

VERS UN RAISONNEMENT INNOVANT DE LA FERTILISATION PHOSPHATÉE

DENOROY Pascal⁽¹⁾, BUTLER Fabienne⁽²⁾, CASTILLON Pierre⁽³⁾, CHAMPOLIVIER Luc⁽⁴⁾, DUVAL Rémy⁽⁵⁾,
FOURRIE Laetitia⁽²⁾, HANOCQ Daniel⁽⁶⁾, KOUASSI Anne-Sophie⁽⁷⁾, METRAILLE Matthieu⁽⁸⁾, MOREL Christian⁽¹⁾,
RABOURDIN Nina⁽²⁾, RAYNAL Christiane⁽⁹⁾, SAVOIE Thierry⁽¹⁰⁾, SOUPLÉ Nicolas⁽⁸⁾

⁽¹⁾INRA UMR TCEM, ⁽²⁾ACTA, ⁽³⁾Arvalis, ⁽⁴⁾CETIOM, ⁽⁵⁾ITB, ⁽⁶⁾Chambre d'Agriculture de Bretagne, ⁽⁷⁾UNILET,
⁽⁸⁾CETA de Romilly, ⁽⁹⁾CTIFL, ⁽¹⁰⁾Chambre d'Agriculture d'Eure et Loir

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 (Compte d'Affectation Spécial "Développement Agricole et Rural") 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 et méthode d'interprétation) validé et destiné à remplacer les pratiques actuelles.

Introduction : pourquoi proposer une rénovation du raisonnement de la fertilisation phosphatée, et sur quelles bases scientifiques

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 :

(1) un diagnostic de la situation rencontrée, c'est-à-dire une évaluation du risque de carence en P pour les cultures prévues, avec pour conséquence la détermination du besoin ou non de fertiliser

(2) 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, et que, pour une même culture et une même méthode analytique, les courbes de réponse à l'offre en P du sol estimée par cette méthode, vont être différentes entre types de sol contrastés, avec pour conséquence la nécessité d'adapter les valeurs de référence de l'interprétation au type de sol considéré, et 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, associé 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 expérimentale 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.

D'autres part, l'évaluation des doses de P à apporter aux cultures quand la fertilisation s'avère nécessaire, est encore largement empiriques, 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). En résumé,

- (1) les plantes s'alimentent en phosphore en absorbant les ions phosphate présents dans la solution du sol
- (2) 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 fertilisant.

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 $V/M = 10$ ml/g) et P_r la quantité (mg P/kg) de phosphate de la phase solide du sol, à l'équilibre avec C_p ,

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

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

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

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 réponse 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.

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'offre 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" (Cp et Pr, et partant, E) de la biodisponibilité du phosphate du sol sont en mesure :

(1) d'estimer de façon convaincante et plus universelle que les indicateurs courants actuels, 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.

(2) 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 C. Morel *et al.* (2011). Une part des résultats disponibles en juin 2011 est disponible sur le site web de l'ACTA : <http://www.acta.asso.fr/apps/accueil/autodefault.asp?d=7732>

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, incluant toujours des traitements carencés en P. Les espèces-types qui ont servi de support aux essais étaient : maïs (grain), blé dur, orge de printemps, betterave sucrière, colza d'hiver, carotte, 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 annuelles carencées en P.

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 ³²P, 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).

Tous les échantillons de terre ont été préparés suivant la procédure habituelle de l'analyse de terre : séchage à l'air & tamisage à 2 mm après écrasement des mottes. Chaque échantillon de terre a été analysé : mesure de Cp (TCEM, Bordeaux) et (pour une part) P Olsen (laboratoire LAS-Arras ou SAS-

Orléans). On a mis en évidence des corrélations curvilinéaires locales entre Cp et P Olsen, permettant de calculer P Olsen à partir de Cp quand P Olsen n'avait pas été directement mesuré.

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 entre rendement et Cp 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).

Tableau 1 : récapitulatif des essais

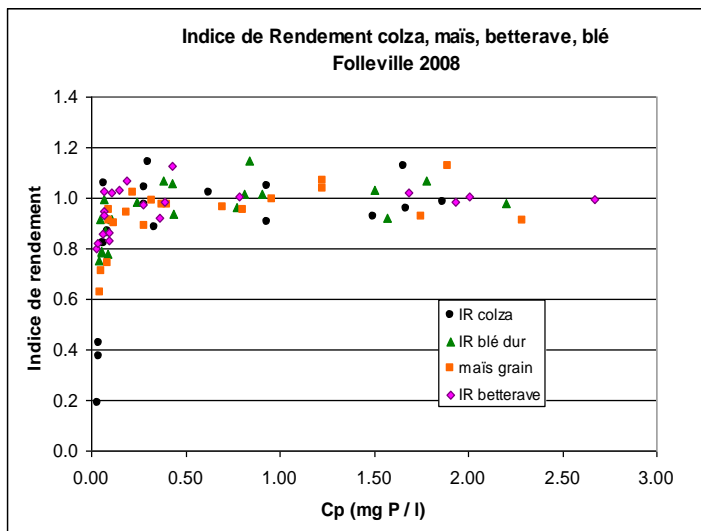
Cultures	Nombre	Cultures avec réponse au phosphore
Maïs	13 (2 fourrages)	12
Blé dur	12	8
Betterave sucrière	10	8
Colza	9	8
Orge	8 (4 printemps)	5 (3 printemps)
Haricot vert	5	5
Carotte	5	4
Blé tendre	2	2
Sorgho	1	1
Tournesol	3	2
Lin oléagineux	1	1
TOTAL	69	56

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. Dans les autres cas, l'offre du sol en P était, pour tous les traitements, trop élevée pour provoquer une carence en P des cultures. (tableau 1).

Principaux résultats de ce projet

Pour évaluer la pertinence pratique de nouveaux indicateurs pour le diagnostic relatif à l'offre P du sol et 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. Ceci est évalué par l'étroitesse de la corrélation générale entre indicateur et IR. Une variante de ce critère peut être de considérer en particulier la gamme de valeurs de l'indicateur pour laquelle il y a réponse de l'IR. 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 unique de la culture (seuil indépendant 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 2. Cela explique que dans les régressions entre IR et indicateur P du sol, les R² ne sont jamais très élevés.

Figure 2 : Indice de rendement pour diverses cultures dans un même site, une même année. A noter la variabilité résiduelle du rendement, même pour des niveaux élevés d'offre P du sol qui conduisent à un plateau de rendement.

De façon générale, on a constaté une bonne corrélation 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 corrélés dans un même type de sol (figure 3).

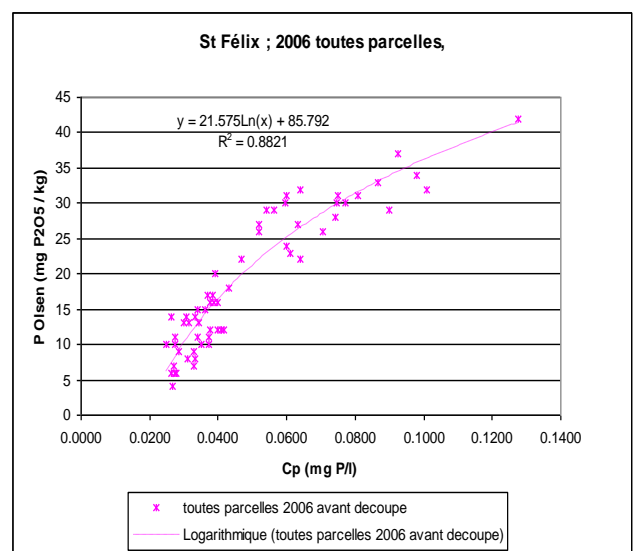
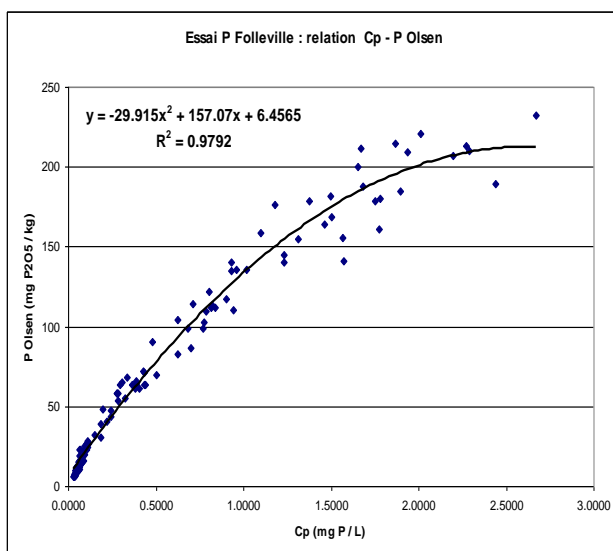


Figure 3 : exemples de corrélations locales entre Cp et P Olsen. A gauche, sol limoneux (Folleville -78) à droite, sol argilo-calcaire (St Félix -17)

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 on le compare 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 corrélation (ou la Somme des Carrés des

Ecart résiduel, SCE) n'est pas amélioré de façon très forte (figures 4 et 5, concernant respectivement les cultures de colza et de carotte).

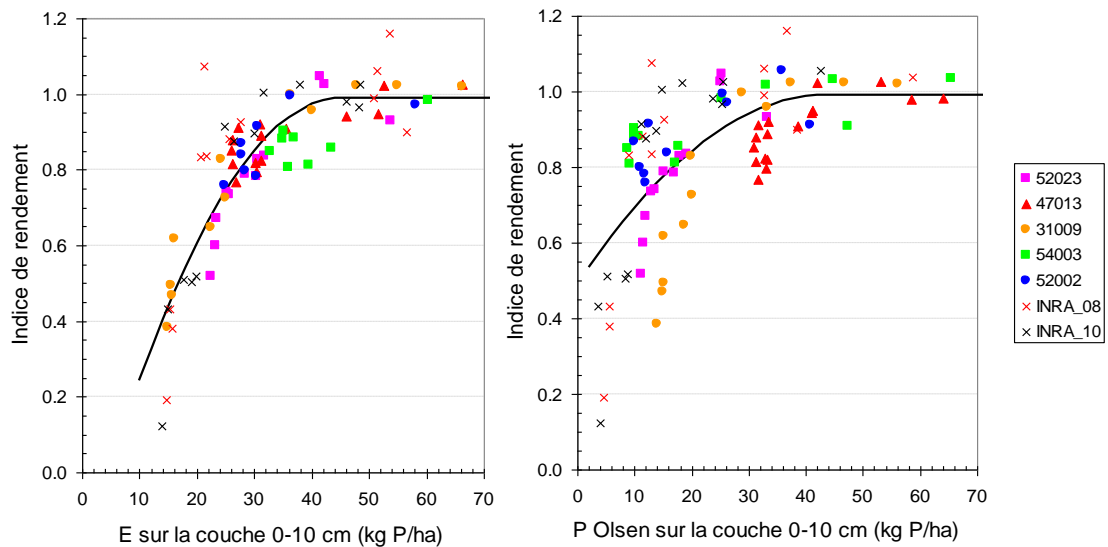
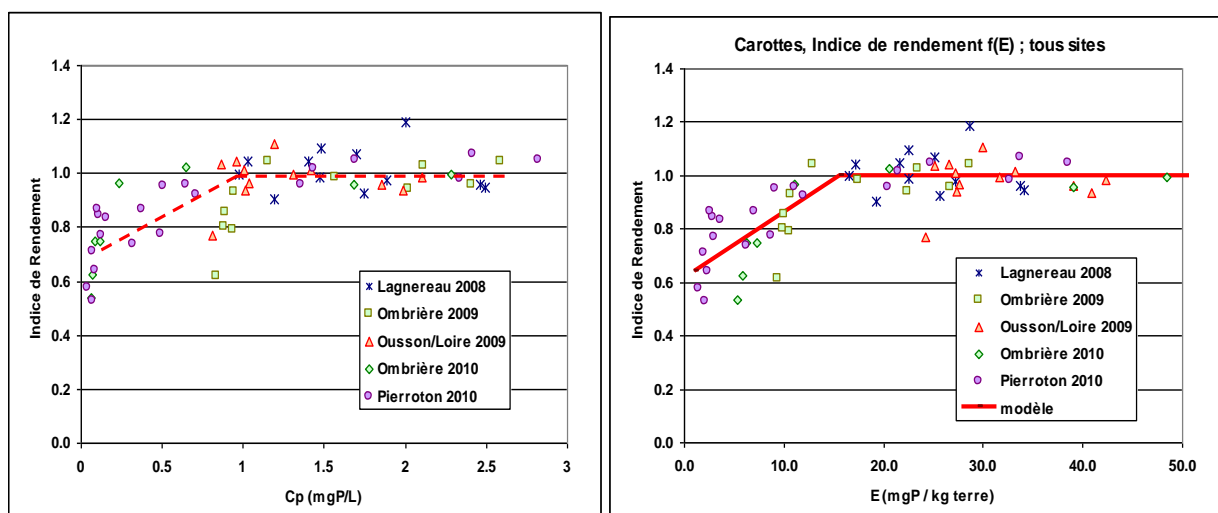


Figure 4 : ensemble des essais colza ; la réponse de la culture dans chaque situation expérimentale est plus spécifique de chaque essai quand on utilise P_Olsen (SCE = 3.68) que quand on utilise E (SCE = 1.34). L'indicateur mécaniste E apparaît donc comme plus universel



CTIFL & UNILET, 2008-2009-2010

Figure 5 : 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.

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

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.

	effectif	Somme des carrés des écarts résiduels		
		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

Dans le cas du maïs, l'ajustement d'ensemble n'est pas amélioré (voire même légèrement dégradé) 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 résultats déjà obtenu sur un autre jeu de données (Denoroy *et al.*, 2010)

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

	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%

La nouveauté de la méthodologie mise en œuvre pour obtenir des courbes de réponse, confrontée à la variété des conditions expérimentales rencontrées, ont conduit à une dispersion des résultats. En particulier, le suivi des essais annuels en non-labour s'est avéré plus délicat à réussir que celui d'essais de longue durée labourés. En effet, d'une part l'homogénéité intra-parcellaire de l'offre en P est plus difficile à assurer dans un essai récent en parcelle agriculteur, et d'autre part l'adéquation du prélèvement d'échantillon de terre à la profondeur réelle du mélange de l'engrais est plus difficilement assurée en travail superficiel.

La variabilité des courbes de réponse obtenues laisse donc persister de l'incertitude sur les conclusions actuelles. Toutefois, de façon générale, la pertinence des nouveaux indicateurs n'est jamais infirmée, même si sa supériorité vis-à-vis du P Olsen est plus ou moins marquée suivant les cultures considérées.

Dans l'interprétation d'une analyse de terre, en cas d'offre du sol inférieure au seuil d'impasse, on sera généralement amené à préconiser une fertilisation pour lever la carence nutritionnelle subie par la culture. Le modèle de biodisponibilité du phosphate (équations 1 et 2) et l'indicateur E, sensé rendre compte de l'ensemble du phosphate biodisponible doivent permettre d'approcher un nouveau mode de calcul de la fertilisation, plus rigoureux puisque basé sur des mécanismes géochimiques. Pour des valeurs initiales C_{pi} et P_{ri} (à l'équilibre) et une dose d'apport D_p (en P) dans une masse de terre fine MTF, on doit avoir théoriquement, j jours après apport d'engrais, des valeurs C_{pj} et P_{rj} telles que :

$$E_j = 10 C_{pj} + P_{rj} = 10 C_{pi} + P_{ri} + D_p \quad [\text{équation 3}], \text{ soit}$$

$$(10 C_{pj} + (v^* C_{pj}^w * (j*1440)^p)) = (10 C_{pi} + (v^* C_{pi}^w * (j*1440)^p)) + ((D_p*1000)/MTF) \quad [\text{équ. 4}]$$

La mesure de l'offre du sol après fertilisation a été comparée à l'offre calculée sur la base de l'équation de Freundlich et des apports d'engrais (TSP) réalisés. Les résultats sont exprimés ici avec l'indicateur Cp, plus sensible que E. On constate en général une assez bonne corrélation des deux (exemples figure 6) surtout aux niveaux bas de Cp (<0.5 mg P / L) qui sont ceux à viser en pratique.

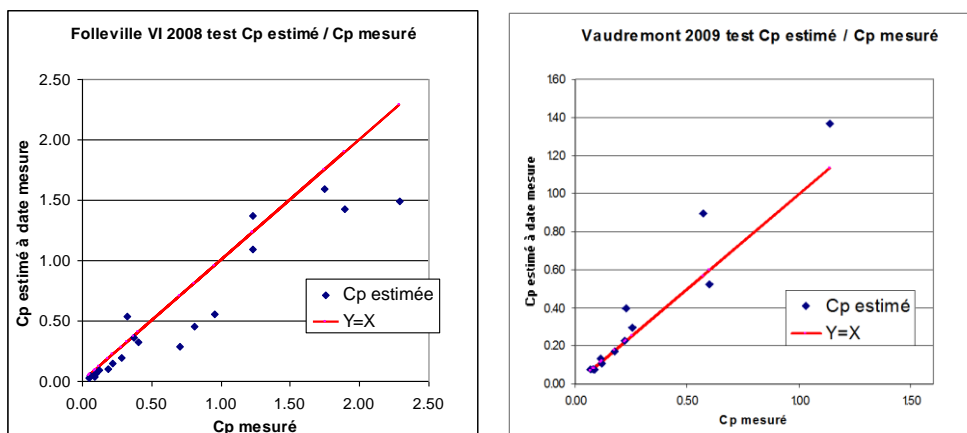


Figure 6 : comparaison des Cp mesurés après apport d'engrais et des Cp calculés sur la base de l'équation cinétique de Freundlich et des quantités de fertilisant épandues, pour deux sites.

Ce constat justifie de s'appuyer sur l'équation de Freundlich et le modèle de biodisponibilité proposé pour calculer la quantité de P à apporter pour remonter l'offre du sol au niveau du seuil d'impasse. Ce modèle présenté dans les équations 3 et 4 ci-dessus est fondamentalement le même que le modèle "CyP," proposé par Morel *et al.* (2011) pour les calculs multiannuels. 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.

Enfin, les essais mis en place ont permis d'actualiser un certain nombre de notions datant des années 1980-1990. Le projet RIP a en effet 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 7).

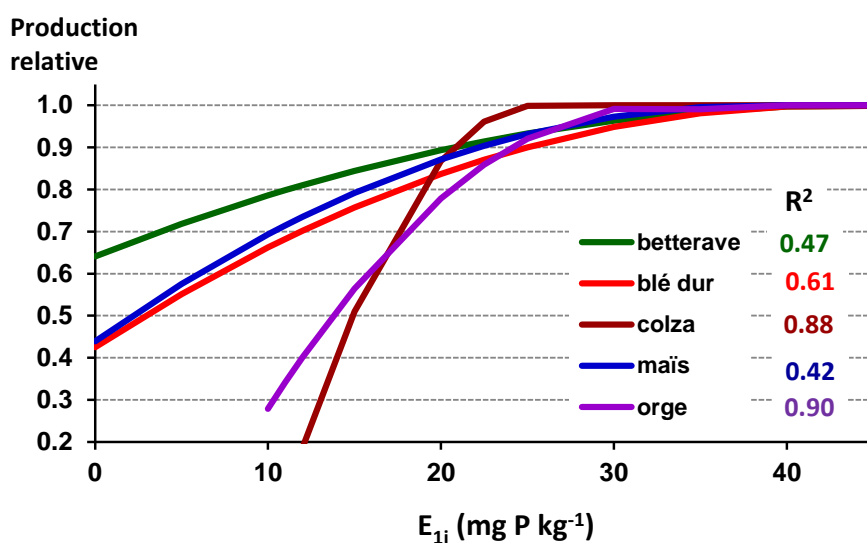


Figure 7 : ajustement de l'IR suivant l'offre P du sol, site de Grignon-Folleville ; 3 betteraves, 3 blés dur, 3 maïs, 2 colza, 2 orges, de 2008 à 2010

De même, le seuil d'impasse (C_p) de la carotte s'avère peu différent de celui du maïs grain (espèce "non exigeante") alors qu'on considèrerait *a priori* les cultures légumières comme exigeantes.

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," *in* 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 8) d'un raisonnement rénové de la fertilisation phosphatée, basée sur de nouveaux indicateurs de la biodisponibilité des ions phosphate du sol (cf. équation [1] à [4]).

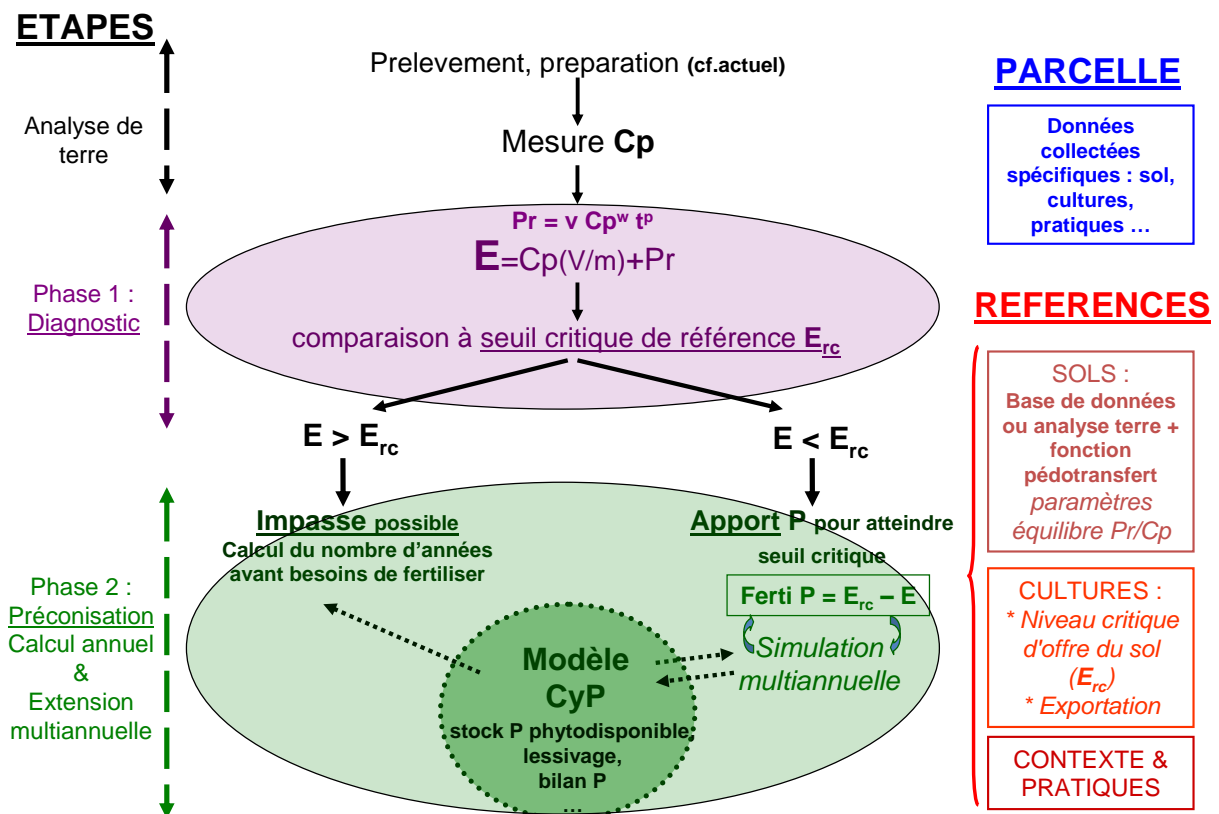


Figure 8 : schéma pour un raisonnement rénové de la fertilisation phosphatée, basée sur de nouveaux indicateurs de la biodisponibilité du P

Les grandes étapes de ce schéma sont, à la suite de l'analyse de terre (mesure de Cp) :

- 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.

Ce raisonnement est innovant à trois points de vue :

- utilisation en routine d'une détermination analytique nouvelle (Cp)
- utilisation d'un modèle de biodisponibilité des ions phosphate dans le sol basé sur l'équation dynamique de Freundlich (equ.2) et l'utilisation de la grandeur E (equ.3) pour caractériser le compartiment de P biodisponible du sol et conduire au diagnostic
- utilisation d'un schéma mécaniste de calcul de la dose de P soluble à apporter pour relever le niveau d'offre P du sol quand nécessaire, basé sur le même modèle de dynamique des ions phosphate.

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 Cp, 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, en particulier à travers son groupe PKMg, 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.

A Arnaud Schneider, Romain Naturel, Iven Cheenacunan, Aimé Messiga, analystes en CDD ou post-doc, qui ont réalisé la majeure partie des analyses.

Références bibliographiques

- Boniface & Trocmé, 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, Elements 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* Proceeding of Agro2010, the XI^e 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*, n°8, pp.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 9^{ème} 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., and 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*, vol.33-1/2, pp.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*, n°29, pp.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 10^{ème} 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 9^{ème} 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>)