d'arbres décisionnels entre la variation annuelle de P M3 et des variables explicatives : Modèle de calibration avec 75 % des observations (a); modèle de validation avec 25 % des observations (b); modèle final avec 100 % des observations (c). Ordre d'importance des variables explicatives exprimé par la pureté du nœud (d), dépendance partielle de la variation annuelle de P M3 face au ratio P/AI M3 (e); à la teneur en AI M3 (f); au bilan annuel de P à la surface du sol (g); à la teneur en MOS (h) et aux groupes texturaux G1, G2 et G3 (i).

5 DISCUSSION

La relation entre l'évolution des teneurs en P M3 dans le sol et le bilan de P à la surface du sol n'a pas été clairement démontrée dans le présent exercice, malgré les différentes tentatives de modélisation utilisées pour adjoindre d'autres variables et mieux expliquer les phénomènes. D'autres formes de modélisation pourraient être tentées pour comprendre comment les différentes variables influencent l'évolution de P M3 dans ces sols. Lors d'un premier exercice de 2002 à 2010, des modèles de régression non-linéaires avaient fait ressortir des effets quadratiques de la teneur initiale en P M3 comme deuxième variable d'importance en plus du bilan de P à la surface du sol pour expliquer l'évolution du P M3 (Gasser et al., 2011). Dans le présent exercice, la régression par Forêts d'arbres décisionnels a permis de tenir compte des effets non-linéaire des variables, toutefois le modèle obtenu ne démontre pas un effet clair du bilan de P à la surface du sol sur l'évolution des teneurs en P M3 dans le sol. Le nombre plus restreint d'observations utilisées dans le présent exercice ($n = 149$) vs l'exercice précédent ($n = 230$) peut être responsable de ce manque de relation et il est peu probable que d'autres formes de modélisation aient été plus concluantes. Malgré ce manque de relation, le ratio P/AI M3 (ISP) semble être un indicateur plus important que le bilan de P à la surface du sol pour expliquer la variation annuelle de P M3. Les corrélations simples indiquent toutefois que ce lien est plus important pour les sols sableux du groupe textural G3 ($R = -0,539$) que pour les sols plus argileux G1 ($R = -0,018$) (Figure 8). De fait, les sols ayant des ratio P/AI M3 très élevés en début de bilan étaient surtout présents dans le groupe textural G3. Par ailleurs, les sols plus sableux des Groupes G2 et G3 avaient aussi en moyenne des teneurs plus élevées en AI M3 que les sols plus argileux de G1. Un abaissement plus important de la teneur en P M3 des sols G3 pourrait s'expliquer soit par une fixation plus importante de P sous formes moins disponibles dans le sol ou par des pertes plus importantes en dehors du système sol-plante. Il est toutefois difficile d'identifier avec ces observations quel mécanisme est en cause. Une analyse des autres formes de P présentes dans le sol (P total, P organique, ou autres formes extractibles) pourrait révéler quelques pistes. Par ailleurs, les plus faibles corrélations des différentes variables pour les sols du groupe textural G2 et particulièrement entre le bilan de P de surface et la variation annuelle de P M3 ($R = -0,017$), par rapport aux groupes G1 et G3 semblent démontrer que les sols de G2 forment un groupe moins homogène en termes d'effets des autres indicateurs sur la variation annuelle de P M3 dans les sols.

De fait, pour faire des inférences plus précises sur l'effet des différents groupes texturaux ou des classes texturales sur la relation entre le bilan de surface de P et l'évolution du P M3, un plus grand nombre d'observations seraient nécessaires. Mais encore, il serait difficile de conclure sous quelles formes (plus fixée ou plus labile) ou vers quelle destination (en profondeur dans le sol, lixivié ou ruisselé) le phosphore a évolué dans ces sols, à moins d'analyses additionnelles. L'exercice a tout de même permis de mettre en relief les relations entre le ratio P/AI M3 (ISP) ou la teneur en AI M3 et l'évolution du P M3 dans ces sols pour certains groupes texturaux (G3 en particulier), et donc de soutenir en partie les indicateurs utilisés dans la réglementation.

Les Figure 7 (aA) et Figure 9 (a) illustrent comment le bilan annuel de P à la surface du sol affecte la variation annuelle du P M3 dans les sols des 149 champs à l'étude. Au-delà du fait que les régressions présentées expliquent un très faible pourcentage de la variation ($R^2 < 0,11$), les pentes de ces relations sont soit nulles ou positives allant jusqu'à une augmentation de 0,10 kg P M3/ha par kg P/ha en excès dans le bilan pour les sols du groupe textural

G3 ($R^2 = 0,11$). Cette valeur est inférieure à celle rapportée par Giroux et al. (2002) mesurée en partie sur des parcelles expérimentales en sols du groupe G2 et qui était de 0,305 kg P M3/ha par kg P/ha en excès dans le bilan.

Cette étude réalisée chez les producteurs comporte beaucoup d'approximations, entre autres au niveau de l'estimation des teneurs en P dans les engrais organiques et dans les parties récoltées. Plusieurs de ces teneurs sont basées sur des valeurs références ou sur des valeurs mesurées dans le passé. Les rendements sont aussi pour la plupart basés sur des rendements moyens estimés régionalement par la Financière agricole du Québec. Au niveau des analyses de sol, nous avons tenté de réduire les biais engendrés par l'échantillonnage au champ en échantillonnant systématiquement les mêmes endroits et les mêmes profondeurs relatives entre les périodes visées par le bilan, c'est-à-dire 2009-2010 et 2017-2018 (Cantin, 2002). Au fil du temps, les sols sont travaillés et leur masse volumique évolue. Le sol de surface peut être mélangé ou dilué avec du sol plus profond ou encore l'échantillon prélevé toujours à la même profondeur peut inclure des horizons inférieurs si le sol est plus ou moins compact. Les apports de chaux influencent aussi la chimie des sols. Toutes ces approximations, ces biais ou ces erreurs peuvent rendre difficile l'interprétation des phénomènes analysés ou du moins amènent de l'incertitude quant aux conclusions.

6 CONCLUSION

Ce projet a permis de documenter l'évolution des teneurs en phosphore disponible (P M3) du sol en fonction du bilan de phosphore à la surface des sols de 149 champs suivis en Chaudière-Appalaches de 2009 à 2018 et de comparer cette évolution à ce qui avait été observé dans un bilan précédent réalisé entre 2002 et 2010. L'évolution de la teneur en P Mehlich-3, ainsi que d'autres paramètres du sol analysés, a été mesurée sur des échantillons composites formés d'échantillons de sol prélevés sur au moins 15 endroits géolocalisés dans les 149 champs en 2009 ou 2010 et relocalisés en 2017 ou 2018. Le bilan de P à la surface du sol a été calculé entre les deux dates où les sols ont été échantillonnés, en cumulant les apports de P en provenance des diverses formes d'engrais épandues et déclarées par les producteurs et en y soustrayant les exportations de P reliées aux diverses récoltes.

En résumé, le bilan annuel de P au sol (Apport – Exportation) était en moyenne légèrement supérieur dans l'exercice de 2009 à 2018 (24 kg P/ha) par rapport à l'exercice précédent de 2002 à 2010 (13 kg P/ha) et présentait des écarts plus importants. Au contraire, la variation annuelle de P M3 dans les sols était en moyenne légèrement inférieure et négative dans l'exercice 2009-2018 (-1,5 kg P M3/ha) par rapport à 2002-2010 (1 kg P M3/ha), mais présentait des écarts plus faibles. À prime abord, l'évolution du P M3 dans ces sols durant le deuxième exercice ne semble pas suivre la même influence du bilan de P réalisé à la surface du sol puisque, pour un bilan moyen supérieur de P, la variation annuelle moyenne en P M3 est tombée en valeur négative à -1,5 kg P M3/ha.

De façon générale, la relation entre le bilan de P à la surface du sol et l'évolution de la teneur en P M3 dans les sols est très peu significative ($R^2 = 0,01$), encore moins au cours du bilan 2009-2018 qu'elle ne l'avait été dans le bilan précédent de 2002 à 2010 ($R^2 = 0,10$). Seules les teneurs en P M3 des sols du groupe textural G3 semblent influencées à la baisse de façon plus marquée par des bilans de P à la baisse ($R^2 = 0,11$) et leurs ratios P/AI M3 plus élevés semblent avoir joué un rôle dans cette dynamique. Pour certains sols du groupe G3, leur niveau de saturation élevé a dû commander une réduction du bilan de P à la surface du sol et par le fait même réduire leur niveau de P M3. Pour les autres sols, ces relations sont beaucoup plus difficiles à établir. Il demeure dans cet exercice à la ferme une grande part d'incertitude dans plusieurs des variables exploitées qui pourrait rendre difficile l'obtention de relations claires entre le bilan de P à la surface du sol et l'évolution du phosphore disponible dans ces sols.

7 RÉFÉRENCES

- Beauchemin, S., Simard, R. R., Bolinder, M. A., Nolin, M. C. et Cluis, D. 2003. Prediction of phosphorus concentration in tile drainage water from the Montreal Lowlands soils. *Can. J. Soil Sci.* 83: 73 -87.
- Gasser, M.-O., M.-H. Perron, M. Grenier. 2011. Effets de l'application des fumiers sur la teneur et la saturation des sols en phosphore dans Chaudière-Appalaches. Rapport de recherche. IRDA. Québec. 29 p. + annexes.
- Giroux, M., J. Cantin, R. Rivest, G. Tremblay. 2002. L'évolution des teneurs en phosphore dans les sols selon leur fertilité, leur richesse en phosphore et les types de sol. Colloque sur le phosphore : une gestion éclairée! Drummondville. OAQ. 19 p.
- Giroux, M., et T. S. Tran. 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol* 9:51-57.
- Giroux, M., J. Cantin, R. Rivest, G. Tremblay. 2002. L'évolution des teneurs en phosphore dans les sols selon leur fertilité, leur richesse en phosphore et les types de sol. Colloque sur le phosphore : une gestion éclairée! Tenu le 6 novembre 2002 à Drummondville. Ordre des agronomes. 19 p.
- Giroux, M. et R. Royer. 2007. Effets à long terme des applications de phosphore sur les rendements, l'évolution des teneurs, de la saturation et de la solubilité du P dans deux sols très riches. *Agrosolutions*. 18 (1) : 17 - 24.
- Groemping, U. 2018. Relative Importance for Linear Regression in R: The Package relaimpo. Version 2.2-3. <http://prof.beuth-hochschule.de/groemping/relaimpo/>. 36 pages.
- Houba, V.J.G., Novozamsky, I., Huybregts, A.W.M. et van der Lee, J.J. 1986. Comparison of soil extractions by 0.01 M CaCl₂, by EUF and by some conventional extraction procedures. *Plant Soil* 96: 433 -437.
- Khiri, L., L.E. Parent, A. Pellerin, A.R.A. Alimi, C. Tremblay, R.R. Simard et J. Fortin. 2000. An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. *J. Environ. Qual.* 29 : 1561-1567.
- Liaw, A. et Wiener, M., 2002. Classification and regression by randomForest. *R news* 2, 18–22.
- MDDEP. 2006. Les bases scientifiques du règlement sur les exploitations agricoles (REA). Ministère du développement durable, et l'environnement et des parcs.
- Peck, T.R., L.T. Kurtz et H.L. Tandon. 1971. Changes in Bray P-1 soil phosphorus test values resulting from applications of phosphorus fertilizer. *Soil.Sc. Am. Amer. J.* 35: 595-598.
- Pellerin, A., L.-É. Parent, J. Fortin, C. Tremblay, L. Khiri et M. Giroux. 2006. Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Can. J. Soil Sci.* 86 : 711-723.
- Peterson, L.A. et A.R. Krueger. 1980. Variation in content of available P Bray-1 and K in soil samples from a cropped N, P and K fertility experiment over 8 years. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 11:993-1004.
- R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. Volume 3. 201 p.
- Rehm, G.W., R.C. Sorenson et R.A. Wiese. 1984. Soil test values for phosphorus, potassium and zinc as affected by rate applied to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 814-818.
- Sissingh, H.A. 1971. Analytical technique of the Pw Method, used for the assessment of the phosphate status of arable soil in the Netherlands. *Plant Soil.* 34 : 483.486.

- Vézina, L., D. Carrier, M. Giroux et M. Rompré. 2000. Proposition de regroupement des sols du Québec selon leur capacité de fixation du phosphore en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. *Agrosol* 11 (1) : 15-39.
- Zhang, T.Q., A.F. MacKenzie et B.C. Liang. 1995. Long-term changes in Mehlich-3 extractable P and K in a sandy clay loam soil under continuous corn (*Zea mays* L.). *Can. J. Soil Sci.* 75 : 361-367.

ANNEXE A – PROTOCOLE DE SÉLECTION DES PARCELLES

SÉLECTION DES PARCELLES

PARCELLES ÉCHANTILLONNÉES LORS DE L'EXERCICE 2002-2010

La liste des entreprises ayant fait l'objet de l'échantillonnage ainsi que les parcelles associées à chaque entreprise sont listées en annexe. Compte tenu des critères de confidentialité ayant eu cours lors du premier exercice, l'IRDA ne dispose pas du nom de l'entreprise propriétaire de ces parcelles. Cependant, afin de faciliter la localisation des parcelles, le cadastre rénové a été ajouté au numéro de parcelle.

CRITÈRES DE SÉLECTION DES PARCELLES POUR L'EXERCICE 2010-2018

Plusieurs éléments peuvent avoir compromis la validité d'une parcelle pour la nouvelle étude. C'est pourquoi 150 parcelles sont prévues au lieu des 248 de l'étude précédente. Afin de sélectionner des parcelles disposant d'une information complète et pouvant être comparées aux données recueillies en 2009-2010, il est demandé à l'agronome (ou au chargé de projet) de procéder à une **présélection** des parcelles, selon les critères de sélection suivant :

1.1.1 Critères de sélection d'une parcelle

Parcelle faisant partie de la liste fournie en annexe.

Fertilisation principalement sous forme d'engrais de ferme. Les engrais minéraux sont comptabilisés, mais ne doivent pas constituer la seule source d'engrais.

Registre de fertilisation complet (engrais minéraux et organiques) et fiable, de 2010 à la date d'échantillonnage (2017-2018).

NB : La caractérisation des fumiers/lisiers n'est plus considérée comme un critère de sélection, mais fortement souhaitée.

Information précise sur les rendements de la culture (Parcelle assurée à l'individuelle à la FADQ ou sinon, la plus précise possible au cours de la période (2010 à 2017-2018)).

À priori, les changements de propriétaire, d'exploitant ou de conseiller ne sont pas considérés comme des critères d'exclusion, tant que les informations requises peuvent être colligées et que les critères de sélection sont toujours comblés.

Afin de faciliter la sélection des 150 sites retenus pour l'étude en cours, l'agronome ou le chargé de projet devra classer l'ensemble des parcelles dont il est responsable selon les critères de conformité suivant :

| CONFORMITÉ | DESCRIPTION |
|---------------------|--|
| Conforme | Parcelle répondant aux critères énoncés plus haut, sans restriction |
| Mise de côté | Parcelle qui pourrait être utilisable mais avec un certain facteur de complexité Changement d'agronome ou d'exploitant Parcelle ayant subi un remaniement mineur Doute sur la localisation des points GPS |
| Éliminée | Parcelle qui ne répond plus aux critères de base mentionnés plus haut ou : Parcelle dont l'aménagement de surface a été bouleversé récemment (réaménagement des planches, nivellement important, sous-solage ou labour > 17 cm menant au mélange des horizons souterrains avec le sol de surface, ...) Parcelle redivisée ou regroupée avec une autre parcelle Parcelle ayant fait l'objet d'abandon de culture |

Une seconde sélection des champs sera réalisée à posteriori par l'IRDA afin d'obtenir une répartition des parcelles représentative sur le territoire de la Chaudière-Appalaches. Selon ce critère, certaines parcelles retenues par les clubs pourraient être rejetées.

ACQUISITION DE DONNÉES

PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS DE SOL

Le prélèvement des échantillons de sol se fera à l'aide d'une sonde standard jusqu'à une profondeur de 17-18 cm.

L'échantillonnage doit être fait environ à la même date que dans l'étude 2002-2010.

Les prélèvements de l'échantillon de sol doivent être localisés autour des mêmes points marqués au GPS lors de l'étude précédente. Dans l'option paramètres (ou *settings*) de votre GPS, sélectionner:

- Système géodésique : NAD83
- Unité : Mètre (ne pas être en degrés)
- Projection : MTM7

Faire parvenir rapidement l'échantillon de sol à Agro-Enviro-Lab en mentionnant sur le formulaire de demande d'analyse le numéro de soumission XXX-XXXX-XXX pour une analyse de sol standard.

Conserver un second échantillon de sol et le remettre à l'IRDA pour évaluation future de la texture ou de paramètres supplémentaires.

Une précaution particulière doit être prise afin d'éviter que les échantillons de sol ne soient soumis à des températures élevées (chaleur dans un véhicule ou séchoir). L'usage d'une glacière avec *ice-pack* pourrait être envisagé si l'échantillonnage doit se prolonger au cours de la journée.

Il est à noter que les sols ne doivent pas être échantillonnés dans les mois suivant l'application de chaux.

COLLECTE DES INFORMATIONS ET FORMULAIRE

Un formulaire sera fourni dans une prochaine communication avec la liste des sites retenus. Ce formulaire, à l'image de celui présenté lors de l'étude précédente, devra être complété pour chaque entreprise et pourra contenir plusieurs parcelles de la même entreprise.

Les instructions relatives à chaque feuille du formulaire se retrouvent au haut de leur page respective.

Les informations requises pour compléter le formulaire sont les suivantes :

| | ENTREPRISE |
|-----------|--|
| 1. | Conseiller en agroenvironnement |
| 2. | Bilan de phosphore de l'entreprise (kg P2O5) |
| 3. | Superficie totale cultivée (hectares) |
| 4. | Bilan de phosphore par hectare |

| | PARCELLE |
|-----------|---|
| 1. | Séquence réelle des cultures durant la période à l'étude |
| 2. | Évaluation la plus précise possible du rendement de la culture, sinon rendement assuré à l'individuelle à la FADQ |
| 3. | Registre d'épandage (le plus complet possible) |
| 4. | Analyse des engrais organiques utilisée au PAEF |
| 5. | Plan de chaulage appliqué |
| 6. | Analyses de sol comprises entre 2009 et 2017 |
| 7. | Type de drainage (souterrain, de surface...) |
| 8. | État du drainage (bon, imparfait, limitant) |

Un accord de participation de l'entreprise au projet sera à prévoir par le club responsable. Cet accord n'est cependant pas à transmettre à l'IRDA.