

Evolution du raisonnement de la fertilisation phosphatée des grandes cultures

Etude par simulation de l'évolution des préconisations de fumure sur un échantillon test représentatif des sols et des successions de culture du Nord du Bassin Parisien

Frédérique Pellerin⁽¹⁾, S. Pellerin⁽¹⁾, Christine Vilette⁽²⁾ et J. Boiffin⁽³⁾

(1) INRA, unité d'Agronomie, 71, avenue Edouard-Bourleaux, B.P. 81, 33883 Villenave d'Ornon Cedex, France.

(2) Station Agronomique de l'Aisne, 02007 Laon, France.

(3) INRA, unité d'Agronomie, 02007 Laon, France.

RÉSUMÉ

Jusqu'à un passé récent, le raisonnement de la fertilisation phosphatée a été basé sur les notions de fumure d'entretien et de correction. L'objectif de la fertilisation était d'amener puis de maintenir le sol à la teneur en P extractible jugée souhaitable pour être non limitante du rendement. Le progrès des connaissances, et l'évolution du contexte de l'agriculture, ont amené les agronomes à faire évoluer ce mode de raisonnement. L'objectif de la fertilisation devient davantage de fertiliser la culture à venir, plutôt que d'amener le sol à un niveau de fertilité donné. L'objectif de ce travail est d'évaluer, grâce à des simulations, les conséquences de cette évolution conceptuelle sur les préconisations de fumure en utilisant deux logiciels (CERES et REGIFERT) correspondant à l'ancien et au nouveau mode de raisonnement. Les simulations ont été faites pour 4 successions de culture, 9 types de sol et une gamme réaliste de teneurs en P extractible, ce qui a conduit au total à 1 152 préconisations de fumure élémentaires. Nous avons vérifié que d'éventuelles différences entre les bases de données des deux logiciels n'étaient pas susceptibles de biaiser les comparaisons. Les simulations font apparaître une certaine cohérence entre les deux démarches : les préconisations d'impasse sous REGIFERT correspondent en majorité à des préconisations de correction négative sous CERES et, à l'inverse, les préconisations d'apport d'une fumure dite de complément de l'offre du sol sous REGIFERT correspondent en majorité à des préconisations de correction positive sous CERES. Cependant les préconisations de fumure REGIFERT sont en moyenne générale inférieures de moitié à celles de CERES. Ces écarts ont deux origines majeures : (i) l'abandon dans le nouveau mode de raisonnement de l'objectif de redressement des sols. Sous CERES cet objectif de redressement conduit à préconiser une correction positive dans 50 % des cas. Du fait du mode de calcul des fumures associé à cet objectif, les fumures préconisées par CERES sont alors très supérieures aux fumures préconisées par REGIFERT dans ces situations ; (ii) la possibilité qu'introduit le nouveau mode de raisonnement de préconiser des impasses, en les faisant porter en priorité sur les cultures sur lesquelles le risque de perte de rendement est minimal (espèces peu exigeantes). Dans la majorité des situations correspondantes CERES préconise une correction négative, mais les marges de sécurité associées à ce type de préconisation font que les fumures préconisées ne sont que légèrement inférieures à l'entretien. A l'échelle de la succession, les bilans [apports recommandés moins exportations] sont toujours positifs sous CERES, même lorsque le sol est bien pourvu, alors qu'ils sont négatifs, équilibrés ou positifs sous REGIFERT, en adéquation avec le diagnostic porté sur l'offre du sol.

Mots clés

Fertilisation phosphatée, phosphore, fumure d'entretien, fumure de correction, bilan apport-exportation.

SUMMARY**RECENT DEVELOPMENTS IN THE MANAGEMENT OF PHOSPHATE FERTILISATION OF ARABLE CROPS: consequences in terms of recommended fertilisation rates as studied by simulations on a range of soils and cropping systems representative of the north of the Paris basin.**

Until a recent past, the recommendation system used for phosphorus fertilisation in France was based on the concepts of maintenance fertilisation and correction (build-up) fertilisation. The objective of fertilisation was to make the soil reach a target P fertility level, which was supposed to be necessary for optimum yield, and then keep it at this level. Progress in the agronomic knowledge, as well as modifications of the context of agriculture, have led agronomists to modify this system. The objective of fertilisation is now more to fertilise the planned crop rather than make the soil reach a target P fertility level. The objective of this paper was to assess the consequences of this new concept of P fertilisation in terms of recommended fertilisation rates. Simulations were performed using two fertilisation recommendation software: CERES, based on the previous concepts of P fertilisation, and REGIFERT, corresponding to current concepts of P fertilisation. The simulations were made for 4 crop rotations, 9 soils and a realistic range of extractable P in soils (Table 6). On the whole, 1 152 elementary P fertilisation recommendations were simulated. We have checked that there was no big differences between both software for reference values, so that trends in recommended fertilisation rates could be mostly attributed to the new concept of P fertilisation (Fig. 6, 7; Table 8). Results showed an overall consistency between both software: recommendations of no fertilisation by REGIFERT mainly correspond with recommendations by CERES of fertiliser supply lower than maintenance (negative correction); Similarly, a fertiliser supply aiming at supplementing the soil supply was recommended by REGIFERT in most of the situations where CERES recommended to bring a build-up fertilisation (positive correction) (Table 11). On the average, recommended P fertilisation rates were however halved in the new system (Table 10). It appeared that the discrepancy had two main origins: (i) the giving up in the new concept of P fertilisation to make soils reach a target P level. Under CERES, this objective led to add an extra P supply to maintenance fertilisation in 50 % of the situations. Because of the associated objective, calculated P fertilisation rates by CERES in these situations were markedly higher than the corresponding REGIFERT recommended rates (Table 11; Fig. 9); (ii) the possibility introduced in the new system of recommending no fertilisation. These no fertilisation recommendations were mostly proposed on non susceptible crops on which the risk of reducing yield was minimum (Table 12). In most of the corresponding situations CERES recommended P fertilisation rates lower than maintenance fertilisation, but security margins associated with this kind of recommendations were so important that recommended fertilisation rates were only slightly lower than maintenance fertilisation rates (Tables 10 and 11). At a time scale corresponding to the crop rotation, P budgets (recommended inputs – outputs) were always positive under CERES, even for soils whose P availability was high. They were negative, equilibrated or positive under REGIFERT, in accordance with the soil P availability (Fig. 10 et 11).

Key-words

Phosphorus fertilisation, phosphorus, maintenance fertilisation, build-up fertilisation, phosphorus budget.

RESUMEN**EVOLUCIÓN DEL RAZONAMIENTO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE LOS CULTIVOS: ESTUDIO POR SIMULACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LAS PRECISIONES DE ABONO SOBRE UNA MUESTRA REPRESENTATIVA DE LOS SUELOS Y DE LAS SUCESIONES DE CULTIVOS EN EL NORTE DE LA CUENCA DE PARIS**

Hasta un pasado reciente, el razonamiento de la fertilización fosfatada se basaba en las nociones de abono de conservación y de corrección. El objetivo de la fertilización es hacer que el suelo alcance y mantenga un contenido de fósforo extractible juzgado deseable para no ser limitante al rendimiento. El progreso de los conocimientos y la evolución del contexto de la agricultura han llevado los agrónomos a hacer evolucionar este modo de razonamiento. El objetivo de la fertilización se convierte en fertilizar el futuro cultivo en lugar de hacer que el suelo alcance un nivel de fertilidad dado.

El objetivo de este trabajo es evaluar, gracias a simulaciones, las consecuencias de esta evolución conceptual sobre las recomendaciones de abonos usando dos programas (CERES y REGIFERT) que corresponden al antiguo y al nuevo modo de razonamiento. Las simulaciones fueron hechas para 4 sucesiones de cultivo, 9 tipos de suelos y una gama realista de contenidos en fósforo extractible, lo que conduce en total a 1152 recomendaciones de abono elemental. Hemos averiguado que eventuales diferencias entre los bancos de datos no eran susceptibles de modificar las comparaciones. Las simulaciones hacen aparecer cierta coherencia entre los dos enfoques: las recomendaciones de no abonar según REGIFERT corresponden en su mayoría a recomendaciones negativas según CERES. Sin embargo las recomendaciones de abono REGIFERT son generalmente inferiores a la mitad que las de CERES.

Estas diferencias tienen dos orígenes principales: (1) el abandono, en el nuevo razonamiento, del objetivo de rectificación de los sue-

los. Según CERES este objetivo de rectificación conduce a recomendar una corrección positiva en 50% de los casos. En razón del modo de cálculo de los abonos recomendados por REGIFERT en estas situaciones; (2) la posibilidad que introduce el nuevo modo de razonamiento es la recomendación de no abonar y de hacerlo en prioridad sobre los cultivos en los que el riesgo de pérdida es mínimo (especies poco exigentes). En la mayoría de las situaciones correspondientes, CERES recomienda una corrección negativa, pero los márgenes de seguridad asociados a este tipo de recomendación hacen que los abonos recomendados sean ligeramente inferiores a la conservación. A escala de la sucesión, los balances aportes recomendados – exportaciones son siempre positivos según CERES, incluso cuando el suelo está bien provisto, mientras que son negativos, equilibrados o positivos según REGIFERT, en adecuación con el diagnóstico dado sobre la oferta del suelo.

Palabras claves

fertilización fosfatada, abono de conservación, balance aporte-exportación.

Lesqu'à un passé récent le raisonnement de la fertilisation phosphatée a été basé sur l'analyse de terre, et les notions de **fumure d'entretien** et de **correction**. L'objectif était d'amener, puis de maintenir le sol au niveau de fertilité phosphatée jugé nécessaire pour obtenir le rendement maximum permis par le milieu pour toutes les cultures pratiquées. La justification de ce mode de raisonnement était que si la teneur à l'analyse d'un sol était insuffisante, le rendement maximum pouvait ne pas être atteint, même en présence d'apports récents et importants d'engrais⁽¹⁾ (Cooke, 1968; Trocmé et Boniface, 1972). Il en résultait donc la nécessité d'amener le sol à la teneur analytique jugée souhaitable puis de l'y maintenir. Les teneurs à atteindre dans les sols avaient été déterminées sur la base de **courbes de réponse** mettant en relation l'indice de rendement avec la teneur à l'analyse de terre, en prenant comme référence les cultures les plus sensibles à une déficience en P. L'insuffisance de l'analyse de terre pour évaluer correctement l'offre du sol en P, et la très grande "distance" qu'il y a entre cet indicateur et le rendement final des cultures, font que les relations obtenues sont généralement très lâches (Julien, 1989; Morel et al., 1992; Hochmuth et al., 1993) (figure 1). La dispersion des points fait qu'il est difficile d'en déduire des seuils ayant une portée générale. Dans le contexte de l'agriculture de ces dernières décennies (faible coût des engrais par rapport au prix des produits agricoles; faibles préoccupations de la société vis à vis des problèmes d'environnement), cette difficulté avait été contournée en choisissant des seuils hauts "sécuritaires par excès" minimisant le risque de perte de rendement. Cette position est de moins en moins justifiée, à la fois pour des raisons économiques et environnementales.

Les limites du mode de raisonnement précédent, conjuguées à l'évolution du contexte de l'agriculture, ont amené les agronomes à proposer une rénovation du mode de raisonnement de la fertilisation phosphatée (Comifer⁽²⁾, 1993; Colomb et al., 1999). Des essais au champ plus nombreux et mieux analysés ont mon-

tré que l'existence d'un effet "vieille graisse" (supériorité d'une fertilité acquise par rapport à des apports d'engrais récents) était l'exception plutôt que la règle. **L'intérêt des fumures de correction et le mode de calcul des fumures qui s'y rattachait ont donc été remis en question.** L'analyse de terre, et la détermination de seuils sur la base de courbes de réponse "indice de rendement x teneur à l'analyse de terre", demeurent à la base du raisonnement, **mais l'objectif de la fertilisation devient d'apporter puis de maintenir le sol à un niveau de fertilité donné. Cette évolution conceptuelle modifie le raisonnement de la fertilisation.** Plusieurs autres innovations ont été introduites. Les espèces ont été réparties en fonction de leur sensibilité à la déficience en P ou en K. Des seuils différents ont donc été proposés selon les groupes d'espèces. Le diagnostic sur l'offre du sol donné par l'analyse de terre est modulé par des critères tel que le passé récent de fertilisation, le pouvoir fixateur du sol ou l'enfouissement ou non des résidus du précédent. Enfin, la possibilité de faire des impasses⁽³⁾ est explicitement prévue lorsque le diagnostic sur l'offre du sol et la culture envisagée le permettent.

L'objectif de ce travail est d'analyser les conséquences de cette évolution conceptuelle sur les prescriptions de fumure.

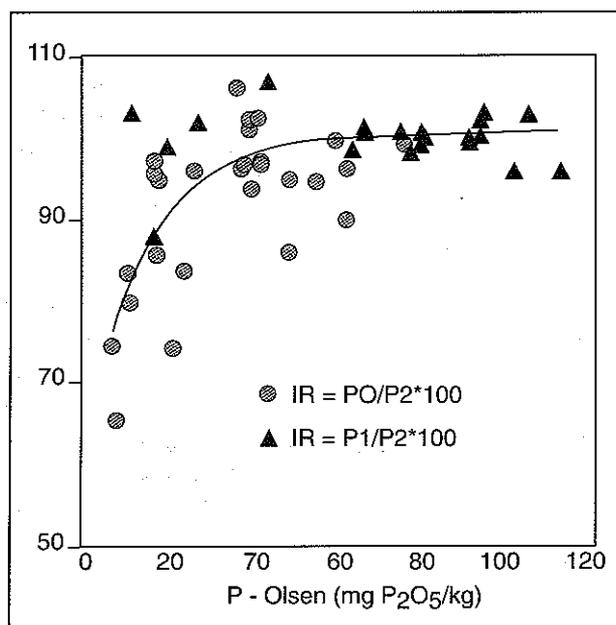
1 - Cette observation, basée sur quelques essais, avait amené les agronomes à introduire l'expression imagée de "vieille graisse" pour expliquer qu'en sol dont la teneur analytique était faible, des apports récents d'engrais même importants ne permettaient pas d'atteindre le rendement maximum.

2 - Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée.

3 - Absence d'apport de fertilisants. Dans l'ancien mode de raisonnement de la fertilisation la possibilité de faire des impasses était prévue mais celles-ci devaient être compensées par des apports accrus les autres années (regroupement des apports sur les cultures les plus sensibles à la déficience par exemple). Dans le nouveau mode de raisonnement apparaît la possibilité de faire des impasses "non compensées".

Figure 1 - Exemple de relation entre l'indice de rendement d'une culture de blé (IR) et la teneur en P Olsen du sol. L'indice de rendement est le rapport entre le rendement du traitement considéré (P0 ou P1) et le rendement d'un témoin supposé non limitant en P (P2). Le traitement P0 est non fertilisé en P, le traitement P1 reçoit une dose égale à une fois les exportations et le traitement P2 reçoit une dose égale à deux fois les exportations (d'après Morel *et al.*, 1992).

Figure 1 - Example of a relationship between the relative yield of wheat (IR) and the Olsen P content of the soil. IR is the ratio between the yield of the considered experimental treatment (P0 or P1) and the yield of a control non limited by P availability (P2). The P0 treatment received no P fertilisation. The P1 treatment received annually one fold the amount of P exported by yields and the P2 treatment received annually two fold the amount of P exported by yields (after Morel *et al.*, 1992).



Pour disposer de données chiffrées nous avons comparé les fumures prescrites par deux logiciels, l'un représentatif de l'ancien mode de raisonnement de la fertilisation phospho-potassique (CERES), dont les bases agronomiques ont été présentées par Rémy et Marin-Laflèche (1974) et l'autre intégrant les évolutions signalées précédemment (REGIFERT) (Colomb *et al.*, 1999). Cette comparaison a été faite sur une gamme de types de sols et de successions de cultures représentatives du Nord du bassin parisien. Les principes du raisonnement de la fertilisation et le détail du calcul des fumures dans chacun des deux logiciels sont rappelés dans le paragraphe suivant. Ces indications sont données pour la clarté de l'analyse, sachant que l'objectif de cet article n'est pas de

justifier la démarche et les modalités de calculs de chacun des logiciels.

PRÉSENTATION DU RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION PHOSPHATÉE DANS CHACUN DES DEUX LOGICIELS

La démarche du logiciel CERES

Bases du raisonnement

Le critère utilisé pour porter un diagnostic sur l'offre du sol en P est l'analyse de terre⁽⁴⁾. Si la teneur du sol est jugée satisfaisante, l'objectif de la fertilisation est de maintenir celle-ci à son niveau actuel. On pratique alors une fumure dite "d'entretien" destinée à compenser les pertes. Si par contre elle est jugée trop faible, ou trop élevée, on ajoute à la fumure d'entretien une fumure dite "de correction". Cette correction est positive lorsqu'on cherche à élever la teneur du sol et négative lorsque au contraire on accepte une baisse de cette teneur.

Etapes conduisant au choix d'une stratégie de fertilisation

Concrètement, pour un échantillon de sol dont la teneur en P a été analysée, les étapes qui conduisent à une préconisation de fumure sont les suivantes :

(1) La teneur du sol en P extractible est confrontée à des valeurs seuils selon un abaque correspondant à la méthode d'extraction utilisée (figure 2). Cette confrontation permet de placer l'échantillon dans une des 7 classes diagnostic allant de "très faible" à "très élevé". Les limites entre classes dépendent de la teneur du sol en argile et en matières organiques⁽⁵⁾. Deux valeurs seuils jouent un rôle particulier dans la mesure où elles vont orienter le choix d'une stratégie de fertilisation :

T_{s1} , à la limite entre les classes "assez faible" et "satisfaisant". T_{s1} sera considérée comme la teneur souhaitable minimale à atteindre.

T_{s2} , à la limite entre les classes "assez élevé" et "élevé". T_{s2} sera considérée comme la teneur souhaitable maximale à atteindre.

4 - Pour P, les deux méthodes les plus utilisées en France sont la méthode Dyer (extraction à l'acide citrique monohydraté 20 g/L) et la méthode Joret-Hébert (extraction à l'oxalate d'ammonium 0,1 mol/L). L'utilisation de la méthode Olsen (extraction au bicarbonate de sodium 0,5M à pH8,5) est plus récente et n'était pas prévue dans les abaques d'interprétation du logiciel CERES.

5 - Ce choix est basé sur le fait que pour une même teneur à l'analyse, la concentration en P dans la solution du sol est d'autant plus faible que la teneur du sol en adsorbants (argiles et matières organiques) est élevée. Pour cette raison plus la teneur du sol en adsorbants est élevée plus les seuils analytiques sont élevés.

Figure 2 - Abaque utilisé par CERES pour porter un diagnostic sur la teneur en P₂O₅ d'un échantillon de sol. A: teneur en argile de l'échantillon (g/1 000 g sol sec); MO: teneur en matières organiques de l'échantillon (g/1.000.g sol sec); TF: très faible; F: faible; f: assez faible; S: satisfaisant; e: assez élevé; E: élevé; TE: très élevé. Les seuils T_{s1} (limite entre les classes f et S) et T_{s2} (limite entre les classes e et E) en mg P₂O₅/1 000 g de sol sec sont calculés comme suit:

Pour la méthode Joret-Hebert:

$$Ts1 = 20 \times (1 + 0,005\sqrt{A + 5MO}) + [25 \times (1 + 0,020\sqrt{A + 5MO})] \times (3)^{1,3} \quad (1)$$

$$Ts2 = 20 \times (1 + 0,005\sqrt{A + 5MO}) + [25 \times (1 + 0,020\sqrt{A + 5MO})] \times (5)^{1,3} \quad (2)$$

Pour la méthode Dyer:

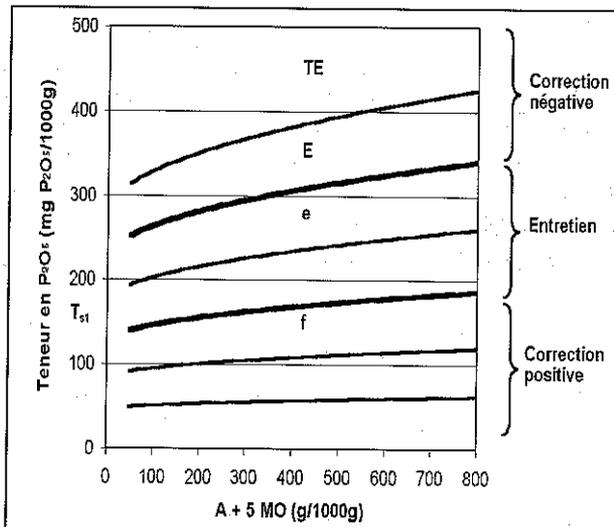
$$Ts1 = 40 + [33 \times (1 + 0,025\sqrt{A + 5MO})] \times (3)^{1,3} \quad (3)$$

$$Ts2 = 40 + [33 \times (1 + 0,025\sqrt{A + 5MO})] \times (5)^{1,3} \quad (4)$$

Figure 2 - Abacus used by CERES for giving a diagnosis on the P₂O₅ concentration in a soil sample. A: clay concentration (g/1 000 g of dry soil); MO: organic matter (g/1 000 g of dry soil); TF: very low; F: low; f: relatively low; S: sufficient; e: relatively high; E: high; TE: very high. Threshold values T_{s1} (limit between f and S classes) and T_{s2} (limit between e and E classes) in mg P₂O₅/1 000.g of dry soil were calculated according to equations:

For the Joret-Hebert's methods, threshold are calculated according to equations (1) and (2).

For the Dyer's method threshold values are calculated according to equations (3) and (4).



(2) Si la teneur du sol est jugée "satisfaisante" ou "assez élevée" (T_{s1} < teneur du sol < T_{s2}), on pratique une fumure "d'entretien" destinée à maintenir la teneur du sol à son niveau actuel. Si elle est jugée trop faible (inférieure à T_{s1}) on ajoute à la fumure d'entretien une fumure "de correction" positive destinée à amener le sol à la teneur T_{s1}. Si elle est jugée trop élevée (supérieure à T_{s2}) on ajoute à la fumure d'entretien une fumure de correction négative destinée à amener le sol à la teneur T_{s2}.

Calcul des fumures

Les fumures annuelles d'entretien (fen, en kg P₂O₅ ha⁻¹) et de correction (fco, en kg P₂O₅ ha⁻¹) sont calculées comme suit:

$$fen = (1 + \lambda) \times (E + D) \quad (5)$$

$$fco = (1 + \lambda) \times (COa) \quad (6)$$

Avec 1 + λ: terme de fixation à l'entretien. Ce terme est introduit pour tenir compte du fait qu'une stricte compensation des pertes ne suffit pas à maintenir la teneur analytique du sol. Il est calculé en fonction du pH de l'échantillon, de sa teneur en argile (A en g/1 000 g), en calcaire (CaCO₃ en g/1 000 g) et en matières organiques (MO en g/1 000 g):

$$\lambda = \frac{(0,2 \times A + 0,06 \times (pH)^2 \times \sqrt{CaCO_3})}{\sqrt{1000 \times MO}} \quad (7)$$

E: exportations par la récolte (en kg P₂O₅ ha⁻¹)

D: pertes par drainage (en kg P₂O₅ ha⁻¹). Ces pertes sont estimées en fonction de la teneur du sol en P₂O₅ (T_{P2O5}, en mg / 1 000 g), de son pH, de sa teneur en argile et en matières organiques:

$$D = \frac{(4000 \times T_{P2O5})}{(pH)^4 \times (A + 5MO)} \quad (8)$$

COa: correction annuelle calculée (en kg P₂O₅ ha⁻¹). La correction globale à apporter pour amener le sol de sa teneur actuelle (T_{P2O5}) à la teneur souhaitée (T_{s1} ou T_{s2}) est calculée en fonction de l'écart entre la teneur actuelle et la teneur visée, de l'épaisseur de la couche labourée (0,25 m) et de la densité apparente du sol (1,5). Cette correction globale est programmée sur 9 années selon les modalités décrites dans le tableau 1. Par sécurité les corrections négatives sont divisées par un facteur 3. Pratiquement, pour les 3 premières années, la correction annuelle calculée COa (en kg P₂O₅ ha⁻¹) est:

- dans le cas d'une correction positive :

$$COa = 10 \times (T_{s1} - T_{P_{205}}) \times (1,5 \times 0,25) \times \left(\frac{4}{21}\right) \quad (9)$$

- dans le cas d'une correction négative :

$$COa = 10 \times (T_{P_{205}} - T_{s2}) \times (1,5 \times 0,25) \times \left(\frac{4}{21}\right) \times \left(\frac{1}{3}\right) \quad (10)$$

Tableau 1 - Répartition de la fumure de correction au cours du temps

Table 1 - Sharing of correction fertilisation between years

Période	Correction	
	Positive	Négative
Années 1 à 3	(4/21)X	(4/21)x(1/3)Y
Années 4 à 6	(2/21)X	(2/21)x(1/3)Y
Années 7 à 9	(1/21)X	(1/21)x(1/3)Y

avec : $X = 10 \times (T_{s1} - T_{P_{205}}) \times (1,5 \times 0,25)$
 $Y = 10 \times (T_{P_{205}} - T_{s2}) \times (1,5 \times 0,25)$
 $T_{P_{205}}$: teneur du sol en P extractible

En résumé, et comme cela a été dit en introduction, la fertilisation est raisonnée de telle sorte qu'elle amène, puis qu'elle maintienne le sol entre les niveaux de fertilité T_{s1} et T_{s2} . Bien qu'elles soient prévues, les corrections négatives sont préconisées avec prudence puisqu'elles visent à amener le sol au niveau T_{s2} (et non T_{s1}) et qu'un coefficient de sécurité d'un tiers est appliqué au calcul.

La démarche du logiciel REGIFERT

Bases du raisonnement

Par rapport à la démarche précédente, le logiciel REGIFERT introduit une innovation importante dans deux domaines :

(1) La notion de **fumure de correction est abandonnée**. L'objectif de la fertilisation n'est plus d'amener le sol à une teneur jugée souhaitable. REGIFERT distingue par contre **deux types de fumures élémentaires**, correspondant à deux fonctions distinctes d'un apport d'engrais, à savoir :

(i) compléter l'offre du sol en P pour la culture immédiatement à venir si celle-ci est jugée insuffisante. La fumure correspondante calculée est dite "**fumure de complément de l'offre du sol pour la culture à venir**" (f_c);

(ii) compenser les pertes dues aux exportations par les récoltes si le maintien du niveau d'offre du sol actuel est jugé nécessaire. La fumure correspondante calculée est dite "**fumure de compensation des pertes**" (f_p);

La fumure de compensation des pertes correspond à la même définition que la fumure d'entretien du logiciel CERES. Elle est calculée sur la base des exportations par les récoltes. Par contre la fumure de complément de l'offre du sol pour la

culture à venir n'a pas d'équivalent dans CERES. Son calcul fait notamment intervenir le prélèvement maximal de P par la culture à venir et le diagnostic fait sur l'offre du sol.

(2) L'offre du sol en P est appréciée par l'**analyse de terre** (méthode Dyer, Joret-Hébert ou Olsen), avec **trois critères supplémentaires** pour porter un diagnostic et en déduire une stratégie de fertilisation. Il s'agit du "**niveau d'exigence**" de la **culture immédiatement à venir, du pouvoir fixateur du sol vis à vis du phosphore** et du **passé récent de fertilisation**.

"**L'exigence**" d'une culture vis à vis du phosphore est une notion traduisant la plus ou moins grande sensibilité de l'espèce à un niveau d'offre du sol en P faible. Elle est déduite de la réponse de la culture à l'absence continue d'apport en P dans des essais de longue durée. Le logiciel REGIFERT distingue deux classes d'exigence (cultures exigeantes et cultures non exigeantes). Concrètement, sur une espèce exigeante, l'absence continue d'apport de fertilisation phosphatée provoque une baisse significative de rendement à un niveau d'offre du sol supérieur à celui à partir duquel on observe une baisse significative du rendement sur une espèce non exigeante. Pour porter un diagnostic sur la teneur en P extractible d'un échantillon de sol, REGIFERT utilise donc deux valeurs seuils, associées à chacune de ces deux classes d'exigence :

L_{1P} : teneur du sol en P extractible au-dessus de laquelle **une impasse sur culture non exigeante** n'entraîne pas de chute significative de rendement⁽⁶⁾;

L_{2P} : teneur du sol en P extractible au-dessus de laquelle **une impasse sur culture exigeante** n'entraîne pas de chute significative de rendement.

Le **pouvoir fixateur** d'un sol traduit sa plus ou moins grande aptitude à fixer le phosphore sur la phase solide au détriment de la phase liquide. Différentes méthodes d'évaluation ont été proposées (Morel et Fardeau, 1990). Le logiciel REGIFERT utilise 5 classes de pouvoir fixateur (faible, assez faible, moyen, élevé, très élevé). Ce critère intervient notamment pour moduler le nombre maximum d'impasses successives acceptées. L'idée sous-jacente est qu'un pouvoir fixateur élevé entraîne une baisse plus rapide et plus forte de biodisponibilité du P apporté par les engrais (Boniface et Trocmé, 1988), d'où un nombre maximal d'années sans apport accepté plus faible.

Enfin le **passé récent de fertilisation** est apprécié au travers du nombre d'années d'impasses précédant la culture à venir. Il est d'autant plus défavorable que le nombre d'années d'impasses est élevé.

6 - Plus précisément on considère que le seuil L_{1P} (respectivement L_{2P}) doit permettre aux cultures non exigeantes (respectivement exigeantes) d'atteindre sans fertilisation complémentaire et dans 9 cas sur 10 un rendement au moins égal à 95% du rendement maximal obtenu en condition d'alimentation en P non limitante (Colomb et al., 1999).

Etapas conduisant au choix d'une stratégie de fertilisation

Concrètement, pour un échantillon de sol dont la teneur en P a été analysée, les étapes qui conduisent à une préconisation de fumure sont les suivantes :

(1) L'exigence de la culture à venir étant caractérisée, la teneur du sol en P extractible est confrontée aux deux valeurs seuils L_{1P} et L_{2P} . Cette confrontation oriente vers le choix d'une stratégie de fertilisation. Ainsi, pour une culture non exigeante, si la teneur en P extractible du sol est supérieure à L_{1P} , l'impasse est possible. Si cette teneur est inférieure à L_{1P} , un apport d'engrais sera recommandé. De même, pour une culture exigeante, si la teneur en P extractible du sol est supérieure à L_{2P} , l'impasse est possible. Si cette teneur est inférieure à L_{2P} , un apport d'engrais sera recommandé (figure 3);

(2) Les autres critères (pouvoir fixateur du sol vis à vis de P et passé récent de fertilisation) interviennent pour :

- (i) déterminer, parmi les cas où l'impasse apparaît possible, ceux où elle sera effectivement préconisée ;
- (ii) définir, lorsqu'un apport d'engrais apparaît nécessaire, le type de fumure pratiquée : f_e , f_c ou $\max(f_e, f_c)$.

La figure 4 présente les différents cas de figures dans le cas des cultures non exigeantes avec les préconisations de fumure associées. Le raisonnement qui aboutit à ces préconisations de fumure est le suivant⁽⁷⁾ :

- Si la teneur du sol est inférieure à L_{1P} , cela signifie, par définition du seuil L_{1P} , que l'offre du sol est insuffisante pour les cultures non exigeantes. Dans ce cas l'objectif de la fertilisation est double : (i) compléter l'offre du sol pour la culture à venir, puisque celle ci est insuffisante, donc apporter une fumure de type f_c et (ii) faire en sorte que la teneur du sol en P extractible ne diminue pas, puisque celle ci est jugée faible, donc apporter une fumure de type f_e . Concrètement la

fumure préconisée est la plus élevée de ces deux fumures élémentaires ($\max(f_e, f_c)$).

- Si la teneur du sol est supérieure à L_{1P} , cela signifie, par définition du seuil L_{1P} , que l'offre du sol est suffisante pour les cultures non exigeantes. Il n'est pas nécessaire de compléter l'offre du sol pour la culture à venir, il est donc inutile de faire intervenir f_c . Dans ce cas l'impasse est préconisée, sauf si les autres critères (pouvoir fixateur et passé récent de fertilisation) sont défavorables, auquel cas on préconise une fumure de type f_e . L'impasse est d'autant plus préconisée que la teneur du sol en P extractible est élevée, que le pouvoir fixateur est modéré et que le nombre d'années d'impasses précédant la culture à venir est faible.

Dans le cas des cultures exigeantes un raisonnement similaire conduit aux préconisations de fumure présentées dans la figure 5.

Calcul des fumures

Les fumures élémentaires f_c et f_e sont calculées de la manière suivante :

$$f_c = a + \left[\mu \cdot Pr^b \times \frac{1 - Cs}{Cru} \right] \tag{11}$$

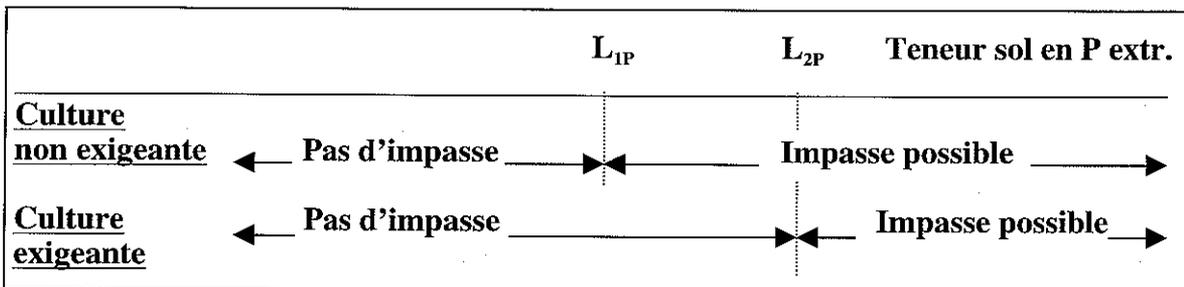
avec :

- a : quantité minimale à apporter dès qu'il y a apport ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)
- Pr : quantité maximale de phosphore prélevée par la culture au cours de son cycle ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).
- Cru : coefficient réel d'utilisation de l'engrais (sans dimension)
- Cs : contribution relative du sol à l'alimentation de la culture en P (sans dimension)
- μ et b : coefficients (sans dimension)

La formule de calcul de f_c a une base mécaniste (la quantité

Figure 3 - Correspondance entre les zones de teneur en P extractible et les stratégies de fertilisation pour les deux classes d'exigence des cultures.

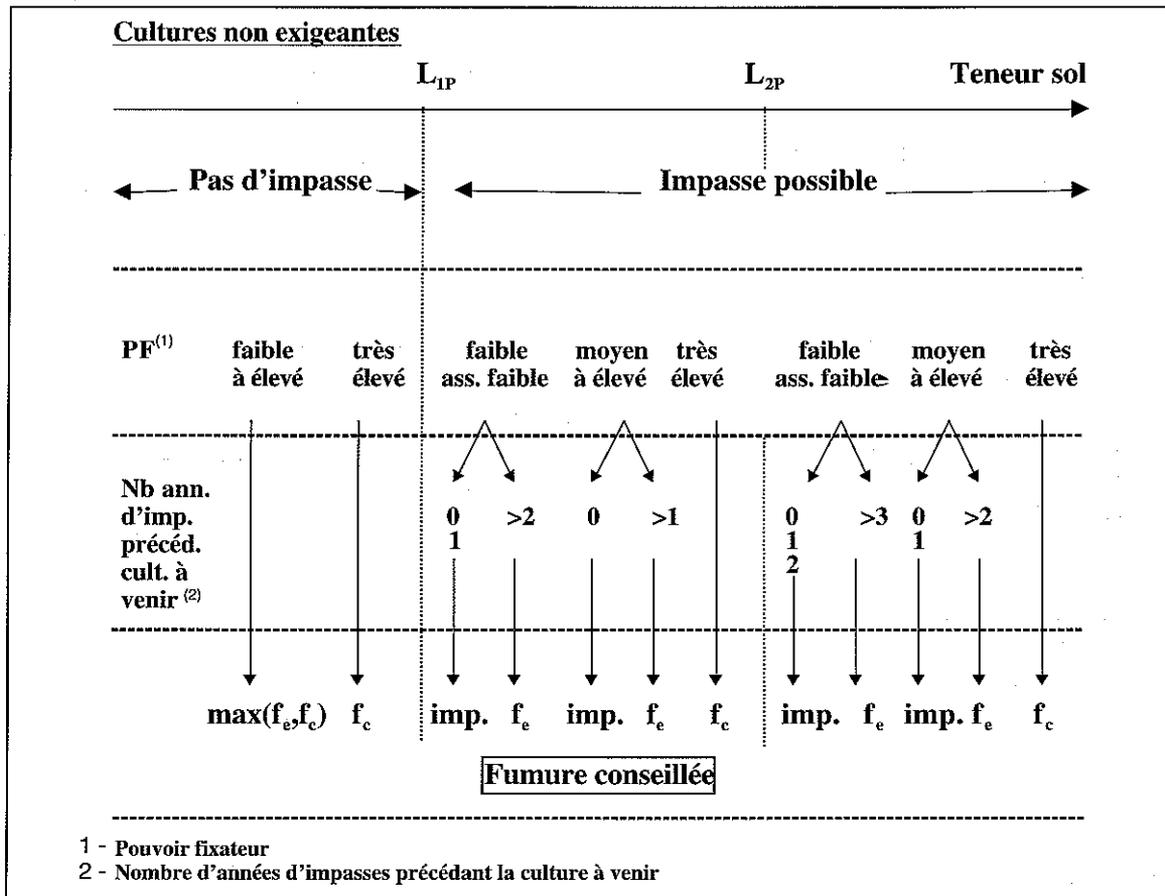
Figure 3 - Correspondence between extractable P in soils and fertilisation strategies for susceptible and non susceptible crops.



7 - Le cas "Pouvoir fixateur très élevé" est très rare en France métropolitaine, sauf dans le cas des Andosols

Figure 4 - Démarche pour le choix d'une stratégie de fertilisation dans le cas des cultures non exigeantes.

Figure 4 - Selection of a fertilisation strategy in the case of non susceptible crops.



d'engrais à apporter doit permettre de compléter la contribution du sol pour satisfaire le prélèvement maximal de la culture) avec cependant l'intervention de coefficients de calibrage (a, b et m). Les valeurs par défaut de ces coefficients et du Cru des engrais phosphatés solubles utilisées par REGIFERT sont données dans les *tableaux 2 et 3*. Le paramètre Cs prend une gamme de valeurs allant de 0,775 à 0,965 selon l'exigence de la culture, la présence ou non d'irrigation, la classe de teneur en P extractible et la classe de pouvoir fixateur (*tableau 4*).

$$f_e = \lambda_p \times E_p \quad (12)$$

avec:

λ_p : coefficient de perte d'extractibilité de P dans le sol au cours du temps (sans dimension). Ce coefficient est fonction du pH_{eau} de la teneur en calcaire total ($CaCO_3$) et en argile (*tableau 5*). Ce coefficient a la même définition que le terme $(1+\lambda)$ apparaissant dans le calcul de la fumure d'entretien dans CERES. Un symbole différent a cependant été utilisé

car les modalités de calcul ne sont pas strictement les mêmes dans les deux logiciels.

E_p : exportations (en $kg P_2O_5 ha^{-1}$).

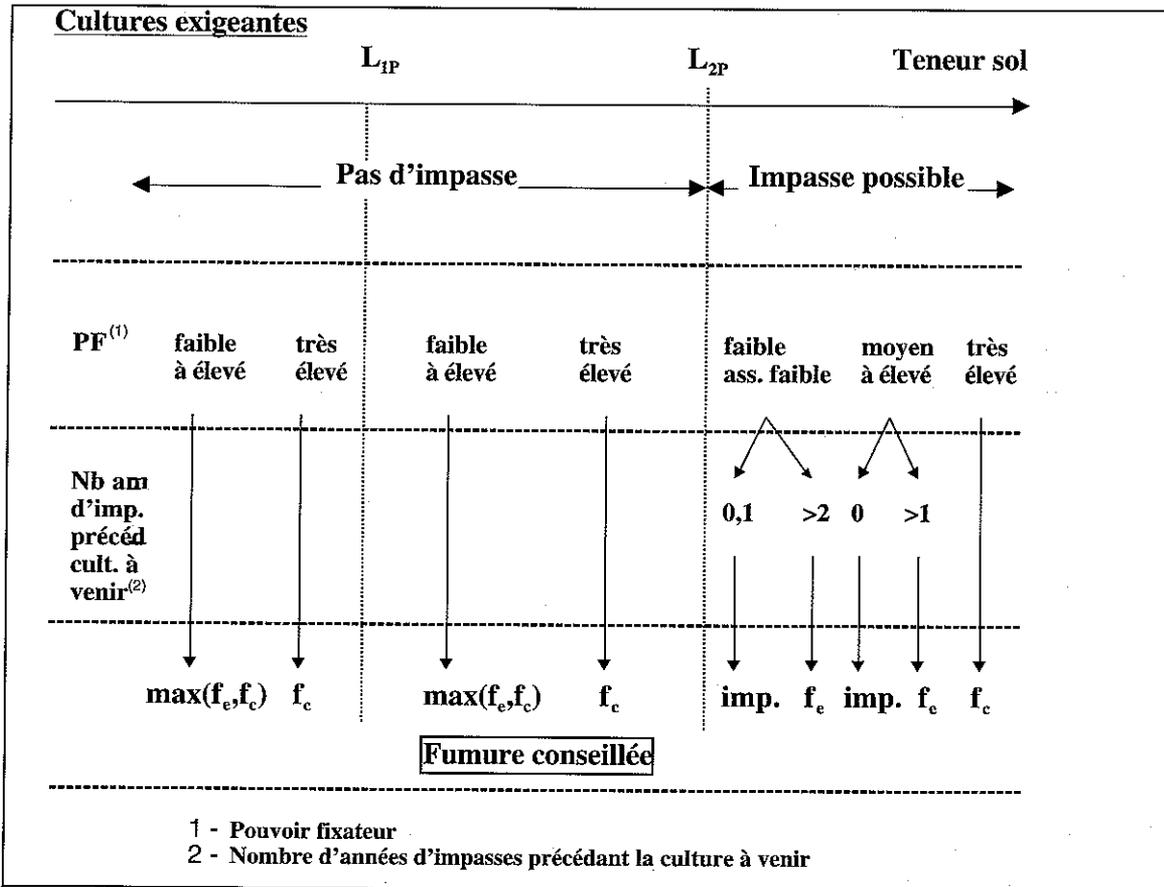
COMPARAISON DES PRÉCONISATIONS DE FUMURE SUR L'ÉCHANTILLON TEST

Présentation de l'échantillon

Les préconisations de fumure ont été calculées pour 4 successions de culture et 9 types de sol représentatifs du nord du Bassin parisien (*tableau 6*). Chacune des 4 successions n'a pas été croisée avec tous les types de sol car seules les combinaisons ayant une réalité agricole ont été étudiées. Pour chaque type de sol une gamme réaliste de 4 valeurs de P extractible a été explorée allant de valeurs faibles à des valeurs fortes. L'une ou l'autre des 2 méthodes d'extraction a été utilisée, ou les deux dans quelques types de sol. Pour chaque type

Figure 5 - Démarche pour le choix d'une stratégie de fertilisation dans le cas des cultures exigeantes.

Figure 5 - Selection of a fertilisation strategy in the case of susceptible crops.



de sol et niveau de P extractible, une gamme réaliste portant sur d'autres critères interférant avec le calcul des fumures a été également explorée (pH, teneur en CaCO_3 , etc.). Le tableau 6 récapitule l'ensemble des situations étudiées. Au total, le nombre de préconisations élémentaires est de 1 152.

Conventions prises

Le classement des cultures selon les classes d'exigence REGIFERT est indiqué dans le tableau 7.

Dans CERES, les seuils T_{s1} et T_{s2} ont été calculés d'après les teneurs en argile et en matières organiques des échantillons selon les formules indiquées dans le paragraphe précédent (figure 2). Dans REGIFERT, les seuils L_{1P} et L_{2P} ont été fixés d'après des références régionales. Le tableau 8 donne les valeurs seuils calculées par CERES ou utilisées par REGIFERT pour chaque type de sol et méthode d'extraction. A quelques exceptions près on observe que les seuils L_{2P} REGIFERT et T_{s2} CERES prennent des valeurs proches. Pour REGIFERT les sols ont de plus été classés en fonction de leur pouvoir fixateur vis à vis du phosphore (tableau 9).

Dans chacun des deux logiciels les calculs de fumure ont été faits en utilisant sa base de donnée associée. Les calculs d'exportations par exemple, ont été faits avec des références concernant les teneurs en P dans les organes récoltés propres à chacune des bases de données. La confrontation des exportations calculées par CERES d'une part et REGIFERT d'autre part montre qu'il n'existe pas d'écart important ou systématique à cet égard susceptible de biaiser les comparaisons (figure 6). De même les valeurs du coefficient de fixation utilisées par les deux logiciels sont proches, quoique légèrement supérieures dans le cas de CERES (figure 7). Sur l'échantillon, le terme $(1 + \lambda)$ de CERES varie entre 1,21 et 1,80 alors que le terme λ_p de REGIFERT varie entre 1,1 et 1,5.

Enfin, les simulations de calcul de fumure ont été faites en faisant l'hypothèse qu'il y avait eu un apport d'engrais P juste avant le début des successions étudiées afin de se placer dans la même situation pour les deux logiciels.

Tableau 2 - Valeurs par défaut des coefficients a, b, et Cru (d'après Colomb *et al.*, 1999)**Table 2** - Default values of coefficients a, b and Cru in Colomb *et al.*, 1999)

a	b	Cru
25	0,8	0,075

Tableau 3 - Valeurs par défaut du coefficient μ (d'après Colomb *et al.*, 1999)**Table 3** - Default values of coefficient μ in Colomb *et al.*, 1999)

	Culture irriguée	Culture non irriguée
Culture non exigeante	0,6	1
Culture exigeante	0,8	1

Tableau 4 - Valeurs par défaut du coefficient Cs (d'après Colomb *et al.*, 1999)**Table 4** - Default values of coefficient Cs (in Colomb *et al.*, 1999)

Classe de pouvoir fixateur	Culture non irriguée				Culture irriguée			
	Exigeante		Non exigeante		Exigeante		Non exigeante	
	$T_{P_{205}} < L_{1P}$	$L_{1P} < T_{P_{205}} < L_{2P}$	$T_{P_{205}} < L_{1P}$	$L_{1P} < T_{P_{205}} < L_{2P}$	$T_{P_{205}} < L_{1P}$	$L_{1P} < T_{P_{205}} < L_{2P}$	$T_{P_{205}} < L_{1P}$	$L_{1P} < T_{P_{205}} < L_{2P}$
1	0,9	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
2	0,875	0,915	0,925	0,95	0,925	0,95	0,925	0,95
3	0,85	0,89	0,9	0,95	0,9	0,95	0,9	0,95
4	0,825	0,865	0,875	0,925	0,875	0,925	0,875	0,925
5	0,775	0,815	0,825	0,9	0,825	0,9	0,825	0,9

1: faible 2: assez faible 3: moyen 4: élevé 5: très élevé

Tableau 5 - Valeurs par défaut du coefficient λ_p **Table 5** - Default values of coefficient λ_p

Teneur en argile (g/kg)	pH <= 5,5	5,5 < pH <= 7,5	pH > 7,5	
			CaCO ₃ <= 30g/kg	CaCO ₃ > 30g/kg
Argile <= 50	1,00	1,05	1,10	1,50
50 < Argile <= 250	1,30	1,10	1,20	1,50
Argile > 250	1,40	1,20	1,30	1,60

Résultats

Types de fumures et doses d'apport préconisées par chacun des deux logiciels sur l'ensemble de l'échantillon

Le *tableau 10* indique les types de fumures préconisées et les fumures moyennes préconisées par chacun des deux logiciels sur l'ensemble de l'échantillon, correspondant à 1 152 préconisations. CERES préconise une fumure inférieure à l'entretien (correction négative) dans 23,4 % des cas, une fumure égale à l'entretien dans 26,6 % des cas et une fumure supérieure à l'entretien (correction positive) dans 50,0 % des cas. Les fumures avec correction négative ne sont que légèrement inférieures aux fumures à l'entretien (72 kg P₂O₅ ha⁻¹ au lieu de 77), ce qui est la conséquence des marges de sécurité appliquées dans le cas des corrections négatives (teneur visée égale à T_{s2} et non à T_{s1} et réduction arbitraire d'un facteur 3 de la correction négative calculée). Les fumures avec correction

positive sont par contre nettement supérieures aux fumures à l'entretien (152 kg P₂O₅ ha⁻¹ au lieu de 77). En moyenne générale sur l'échantillon, la fumure préconisée par CERES est de 113 kg P₂O₅ ha⁻¹.

REGIFERT préconise une impasse dans 34,5 % des cas, une fumure de type f_e (équivalente à l'entretien) dans 19,9 % des cas et une fumure de type f_c dans 45,6 % des cas. En fait, lorsqu'un apport d'engrais est préconisé par REGIFERT, il s'agit d'un apport de type f_e dans 18,4 % des cas, f_c dans 54,9 % des cas et max (f_e, f_c) dans 26,7 % des cas. Les fumures f_c sont généralement supérieures aux fumures f_e, en particulier dans le cas des cultures exigeantes (*figure 8*), ce qui résulte de la prise en compte de l'exigence de la culture dans le calcul de f_c (*équation 11 et tableaux 3 et 4*). En conséquence, lorsque la fumure préconisée est le maximum de f_e et de f_c, c'est le plus souvent f_c qui est retenu. En moyenne générale sur l'échantillon, la fumure préconisée par REGIFERT est de

Tableau 6 - Inventaire des situations étudiées

Table 6 - List of the studied cases

Successions	Objectif de rendement (t/ha)	Type de sol	Gamme de P ext (mg/kg)	Méthode	Gamme de pH	Teneur en CaCO ₃ (g/kg)	Teneur en C (g/kg)	Nombre de préconisations élémentaires
MG/PF/BT	8/6/8	AI	100-200-350-500	D	7 à 7,8	0 à 10	8 à 10	3 x 4 x 6 = 72
PdT/PF/BT	35/6/8	S	80-180-300-440	D	6,6 à 7,5	0 à 10	7 à 8,5	3 x 4 x 6 = 72
		LS	90-200-310-450	D	7	1	8	3 x 4 x 3 = 36
BS/PF/BT	60/6/8	LS	90-200-310-450	D	7,5	10	8,5	3 x 4 x 1 = 12
		LS	60-130-220-310	JH	7,8	50	9	3 x 4 x 1 = 12
		S	60-130-220-310	JH	7,8	300	11	3 x 4 x 1 = 12
		LMS	80-180-300-440	D	6,8	0	7	3 x 4 x 2 = 24
		LLS	80-170-290-410	D	7,5	2	8,5	3 x 4 x 3 = 36
		LM	90-200-310-450	D	7 à 7,8	0 à 10	8 à 10	3 x 4 x 10 = 120
		LM	60-130-220-310	JH	7,8 à 8	50 à 100	9	3 x 4 x 5 = 60
		LC	60-130-220-310	JH	8	300	11 à 13	3 x 4 x 5 = 60
CO/BT/TO	3.5/8/3	CL	60-130-230-320	JH	8,4	600	15	3 x 4 x 2 = 24
		LA	65-140-240-350	JH	8	100	10,5	3 x 4 x 3 = 36
		LS	60-130-220-310	JH	7,8	50	9	3 x 4 x 1 = 12
		LS	90-200-310-450	D	7 à 7,5	1 à 10	8 à 8,5	3 x 4 x 4 = 48
		S	60-130-220-310	JH	7,8	300	11	3 x 4 x 1 = 12
		S	80-180-300-440	D	6,6 à 7,5	0 à 10	7 à 8,5	3 x 4 x 6 = 72
		LMS	80-180-300-440	D	6,8	0	7	3 x 4 x 2 = 24
		LLS	80-170-290-410	D	7,5	2	8,5	3 x 4 x 3 = 36
		LM	90-200-310-450	D	7 à 7,8	0 à 10	8 à 10	3 x 4 x 10 = 120
		LM	60-130-220-310	JH	7,8 à 8	50 à 100	9	3 x 4 x 5 = 60
		LC	60-130-220-310	JH	8	300	11 à 13	3 x 4 x 5 = 60
		CL	60-130-230-320	JH	8,4	600	15	3 x 4 x 2 = 24
		LA	65-140-240-350	JH	8	100	1,5	3 x 4 x 3 = 36
		AI	100-200-350-500	D	7 à 7,8	0 à 10	8 à 10	3 x 6 x 4 = 72

MG: Maïs grain; PF: Pois fourrager; BT: Blé tendre; PdT: Pomme de terre de consommation; BS: Betterave sucrière; CO: Colza d'hiver; TO: Tournesol
 AI: Argile limoneuse; S: Sable; LS: Limon sableux; LMS: Limon moyen sableux;
 LLS: Limon léger sableux
 LM: Limon moyen; LC: Limon calcaire; CL: Calcaire limoneux; LA: Limon argileux

D: Méthode Dyer; JH: Méthode Joret-Hébert

Le nombre de préconisations élémentaires est obtenu en multipliant le nombre de cultures dans la succession par le nombre de valeurs de P extractible et le nombre de valeurs prises par d'autres critères susceptibles d'interférer avec le calcul des fumures.

54 kg P₂O₅ ha⁻¹, soit la moitié de la préconisation moyenne CERES. Hors préconisation d'impasse elle est de 82 kg P₂O₅ ha⁻¹, ce qui signifie que l'écart de préconisation entre les deux logiciels ne provient pas que des impasses.

Le tableau 11 indique la distribution croisée des types de fumures préconisées selon les deux logiciels. Ce croisement montre une certaine cohérence entre les deux démarches: les

préconisations d'impasses par REGIFERT correspondent en majorité à des préconisations avec correction négative sous CERES; Les préconisations de type f_c sous REGIFERT (correspondant pour 21 % d'entre elles à des préconisations de type max (f_e, f_c)) correspondent en majorité à des préconisations avec corrections positives sous CERES. Lorsqu'une fumure d'entretien est préconisée par les deux logiciels (39

cas), les préconisations correspondantes sont très proches (52 et 49 kg P_2O_5 ha⁻¹), ce qui confirme qu'il n'y a pas d'écart important entre les deux logiciels pour le calcul des fumures d'entretien. **Les écarts importants de préconisation apparaissent dans deux cas de figure :**

(i) dans tous les cas où CERES **préconise une correction positive**. Les fumures CERES préconisées sont alors très

Tableau 7 - Classement des cultures selon leur exigence vis à vis de P

Table 7 - Crop susceptibility to Phosphorus deficiency

CULTURE	Niveau d'exigence
Betterave sucrière	Exigeante
Colza d'hiver	Exigeante
Pomme de terre consommation	Exigeante
Pois fourrager	Exigeante
Blé tendre	Non exigeante
Maïs grain	Non exigeante
Tournesol	Non exigeante

supérieures aux fumures REGIFERT correspondantes. Celles ci sont en majorité des fumures de type f_c (pour 67,2 % d'entre elles), mais l'objectif différent de ces fumures (compléter l'offre du sol pour la culture immédiatement à venir plutôt que d'amener le sol à une teneur visée), et le mode de calcul associé, conduisent à des préconisations f_c supérieures à l'entretien mais nettement inférieures aux fumures CERES correspondantes incluant une correction positive. Ce résultat est illustré par la *figure 9*, dans laquelle on a représenté les fumures préconisées REGIFERT (hors préconisation d'impasse), en fonction des préconisations correspondantes CERES, pour chacun des types de fumure CERES (correction négative, entretien ou correction positive). Les cas où les préconisations CERES sont nettement supérieures aux préconisations REGIFERT correspondent aux cas où CERES préconise une correction positive.

(ii) dans tous les cas où REGIFERT préconise une **impasse** puisque, par définition, les fumures REGIFERT sont alors nulles. Les fumures CERES associées correspondent en majorité à des préconisations avec correction négative (pour 48,2 % d'entre elles) ou à l'entretien (pour 32,4 % d'entre elles). Cependant les marges de sécurité associées aux corrections négatives sous CERES font que les préconisations correspondantes sont à peine inférieures à l'entretien.

Tableau 8 - Seuils utilisés par REGIFERT et CERES (en mg de P_2O_5 /1 000 g).

Table 8 - Threshold values used by REGIFERT and CERES (in mg P_2O_5 /1 000 g)

Type de sol	Méthode d'extraction	REGIFERT		CERES	
		L_{1P}	L_{2P}	T_{s1}	T_{s2}
AL	D	180	400	248,1 - 249,5	444,2 - 447
CL	JH	190	300	173	302,3
LA	JH	190	300	181,2	315,8
LC	JH	190	300	168,4 - 170,2	294,8 - 297,8
LLS	D	150	300	226,1	401,5
LM	JH	125	250	168,2	294,5
	D	180 - 190	300 - 350	225,6 - 227,6	400,5 - 404,5
LMS	D	180	350	196,9 - 224,5	334,2 - 398,4
LS	JH	125	250	168,2	294,5
	D	180	350	225,6	400,5
S	JH	150	300	168,4	294,8
	D	190	300	224,5	398,4

1 : La teneur en matière organique étant variable pour un type de sol donné, on obtient plusieurs valeurs seuils pour un même type de sol. Seules les valeurs extrêmes ont été reportées.

T_{s1} : teneur seuil en dessous de laquelle CERES préconise un apport supérieur à l'entretien (correction positive)

T_{s2} : teneur seuil au dessus de laquelle CERES préconise un apport inférieur à l'entretien (correction négative)

L_{1P} : teneur seuil au dessus de laquelle une impasse sur cultures non exigeantes n'entraîne pas une chute significative de rendement (impasse possible)

L_{2P} : teneur seuil au dessus de laquelle une impasse sur cultures exigeantes n'entraîne pas une chute significative de rendement (impasse possible)

Tableau 9 - Caractérisation des sols en fonction de leur pouvoir fixateur vis à vis de P.

Table 9 - Characterisation of soils according to their P fixing capacity

Type de sol	PF p
AL	3 et 4
CL	3
LA	4
LC	4
LLS	2
LM	3 et 4
LMS	3
LS	3 et 4
S	2 et 3

2 : assez faible 3 : moyen 4 : élevé

Analyse culture par culture

Les résultats par culture figurent dans les *tableaux 12 et 13*. Sous CERES, la fréquence des types de fumures préconisées est totalement indépendante de la culture à venir, ce qui est normal puisque celle-ci n'intervient ni dans le diagnostic ni dans le choix du type de fertilisation à apporter. Quelle que soit la culture, les fumures avec correction négative ne sont que légèrement inférieures aux fumures à l'entretien. Les fumures avec correction positive sont par contre toujours nettement supérieures aux fumures à l'entretien (*tableau 13*). Sous REGIFERT la fréquence d'impasses préconisées varie de 5 à 75 % selon la culture envisagée. Elle varie entre 5 et 25 % pour les espèces exigeantes et entre 14 et 75 % pour les espèces non exigeantes. Le pourcentage d'impasse est de 75 % sur maïs, qui est une espèce non exigeante et qui se trouve en tête de succession. Compte tenu des conventions prises, elle est précédée d'un apport, ce qui augmente la probabilité de

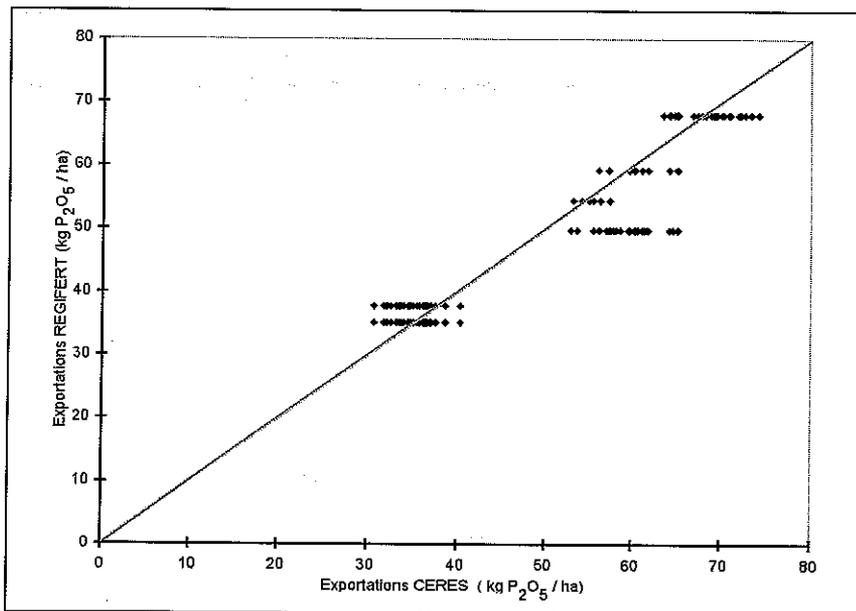


Figure 6 - Comparaison des exportations de P par culture (en kg P₂O₅ ha⁻¹) calculées par le logiciel CERES et le logiciel REGIFERT.

Figure 6 - Comparison of P exports by yields (in kg P₂O₅ ha⁻¹) calculated by CERES and REGIFERT.

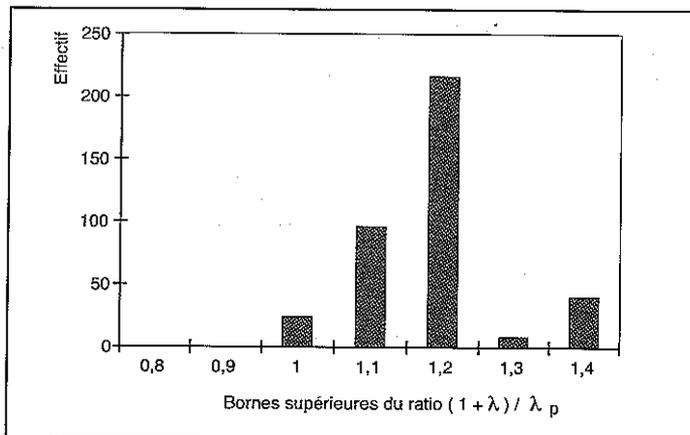


Figure 7 - Distribution des valeurs du rapport entre le terme de fixation à l'entretien calculé par CERES (1+λ) et le coefficient de perte d'extractibilité (λp) calculé par REGIFERT.

Figure 7 - Distribution of the ratio between the fixation coefficient calculated by CERES (1+λ) and the corresponding coefficient (λp) calculated by REGIFERT.

	Nombre de cas	%	Fumure moyenne préconisée (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)
Correction négative	270	23,4	72
Entretien	306	26,6	77
Correction positive	576	50,0	152
Total	1152	100,0	113
REGIFERT			
Impasse	398	34,5	0
fe	229	19,9	66
fc	525	45,5	90
Total hors impasse	754	65,5	82
Total	1152	100,0	54

Tableau 10 - Comparaison des fumures moyennes préconisées par CERES et REGIFERT sur l'échantillon test, toutes cultures confondues.

Table 10 - Comparison of average fertilisation rates recommended by CERES and REGIFERT on the studied sample, with all crops being considered.

Tableau 11 - Distribution croisée des types de fumure préconisées par CERES et REGIFERT. Nombre de cas correspondant à chacune des situations croisées et fumures moyennes recommandées par CERES et REGIFERT (en kg P₂O₅ ha⁻¹)

Table 11 - Cross distribution of kind of fertilisation recommended by CERES and REGIFERT. Number of cases corresponding to each crossed situation and associated average fertilisation rates recommended by CERES and REGIFERT (in kg P₂O₅ ha⁻¹)

CERES Type de fumure CERES préconisée		REGIFERT Type de fumure REGIFERT préconisée		
		Impasse	fe	fc
Correction négative	Nombre de cas	192	78	0
	Fum. moy. CERES	82	46	/
	Fum. moy. REGIFERT	0	47	/
Entretien	Nombre de cas	129	39	138
	Fum. moy. CERES	89	52	71
	Fum. moy. REGIFERT	0	49	86
Correction positive	Nombre de cas	77	112	387
	Fum. moy. CERES	124	170	152
	Fum. moy. REGIFERT	0	84	91

Figure 8 - Comparaison des fumures f_e et f_c (en kg P₂O₅ ha⁻¹). Ces deux fumures ont été calculées par REGIFERT dans 615 cas. A noter qu'il y a superposition de points dans de très nombreux cas.

Figure 8 - Comparison of f_e and f_c fertilisation rates (in kg P₂O₅ ha⁻¹). Both fertilisation rates were calculated by REGIFERT for 615 cases. Points corresponding to the studied cases were often superposed.

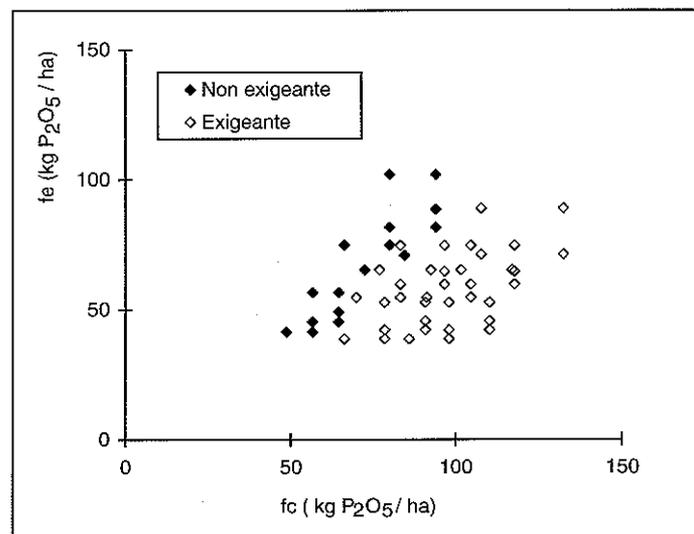


Figure 9 - Comparaison des préconisations de fumure REGIFERT et CERES, hors préconisation d'impasse. (a) : Fumures CERES avec correction négative (78 cas); (b) Fumures CERES à l'entretien (177 cas); (c) Fumures CERES avec correction positive (499 cas).

Figure 9 - Comparison of fertilisation rates recommended by REGIFERT and CERES, with the recommendations of no fertilisation being excluded. (a) : CERES recommendations with a negative correction (78 situations); (b) CERES recommendations with no correction (maintenance fertilisation) (177 situations) (c) CERES recommendations with a positive correction (499 situations).

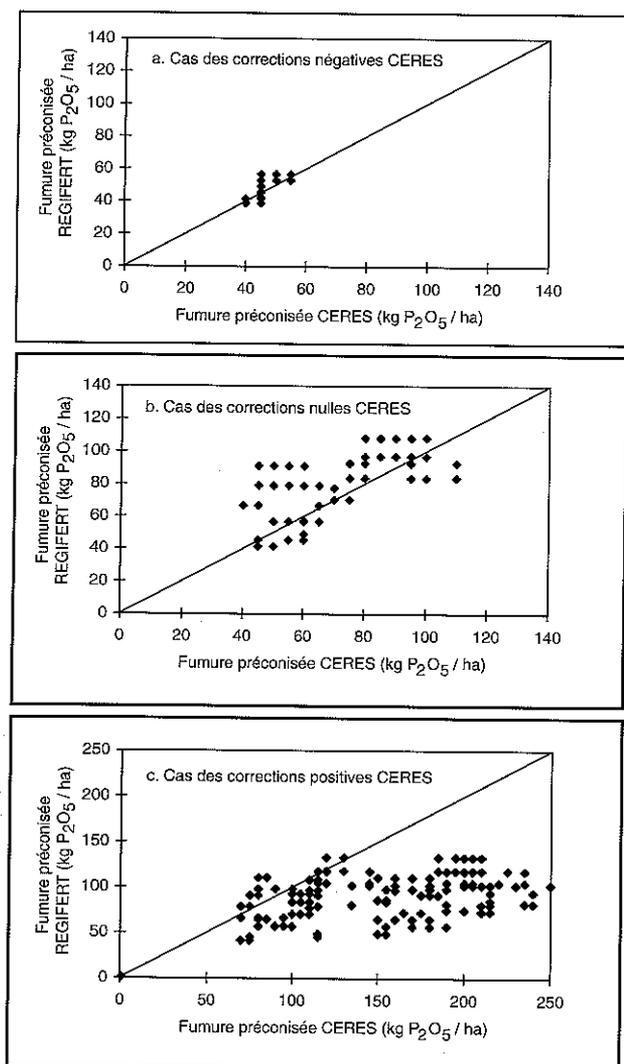
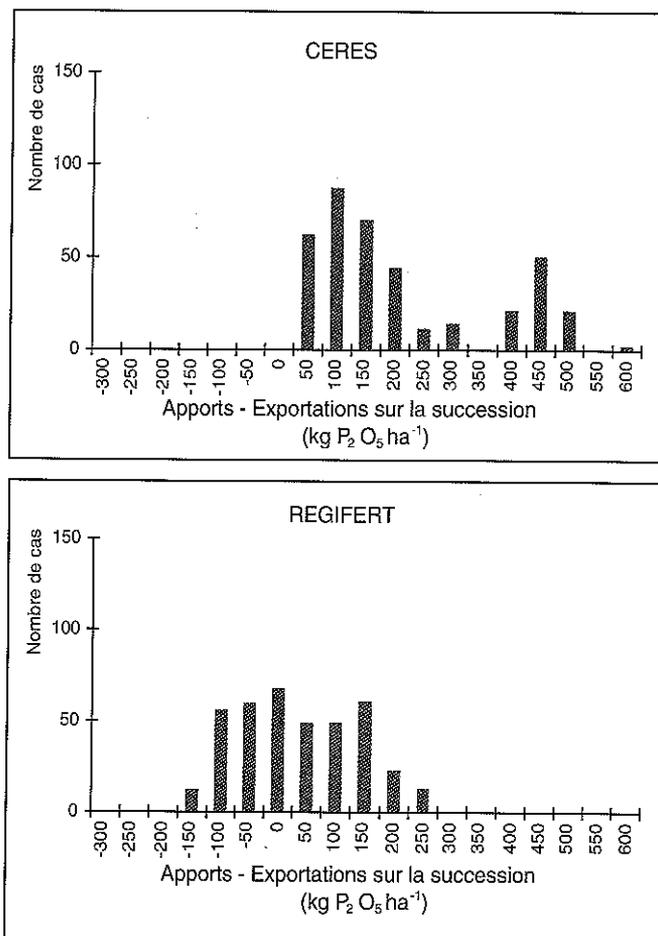


Figure 10 - Distribution de la valeur du bilan (Apports préconisés - Exportations) à l'échelle de la succession (en kg P₂O₅ ha⁻¹). (a) : CERES; (b) : REGIFERT.

Figure 10 - Distribution of the phosphorus balance (recommended inputs - outputs) at a time scale corresponding to the crop rotation (in kg P₂O₅ ha⁻¹). (a) : CERES; (b) : REGIFERT.



préconisation d'impasse. A l'inverse, le tournesol, bien qu'étant une espèce non exigeante, donne lieu à un faible pourcentage de préconisation d'impasse. Ce résultat est probablement la conséquence de sa troisième position dans la succession. Quand des impasses ont été préconisées sur les cultures qui précèdent, la probabilité de préconiser une impasse est en effet réduite du fait des règles relatives au nombre maximal d'impasses tolérées (figure 4). Sur cultures exigeantes, lorsqu'un apport est préconisé par REGIFERT, il s'agit le plus souvent d'un apport de type f_c.

Quelle que soit la culture, les préconisations REGIFERT moyennes par culture sont inférieures aux préconisations CERES (tableau 13). L'écart entre les préconisations des deux logiciels est supérieur dans le cas des cultures non exigeantes.

Tableau 12 - Type de fertilisation préconisé par culture (en %).

Table 12 - Kind of fertilisation recommended on each crop (in %).

CERES		Type de fumure préconisée (en %)		
Culture	Exigence	Correction négative	Entretien	Correction positive
BET. SUCRIERE	Exigeante	22,7	27,3	50,0
COLZA HIVER	Exigeante	23,4	26,6	50,0
P. DE T. CONS.	Exigeante	25,0	25,0	50,0
POIS FOURRAGE	Exigeante	23,4	26,6	50,0
BLE TENDRE	Non exigeante	23,4	26,6	50,0
MAIS GRAIN	Non exigeante	25,0	25,0	50,0
TOURNESOL	Non exigeante	23,4	26,6	50,0
Toutes cultures		23,4	26,6	50,0

REGIFERT		Type de fumure préconisée (en %)		
Culture	Exigence	Impasse	f_e	f_c
BET. SUCRIERE	Exigeante	25,0	0,0	75,0
COLZA HIVER	Exigeante	25,0	0,0	75,0
P. DE T. CONS.	Exigeante	25,0	0,0	75,0
POIS FOURRAGE	Exigeante	5,0	20,0	75,0
BLE TENDRE	Non exigeante	66,0	23,0	10,0
MAIS GRAIN	Non exigeante	75,0	0,0	25,0
TOURNESOL	Non exigeante	14,0	52,0	34,0
Toutes cultures		35,0	20,0	46,0

En moyenne, les préconisations REGIFERT sont de 35 kg P_2O_5 ha⁻¹ sur cultures non exigeantes et de 75 kg P_2O_5 ha⁻¹ sur cultures exigeantes, alors que les préconisations correspondantes sous CERES sont de 119 et 107 kg P_2O_5 ha⁻¹. En excluant les cas donnant lieu à préconisation d'impasse sous REGIFERT, les préconisations moyennes REGIFERT sont de 69,5 kg P_2O_5 ha⁻¹ sur cultures non exigeantes et de 91 kg P_2O_5 ha⁻¹ sur cultures exigeantes, alors que les préconisations correspondantes sous CERES sont de 138 et 114 kg P_2O_5 ha⁻¹. Ces résultats illustrent bien la forte prise en compte du niveau d'exigence des espèces par REGIFERT, à la fois pour les préconisations d'impasse mais aussi pour le calcul des fumures hors impasse.

Analyse à l'échelle de la succession

Les résultats à l'échelle de la succession sont présentés dans la figure 10. Le bilan calculé correspond à la différence entre le cumul des apports préconisés sur la succession et le cumul des quantités de P exportées. Le bilan des apports moins les exportations est toujours positif dans CERES, avec un solde positif pouvant atteindre 500 à 600 kg P_2O_5 en trois ans. Il est, selon les cas, positif, équilibré ou négatif dans REGIFERT. Dans la figure 11 on a mis en relation la valeur du bilan avec la classe diagnostique

sol P_2O_5 selon REGIFERT. Dans CERES, le bilan est d'autant plus positif que l'offre du sol est jugée faible. Il est cependant également positif, quoique dans une moindre mesure, pour les classes d'offre du sol les plus élevées. Ce résultat peut surprendre dans la mesure où CERES peut préconiser des corrections négatives. L'absence de bilan réellement négatif à l'échelle de la succession est en fait la conséquence des coefficients de sécurité appliqués aux corrections négatives (tableau 1) et de l'intervention du coefficient de fixation qui fait que les fumures d'entretien sont toujours supérieures aux exportations. Dans REGIFERT, par contre, on observe des bilans légèrement positifs pour les classes d'offre du sol les plus faibles (inférieures à L_{1p}), équilibrés pour les classes d'offre intermédiaires (entre L_{1p} et L_{2p}) et négatifs pour les classes d'offre du sol élevées (supérieures à L_{2p}).

CONCLUSION

Les 1 152 préconisations de fumure simulées dans le cadre de ce travail à l'aide des logiciels CERES et REGIFERT montrent que l'évolution récente du mode de raisonnement de la fertilisation phosphatée conduit à une réduction moyenne d'environ 50 % des doses d'apport préconisées. L'analyse de l'origine des écarts

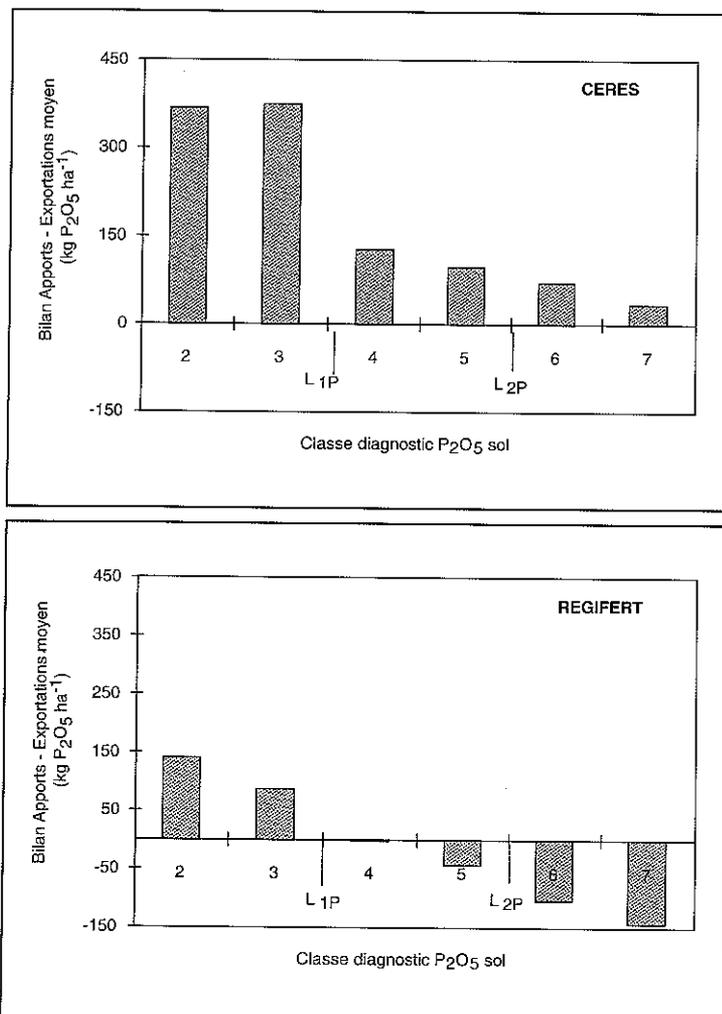


Figure 11 - Bilan moyen (Apports préconisés - Exportations, en kg P₂O₅ ha⁻¹) à l'échelle de la succession en fonction des classes diagnostic sur l'offre du sol en P ordonnées par ordre croissant.

Classe 2: teneur du sol inférieure à L_{1P}, pouvoir fixateur (PF) moyen ou élevé; Classe 3: teneur du sol inférieure à L_{1P}, PF faible ou assez faible; Classe 4: teneur du sol intermédiaire entre L_{1P} et L_{2P}, PF moyen ou élevé; Classe 5: teneur du sol intermédiaire entre L_{1P} et L_{2P}, PF faible ou assez faible; Classe 6: teneur du sol supérieure à L_{2P}, PF moyen ou élevé; Classe 7: teneur du sol supérieure à L_{2P}, PF faible ou assez faible.

(a): CERES; (b): REGIFERT.

Figure 11 - Average balance (recommended input - outputs, in kg P₂O₅ ha⁻¹) at a time scale corresponding to the crop rotation as a function of the class of soil P availability ranked by increasing order.

Class 2: extractable soil P lower than L_{1P}, soil fixing capacity for P (FCP) intermediate or high; Class 3: extractable soil P lower than L_{1P}, FCP low or relatively low; Class 4: extractable soil P between L_{1P} and L_{2P}, FCP intermediate or high; Class 5: extractable soil P between L_{1P} and L_{2P}, FCP low or relatively low; Class 6: extractable soil P above L_{2P}, FCP intermediate or high; Class 7: extractable soil P above L_{2P}, FCP low or relatively low.

(a): CERES; (b): REGIFERT.

de préconisations de fumure observés entre les deux logiciels doit bien entendu être conduite avec prudence car plusieurs modifications du mode de raisonnement ont été introduites simultanément (abandon de la notion de fumure de correction, introduction de la notion de fumure de complément de l'offre du sol, introduction de la notion d'exigence des espèces, intervention du pouvoir fixateur, acceptation de l'impasse, etc.). Sans pouvoir faire totalement la part des choses, il apparaît cependant que la réduction des préconisations a deux origines majeures :

- **l'abandon par REGIFERT de la notion de redressement (correction positive)**. Sous CERES l'objectif d'amener le sol au seuil T_{s1} conduit à préconiser une correction positive dans 50 % des cas (tableau 10). Or, la figure 9c montre que c'est dans le cas où une correction positive est préconisée que les préconisations CERES sont le plus nettement supérieures aux préconisations REGIFERT. La majorité des préconisations de correction positive sous CERES correspondent à des préconisations de type f_c sous REGIFERT (apport d'une fumure de complément de l'offre du sol), ce qui traduit une certaine cohérence entre les deux logiciels. Cependant l'objectif très différent de ces deux types de fumure (amener le sol à une teneur visée dans un cas,

compléter l'offre du sol pour la culture immédiatement à venir dans l'autre) et les modes de calcul qui en résultent, font que les préconisations correspondantes sont très différentes. Les fumures de type f_c sont en général supérieures à l'entretien, en particulier dans le cas des cultures exigeantes (tableaux 10, 11 et 13; figure 8), mais elles sont très inférieures aux fumures incluant une correction positive calculées sous CERES (tableaux 10, 11, 13).

- **la possibilité qu'introduit REGIFERT de préconiser des impasses**. Cette possibilité est a priori utilisée sans risque de perte de rendement puisque, par définition des seuils L_{1P} et L_{2P}, elle n'est préconisée que lorsque l'offre du sol est telle qu'une impasse n'entraîne pas de réduction significative du rendement. De plus la distinction des espèces selon leur exigence vis à vis de P permet de faire porter les impasses en majorité sur les espèces non exi-

Tableau 13 - Fumures moyennes préconisées par culture (en kg P_2O_5 ha⁻¹).**Table 13** - Average fertilisation rates recommended on each crop (in kg P_2O_5 ha⁻¹).

CERES		Fumure moyenne	Fumure moyenne préconisée par type de stratégie		
Culture	Exigence		Correction négative	Entretien	Correction positive
BET. SUCRIERE	Exigeante	120,6	81,7	84,2	158,1
COLZA HIVER	Exigeante	120,4	78,9	83,7	159,3
P. DE T. CONS.	Exigeante	95,6	53,9	61,7	133,3
POIS FOURRAGE	Exigeante	85,9	44,3	50,0	124,5
BLE TENDRE	Non exigeante	134,3	92,8	97,5	173,2
MAIS GRAIN	Non exigeante	131,9	75,8	90,0	180,8
TOURNESOL	Non exigeante	85,9	44,3	50,0	124,5
Moyenne pondérée		113,0	71,4	76,6	151,8

REGIFERT		Fumure moyenne	Fumure moyenne préconisée par type de stratégie		
Culture	Exigence		Impasse	f_e	f_c
BET. SUCRIERE	Exigeante	84,0	0		111,0
COLZA HIVER	Exigeante	72,0	0		95,0
P. DE T. CONS.	Exigeante	49,0	0		65,0
POIS FOURRAGE	Exigeante	77,0	0	46,0	90,0
BLE TENDRE	Non exigeante	31,0	0	94,0	83,0
MAIS GRAIN	Non exigeante	19,0	0		75,0
TOURNESOL	Non exigeante	45,0	0	48,0	59,0
Moyenne pondérée		54,0	0	66,0	90,0

geantes. La majorité des préconisations d'impasse sous REGIFERT correspondent à des préconisations de correction négative sous CERES, ce qui là encore traduit une certaine cohérence entre les deux logiciels. Cependant les marges de sécurité appliquées sous CERES à propos de ces corrections négatives font qu'en pratique les préconisations correspondantes sont à peine inférieures à l'entretien.

Au total, l'analyse qui précède montre que l'évolution à la baisse des préconisations de fumure entre CERES et REGIFERT est bien en grande partie attribuable à l'évolution conceptuelle qui est intervenue entre ces deux générations de logiciels.

A l'échelle de la succession, l'objectif sous CERES de redressement des sols jugés peu pourvus, et l'extrême prudence des corrections négatives préconisées sur sols très bien pourvus, conduisent à des bilans toujours excédentaires, et donc a priori à une augmentation de la teneur des sols dans tous les cas. L'abandon de cet objectif de redressement sous REGIFERT, et son remplacement par la notion de fumure de complément de l'offre du sol, conduisent sur sols peu pourvus à des bilans positifs à l'échelle de la succession, mais moins

fortement excédentaires que sous CERES. La possibilité de préconiser des impasses permet à l'inverse d'être en bilan négatif à l'échelle de la succession sur sols très bien pourvus (teneurs supérieures à L_{2p}). A l'inverse de CERES, ces possibilités de bilan négatif permettent d'envisager l'utilisation de REGIFERT dans le cadre d'un raisonnement de la fertilisation couplant des objectifs de production et des objectifs environnementaux.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Monsieur Alain Mollier pour son aide au niveau informatique.

BIBLIOGRAPHIE

- Boniface R., Trocmé S., 1988 - Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. 2 - Essais sur la fumure phosphatée. In : Phosphore et Potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation. INRA, Paris, eds. pp 279-402.
- Colomb B., Dubrulle P., Marin-Lafèche A., Villette C., 1999 - Références régionales et fertilisation raisonnée : le logiciel REGIFERT. Manuel de l'Agronome. Document INRA.
- COMIFER, 1993 - Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures, 28 p.
- Cooke G.W., 1968 - The control of soil fertility. Crosby Lockwood and Son LTD ed., London.
- Hochmuth G., Hanlon E., Hochmuth B., Kidder G. et Hense! D., 1993 - Field fertility research with P and K for vegetables. Interpretations and recommendations. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings 52, 95-101.
- Juilen J.L., 1989 - Détermination de normes d'interprétation d'analyse de terre en vue de la fertilisation potassique. L'exemple de la Basse-Normandie. Science du Sol 27, 131-144.
- Morel C. et Fardeau J.C., 1990 - Pouvoir fixateur des sols vis-à-vis du phosphore : Conséquences sur la fertilisation phosphatée. Perspectives Agricoles 147, 65-72.
- Morel C., Plenchette C. et Fardeau J.C., 1992 - La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture du blé. Agronomie 12, 565-579.
- Rémy J.C., Marin-Lafèche A., 1974 - L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Annales agronomiques 25, 607-632.
- Trocmé S., Boniface R., 1972 - Synergie des réserves du sol et des engrais récemment appliqués. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol 4-5, 161-173.

