

Vers un raisonnement innovant de la fertilisation phosphatée

Denoroy P.⁽¹⁾, Butler F.⁽²⁾, Castillon P.⁽³⁾, Champolivier L.⁽⁴⁾, Duval R.⁽⁵⁾, Fourrie L.⁽²⁾, Hanocq D.⁽⁶⁾, Kouassi A.S.⁽⁷⁾, Metraillé M.⁽⁸⁾, Morel C.⁽¹⁾, Rabourdin N.⁽²⁾, Raynal C.⁽⁹⁾, Savoie T.⁽¹⁰⁾, Souplet N.⁽⁸⁾

⁽¹⁾ INRA UMR TCEM, Domaine de la Grande Ferrade, 71 Avenue Edouard Bourlaux, BP81, 33883 Villenave d'Ornon Cedex

⁽²⁾ ACTA, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12

⁽³⁾ Arvalis-Institut du végétal Domaine expérimental du Magneraud, 17700 Saint Pierre d'Amilly

⁽⁴⁾ CETIOM, Station Inter Instituts, 6 chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège

⁽⁵⁾ ITB, 45 rue de Naples, 75008 Paris

⁽⁶⁾ Chambre d'Agriculture de Bretagne, Rond-point Maurice Le Lannou, CS 74223, 35042 Rennes Cedex

⁽⁷⁾ UNILET, Artiguères, 40280 Benquet

⁽⁸⁾ CETA de Romilly, Zone industrielle la glacière, 10510 Maizières La Grande Paroisse

⁽⁹⁾ CTIFL, 28 Route des Nebouts, 24130, Prigonrieux

⁽¹⁰⁾ Chambre d'Agriculture d'Eure et Loir, 10 rue Dieudonné-Costes, 28000 Chartres

Correspondance : denoroy@bordeaux.inra.fr

Résumé

Pour améliorer le raisonnement de la fertilisation phosphatée, de nouveaux concepts et moyens d'investigation apparaissent nécessaires. La mise en œuvre pratique de schémas scientifiques acquis dans les décennies passées a été évaluée dans le cadre d'un projet soutenu par le CasDAR dans le but d'aboutir à un raisonnement plus rationnel et mécaniste de la gestion du phosphate du sol pour la nutrition des cultures. Une large part des hypothèses de départ a été validée et un schéma rénové de l'interprétation de l'analyse de terre peut être proposé. Des travaux complémentaires restent nécessaires pour aboutir à un outil complet (méthode d'analyse + interprétation) validé et destiné à remplacer les pratiques actuelles.

Mots-clés : fertilisation phosphatée, raisonnement de la fertilisation, dosage du phosphore, diagnostic, phosphate biodisponible, modèle mécaniste, courbe de réponse au phosphore, P Olsen, P soluble

Abstract: Towards an innovative approach of phosphate fertilization

To improve phosphate fertilization, new concepts and means of investigation appear necessary. The practical implementation of scientific diagrams acquired in past decades has been evaluated as part of a project supported by the CasDAR to result in a more rational and sound mechanistic management of phosphate from the soil for crop nutrition. A large part of the assumptions has been validated and a renovated interpretation of the analysis of Earth can be proposed. Further work is still needed to get a complete tool (analytical method + interpretation) validated and designed to replace the current practices.

Keywords: phosphate fertilization, fertilization management, phosphate measurement, diagnosis, bioavailable phosphate, mechanistic model, phosphore response curve, P Olsen extracting method, Soluble P

Introduction

La gestion rationnelle du phosphore en agriculture a pour objectif d'éviter la carence en phosphate des cultures, tout en évitant les pertes vers l'environnement (en particulier les eaux superficielles, où il y a risque d'eutrophisation) et l'utilisation non économiquement justifiée d'intrants.

En pratique, cette gestion est basée sur l'interprétation de l'analyse de terre (Denoroy *et al.*, 2004), qui doit aboutir à :

- un diagnostic de la situation rencontrée, c'est-à-dire une évaluation du risque ou non de carence en P pour les cultures prévues, avec pour conséquence le besoin ou non de fertiliser,
- si la fertilisation apparaît nécessaire, une préconisation de quantité de phosphore à apporter sous forme soluble, ce qui pourra être réalisé par diverses options d'apport organique ou minéral. Si la fertilisation n'est pas justifiée, on peut chercher à estimer le nombre d'années pendant lesquelles la politique d'impasse de fertilisation pourra être pratiquée sans perte de rendement.

Parmi les paramètres de l'interprétation de l'analyse de terre, se trouve le type même d'analyse pratiqué. En effet, l'analyse de terre courante actuellement (et réalisée en routine par les laboratoires de service tels ceux du GEMAS) consiste en une extraction chimique d'une partie du phosphore contenu dans la terre analysée, suivie d'un dosage de ce phosphore extrait.

La phase d'extraction utilise un extractant spécifique pour chaque méthode normalisée (acide citrique pour la méthode Dyer, acétate d'ammonium pour la méthode Joret-Hebert, bicarbonate de soude pour la méthode Olsen,...) et l'interaction de cet extractant avec la phase solide du sol conduit à la libération plus ou moins importante de diverses formes de phosphore, ce qui explique l'absence de corrélation unique entre résultats de diverses analyses quand on considère différents types de terres (Boniface et Trocmé, 1988 ; Schvartz *et al.*, 2009). Une conséquence de cette interaction chimique variable entre extractant et terre analysée, est que, pour une même culture, les courbes de réponse à l'offre en P du sol estimée par une même méthode analytique vont être différentes entre types de sol contrastés, entraînant de grandes difficultés à transposer des acquis expérimentaux d'une situation à une autre (autre sol, autre analyse,...).

A ceci s'ajoute le fait que les cultures ne répondent pas toutes avec la même intensité à la carence en P, d'où la notion d'exigence des cultures (Comifer, 1993) qui, associée à d'autres critères de raisonnement (passé récente de fertilisation, etc. ...) multiplie les cas à étudier pour la formalisation d'un système complet d'interprétation des analyses. Jusqu'à présent, le paramétrage des systèmes de raisonnement de la fertilisation a été construit sur la base d'essais au champ, mais l'expression de la carence en P peut mettre un long temps à apparaître ce qui nécessiterait pour traiter suffisamment de cas, de maintenir un large réseau d'essais de longue durée. Ceci d'autant plus que la diversification des pratiques en matière de travail du sol a conduit dans les décennies récentes à une diversification parallèle des schémas de distribution du phosphore dans le sol, conduisant à de nouveaux comportements des cultures et posant des questions quant à l'échantillonnage pertinent du sol pour l'analyse de terre.

Enfin, l'évaluation des doses de P à apporter aux cultures est encore largement empirique, malgré de rares tentatives d'application d'un modèle mécaniste de besoin des cultures (Denoroy *et al.*, 2004). Aussi, malgré les adaptations récentes (Comifer, 2009), il devient difficile de faire progresser le raisonnement de la fertilisation phosphatée, ce qui transparait également quand on considère la situation au plan international (Jordan-Meille, 2009).

Pourtant, les acquis scientifiques des dernières décennies ouvrent des pistes pour une approche plus mécaniste et donc universelle de l'évaluation du phosphore bio-disponible dans le sol (Morel, 2002 ; Morel ; 2007 ; Morel *et al.*, 2011).

De façon synthétique,

- les plantes s'alimentent en phosphore en absorbant les ions phosphate présents dans la solution du sol,
- cette solution est réapprovisionnée par diffusion à partir du phosphate sorbé sur la phase solide du sol, et l'équilibre permanent entre ces deux compartiments est simplement formalisé par une équation dite "dynamique de Freundlich". Cette équation s'applique d'ailleurs également au cas du réapprovisionnement en sens inverse de la solution du sol et de la phase solide du sol en cas d'apport de fertilisants.

Suivant ce modèle conceptuel simple, l'ensemble du phosphate biodisponible pour une culture est donc la somme du phosphate du sol immédiatement soluble et du phosphate diffusible, cette somme étant nommée E (mg P/kg de terre). Si on appelle C_p (mg P/L) la concentration de phosphore (forme phosphate) en solution dans une suspension de terre dans l'eau (normalisée, rapport masse M de terre dans volume V d'eau ; rapport 1/10) et Pr la quantité (mg P/kg) de phosphate de la phase solide du sol, à l'équilibre avec C_p ,

$$E = V/M * C_p + Pr \quad (\text{mg P/kg terre fine}) \quad [\text{équation 1}]$$

L'équation dynamique "de Freundlich" qui rend compte de l'équilibre entre Pr et C_p , s'écrit :

$$Pr = v * C_p^w * t^p \quad (\text{mg P/kg terre fine}) \quad [\text{équation 2}]$$

Où v, w et p sont des paramètres d'ajustement qui ont cependant une certaine signification chimique (Morel *et al.*, 2011). La variable t est le temps (mn) car le compartiment du sol concerné par la diffusion dépend du temps, le phénomène n'étant pas instantané.

Des travaux préliminaires (Morel *et al.*, 2000) ont montré que l'indicateur E, qui intègre le pouvoir tampon du sol vis-à-vis du phosphore, représente mieux l'offre en P du sol perçue par une culture entre des sols très contrastés, puisque la réponse de la culture à cet indicateur apparaît plus unifiée entre sites qu'avec l'indicateur Olsen, pourtant estimé le meilleur indicateur courant utilisé en France (Fardeau *et al.*, 1988).

Ces indicateurs mécanistes sont également les variables gérées par les modèles représentant le fonctionnement des couverts sous contrainte phosphatée (Mollier *et al.*, 2008). Ces modèles permettent d'acquérir rapidement par simulation des informations et réponses à des questions sur le fonctionnement du système sol-plante sous de multiples hypothèses. L'utilisation des mêmes indicateurs en expérimentation permet de valider la pertinence et la représentativité des modèles.

1. Le projet "Raisonnement Innovant de la Fertilisation Phosphatée" (RIP)

Ce projet, soutenu par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche dans le cadre de l'appel d'offres Casdar 2007 a concerné l'ensemble des signataires ; les travaux se sont déroulés d'octobre 2007 à juin 2011.

Son objectif était d'évaluer si les "nouveaux indicateurs" (C_p et Pr, et partant, E) de la biodisponibilité du phosphate du sol sont en mesure :

- d'estimer de façon convaincante et plus universelle l'offre en P du sol perçue par les cultures, le critère pour ceci étant l'unicité, entre situations de sol contrastées, de la courbe de réponse du rendement d'une culture quand l'offre du sol est exprimée en valeur E. L'expression de l'offre du sol suivant l'analyse Olsen a été utilisée comme référence de la situation actuelle. Pour normaliser les réponses des cultures entre situations de potentiel pédo-climatique variées, les rendements étaient exprimés en indice de rendement, relativement au rendement potentiel de l'année.

- de rendre compte de l'évolution à moyen terme (quelques années) de l'offre en P du sol, suivant le bilan en P à la parcelle.

Le premier objectif "volet 1" du projet, est traité ici, avec la synthèse actuelle des travaux entrepris dans ce projet. Le second fait l'objet du modèle CyP présenté séparément par Morel *et al.* (2011). Une part des résultats disponibles en juin 2011 est disponible sur le site web de l'ACTA : www.acta.asso.fr

Le volet 1 s'est essentiellement appuyé sur des essais au champ et en contexte de grande culture, dans lesquels on a étudié la réponse de diverses cultures à des offres variables du sol en P (traitements). Les espèces-types qui ont servi de support aux essais étaient le maïs (grain), le blé dur, l'orge de printemps, la betterave sucrière, le colza d'hiver, la carotte et le haricot vert. Cette gamme de cultures permettait de couvrir la gamme des exigences proposée par défaut par le Comifer (Comifer 1993). Certaines cultures supplémentaires ont pu se trouver ajoutées, souvent pour des contraintes de successions culturales (blé tendre, tournesol, sorgho grain, maïs ensilage, lin oléagineux).

Les essais au champ étaient soit des essais P de longue durée (de 5 à 10 traitements * 4 répétitions), soit des essais annuels implantés sur des parcelles supposées assez peu pourvues en P pour obtenir une réponse en perte de rendement des parcelles les moins fertilisées. Dans le premier cas - généralement en station de recherche ou ferme expérimentale-, les gradients installés d'offre en P du sol étaient mis à profit pour obtenir des réponses des cultures, chaque parcelle expérimentale étant considérée comme une entité. Dans le second cas -chez des agriculteurs-, une large gamme de doses d'apport de P (forme TSP) non répétées (sauf le témoin sans apport, répété plusieurs fois) et disposés aléatoirement sur le site, ont permis d'obtenir une gamme de réponse des cultures. Il s'est toutefois avéré assez difficile de trouver des situations expérimentales.

Pour chaque site (et pour chaque bloc des essais de longue durée), on a réalisé une analyse de terre de caractérisation initiale (INRA-LAS Arras) et un paramétrage, par traçage isotopique au ^{32}P , de la dynamique des ions phosphate à l'interface phase solide-solution (UMR TCEM, Bordeaux).

L'objectif étant de mettre en regard une estimation analytique de l'offre en P du sol, et une réponse d'une culture, le sol de chaque parcelle expérimentale était échantillonné en vue d'analyse, en début de culture afin d'estimer l'offre minérale perçue par les plantes. On a vérifié qu'après quelques semaines suivant l'épandage de l'engrais, le statut phosphaté du sol évolue de façon imperceptible tant que la culture absorbe peu de phosphore (stades jeunes, qui sont aussi les plus sensibles à la carence). Le prélèvement de terre était effectué au moins sur la profondeur d'enfouissement de l'engrais. Contrairement à nos hypothèses initiales, beaucoup d'essais annuels se sont trouvés en situation de non-labour et de travail simplifié, ce qui a pu poser des problèmes pratiques pour la bonne estimation de l'horizon de mélange de l'engrais lors du prélèvement de terre. Pour essayer de pallier ce problème, on a prélevé également l'horizon situé sous le niveau de mélange de l'engrais, jusqu'à une profondeur "de labour" (25 à 30 cm). Chaque échantillon de terre a été analysé : mesure de C_p (TCEM, Bordeaux) et (pour une part) P Olsen (laboratoire LAS ou SAS). On a mis en évidence des relations curvilinéaires locales entre C_p et P Olsen, permettant de calculer P Olsen à partir de C_p quand P Olsen n'avait pas été directement mesuré.

Tous les échantillons de terre ont été préparés suivant la procédure habituelle de l'analyse de terre : séchage à l'air et tamisage à 2 mm après écrasement des mottes.

Le rendement de chaque parcelle a été mesuré et exprimé suivant les normes commerciales en vigueur pour la culture. Pour chaque site, on a ajusté la relation rendement/ C_p suivant un modèle quadratique-plateau dont le plateau donnait une estimation du rendement potentiel de l'essai (Colwell, 1981). Ce dernier a servi de référence pour le calcul de l'indice de rendement (IR) de chaque parcelle de l'essai correspondant : $IR = \text{rendement parcelle} / \text{rendement potentiel}$. La valeur E associée à chaque parcelle a été calculée suivant l'équation 1. La valeur de t utilisée pour ce calcul était ajustée de façon à minimiser, pour une culture, la variabilité entre les courbes de tous les essais : minimisation de la

somme des carrés résiduels d'un ajustement quadratique plateau commun au modèle $IR = f(E)$; sinon par défaut on utilisait $t = 1$ jour (1440 mn).

Cultures	Nombre	Cultures avec réponse au phosphore
Maïs	13 (2 fourrages)	12
Blé dur	12	8
Betterave sucrière	10	8
Colza	9	8
Orge	8 (4 printemps)	5 (3 printemps)
Haricot vert	5	5
Carotte	5	4
Blé tendre	2	2
Sorgho	1	1
Tournesol	3	2
Lin oléagineux	1	1
TOTAL	69	56

Tableau 1 : Récapitulatif des essais

Au total, plus de 73 essais ont été mis en place et 69 ont pu être exploités, dont la plupart expriment des réponses des cultures à la carence en P (Tableau 1).

2. Présentation des résultats

Pour évaluer la pertinence pratique de nouveaux indicateurs, en particulier du point de vue de leur "universalité" entre situations expérimentales, les critères suivants sont proposés :

- validité statistique de l'indicateur, soit sa capacité à rendre compte de la réponse de la culture : étroitesse de la corrélation générale entre indicateur et IR, mais en particulier dans la gamme de réponse de l'IR à la variation de l'indicateur. Cette validité peut être évaluée au niveau local (essai par essai) ou global : capacité à rendre compte de la réponse de la culture pour toutes les situations traitées ensemble.
- considérant toutes les situations expérimentales pour une même culture, capacité de l'indicateur à rendre compte d'un seuil de réponse de la culture indépendamment du contexte pédologique. Ce seuil de réponse (ou seuil d'impasse, soit en pratique : niveau d'offre du sol au-dessus duquel la fertilisation n'est pas nécessaire immédiatement) est une valeur centrale pour le pilotage de la fertilisation. Un indicateur va être d'autant plus "universel" (et ses références d'autant plus généralisables) que ce seuil tendra à être unique pour toutes les situations.

Du fait de la relativement petite taille des parcelles expérimentales individuelles (de 36 m² à 250 m² environ), dont seulement une petite partie était échantillonnée, et aussi du fait de l'interférence probable avec d'autres facteurs, la variabilité résiduelle de l'IR reste forte dans tous les essais, y compris sur le "plateau" de réponse et même les essais de longue durée, comme montré en exemple dans la Figure 1. Cela explique que dans les régressions entre IR et indicateur P du sol, les R² ne sont jamais très élevés.

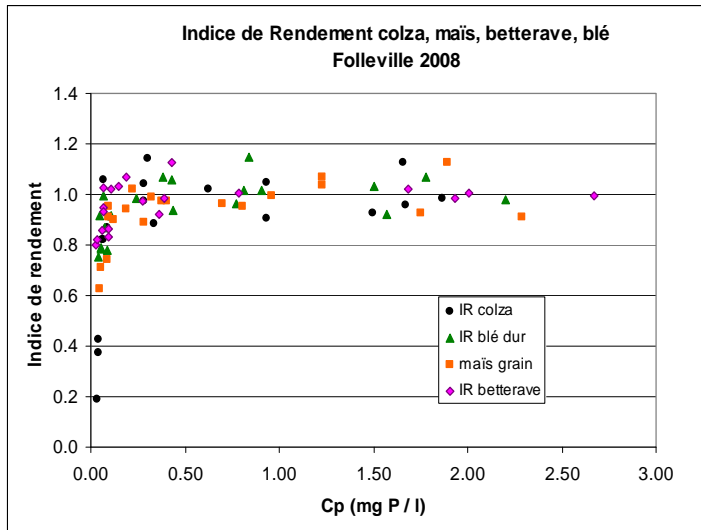


Figure 1 : Variabilité résiduelle du rendement (en indice)

De façon générale, on a constaté une bonne relation locale entre indicateur Cp et Rendement ou IR, et au niveau local cette corrélation est du même ordre de précision quand on considère l'indicateur Cp ou P Olsen, ce qui exprime aussi le fait que ces deux indicateurs sont fortement reliés dans un même type de sol (Figure 2).

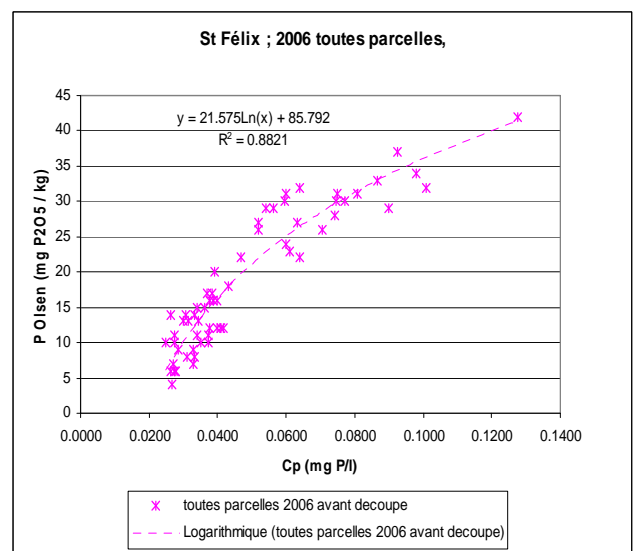
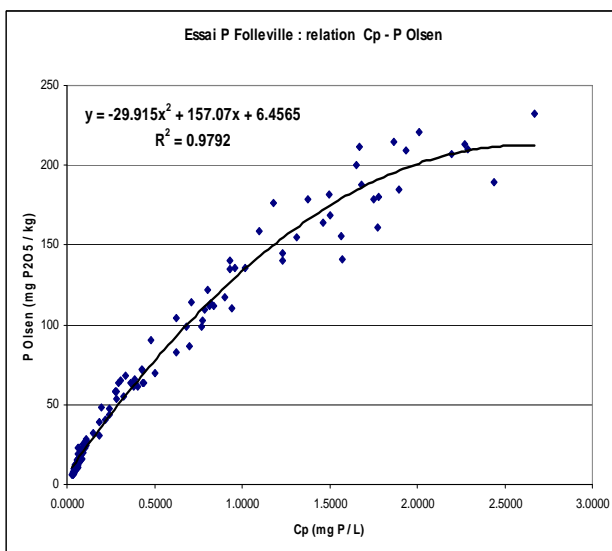


Figure 2 : Exemples de relations locales entre Cp et P Olsen. A gauche, sol limoneux (Folleville -78) à droite, sol argilo-calcaire (St Félix -17)

Pour évaluer l'universalité d'un indicateur, c'est-à-dire sa capacité à rendre compte de façon unique de la réponse des cultures dans des contextes variés, on va prendre en compte l'ensemble des situations expérimentales relatives à une culture donnée. Dans ce cas, on considère l'indicateur E (qui intègre, contrairement à Cp, la capacité du sol à réapprovisionner la solution), et le comparer à l'indicateur Olsen.

De façon générale, on constate que E rend compte d'une façon plus unifiée de la réponse de la culture, surtout en situation de carence, même si le R² de la régression (ou la Somme des Carrés des Ecartés résiduels, SCE) n'est pas amélioré de façon très forte (Figures 3 et 4).

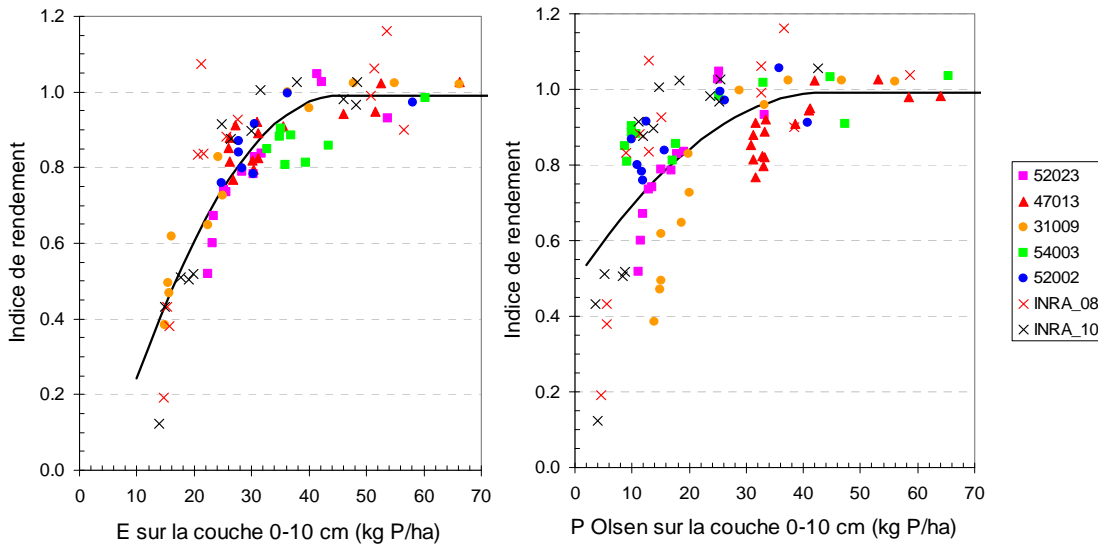


Figure 3 : Ensemble des essais colza ; la réponse de la culture dans chaque situation expérimentale est plus spécifique de chaque essai quand on utilise P_Olsen (SCE = 3.68) que quand on utilise E (SCE = 1.34). L'indicateur mécaniste E apparaît donc comme plus universel

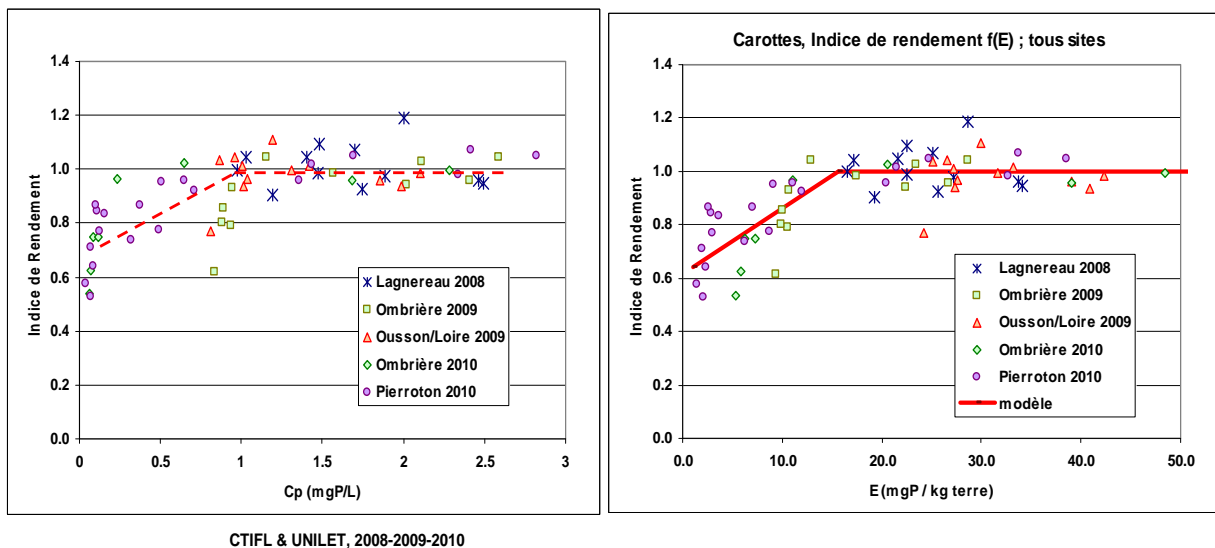


Figure 4 : Ensemble des essais carotte ; la réponse de la culture dans chaque situation expérimentale est plus spécifique de chaque essai quand on utilise Cp que quand on utilise E.

Dans le cas des céréales à paille (Tableau 2) l'utilisation de E améliore assez peu la corrélation entre indicateur de l'offre du sol et réponse de la culture, comparativement à P Olsen. Par contre il est confirmé que Cp est l'indicateur le moins universel.

Dans le cas du maïs, l'ajustement d'ensemble n'est pas amélioré par le remplacement de l'indicateur P Olsen par E, mais la variabilité inter-sites de l'estimation du seuil d'impasse est améliorée (Tableau 3). Ceci confirme un résultat déjà obtenu sur un autre jeu de données (Denoroy *et al.*, 2010)

L'évolution mesurée de l'offre du sol (Cp) a été comparée à celle calculée sur la base de l'équation de Freundlich et des apports d'engrais (TSP) réalisés. On constate en général une assez bonne corrélation des deux (exemples Figure 5) surtout aux niveaux bas de Cp qui sont ceux à viser en pratique.

		Somme des carrés des écarts résiduels		
	effectif	Cp 0-10 cm	P Olsen 0-10 cm	E 1 jour 0-10 cm
Blé dur	328	3.35	2.41	2.31
Orge	210	3.95	3.65	2.22
Blé tendre	76	0.12	0.09	0.08

Tableau 2 : Résumé de SCE entre IR des céréales à paille et indicateurs d'offre P du sol (modèle quadratique-plateau)

	Cp	P Olsen	E 1/2 j
Coefficient de corrélation de la courbe ajustée	0,18	0,37	0,40
Coefficient de variation des seuils de "non réponse"	118%	41%	26%

Tableau 3: Corrélation de IR à divers indicateurs et variabilité du seuil d'impasse

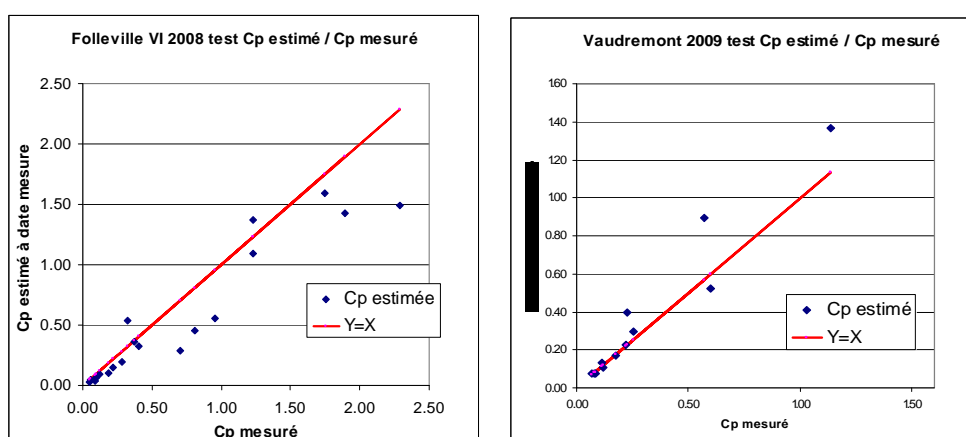


Figure 5 : Comparaison des Cp mesurés après apport d'engrais et des Cp calculés sur la base de l'équation cinétique de Freundlich et des quantités de fertilisant épandues, pour deux sites.

Ce constat justifie de s'appuyer sur l'équation de Freundlich pour calculer, quand l'analyse de terre indique une offre insuffisante du sol, la quantité de P à apporter pour remonter l'offre du sol au niveau du seuil d'impasse. On dispose ainsi d'un modèle mécaniste de calcul de la fertilisation nécessaire, ce qui n'était pas le cas avec les indicateurs analytiques actuels.

Le projet RIP a été le premier projet expérimental sur la fertilisation P coordonné au niveau national depuis plus de 20 ans. Il a été l'occasion d'acquérir de nombreuses références qui seront publiées au fur et à mesure de leur validation définitive. Par exemple, le classement relatif en "exigence" de certaines cultures pourrait se trouver mis en cause, la betterave s'étant en particulier montrée moins

exigeante que supposé puisque son IR (rendement relatif) n'est pas plus affecté par la baisse de l'offre P du sol que celui du maïs ou du blé, contrairement à l'orge ou au colza (Figure 6).

Production relative

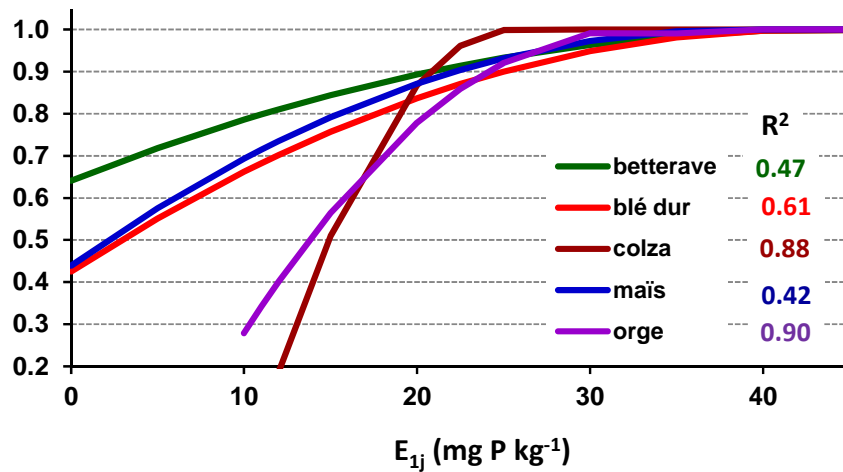


Figure 6 : Ajustement de l'IR suivant l'offre P du sol, site de Grignon-Folleville ; 3 betteraves, 3 blés dur, 3 maïs, 2 colza, 2 orges, de 2008 à 2010

3. Vers un raisonnement innovant de la fertilisation phosphatée, basée sur des indicateurs objectifs de la biodisponibilité du P

En résumé de ce qui précède, on retient :

- l'indicateur E est plus performant que P Olsen pour rendre compte de façon unifiée de la réponse d'une culture à la carence en P du sol dans des sites bien différenciés par leur sol,
- l'indicateur E permet également d'estimer un seuil d'impasse de façon moins variable entre sol, que l'indicateur P Olsen ou le seul P soluble,
- le formalisme proposé pour exprimer la biodisponibilité du P ouvre la possibilité d'un calcul objectif de la quantité de P soluble à apporter à un sol pour atteindre un niveau choisi d'offre en P,

Par ailleurs, on dispose d'un modèle ("CyP", Morel *et al.*, 2011) permettant de prévoir l'évolution multi-annuelle de l'offre en P du sol via le calcul de la quantité de P biodisponible.

Ces éléments permettent la formalisation d'ensemble (Figure 7) d'une rénovation du raisonnement de la fertilisation phosphatée, basée sur de nouveaux indicateurs de la biodisponibilité des ions phosphate du sol (cf. équation [1] et [2]).

Les grandes étapes de ce schéma sont :

- la comparaison pour toutes les cultures (ou groupes de cultures) envisagées, de l'offre E calculée à partir de la mesure Cp et des paramètres propres du sol, au seuil critique E_{rc} de chaque culture ; le diagnostic conclut à la nécessité ou non de fertiliser,
- en cas de nécessité de fertiliser, calcul de la dose à apporter pour remonter E au niveau critique ; en cas de non-nécessité, calcul avec le modèle CyP du nombre d'années d'impasse possible,
- on peut envisager un calcul parallèle de la dose nécessaire à entretenir la fertilité acquise, de façon à aider la définition d'une stratégie de fertilisation sur une succession culturale.

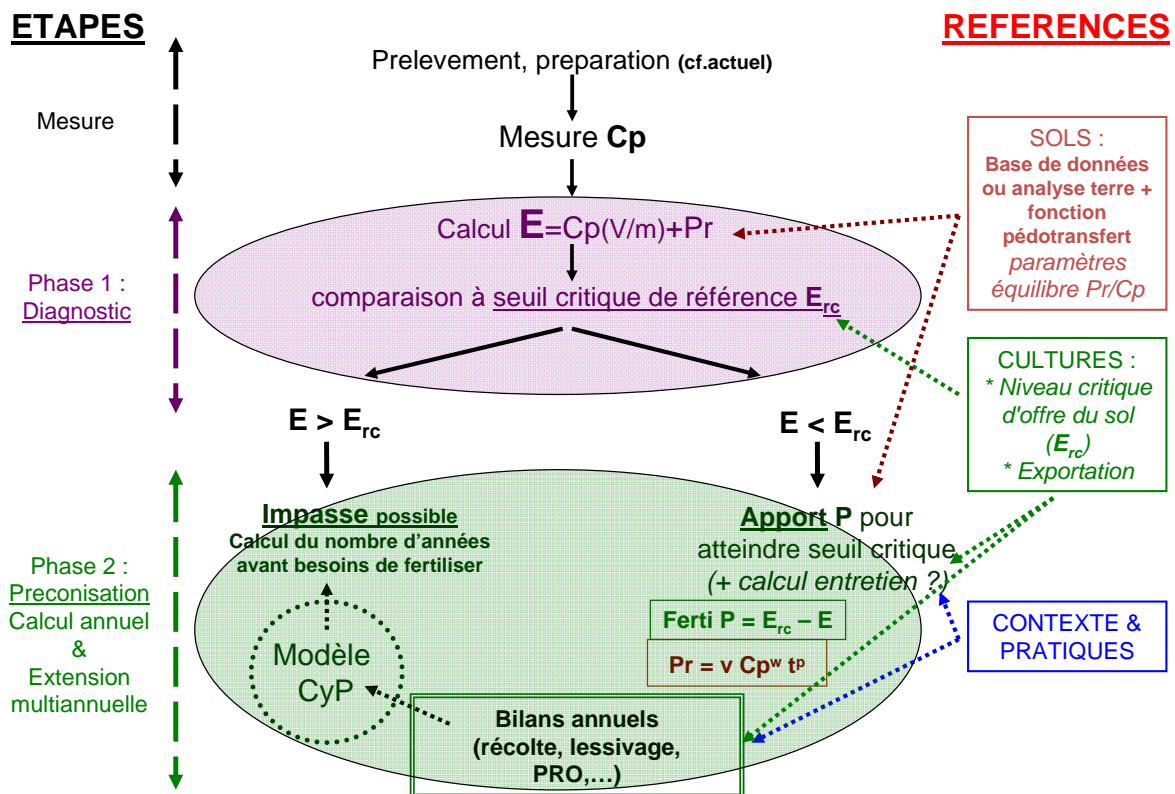


Figure 7 : Schéma pour un raisonnement rénové de la fertilisation phosphatée, basée sur de nouveaux indicateurs de la biodisponibilité du P

Pour que ce raisonnement innovant passe à la pratique, plusieurs obstacles doivent encore être levés :

- les premiers enseignements des essais menés dans le cadre du CasDAR-RIP doivent être confirmés. Sur le plan du diagnostic, l'universalité de l'indicateur E (pour rendre compte des réponses des cultures) n'est pas complète et il faut donc s'assurer que l'inexactitude qui résulterait de l'emploi de cet indicateur est compatible avec un niveau satisfaisant d'imprécision en termes de gestion de la fertilité et de contrôle des risques environnementaux;
- l'acquisition de références expérimentales doit être complétée. Ceci peut se faire par la mise en place de nouveaux essais (sur la base de la méthodologie testée dans le projet RIP). La réinterprétation des résultats acquis dans le passé (base de données des essais P COMIFER) peut être envisagée si les terres correspondantes peuvent être re-caractérisées vis-à-vis des nouveaux indicateurs;
- l'analyse C_p , bien que simple à réaliser, n'est encore pratiquée que dans des laboratoires de recherche. Son passage en routine, dans le cadre des laboratoires de service, doit être assuré et validé. Le GEMAS est l'interlocuteur indispensable pour cette étape;
- l'estimation des paramètres de l'équation cinétique de Freundlich doit pouvoir être acquise sans nécessiter systématiquement de traçage isotopique. Son estimation à partir de paramètres d'analyse de terre courante est une piste actuelle de travail de l'UMR TCEM (INRA Bordeaux), mettant en valeur les références acquises dans le cadre du projet RIP.

Sur toutes ces questions, le COMIFER sera sollicité pour aboutir à une rénovation des concepts pratiques, outils et références pour une gestion optimisée de l'intrant phosphore.

Conclusion

Initié largement autour du groupe PKMg du COMIFER, le projet RIP a permis un premier test en vraie grandeur de la pertinence d'indicateurs mécanistes de la biodisponibilité du phosphore. Jusqu'à présent, ces indicateurs n'étaient utilisés que dans le cadre de la recherche. Leur utilisation en condition agricole a mis en évidence des intérêts et des limites. Un premier schéma pour une rénovation assez profonde du raisonnement pratique de la fertilisation phosphatée peut cependant être proposé. Pour aboutir à un outil complètement paramétré et validé, des contributions du GEMAS et du COMIFER devront venir en appui aux acquis actuels aux travaux complémentaires nécessaires.

Remerciements :

Aux agriculteurs et CETA qui ont accueilli des essais, aux équipes techniques de terrain (Instituts) et unités expérimentales (INRA : Versailles-Grignon, Toulouse, Pierroton) ou fermes expérimentales (Chambres d'Agriculture : Miermaigne, Bignan) qui ont géré les essais.

Références bibliographiques

Boniface R., Trocmé S., 1988. Enseignements fournis par divers essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. Essais sur la fumure phosphatée. *In* Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquence sur la fertilisation (Gachon L. Ed.), INRA Editions, Versailles, pp.279-402

Colwell J.D., 1981. Some considerations in modelling the effects of fertilizers on crop yields. *The Journal of the Australian Institute of Agricultural Science* 47 (3), 142-148

Comifer, 1993. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures, Comifer, Paris, 36 pp.

Comifer, 1995, Eléments complémentaires à la méthode de raisonnement de la fertilisation PK permettant d'aider à sa mise en œuvre, Comifer, Paris, 49 pp.

Comifer 2009. Fertilisation PK, Grille de calcul de dose & Teneur en P, K & Mg des organes végétaux récoltés, 6 p., Comifer, Paris, (<http://www.comifer.asso.fr/images/stories/publications/livres/tablesexportgrillescomifer2009.pdf>)

Denoroy P., Dubrulle P., Villette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser M., Marin-Lafèche A., Pellerin S., Boiffin J., 2004, RegiFert, interpréter les résultats des analyses de terre, collection Technique et Pratique, Quae ed., Paris, 132 pp.

Denoroy P., Castillon P., Bouthier A., Morel C., 2010. Improving crop response diagnosis to soil phosphorus supply. *In*: Proceedings of Agro2010, the Xle ESA Congress, August 29th-September 3rd, 2010, Montpellier, France, pp.731-732

Fardeau J.-C., Morel C., Boniface R., 1988. Phosphore assimilable des sols. Quelle méthode choisir en analyse de routine. *Agronomie* 8, 577-584

Jordan-Meille L, 2009. Comparaison des méthodes de raisonnement de la fertilisation P en Europe : quels diagnostics pour quelles préconisations ? *In* Actes des 9eme Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse de terre, Blois, 25 & 26 novembre 2009. (<http://www.comifer.asso.fr/index.php/qui-sommes-nous/rencontres-de-la-fertilisation.html>)

Mollier A., De Willigen P., Heinen M., Morel C., Schneider A., Pellerin S., 2008 A two-dimensional simulation model of phosphorus uptake including crop growth and P-response. *Ecological Modelling* 210, 453-464.

Morel C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du P du sol par la modélisation du transfert des ions phosphate entre le sol et la solution. Document présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. INPL-ENSAIA Nancy. 80p. (http://www.bordeaux-aquitaine.inra.fr/tcem/page_personnel/morel_christian)

Morel C., 2007. Mobilité et biodisponibilité du phosphore dans les sols cultivés : mécanismes, modélisation et diagnostic. *Océanis* 33-1/2, 51-74

Morel C., Tuney H, Plenet D., Pellerin S., 2000. Transfer of phosphate ion between soil and solution. Perspectives in soil testing. *Journal of Environmental Quality* 29, 50-59.

Morel C. Butler F., Castillon P., Champolivier L., Denoroy P., Duval R., Hanocq D., Kouassi A.-S., Kvarnstrom A., Messiga A., Métraille M., Rabeharisoa L., Raynal C., Savoie T., Sinaj S., Ziadi N., 2011. Gestion à long terme de la dynamique du phosphore dans les sols cultivés. In Actes des 10eme Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse, Reims, 23 & 24 novembre 2011.

Schvartz C., Julien J.-L., groupe PKMg Comifer, 2009. Peut-on établir une correspondance entre les teneurs P Olsen et Joret-Hebert ou Dyer à partir de la BDAT ? In Actes des 9eme Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse de terre, Blois, 25 & 26 novembre 2009. (<http://www.comifer.asso.fr/index.php/qui-sommes-nous/rencontres-de-la-fertilisation.html>)