

Evolution du statut phosphaté des sols de prairies aux Pays-Bas.

Conséquences pour les recommandations de fertilisation

J.A. Reijneveld¹, O. Oenema²

Pour la production et la qualité des prairies, il est nécessaire que le sol soit bien pourvu en Phosphore. Divers types d'analyse de sol existent. Elles peuvent permettre de déterminer la fertilisation optimale et limiter les pertes en P dans le milieu. L'expérience des Pays-Bas est ici présentée.

RÉSUMÉ

Aux Pays-Bas, on utilise depuis longtemps le test P-AI qui est un indicateur de la quantité de réserves de P du sol partiellement mobilisables au cours de la période de végétation. Il est utilisé pour les recommandations de fertilisation P aux Pays-Bas. L'étude d'une base de données d'analyses de sol considérable montre que le niveau moyen en P-AI des sols de prairies a peu varié entre 1970 et 2010 (niveau "Suffisant") avec de grandes différences entre régions et entre types de sol. Plusieurs méthodes d'analyses sont comparées. Divers travaux suggèrent de combiner des tests évaluant le P du sol facilement disponible (comme P-CaCl₂) avec ceux qui extraient le P disponible (P-AI ou P-Olsen) pour optimiser son efficacité d'utilisation. La combinaison de 2 analyses de sol (P-AI et P-CaCl₂ ou P-Olsen et P-CaCl₂) semble prometteuse pour améliorer les recommandations de fertilisation et l'évaluation environnementale des pratiques ; elle sera prochainement mise en place et utilisée.

SUMMARY

Changes in the phosphorus status of grassland in the Netherlands. Impact on fertilization recommendations

In order to guarantee productivity and soil quality, soil needs to be supplied with adequate phosphorus reserves. Soil analysis helps determine optimal fertilization and helps reduce soil P losses. A study carried out in the Netherlands is presented below. The P-AI test has been used for a long time in the Netherlands to measure P soil reserves that are partially available during the vegetation period (P capacity). The mean P-AI level of grassland soil has barely changed between 1970 and 2010 ('adequate' level), but with wide disparities between regions and different types of soil. Several methods of analysis were compared. Previous studies suggest the idea of combining tests measuring readily available soil phosphorus (P intensity: P-CaCl₂) with tests extracting available P (P-AI or P-Olsen) in order to optimize efficient use of P. Combining 2 methods of soil analysis will help improve fertilization recommendations and environmental assessment of these practices. This will soon be introduced and monitored further.

1. La fertilisation phosphatée des prairies en Europe

■ Évaluation du statut P du sol... en Europe

La croissance des cultures dépend de la disponibilité en phosphore (P) dans le sol (cf. par exemple BARBER, 1982 ; MARSCHNER, 1985 ; HOLFORD, 1997). Ceci est connu depuis plus d'un siècle et les recommandations de fertilisation en P visent à améliorer sa disponibilité dans le sol

pour obtenir un niveau qualifié "d'optimum agronomique" (ANONYME, 1999 ET 2002 ; DENORY *et al.*, 2004). Depuis le début du 20^e siècle, **ces recommandations de fertilisation sont basées sur des analyses de sol et il y a eu un long débat sur les meilleurs tests disponibles pour évaluer le niveau de P du sol** (PARKER *et al.*, 1951 ; VOSS, 1998 ; REIJNEVELD *et al.* 2010a). Actuellement, **plus d'une douzaine de tests existent en Europe pour le P** (ALVA, 1993 ; TUNNEY *et al.*, 1997). Certaines analyses de sol sont utilisées dans plusieurs pays. Par exemple, la méthode

AUTEURS

1 : BLGG AgroXpertus, Binnenhaven 5, 6709 PG Wageningen, Les Pays-Bas ; Arjan.Reijneveld@blgg.agroxpertus.com (blgg.agroxpertus.com)

2 : Wageningen UR, Alterra, P.O. Box 47, NL-6700 AA Wageningen, Les Pays-Bas ; Oene.Oenema@wur.nl (www.wur.nl)

MOTS CLÉS : Analyse de sol, évolution, fertilisation phosphatée, méthode d'estimation, Pays-Bas, Phosphore, prairie, sol.

KEY-WORDS : Change in time, estimation method, grassland, phosphate fertilization, Phosphorus, soil, soil analysis, the Netherlands.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Reijneveld J.A., Oenema O. (2012) : "Evolution du statut phosphaté des sols de prairies aux Pays-Bas. Conséquences pour les recommandations de fertilisation", *Fourrages*, 210, 109-118.

P-Al (EGNER *et al.*, 1960) est utilisée en Belgique, Estonie, Hongrie, Norvège, Roumanie, Suède et aux Pays-Bas. Le P-Olsen (OLSEN *et al.*, 1954) est mesuré au Danemark, en France, Grèce, Italie, Pologne, Espagne et Royaume-Uni. P-Olsen est également utilisé en Nouvelle-Zélande et aux États-Unis. Les méthodes Mehlich 3 (MEHLICH, 1984) et P-Bray I (BRAY et KURTZ, 1945) sont aussi couramment utilisées (SIMS *et al.*, 2002). Dans de nombreux pays, plusieurs tests différents peuvent être utilisés pour le P, en fonction de l'utilisation des terres (prairie, culture ou horticulture) ou du type de sol. Cependant, un seul type d'analyse est utilisé pour chaque situation : aux Pays-Bas, le test P-Al est utilisé pour les prairies et l'horticulture, et d'autres tests sont utilisés pour les cultures.

Le **test P-Al qui est un indicateur de la quantité de P disponible au cours de la période de végétation à partir des réserves du sol partiellement mobilisables** (« *P capacity* », REIJNEVELD *et al.*, 2010a). Divers travaux suggèrent d'utiliser des tests, comme **P-CaCl₂**, qui sont des **indicateurs du niveau des réserves de P facilement disponibles** (« *P intensity* », REIJNEVELD *et al.*, 2010a). La combinaison des analyses de sol (P-Al et P-CaCl₂ ou P-Olsen et P-CaCl₂) permettrait de mieux évaluer le P disponible et ainsi d'optimiser l'efficacité d'utilisation du P, d'améliorer les recommandations de fertilisation ainsi que l'évaluation environnementale des pratiques.

■ Politiques de gestion de la fertilisation P, notamment aux Pays-Bas

Les recommandations de fertilisation P ont considérablement contribué à atténuer la carence en P dans la production agricole et à optimiser l'efficacité agronomique des apports d'engrais phosphatés (VAN DER PAAUW, 1971 ; SIMS *et al.*, 2000). Améliorer le statut en P des sols au-delà du niveau optimal de fertilité est considéré comme inutile : l'augmentation du rendement est trop faible pour compenser les coûts supplémentaires de fertilisation (*cf.* par exemple OTTEN et VEENSTRA, 1951 ; VAN DER PAAUW et SLUIJSMANS, 1954 ; ANONYME, 1986 ; OLFS *et al.*, 2005). Pourtant, **la superficie des terres agricoles avec des statuts en P excédentaires est devenue importante dans de nombreux pays**. Par exemple, il a été rapporté que, pour 50 % des terres arables de Suède, le niveau de P du sol est « Haut » ou « Très haut » (ERIKSON *et al.*, 1997 ; DJODJIC *et al.*, 2004). En Belgique, environ 80 % des terres arables et 60 % des prairies ont des niveaux de P estimés comme « Relativement élevé » à « Très élevé » (BDB, 2005). Dans l'État de New-York, 47 % des échantillons de sol analysés se situaient au-dessus des limites recommandées (KETTERINGS *et al.*, 2005). Un enrichissement excessif des sols en P augmente le risque de pertes de P dans le milieu aquatique par érosion, ruissellement et lessivage dans le sous-sol. L'enrichissement des cours d'eau en P conduit à l'eutrophisation, qui peut créer de sérieux problèmes pour la conservation de la nature et quand l'eau est utilisée pour les loisirs, la pêche ou la consommation (PAUTLER et SIMS, 2000 ; SCHOUMANS et CHARDON, 2003 ; SIMS *et al.*, 2000). Dans de nombreux pays de l'hémisphère

nord, les terres agricoles sont considérées comme une **source importante de pollution diffuse en P**, contribuant pour moitié environ à l'enrichissement en P des eaux de surface (WITHERS *et al.*, 2003).

La politique de gestion des éléments nutritifs et les **mesures prises aux Pays-Bas** visent à réduire les excès de fertilisation P, **en abaissant par étapes les limites des apports fertilisants P depuis 1984**. Depuis janvier 2010, les seuils de fertilisation P dépendent du niveau de P du sol évalué, pour les prairies, à partir des valeurs de P-Al (ANONYME, 2009). Les parcelles qui présentent un niveau de P-Al bas peuvent recevoir un apport de P supérieur à celles ayant un niveau P-Al élevé.

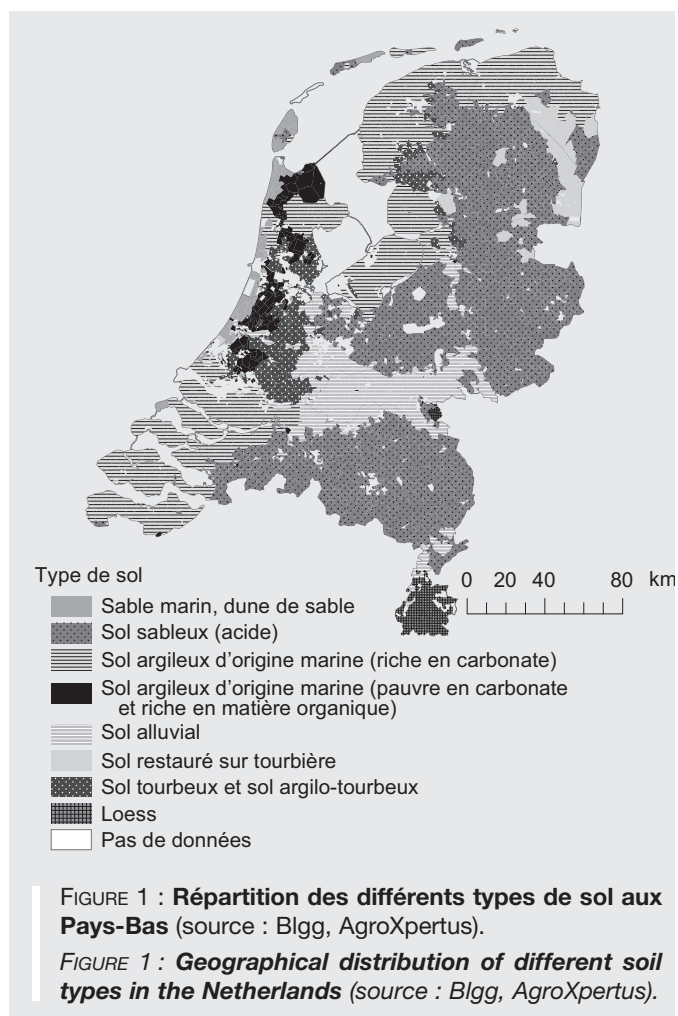
Nous présentons ici les résultats d'une étude conduite à partir d'une base de données de plus de 1 million de résultats d'analyses de terres agricoles aux Pays-Bas, étude décrivant et analysant les variations spatiales et les évolutions, entre 1970 et 2009, observées pour le statut P des sols de prairies. Cette étude s'appuie sur les travaux de REIJNEVELD *et al.* (2009 et 2010a), complétés par des travaux explorant les options possibles pour améliorer les recommandations de fertilisation P en fonction des classifications des sols.

2. Présentation de l'étude et de son contexte

■ La production laitière aux Pays-Bas

Environ 60 % de la superficie des Pays-Bas sont occupés par des terres agricoles (au total 20 000 km²) et environ 50 % de cette surface sont occupés par **des prairies intensives**, 35 % par des cultures (pommes de terre, betterave à sucre, céréales, bulbes), 10 % par du maïs destiné à être ensilé et 5 % par des cultures horticoles ou maraîchères (fleurs à bulbe, fraise, poireau).

Les fermes laitières sont situées sur **plusieurs types de sols** (figure 1). Sur le principal type de sol, sol sableux (acide) à l'ouest et au sud du pays, se trouvent des prairies et du maïs ensilage. Les sols argileux d'origine marine, récents et riches en carbonates, sont généralement utilisés pour les cultures arables, alors que les sols argileux, pas ou faiblement carbonatés et présentant une teneur en matière organique élevée, situés dans la partie occidentale, sont destinés à la production laitière à base d'herbages (absence de maïs). Les sols fluviaux (argiles lourdes) déposés sur les plaines d'inondation, le long du Rhin, de la Meuse et du Waal, sont réservés pour la production laitière à base d'herbages et pour l'arboriculture fruitière. Les sols tourbeux et les sols argilo-tourbeux (histosols) sont également consacrés à la production laitière à base d'herbages. L'utilisation des terres sur lœss, dans le sud, est partagée entre prairies, maïs, terres arables et horticulture. Les sols restaurés sur les anciennes tourbières (résidus de tourbe mélangés à du sable) sont utilisés pour les cultures arables (pommes de terre cultivées pour la production de fécule, betteraves à sucre et blé).

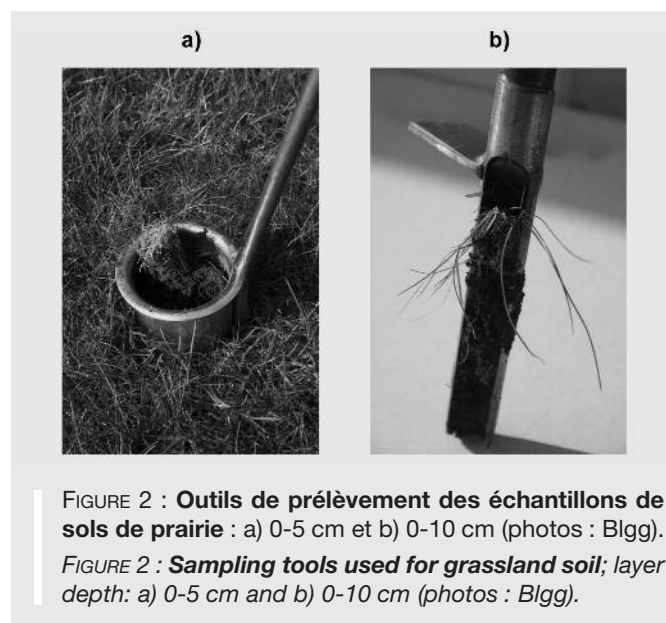


La **ferme laitière moyenne** a une surface 43 ha (36 ha de prairie, 6 ha de maïs et 1 ha d'autres cultures), produit annuellement 600 000 kg de lait avec 73 vaches (données de 2005) ; les taux butyreux et protéique du lait produit sont respectivement de 4,36 % et 3,48 %.

■ Origine des bases de données d'analyses de sol

Les échantillons de sols ont été prélevés et analysés par le laboratoire d'analyses des sols et des cultures BLGG AgroXpertus (Blgg) à partir de 1928. **Déterminer le statut en P du sol des parcelles des agriculteurs est devenu systématique** pour tous les types de sol **dès le début des années 1930**. Jusqu'en 1952, Blgg était le seul laboratoire des Pays-Bas qui analysait les sols à la demande des agriculteurs. Aujourd'hui, Blgg analyse environ 80 % des échantillons de sol aux Pays-Bas. Depuis 1928, plus de 5 millions d'analyses de teneur en P du sol ont ainsi été effectuées à la demande des agriculteurs ; certaines ont constitué la base de l'étude ici présentée.

Généralement, les parcelles sont échantillonnées par des techniciens de Blgg qui effectuent 40 prélèvements positionnés en W (un échantillon de sol est constitué de 40 sous-échantillons (carottes)). Le prix de l'analyse d'un échantillon moyen de sol (y compris les conseils) est d'environ 80 €.



La plupart des prélèvements de sols de prairies sont réalisés entre novembre et février. Pour les prairies, on prélevait la couche 0-5 cm jusqu'en 2000 (figure 2a) ; ensuite on a prélevé la couche 0-10 cm (figure 2b). Avant 2008, pour chaque analyse de sol, on disposait du nom de l'agriculteur, de son adresse avec le code postal et d'une caractérisation de l'utilisation des terres et du type de sol ; aujourd'hui, l'information est recueillie par SIG. Il est **recommandé d'effectuer une analyse tous les 4 ans par parcelle** de moins de 5 ha (pour une parcelle de 10 ha : 2 échantillons sont prélevés). Dans la pratique, certains agriculteurs procèdent, tous les 4 ou 5 ans, à une analyse générale de toutes leurs parcelles, tandis que d'autres n'effectuent presque jamais d'analyses ou n'analysent que quelques parcelles à intervalles irréguliers. Cependant, en 2005, la quasi-totalité des prairies intensives ont dû être analysées dans le cadre de la politique de gestion des éléments nutritifs (ANONYME, 2009).

■ Les analyses de sol et les recommandations de fertilisation P pour les prairies aux Pays-Bas

L'état phosphaté du sol des prairies est évalué par la méthode P-Al, c.a.d. à partir d'une extraction au lactate d'ammonium 0,1 M en milieu acide acétique 0,4 M à pH 3,75 (EGNER *et al.*, 1960). **A partir de 2006, la méthode P-CaCl₂ a également été utilisée**, basée sur l'extraction par CaCl₂ 0,01 M (HOUBA *et al.*, 1998 ; NEN 5704, 1996). Le statut P du sol est donc maintenant décrit à la fois par les valeurs de P-Al et de P-CaCl₂. L'agriculteur reçoit également des données sur la fourniture d'azote (N), de soufre (S), de potassium (K), de magnésium (Mg), la teneur en matière organique du sol, le pH (CaCl₂), le complexe argilo-humique, les cations échangeables et, sur demande, les oligo-éléments (Cu, Co, Se, B, Zn et Mn). Les résultats sont présentés aux agriculteurs, ainsi que des recommandations de fertilisation ; en outre, un bilan sur le statut organique et l'état structural du sol sont fournis.

Niveau de P-Al du sol		Fertilisation P en 1 ^{ère} coupe (kg P ₂ O ₅ /ha)	Fertilisation P pour les coupes suivantes (kg P ₂ O ₅ /ha)				
Classe	Valeur (mg P ₂ O ₅ /100 g)		Pâturage		Fauche (apport par coupe)		
			Jours + nuits	Jours	< 1 ^{er} juillet		> 1 ^{er} juillet et < 15 septembre
Bas	< 18	110	10	20	25	20	20
Assez bas	18 - 29	70	10	20	25	20	20
Suffisant	30 - 39	45	10	20	25	20	20
Amplement suffisant	40 - 55	25	10	20	25	20	20
Élevé	> 55	15	0	0	0	0	0

TABLEAU 1 : **Recommandations pour la fertilisation phosphatée des prairies aux Pays-Bas** (ANONYME, 2002).TABLE 1 : **Recommendations for grassland phosphorus fertilization in the Netherlands** (ANONYME, 2002).

Pour les herbages, les recommandations d'application sont (tableau 1 ; ANONYME, 2002) :

- un apport (engrais chimique et/ou fumier animal) de printemps d'environ 110 kg de P₂O₅ par hectare à la première coupe lorsque la valeur de P-Al (en mg P₂O₅/100 g) est "Basse" (<18) et de 15 kg P₂O₅/ha lorsque la valeur de P-Al est Élevée (> 55) ;

- pour les parcelles récoltées tard, les doses recommandées, en fauche ou au pâturage, varient de 25 kg P₂O₅/ha, lorsque la valeur de P-Al est Basse, à 0 kg P₂O₅/ha, lorsque la valeur de P-Al est Élevée. Généralement, un plan de fertilisation est établi par l'agriculteur avec son conseiller.

■ Analyse des données recueillies dans les bases de données d'analyses de sol

Nous avons examiné les évolutions des valeurs moyennes et médianes aux niveaux nationaux et régionaux. **Les régions ont été définies sur la base des codes postaux des parcelles analysées.** Les zones postales ayant moins de 20 dossiers (seuil choisi arbitrairement) sur une période de 4 ans ont été exclues de l'analyse ; ainsi, 1 387 zones postales ont été retenues pour les prairies. Le nombre moyen d'enregistrements par zone postale était de 94 pour les prairies (1996-2000). Les évolutions des valeurs moyennes et médianes pour les prairies de chaque zone postale entre les périodes 1984-1988 et 1996-2000 ont été analysées statistiquement.

Nous avons supposé que les données sélectionnées dans la base de données pouvaient être analysées comme s'il s'agissait d'un échantillon aléatoire, et que les erreurs dans l'estimation restaient suffisamment petites pour empêcher des erreurs grossières d'interprétation. Nous avons testé statistiquement la représentativité de nos données en comparant les valeurs de P obtenues pour les clients (agriculteurs) « réguliers » et celles des « nouveaux » (en raison de la législation) (pour plus d'information, voir REIJNEVELD *et al.*, 2010). En outre, nous avons testé l'homogénéité des ensembles de données en utilisant une procédure de ré-échantillonnage (LEMERCIER *et al.*, 2008).

■ Confrontation de 3 méthodes d'extraction du P

De même que P-Al, P-Olsen est également signalé (VAN ROTTERDAM-LOS, 2010) comme indicateur de la quantité de P (réserves du sol partiellement mobilisables). C'est pourquoi nous avons également **cherché à étudier la relation entre P Olsen, P-Al et P-CaCl₂**, en particulier le P disponible évalué par P-Olsen. Un échantillon, relativement petit (n=71 parcelles en sol sableux et n=61 parcelles de sol argileux) mais comportant les résultats des 3 types d'analyses (P-Olsen, P-Al, P-CaCl₂) et quelques autres caractéristiques du sol, nous permettra d'effectuer quelques comparaisons.

3. Résultats

■ Évolution du statut phosphaté du sol des prairies

Sur la période 1950-1953, la valeur moyenne du P-Al des prairies (97 000 échantillons analysés) était de 33 mg P₂O₅/100 g (équivalent à un niveau Suffisant). **En 1970, le P-Al a augmenté jusqu'à environ 40** (Amplement suffisant), **puis il est resté stable** (figure 3).

Le pourcentage de dossiers avec une valeur P-Al entre 30 et 50 est passé de 42 % en 1971-1975 à 48 % en 1996-2000, tandis que le nombre d'échantillons de sol avec P-Al < 20 a diminué de 7 à 4,5 % (figure 4 : sol argileux d'origine marine). Des changements similaires ont été observés pour les prairies sur les sols sableux : la valeur médiane est demeurée constante, mais le coefficient d'aplatissement a augmenté.

Sur la période 1996-2000, 9 % des zones enquêtées ont une valeur médiane de P-Al < 30, 78 % ont une valeur médiane de P-Al comprise entre 30 et 50 (Suffisante, et Amplement suffisante), 12 % ont des valeurs comprises entre 50 et 75 (Élevé) et 1,4 % dépassent 75 (Très élevé) (figure 5).

■ Statut P du sol et usage des terres

Les premières enquêtes réalisées au cours des **années 1930 à 1938** nous fournissent un premier

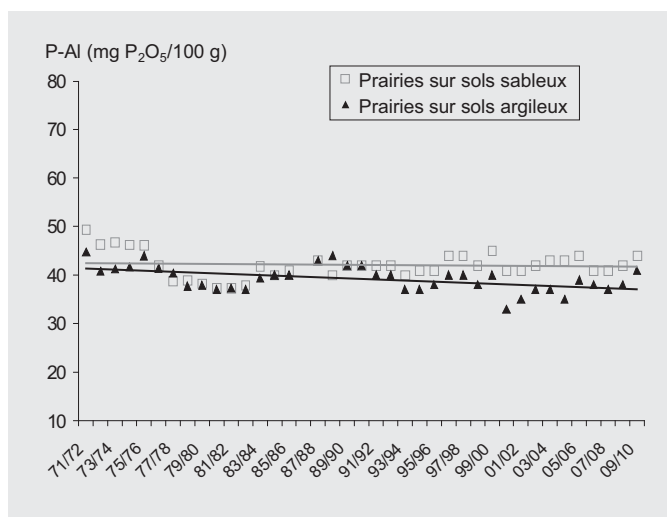


FIGURE 3 : Evolution du statut P des prairies sur sols sableux et sols argileux d'origine marine aux Pays-Bas entre 1970 et 2009 (couche prélevée : 0-5 cm jusqu'en 2000, 0-10 cm depuis).

FIGURE 3 : *Changes in the phosphorus status of sandy and clay sea soil in the Netherlands between 1970 and 2009 (sampled layer depth: 0-5 cm up until 2000, 0-10 cm from then on).*

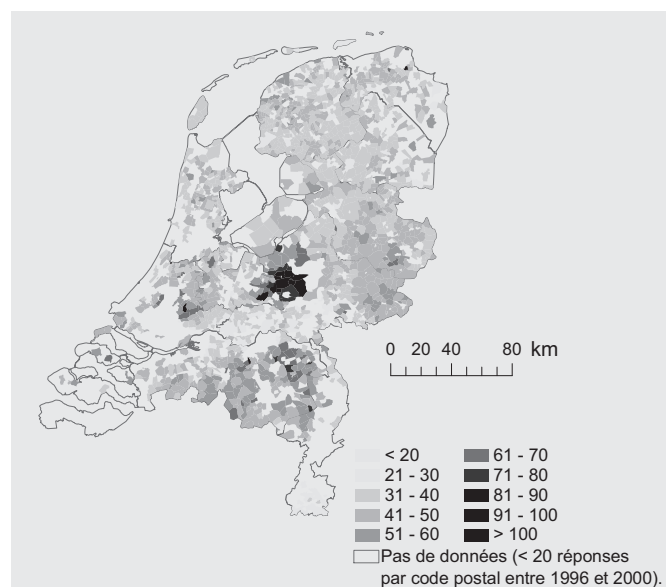


FIGURE 5 : Répartition spatiale des valeurs médianes de P-AI des prairies (source : Blgg, AgroXpertus).

FIGURE 5 : *Spatial distribution of mean P-AI values for grassland (source : Blgg, AgroXpertus).*

différence moyenne entre les types d'utilisation des terres ont peu évolué au cours des 70 dernières années (le niveau augmente mais la répartition par région est inchangée).

Sur la période comprise **entre 1984 et 2004**, le niveau de P (P-AI) des sols sableux augmente selon un gradient : prairie < terres arables < culture de maïs < cultures horticoles avec, respectivement, 27, 35, 45 et 80 % des sols analysés dans la gamme Élevée.

Les prairies présentant les statuts phosphatés les plus élevés se trouvent dans les régions à forte densité de bétail, et le niveau de P du sol y est plus élevé que dans les régions avec seulement des cultures. Par conséquent, **les sols de prairies sont plus riches en P dans le centre des Pays-Bas, où les sols sont sableux et l'élevage intensif** (élevage de volailles et production porcine).

■ Statut P du sol et type de sol

Sur la période 1930-1938, les **sols sur loess** avaient, en moyenne, les **niveaux de P (P-AI) les plus bas** (plus de 60 % des échantillons analysés se trouvaient dans la classe Faible), tandis que les sols sableux présentaient le statut P le plus élevé. Plus de **70 ans plus tard, on retrouve le même classement des sols** pour la valeur médiane du statut P : sols sableux > sols tourbeux > sols argileux d'origine marine > sols fluviaux ≥ sols sur loess ($P < 0,001$).

■ Statut P du sol et P disponible pour les plantes

A partir de 2006, deux analyses de sol ont été réalisées : P-AI et P-CaCl₂. Entre 2006 et 2010, les valeurs P-CaCl₂ pour les prairies ont varié de 0,7 à 6,3 mg P/kg

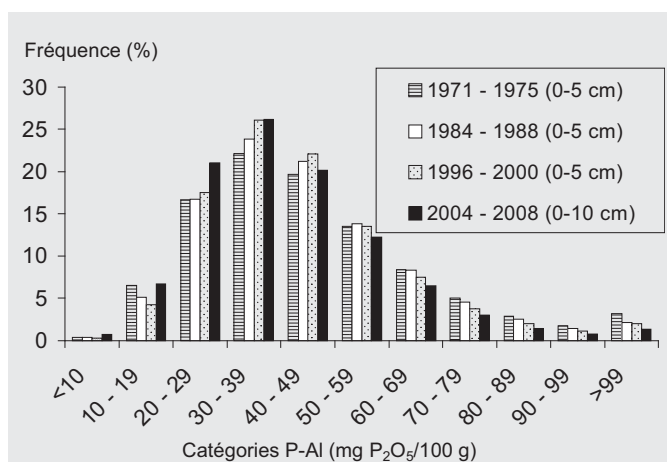


FIGURE 4 : Evolution de la répartition des teneurs en P (P-AI, mg P₂O₅/100 g) des prairies sur sols argileux d'origine marine aux Pays-Bas (fréquences en % ; 0-10 cm à partir de 2004 ; REIJNEVELD *et al.*, 2010a et b).

FIGURE 4 : *Changes in the distribution of soil phosphorus content (P-AI, mg P₂O₅/100 g) in grassland on clay sea soil in the Netherlands (incidence expressed in %, 0-10 cm from 2004 onwards; REIJNEVELD *et al.*, 2010a and b).*

aperçu du statut phosphaté des sols ; les analyses, qui ont été pratiquées par les agriculteurs ayant de grandes exploitations et un certain niveau de formation, ne sont probablement pas tout à fait représentatives. Plus de la moitié des échantillons provenant de parcelles dédiées à des cultures horticoles avaient un niveau Suffisant à Élevé en P. **Les échantillons de terres arables et de prairies avaient en moyenne un niveau de P inférieur à ceux des exploitations d'horticulture.** Fait intéressant, la répartition régionale des niveaux de P et la

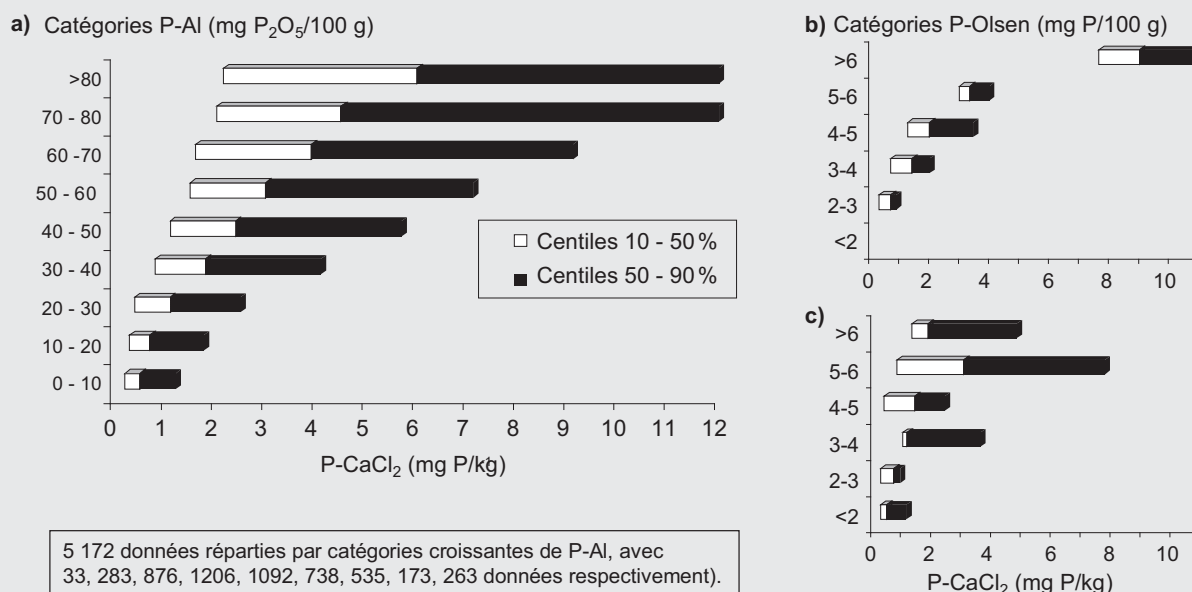


FIGURE 6 : En fonction de la teneur en P-CaCl₂, répartition a) des teneurs en P (P-Al) de prairies sur sols argileux d'origine marine aux Pays-Bas (5 172 données, 2009-2010), b) des teneurs en P (P-Olsen) de prairies sur sols argileux d'origine marine (61 données), c) des teneurs en P (P-Olsen) de prairies sur sols sableux (71 données).

FIGURE 6 : Distribution, based on P-CaCl₂ content, of a) P (P-Al) content for grassland on clay sea soil (5 172 entries, 2009-2010), b) P (P-Al) content for grassland on clay sea soil (61 entries), c) P-content (P-Olsen) for grassland on sandy soil (71 entries).

(centiles 10 et 90 respectivement). **En prairies, le niveau de P-CaCl₂ varie selon le type de sol** : sols argilo-tourbeux < sols tourbeux < lœss < sols argileux d'origine marine < sols sur argile fluviale < sol sableux < sol sur tourbière restaurée < dunes de sable.

La **relation générale entre P-Al et P-CaCl₂** présente un coefficient de corrélation de Spearman (R²) de 0,42. Ce coefficient varie de 0,04 pour les dunes de sable à 0,50 pour les sols sur lœss et il est de 0,29 pour les sols développés sur les argiles d'origine marine. Les résultats sont présentés dans la figure 6a. On peut, par exemple, constater que, pour un P-Al variant entre 30 et 40, le P-CaCl₂ varie de 1 à 4 mg P/kg.

Sur le tableau 2, pour les sols développés sur argile marine, on a réparti les analyses selon les 3 catégories (P-Al : Bas, Moyen et Élevé) de la législation néerlandaise

(ANONYME, 2009) et placé en vis-à-vis la disponibilité des ions phosphates évaluée par P-CaCl₂ : **4 % des analyses présentent à la fois des valeurs élevées de P-Al et des valeurs basses de P-CaCl₂** ; c'est le cas inverse pour 3 % des analyses.

■ P-Olsen versus P-Al et P-CaCl₂

La relation entre P-Olsen et P-CaCl₂ pour les **sols acides et sablonneux** présente un coefficient R² de 0,23 ; le coefficient est de 0,39 pour la relation entre P-Olsen et P-Al. **Un modèle de régression multiple avec P-Al et P-CaCl₂ peut expliquer 54 % de la variation de P-Olsen** ; la prise en compte d'autres caractéristiques du sol comme le pH contribuent à l'amélioration du modèle.

La relation entre P-Olsen et P-CaCl₂ en sol développé **sur argile d'origine marine** présente un R² de 0,90, identique pour la relation entre P-Olsen et P-Al. **Un modèle de régression multiple avec P-Al et P-CaCl₂ explique 94 % de la variation de P-Olsen.**

On observe de grandes différences de teneurs en P-CaCl₂ au sein d'une classe de niveau de P-Olsen ; ce résultat est présenté sur la figure 6b pour les sols sur argile d'origine marine et la figure 6c pour les sols sableux. Par exemple, pour des valeurs de P-Olsen comprises entre 5 et 6 mg P/100 g (niveau Élevé), les valeurs de P-CaCl₂ varient entre 1 et 8 mg P/kg (figure 6c). Pour des valeurs de P-Olsen < 2 mg P/100 g (niveau Très faible), P-CaCl₂ varie entre la limite de détection (0,2) et 1,5 mg P/kg.

P-CaCl ₂ (mg P/kg)	Niveau de P-Al (mg P ₂ O ₅ /100 g)			Total
	Bas (< 27)	Moyen (27-50)	Élevé (> 50)	
Bas (< 1)	16	14	4	34
Moyen (1 - 2)	5	17	2	24
Élevé (> 2)	3	27	11	41
Total	24	58	17	100

TABLEAU 2 : Répartition (%) des sols argileux d'origine marine aux Pays-Bas selon leurs teneurs en P-Al et en P-CaCl₂ (2009).

TABLE 2 : Geographical distribution (%) of clay sea soil in the Netherlands based on P-Al and P-CaCl₂ content (2009).

4. Discussion

■ Stabilité du statut P des prairies

Les valeurs médianes du P-Al des sols de prairies sont restées relativement stables entre 1970-2000 (figure 3) et voisines du niveau de P du sol Suffisant (et non Élevé), ce qui est surprenant étant donné les apports excédentaires de phosphore réalisés (environ 1 200 kg de P_2O_5 /ha dans les trois dernières décennies) et la réduction des excédents moyens de P entre 1988 et la période actuelle (CBS, 2009). Une explication de cette stabilité peut résider dans un lessivage régulier du P de l'horizon de surface échantillonné vers l'horizon sous-jacent. Deuxièmement, les labours et le réensemencement des prairies ont mélangé le sol de surface avec une partie du sol de l'horizon sous-jacent et ont abaissé le niveau de P du sol. En moyenne, les prairies intensives des Pays-Bas sont ressemées tous les 5 ans (VELLINGA *et al.*, 2004). Un labour est souvent effectué à cette occasion et le sous-sol, à plus faible teneur en P, est ramené à la surface, ce qui diminue le statut P de la couche supérieure du sol. Troisièmement, le passage du phosphore du sol d'une forme extractible à une forme non extractible (réactions de précipitation et d'absorption irréversibles de P; cf. par exemple SCHOUmans *et al.*, 2004; DELGADO et TORRENT, 2000; CAO et HARRIS, 2008) peut également expliquer cette relative stabilité du niveau de P. Enfin, il est possible que les agriculteurs ayant des sols bien fournis en P ne demandent plus aussi fréquemment des analyses de sol. Dans un essai comparant les valeurs des analyses de « nouveaux » clients (restés plus de 10 ans sans analyse de sol) à celles de clients « réguliers », nous avons en effet constaté de petites différences de valeurs P-Al moyennes pour les sols argileux d'origine marine (moyenne P-Al supérieure de 2 unités chez les « nouveaux » clients) et les sols sableux (moyenne P-Al supérieure de 6 unités chez les « nouveaux » clients) (REIJNEVELD *et al.*, 2010).

■ Les différences de statut P entre sols

Les différences de niveaux de P du sol entre les différentes utilisations des terres (de l'horticulture à la prairie) sont liées au résultat économique dégagé par le type de culture et aussi à la capacité intrinsèque de prélèvement du P de ces cultures. La teneur en P élevée des terres horticoles est liée à la forte demande de P par certaines de ces cultures ainsi qu'à leur marge brute élevée (DEN DULK, 1959; ANONYME, 1999). Sur la période 2005-2008, les marges brutes moyennes dans l'horticulture (plein champ) et la production laitière étaient de 18,3 et 6,3 k€/ha respectivement (BOONE et DOLMAN, 2010). Pendant des siècles, les maraîchers ont apporté des quantités relativement importantes de P aux parcelles horticoles, en grande partie sous forme de fumier et de compost avant le début du XX^e siècle, puis par une combinaison de fumier et d'engrais phosphatés. Il y a même des résultats suggérant que les sols horticoles présentaient des niveaux de P plus élevés au XIX^e siècle (MAYER, 1895).

Il existe également de grandes différences de niveaux de P-Al entre les types de sol et entre les régions. Le niveau de P-Al des sols sur loess et sur argile alluviale est bas par rapport à celui des autres types de sol (figure 5 : loess dans le sud du Limbourg et argile alluviale dans le centre des Pays-Bas). Bien qu'elles aient déjà été décrites dans la première moitié du XX^e siècle (DE VRIES et DECHERING, 1938; VAN DER PAAUW, 1948; VERMEULEN et FEY, 1957; NEUTEL, 1994), ces différences ne correspondent pas aux attentes basées sur les normes de fertilisation (tableau 1). Ces recommandations de fertilisation visent à ce que tous les sols se situent dans la plage optimale et s'y maintiennent; cependant, même à l'échelle d'une ferme, on constate de grandes différences de statut P entre parcelles; dans les fermes d'élevage, les parcelles à proximité des bâtiments ont souvent des valeurs plus élevées que celles qui sont plus éloignées, en raison probablement de la densité et de la durée de présence supérieures du bétail qui produit de grandes quantités de déjections animales. En outre, jusqu'à récemment, les services de vulgarisation et de recherche agricole informaient les agriculteurs sur le fait que le P du sol n'était pas lessivé et ne nuisait pas à l'environnement; un niveau en P Élevé dans le sol était considéré comme une « bonne pratique agricole ». Récemment dans une enquête, des agriculteurs ont indiqué dans un questionnaire (REIJNEVELD *et al.*, 2012) qu'ils visaient des sols bien pourvus en P car ils n'étaient pas certains de leur niveau réel de disponibilité en phosphore.

■ Statut P du sol et politique de gestion des nutriments

Les restrictions gouvernementales d'utilisation des effluents d'élevage ont été renforcées à partir de 1984 (OENEMA *et al.*, 2005; SCHRÖDER et NEETESON, 2008). Depuis 2010, les limites d'application des fertilisants P (fumiers et autres) dépendent de l'état phosphaté du sol : la dose limite permise est d'autant plus faible que le statut P du sol est élevé (tableau 3; ANONYME, 2009). Ces lois fixent aussi des normes pour l'épandage de fumier et, indirectement, pour la densité de cheptel et la gestion des excédents de phosphore.

Au XX^e siècle, l'excédent en P a augmenté : il est passé d'une moyenne d'environ 25 kg de P_2O_5 par hectare et par année au cours de la première décennie, à environ 40 kg P_2O_5 /ha/an durant les années 1950, puis à environ 78 kg P_2O_5 /ha/an de P_2O_5 par hectare par an durant les années 1980. Cet excédent a été ramené à environ 40 kg P_2O_5 /ha en 2008 et devrait diminuer encore jusqu'à 0-5 kg P_2O_5 /ha en 2015 (CBS, 2009). La politique actuelle de gestion des éléments nutritifs suggère que les apports de P par les fertilisants organiques et minéraux continuera à diminuer jusqu'à ce qu'un « zéro excédent de P » ait été réalisé au niveau national d'ici 2015. Cette limitation de l'épandage de fumier par hectare aura des conséquences pour l'élevage laitier à venir, en termes d'élimination du fumier. Un nombre croissant de fermes devra exporter le fumier des exploitations d'élevage vers d'autres exploitations agricoles, avec ou sans traitement préalable.

Niveau de P du sol	Valeur P-Al (mg P ₂ O ₅ /100 g)	Fertilisation maximale autorisée (kg P ₂ O ₅ /ha)					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
Prairie							
Elevé	< 27	90	90	85	85	85	80
Moyen	27 - 50	95	95	95	95	95	90
Bas	> 50	100	100	100	100	100	100
Maïs							
Elevé		75	70	65	55	55	50
Moyen		80	75	70	65	65	60
Bas		85	85	85	85	80	75

TABLEAU 3 : **Fertilisation autorisée** (engrais chimiques ou déjections animales) **selon la législation néerlandaise.**

TABLE 3 : **Fertilizers** (chemical fertilizers and manure) **approved by Dutch legislation.**

■ Fertilité des sols et production des prairies

Généralement, le taux de matière organique (MO) des sols de prairies permanentes est élevé (REIJNEVELD *et al.*, 2009), même si le ressemis des prairies peut temporairement provoquer une baisse du niveau de MO dans le sol. Dans plusieurs pays européens, une baisse du taux de MO a été signalée, y compris pour les prairies (VLEESHOEWERS et VERHAGEN, 2002 ; SLEUTEL *et al.*, 2003 ; BELLAMY *et al.*, 2005 ; DAVIDSON et JANSSENS, 2006). En revanche, aux Pays-Bas, les taux de MO dans les sols sont restés stables au cours des dernières décennies (HANEGRAAF *et al.*, 2009 ; REIJNEVELD *et al.*, 2009). Toutefois, **les agriculteurs craignent que la législation, en limitant les apports de fumier, réduise le taux de MO et compromette le potentiel de production du sol. Les seuils sont plus sévères pour les terres à maïs que pour les prairies** (tableau 3). Les parcelles de maïs avec des teneurs en P élevées verront les apports de P limités à 50 kg P₂O₅/ha, ce qui équivaut à seulement environ 1 000 kg de matière organique « efficace » de lisier de bovins. On considère que la matière organique efficace correspond à la quantité de matière organique qui reste dans le sol après un an. Etant donné que la législation en matière de gestion des éléments nutritifs fixe des objectifs à l'échelle de l'exploitation, tout en tenant compte des caractéristiques d'utilisation des terres, il existe des **possibilités d'optimisation à l'échelle de l'exploitation et entre les parcelles** ; il faudra cependant surveiller l'évolution des niveaux de matière organique dans les sols.

■ Vers des recommandations de fertilisation améliorées

L'optimisation des apports de P devient un enjeu majeur, du fait des restrictions par la législation actuelle (tableau 3), mais aussi en raison des préoccupations croissantes concernant l'épuisement des ressources minières de P dans le monde, alors que la plupart des sols dans l'hémisphère sud en sont encore faiblement pourvus (HEFFER *et al.*, 2006 ; CORDELL *et al.*, 2009).

La combinaison d'indicateurs du niveau de réserves de P du sol (P-Al ou P-Olsen) et de sa disponibilité (P-CaCl₂) peut expliquer, mieux qu'une seule analyse, les réponses des cultures au statut P du sol (par exemple KUIPERS, 1961 ; FARDEAU *et al.*, 1991 ; EHLERT *et al.*, 2003 ;

QUINTERO *et al.*, 2003 ; VAN ROTTERDAM-LOS, 2010). L'effet d'une **utilisation conjointe des taux de P-Al et de P-CaCl₂** a été étudié à travers la littérature, dans des expérimentations en pots et dans la pratique, en utilisant un grand nombre de données (BUSSINK et TEMMINGHOFF, 2004 ; BUSSINK *et al.*, 2007 ; BUSSINK et REIJNEVELD, 2010 ; VAN ROTTERDAM *et al.*, 2009). En affinant l'estimation du statut P des sols, ces nouveaux résultats **permettraient d'optimiser les apports d'engrais phosphaté** (chimiques ou organiques), limités par législation. Par exemple, dans le passé on recommandait un apport de 110 kg P₂O₅/ha sur une parcelle avec un faible niveau de réserves en P (P-Al) ; actuellement, si la même parcelle présente un niveau de P disponible Suffisant ou Élevé, la recommandation n'est plus que de 70 kg P₂O₅/ha. Les nouveaux conseils, basés sur l'utilisation des deux analyses, sont en moyenne inférieurs de 15 kg P₂O₅/ha à ceux préconisés auparavant, et permettent de conserver la qualité et le niveau de production de l'herbe. Depuis 2012, le Comité qui travaille sur les recommandations de fertilisation pour les cultures fourragères et les prairies combine les indicateurs P-Al et P-CaCl₂ pour faire ses recommandations officielles.

En outre, **P-CaCl₂ peut être utilisé pour améliorer la classification des sols**. Par exemple, 5 % des parcelles présentent un niveau P-Al élevé et des valeurs basses de P-CaCl₂. Les apports de fertilisants P dans ces prairies seront autorisés jusqu'à 80 kg P₂O₅/ha car ces parcelles présentent un risque de faible teneur en P dans le fourrage. En effet, une valeur minimale de 3,3 g de P par kg de matière sèche est nécessaire pour satisfaire les besoins nutritionnels des bovins laitiers (VALK, 2002). En 2009, des teneurs en P ≤ 3,3 g/kg MS ont été trouvées dans environ 6 % des ensilages. Or, cette teneur doit être surveillée attentivement pour maintenir des systèmes laitiers de haute productivité et efficaces.

■ Perspective de diagnostic associant P-Olsen avec P-CaCl₂

P-Olsen, donnant une évaluation intermédiaire du P disponible dans le sol entre les 2 autres méthodes, est parfois comme un indicateur du niveau de P facilement disponible (« *P intensity* »), mais aussi parfois comme un test de la quantité de réserves de P partiellement mobilisables (DELGADO et TORRENT 2001 ; VAN ROTTERDAM, 2009). Parmi les nombreuses analyses disponibles pour évaluer

le statut P des sols, NEYROUD et LISCHER (2003) ont **comparé 16 méthodes**. Ils ont constaté que la quantité de P extraite diminue selon l'ordre : P-total > P-oxalate > P-Al > P-Mehlich3 > P-Bray > P-AAEDTA (acétate d'ammonium + EDTA) > P-DL (lactate de calcium) > P-CAL (lactate de calcium/acétate) > P-Olsen > bande de papier > P-AAAC (acétate d'ammonium acide) > P-Morgan > P-H₂O > P-CO₂ (CO₂ saturé d'eau) > P-CaCl₂. En ce qui nous concerne, nous avons trouvé que la quantité de P extraite du sol diminue selon l'ordre : P-Al > P-Olsen > P-CaCl₂ (432 % > 100 % > 5,0 % exprimé en % du P-Olsen). Ce résultat est très comparable à celui obtenu par CSATHÓ *et al.* (2002) qui ont trouvé les pourcentages suivants : 370 % > 100 % > 7,5 %. De **fortes corrélations entre les méthodes** ont été observées par nous et d'autres auteurs ; cependant, il s'agit de moyennes : les écarts peuvent s'avérer plus importants. Nous trouvons une **variabilité importante du niveau de P disponible pour les plantes au sein des catégories de P-Olsen** (figures 6b et 6c). Ces différences **pourraient avoir des implications dans les recommandations de fertilisation**. Par exemple, on pourrait diminuer les recommandations pour les sols dont le niveau de P-Olsen est faible et celui de P-CaCl₂ élevé ; au contraire, on pourrait augmenter la dose de fertilisant pour les sols dont le niveau de P-Olsen est élevé et celui de P-CaCl₂ relativement faible.

La combinaison des analyses du sol est également encouragée pour la recherche environnementale (MOODY, 2011). Ainsi, un niveau d'alimentation optimal en P est important tant du point de vue agronomique qu'environnemental. Dans l'histoire récente, la préférence pour un test de sol unique a été souvent faite pour des raisons économiques, mais avec les méthodes modernes d'analyse cette question n'est plus un problème.

Accepté pour publication,
le 4 Avril 2012.

Remerciements au lecteur qui, par ses remarques et propositions, a contribué à la qualité de la traduction et de la publication.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALVA A.K. (1993) : "Comparison of Mehlich 3, Mehlich 1, Ammonium Bicarbonate-DTPA, 1.0M Ammonium Acetate, and 0.2M Ammonium Chloride for extraction of calcium, magnesium, phosphorus, and potassium for a wide range of soils", *Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis*, 24, 603-612.
- ANONYMOUS (1986) : "Fertilisation recommendation for arable land", *Consulentschap voor Bodem-, Water- en Bemestingszaken in de Akkerbouw en Tuinbouw* (in dutch).
- ANONYMOUS (1999) : "Fertilisation recommendations for arable crops, and horticultural crops", *Praktijonderzoek voor de akkerbouw en vollegroenteteelt*, 95 (composed by Van Dijk W.) (in dutch).
- ANONYMOUS (2002) : *Fertilisation recommendation for grassland, and forage crops*, (www.bemestingsadvies.nl), Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen (in dutch).
- ANONYMOUS (2009) : "Fourth Dutch Programme regarding Nitrate-directive (2010-2013)", *Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality* (in dutch).
- BARBER S.A. (1982) : *Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach*, Joh Wiley, New York.
- BDB (Bodemkundige Dienst België) (2005) : "Chemical soil fertility of arable land and grassland in Belgium 2000-2003", *Bodemkundige Dienst België*, Leuven, Belgium (in dutch).
- BELLAMY P.H., LOVELAND P.J., BRADLEY R.I., LARK R.M., KIRK G. J. D. (2005) : Carbon losses from all soils across England and Wales 1978_2003, *Nature*, 937, 245-248.
- BOONE J.A., DOLMAN M.A. (2010) : *Sustainability performance of agriculture in 2010. Results of the Netherlands agriculture and horticulture in the people, planet, and profits domains*, LEI-report (www.lei.wur.nl), The Hague, The Netherlands.
- BUSSINK D.W., TEMMINGHOFF E.J.M. (2004) : "Soil and tissue testing for micronutrient status", *The Int. Fertiliser Soc., Proc.*, 548, York.
- BUSSINK D.W., REIJNEVELD J.A. (2010) : "Die P-Düngungsempfehlung für Silomais auf neuer Leiste (A new concept for P fertiliser recommendation for maize)", *VDLUFA Kongressband*, 122, Kiel (in german).
- BUSSINK D.W., REIJNEVELD J.A., VAN ROTTERDAM-LOS A.M.D. (2007) : "Ein neuer Ansatz für die P-Düngungsempfehlung (A new concept for phosphorus fertiliser recommendations)", *VDLUFA Kongressband*, 119, Göttingen (in german).
- CAO X.D., HARRIS W. (2008) : "Carbonate and magnesium interactive effect on calcium phosphate precipitation", *Env. Sci. & Technology*, 42, 436-442.
- CBS (2009) : *Central Bureau for Statistics*, www.cbs.nl et www.statline.nl (in dutch).
- CORDELL D., DRANGERT J.O., WHITE S. (2009) : "The story of phosphorus: Global food security and food for thought", *Global Environmental Change - Human and Policy dimensions*, 19, 292-305.
- CSATHÓ P., MAGYAR M., DEBRECZENI K., SARDI K. (2002) : "Correlations between soil P and corn leaf P contents in a network of hungarian long-term field trials", *Comm. in soil science and plant analysis*, 33, 3085-3103.
- DAVIDSON E.A., JANSSENS I.A. (2006) : "Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change", *Nature*, 440, 165-173.
- DELGADO A., TORRENT J. (2000) : "Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils", *Soil science society of America journal*, 64, 2031-2037.
- DELGADO A., TORRENT J. (2001) : "Comparison of soil extraction procedures for estimating phosphorus release potential of agricultural soils", *Comm. in soil science and plant analysis*, 32, 87-105.
- DEN DULK P.R. (1959) : "Fertilisation of some horticultural crops", *De Buffer*, 5^e Jaargang nr. 2 (in dutch).
- DENORROY P., DUBRULLE P., VILETTE C., COLOMB B., FAYET G., SCHOESER M., MARIN-LAFLECHE A., PELLERIN F., PELLERIN S., BOIFFIN F. (2004) : *Interpréter les resultats des analyses de terre*, Coll. Techniques et Pratiques, Quae editions, Paris, 132 p.
- DE VRIES O., DECHERING F.J.A. (1938) : "Soil sampling. Description and explanation of soil sampling as practised by Blgg", *Bedrijfslaboratorium voor grondonderzoek Groningen*, Hoitsema C.V. Groningen (in dutch).
- EGNÉR H., RIEHM H., DOMINGO W.R. (1960) : "Soil tests as basis of establishing soil nutrient status. I. Chemical extraction methods for phosphor and potassium (Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung)", *Kungl. Landbrukshögsk. Ann.*, 26, 199-215 (in german).
- EHLERT P., MOREL C., FOTYMA M., DESTAIN J.P. (2003) : "Potential role of phosphate buffering capacity of soils in fertilizer management strategies fitted to environmental goals", *J. Plant Nutrition and Soil Sci.*, 166, 409-415.

- ERIKSSON J., ANDERSSON A., ANDERSSON R. (1997) : "Current status of Swedish arable soils", (In Swedish) *Rep. 4778. Swedish Environ. Protection Agency*, Stockholm, Djodjic F., Börling K., Bergström L. (2004), "Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content", *J. Environmental Quality*, 33-2, 678-684.
- FARDEAU J.C., MOREL C., BONIFACE R. (1991) : "Cinétiques de transfert des ion phosphate du sol vers la solution du sol: paramètres caractéristiques", *Agronomie*, 11, 787-797.
- HANEGRAAF M.C., HOFFLAND E., KUIKMAN P.J., BRUSSAARD L. (2009) : "Trends in soil organic matter in Dutch grasslands and maize fields on sandy soils", *Europ. J. Soil Sci.*, 60, 213-222.
- HEFFER P., PRUD'HOMME M.P.R., MUIRHEID B., ISHERWOOD K.F. (2006) : "Phosphorus Fertilisation: Issues and Outlook", *Proc. Int. Fertilizer Society*, 586, London.
- HOLFORD I.C.R. (1997) : "Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants", *Australian J. Soil Research*, 35, 227-239.
- HOUBA V.J.G., NOVOZAMSKY I., VAN DIJK D. (1998) : "Certification of an air-dry soil for pH and extractable nutrients using one hundredth molar calcium chloride", *Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis*, 29, 1083-1090.
- KETTERINGS Q.M., KAHABKA J.E., REID W.S. (2005) : "Trends in phosphorus fertility of New York agricultural land", *J. Soil and Water Conservation*, 60, 10-20.
- KUIPERS S.F. (1961) : *Theory of fertilization*, J.B. Wolters, Groningen (in dutch).
- LEMERCIER B., GAUDIN L., WALTER C., AUROUSSEAU P., ARROUJAYS D., SCHVARTZ C., SABY N.P.A., FOLLAIN S., ABRASSART J. (2008) : "Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database", *Soil Use and Management*, 24, 131-138.
- MARSCHNER H. (1985) : *Mineral Nutrition of Higher Plants*, Academic Press, London.
- MAYER A. (1895) : "Soil sampling results from the Dutch province Gelderland", *Landbouwkundig tijdschrift*, 236-244, Ritzema Bos J., Van Assendelft De Coningh A.D., Mayer M. & Prins A.M éd. (in dutch).
- MOODY P.W. (2011) : "Environmental risk indicators for soil phosphorus status", *Soil Research*, 49, 247-252.
- NEN 5704 (1996) : *Soil - Sample preparation of soil. Extraction with calcium chloride solution (0.01 mol/l)*, www.nen.nl (in dutch).
- NEUTEL H. (1994) : "The phosphorus status of Dutch arable soils from 1971/72 to 1991/92", *Meststoffen*, 14-20 (in dutch).
- NEYROUD J.A., LISCHER P. (2003) : "Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results?", *J. Plant Nutrition and Soil Sci.*, 166, 422-431.
- OENEMA O., VAN LIERE L., SCHOUMANS O. (2005) : "Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands", *J. Hydrology*, 304, 289-301.
- OLFS H.W., BLANKENAU K., BRENTROP F., JASPER J., LINK A., LAMMEL J. (2005) : "Soil - and plant - based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming", *J. Plant Nutrition and Soil Sci.*, 168, 414-431.
- OTTEN J.M.L., VEENSTRA G. (1951) : *Theory of fertilization*, J.B. Wolters, Groningen-Djakarta, 13th ed. (in dutch).
- PARKER F.W., NELSON W.L., WINTERS E., MILES I.E. (1951) : "The broad interpretation and application of soil test information", *Agronomy J.*, 43, 105-112.
- PAUTLER M.C., SIMS J.T. (2000) : "Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus, and phosphorus saturation in Delaware soils", *Soil Sci. Society of America J.*, 64, 765-773.
- QUINTERO C.E., BOSCHETTI N.G., BENAVIDEZ R.A. (2003) : "Effects of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement", *Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis*, 34, 1435-1450.
- REIJNEVELD J.A., VAN WENSEM J., OENEMA O. (2009) : "Soil organic contents of agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004", *Geoderma*, 152, 231-238.
- REIJNEVELD J.A., EHLERT P.A.I., TERMORSHUIZEN A.J., OENEMA O. (2010A) : "Changes in soil phosphorus status of agricultural land in the Netherlands during the 20th century", *Soil Use and Management*, 26, 399-411.
- REIJNEVELD J.A., EHLERT P.A.I., SCHOUMANS O.F., TERMORSHUIZEN A.J., OENEMA O. (2010B) : "Changes in soil P status of grassland in the Netherlands between 1971 and 2009", *Grassland Sci. in Europe*, Vol. 15.
- REIJNEVELD J.A., TERMORSHUIZEN A.J., OENEMA O. (2012) : "Soil fertility practices and farmer' motives in arable farming", in preparation.
- SCHOUMANS O.F., CHARDON W.J. (2003) : "Risk assessment methodologies for predicting phosphorus losses", *J. Plant Nutrition and Soil Sci. (Zeitschrift für Pflanzenernahrung und Bodenkunde)*, 166, 403-408.
- SCHOUMANS O.F., EHLERT P.A.I., CHARDON W.J. (2004) : "Evaluation of methods for determining soils with low soil P status", *Alterra rapport*, 730.3. Alterra Wageningen, The Netherlands (in dutch).
- SCHRÖDER J.J., NEETESON J.J. (2008) : "Nutrient management regulations in the Netherlands", *Geoderma*, 144, 418-425.
- SIMS J.T., EDWARDS A.C., SCHOUMANS O.F., SIMARD R.R. (2000) : "Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices", *J. Environmental Quality*, 29, 60-71.
- SLEUTEL S., DE NEVE S., HOFMAN G., BOECKX P., BEHEYDT D., VAN CLEEMPUT O., MESTDAGH I., LOOTENS P., CARLIER L., VAN CAMP N., VERBEECK H., VAN DE WALLE I., SAMSON R., LUST N., LEMEURE R. (2003) : "Carbon stock changes and carbon sequestration potential of Flemish cropland soils", *Global Change Biology*, 9, 1193-1203.
- TUNNEY H., BROOKES P.C., JOHNSTON A.E. (1997) : *Phosphorus loss from soil to water*, Publisher Wallingford, CABI, ISBN 0851991564.
- VALK H. (2002) : *Nitrogen and phosphorus supply of dairy cows*, Dissertation, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 204 pp.
- VAN DER PAAUW F. (1948) : "Phosphorus fertilisation in agriculture", *Landbouwvoorlichting*, 1, Landbouwproefstation en bodemkundig instituut T.N.O (in dutch).
- VAN DER PAAUW F. (1971) : "An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus", *Plant and Soil*, 34, 467-481.
- VAN DER PAAUW F. C.M., SLUIJSMANS J. (1954) : "Scheme for fertilizer recommendation for lime, phosphorus, and magnesium on the basis of soil tests", *Landbouwgids*, 275 p. (in dutch).
- VAN ROTTERDAM D., BUSSINK D., TEMMINGHOFF E., VAN RIEMSDIJK W. (2009) : "Predicting uptake of phosphorus by rye-grass ; towards a reliable estimation of the chemical availability of phosphorus in the soil", *Bodem*, 5 (in dutch).
- VAN ROTTERDAM-LOS A.M.D. (2010) : *The potential of soils to supply phosphorus and potassium, processes and predictions*, PhD thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- VELLINGA T.V., VAN DEN POL-VAN DASSELAAR A., KUIKMAN P.J. (2004) : "The impact of grassland ploughing on CO₂ and N₂O emissions in the Netherlands", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70, 33-45.
- VERMEULEN F.H.B., FEY P.J. (1957) : "The phosphate status of arable land and grassland in the Netherlands", *Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen*, 631.416.2 (492) N° 63.7 (in dutch).
- VLEESHOUWERS L.M., VERHAGEN A. (2002) : "Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe", *Global Change Biology*, 8, 519-530.
- VOS R. (1998) : "Fertility recommendations: past and present", *Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis*, 29, 1429-1440.
- WITHERS P.J.A., ULÉN B., STAMM C. BECHMANN M. (2003) : "Incidental phosphorus losses - are they significant and can they be predicted?", *J. Plant Nutrition and Soil Sci.*, 166, 459-468.



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33 01 30 21 99 59 – Fax : +33 01 30 83 34 49 – Mail : afpf.versailles@gmail.com

Association Française pour la Production Fourragère