

# ÉVALUATION DE LA PERTINENCE DES DEUX MÉTHODES D'ANALYSE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS FORESTIERS

MAURICE BONNEAU - GÉRARD LÉVY - PIERRE MONTPIED

Le phosphore est un des éléments majeurs indispensables à la vie et à la croissance des végétaux, et, parmi eux, les arbres de forêt.

Il est assimilé sous forme d'ions  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$  ou  $\text{PO}_4^{3-}$ . Ces ions, qui sont, dans le sol, les formes assimilables du phosphore, sont adsorbés sur les colloïdes de diverses manières : soit directement, sur les charges positives des hydroxydes de fer et des hydroxydes d'aluminium, sur les particules de carbonate de calcium, soit par l'intermédiaire de l'ion calcium, éventuellement des ions fer et aluminium, sur les charges négatives des argiles. Une partie de ces ions phosphoriques est en outre présente dans la solution du sol.

Un modèle plus moderne (Fardeau, 1981) considère que ces diverses formes sont réparties au sein de nombreux compartiments dont chacun échange des ions phosphate avec la solution du sol. Fardeau dit de manière imagée qu'ils sont « *branchés de manière mamellaire* » sur la solution du sol. L'absorption par les racines se fait à partir de la solution dont l'appauvrissement est compensé par le transfert d'ions phosphate à partir de ces compartiments. Ce transfert s'effectue à des vitesses variables suivant les compartiments concernés. Il faut être bien conscient que la teneur en ions phosphate de la solution du sol est toujours très faible, représentant de l'ordre du kg/ha. C'est donc la vitesse des transferts, et donc la répartition du phosphore entre les compartiments à transfert rapide et les compartiments à transfert lent, qui commande la richesse de l'alimentation phosphatée. Ces transferts sont réversibles : en cas de fertilisation, un enrichissement important de la solution du sol n'est que de durée limitée, mais le transfert du phosphore de la solution du sol vers des compartiments qui le céderont ultérieurement assure un renforcement plus modéré, mais durable, de la concentration de la solution, et donc de la nutrition des arbres.

On conçoit alors que le dosage du phosphore biodisponible du sol ne soit pas aisé. La seule méthode objective, introduite par Barbier *et al.* (1971), puis perfectionnée par Fardeau (1981), consiste à mettre en présence un échantillon de sol et une solution de phosphates dans laquelle une partie (très faible) du phosphore est représentée par l'isotope 32 du phosphore (majoritairement  $^{31}\text{P}$ ). Après des durées variables de contact (1 à 10 minutes), on mesure le  $^{32}\text{P}$  restant en solution. De la quantité de phosphore radioactif échangée après des durées variables de contact, on déduit la quantité de phosphore biodisponible (en fait "isotopiquement diluable") dans des compartiments de moins en moins réactifs (durée de contact de plus en plus longue) qui simulent plus ou moins bien le phosphore biodisponible, immédiatement, au terme de la saison, ou de plusieurs années.

Cette méthode, surtout à cause du prix de l'isotope  $^{32}\text{P}$ , mais aussi à cause de manipulations relativement longues, n'est pas utilisable de manière courante.

Les méthodes usuelles d'analyse correspondent à une plus ou moins grande énergie de rétention du phosphore par les colloïdes, ou une rétention par des colloïdes de natures différentes, et emploient des réactifs d'extraction très variés, depuis des réactifs extrêmement doux (eau) jusqu'à des réactifs très énergiques (acides ou bases forts).

En matière forestière, l'extraction, qui avait été pratiquée à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle par des acides très forts (Henry, 1908 ; Bonneau, 2001), avait évolué et, vers 1950, on utilisait au contraire l'acide sulfurique très dilué (0,004 N - méthode Truog), utilisée par ailleurs surtout pour les sols agricoles. Cette méthode était loin de donner satisfaction car, dans les sols forestiers, vierges de toute fertilisation, elle ne fournissait que des valeurs très basses, quels que soient les types de sols ou la productivité des peuplements. Duchaufour eut alors l'idée de tenter l'utilisation, après adaptation et simplification, d'une méthode canadienne mise au point par Rennie (Rennie, 1956 ; Duchaufour et Bonneau, 1959). Elle consistait en une double extraction, d'abord à l'acide sulfurique dilué, puis à la soude caustique N/10. On extrait ainsi à la fois le phosphore lié au calcium (sur les argiles et les particules de calcaire) et le phosphore adsorbé sur les hydroxydes d'aluminium et partiellement celui qui est retenu par les hydroxydes de fer.

De fait, cette méthode, testée sur une vingtaine d'échantillons provenant de sols très divers, s'avéra fournir des valeurs diversifiées. Ultérieurement, pratiquée systématiquement sur les échantillons de sols prélevés par les équipes de la Station de sylviculture de l'INRA dans les placettes utilisées pour la construction des tables de production, elle se révéla globalement en bon accord avec la production des peuplements correspondants, mais aucun test statistique précis ne fut effectué à l'époque. Il aurait d'ailleurs été indispensable de tenir compte des autres facteurs de l'alimentation minérale et du climat, donc d'effectuer une recherche très complète.

Cette méthode fut adoptée par le laboratoire d'analyse des sols de l'INRA d'Arras, pour les sols forestiers, et par l'unité de recherche sur les sols forestiers de l'Institut agronomique de Gembloux en Belgique.

Les autres laboratoires français qui eurent parfois à analyser des sols de forêt continuèrent à appliquer les mêmes méthodes que pour les sols agricoles, notamment, pour les sols acides, l'extraction à l'acide citrique à 2 % (parfois appelée à tort méthode Dyer, cette dernière utilisant l'acide citrique à 1 %) et, pour les sols calcaires ou très calciques, la méthode Joret-Hébert, basée sur une extraction à l'oxalate d'ammonium.

C'est pourquoi, en 1969-70 fut effectuée une comparaison entre la méthode Duchaufour et la méthode à l'acide citrique (Bonneau *et al.*, 1970). La méthode Joret-Hébert fut laissée de côté car la méthode Duchaufour nécessitait une adaptation préalable aux sols calcaires : en effet, l'acide sulfurique dilué employé était la plupart du temps insuffisant pour dissoudre toutes les particules de calcaire actif, et la teneur du sol en  $\text{P}_2\text{O}_5$  s'en trouvait sous-évaluée.

La comparaison entre méthode Duchaufour et méthode citrique, sur une cinquantaine d'échantillons de sols en majorité très acides (cryptopodzoliques, podzoliques), montra une bonne correspondance entre les deux, avec une relation statistique :

$$\text{P}_2\text{O}_5 \text{ citrique} = 0,0218 + 0,667 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ Duchaufour}$$

avec des valeurs équivalentes des deux méthodes pour une teneur du sol de 0,08 g/kg, une valeur citrique légèrement supérieure à la valeur Duchaufour pour des teneurs Duchaufour inférieures (sols pauvres), mais la dispersion des points représentatifs est très grande, et une valeur

Duchaufour supérieure à la valeur citrique dans les sols plus riches (mais souvent riches en aluminium).

Aucune relation systématique n'avait été tentée avec les résultats d'analyses foliaires.

Lors de l'établissement du Réseau national pour l'Étude des Écosystèmes forestiers (RENECOFOR) (102 placettes de niveau II ou supérieur) et du réseau européen de suivi de la santé des forêts (réseau de niveau I : 520 placettes en France), on dut choisir des méthodes d'analyse du phosphore largement pratiquées dans les autres pays européens. La méthode Duchaufour ne convenait donc malheureusement pas, puisque utilisée seulement, comme indiqué plus haut, en France et en Belgique. On choisit la méthode citrique pour les sols acides et la méthode Joret-Hébert pour les sols calcaires. La question de la comparaison de ces méthodes avec la méthode Duchaufour, toujours pratiquée en France pour les analyses usuelles de fertilité des sols forestiers, se reposa donc. Pour rester dans un volume de travail compatible avec les moyens disponibles, on décida de ne comparer, comme en 1970, que la méthode Duchaufour et la méthode citrique, mais cette fois en testant quelle était celle de ces deux méthodes qui était en meilleur accord avec les analyses de feuilles ou aiguilles.

## MÉTHODES

On n'a étudié, dans chacun des deux réseaux, que des sols non calcaires, sur lesquels c'est la méthode citrique qui avait été choisie.

Dans chaque placette étudiée, le sol a été prélevé à deux niveaux : 0-10 et 20-40 cm. Sur les échantillons RENECOFOR, la méthode Duchaufour, qui n'avait pas été pratiquée initialement, a été réalisée. Sur les échantillons du Réseau européen pour lequel le dosage du phosphore n'avait pas été fait, les deux analyses ont été pratiquées. Ce sont ainsi 320 échantillons de sol qui ont été réanalysés.

En outre, des analyses foliaires ont été pratiquées sur 64 placettes du réseau européen. Sur le réseau RENECOFOR, elles l'étaient, à l'époque, systématiquement chaque année. La corrélation entre teneur des aiguilles ou feuilles en phosphore et la richesse des sols en cet élément, appréciée selon l'une ou l'autre méthode, a ainsi pu être étudiée sur 132 placettes.

Les analyses de sol ont été réalisées au laboratoire INRA d'Arras et les analyses foliaires au laboratoire INRA de Bordeaux (LERMAVE).

## RÉSULTATS

### Comparaison des teneurs du sol en phosphore biodisponible

La corrélation entre la méthode Duchaufour et la méthode citrique est très bonne, avec un coefficient de corrélation de 0,81 pour 320 couples ( $r^2 = 0,656$ ). La relation est linéaire entre les logarithmes des résultats de chaque méthode. La figure 1 (p. 60) représente cette relation dont la formule est :

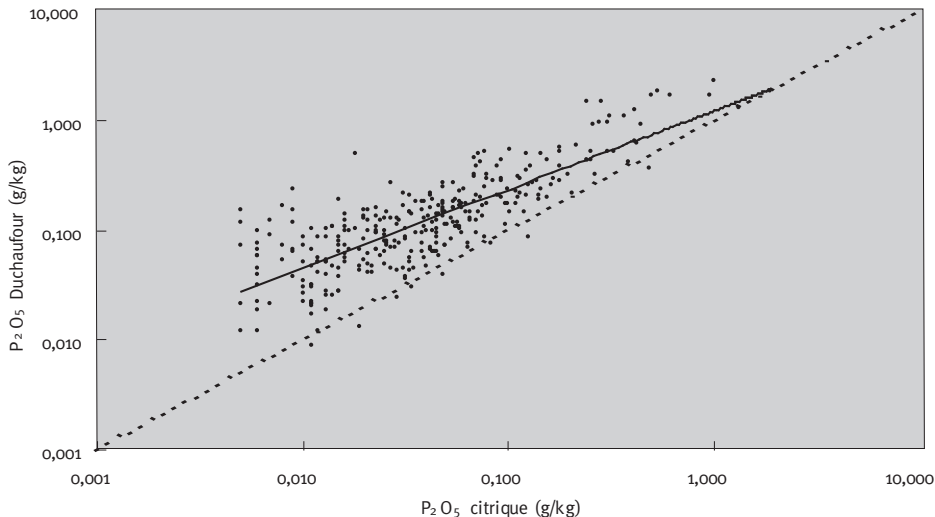
$$\log_{10}(P_2O_5 \text{ Duch}) = 0,715 \times \log_{10}(P_2O_5 \text{ citr}) + 0,0803$$

ou en logarithmes népériens :

$$\ln(P_2O_5 \text{ Duch}) = 0,715 \times \ln(P_2O_5 \text{ citr}) + 0,185$$

**FIGURE 1 COMPARAISON DES MÉTHODES DUCHAUFOUR ET CITRIQUE D'EXTRACTION DU PHOSPHORE DU SOL**

Sols non calcaires provenant de placettes du réseau RENECOFOR et du "réseau européen". Ensemble des données



Les valeurs Duchaufour sont presque toujours supérieures aux valeurs citriques, mais de moins en moins quand on passe des valeurs faibles aux valeurs élevées. Ceci est en opposition avec les résultats de la première étude mentionnés ci-dessus. On est cependant conduit à considérer que les résultats les plus récents, qui portent sur un beaucoup plus grand nombre d'échantillons, sont plus proches de la réalité.

Si, comme il est normal de le faire, on cherche à interpréter les résultats par type de sol, on trouve que la pente de la droite de régression ne varie pas avec le type de sol, mais que son ordonnée à l'origine est faible pour les sols pauvres en cations échangeables, pseudogleys (luvisols-rédoxysols du *Référentiel pédologique*), sols podzoliques (podzosols), plus élevée pour les sols moyennement riches, sols lessivés (luvisols), bruns acides (brunisol oligosaturés et alocrisols), et plus forte encore pour les sols riches, sols bruns (brunisol mésosaturés), sols bruns eutrophes (brunisol saturés, calcisol).

Le tableau I (p. 61) donne les valeurs de a et b

$$\ln(P_2O_5 \text{ Duch}) = a \times \ln(P_2O_5 \text{ citr}) + b$$

et les figures 2 et 3 (p. 61 et 62) donnent les droites représentatives pour les différents types de sols et pour les deux niveaux 0-10 et 20-40 cm. Le supplément de  $P_2O_5$  extrait par la méthode Duchaufour par rapport à la méthode citrique est plus grand dans les sols riches en cations échangeables que dans les sols pauvres.

En outre, si on introduit les caractéristiques chimiques des sols dans la relation entre les valeurs Duchaufour et les valeurs citriques, on améliore de 10 à 14 % l'explication de la variation, et ce sont les variables liées au pH (pH dans  $CaCl_2$ ) et à la matière organique (taux de carbone et C/N) qui interviennent de façon significative. L'étude montre que, plus la matière organique est "active" (C/N faible) et plus le carbone organique est abondant, plus la méthode Duchaufour extrait de phosphore par rapport à la méthode citrique. Ceci est sans doute en relation avec l'extraction d'une partie du phosphore organique par la méthode Duchaufour.

**TABEAU I**      **Pente et ordonnée à l'origine de la droite de régression de  $\ln(P_2O_5 \text{ Duchaufour})$  en fonction de  $\ln(P_2O_5 \text{ citrique})$  pour différents types de sol**  
 Dans chaque colonne, les valeurs associées avec la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 0,05

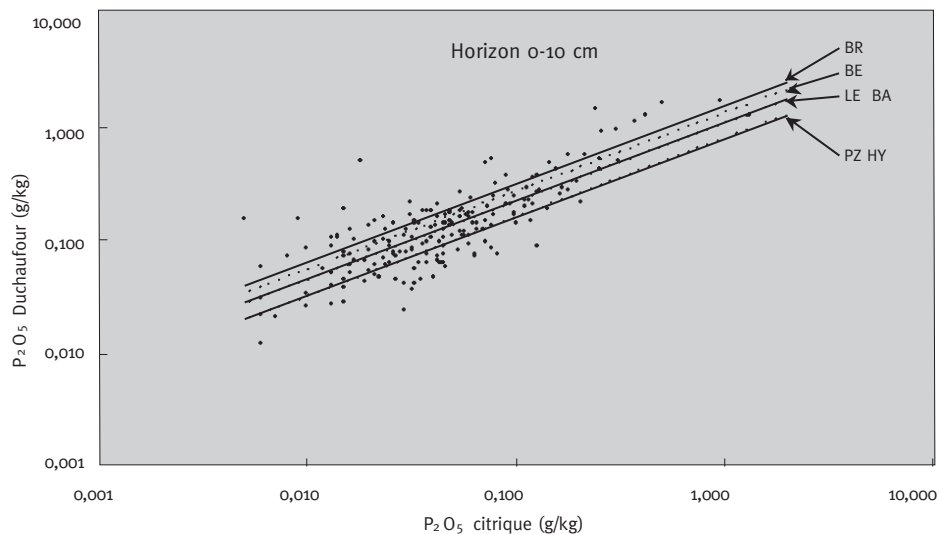
Type de sol	Horizon de surface 0-10 cm		Horizon profond 20-40 cm	
	Pente = 0,693		Pente = 0,706	
Brun eutrophe BE . . . . .	0,26	ab	0,58	a
Brun BR . . . . .	0,43	a	0,51	a
Brun acide BA . . . . .	0,11	b	0,25	ab
Lessivé LE . . . . .	0,05	b	0,18	ab
Podzolique PZ . . . . .	-0,27	c	-0,22	c
À hydromorphie temporaire HY . . . . .	-0,23	c	-0,33	c

Il faut, en résumé, retenir que la méthode Duchaufour extrait nettement plus de phosphore que la méthode citrique.

Il faut souligner aussi que **l'application de la formule tirée de la comparaison et représentée sur les figures 1, 2 et 3 n'est utilisable pour obtenir la valeur du phosphore Duchaufour à partir de la valeur citrique que pour un ensemble de plusieurs sols, mais en aucun cas pour un sol particulier**, étant donné la très forte dispersion des résultats pour les valeurs faibles le plus souvent rencontrées dans les sols forestiers (0,05 à 0,1 g/kg). Pour un échantillon particulier, la valeur réelle pourrait aller de la moitié au double de la valeur calculée.

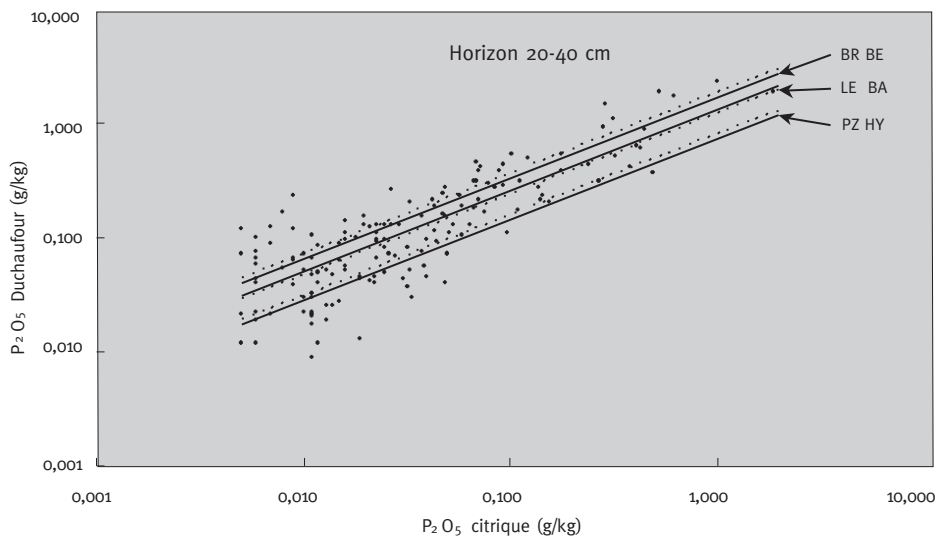
**FIGURE 2**      **COMPARAISON DES MÉTHODES DUCHAUFOUR ET CITRIQUE D'EXTRACTION DU PHOSPHORE DU SOL**

Droites de régression des différents types de sol, horizon 0-10 cm  
 (voir tableau I pour les codes de sols)



**FIGURE 3 COMPARAISON DES MÉTHODES DUCHAUFOUR ET CITRIQUE D'EXTRACTION DU PHOSPHORE DU SOL**

Dropes de régression des différents types de sol, horizon 20-40 cm  
(voir tableau I pour les codes de sols)



**TABEAU II**

**Statistiques des modèles de régression**  
 $P_2O_5 \text{ foliaire} = f(\ln(P_2O_5 \text{ sol}))$  pour chaque espèce  
 (n = effectif,  $r^2$  = part expliquée de la variation ;  
 seuls les  $r^2$  significatifs au seuil de 5 % sont indiqués)

Espèces	Paramètre	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Duch. 0-10 cm	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> citrique 0-10 cm	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Duch. 20-40 cm	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> citrique 20-40 cm
Chêne sessile . . . . .	n r <sup>2</sup>	39 <b>0,236</b>	39 <b>0,159</b>	39 <b>0,309</b>	26 <b>0,258</b>
Chêne pédonculé . . . . .	n r <sup>2</sup>	20 <b>0,261</b>	20 <b>0,342</b>	20 <b>0,408</b>	15 <b>0,208</b>
Hêtre . . . . .	n r <sup>2</sup>	20 <b>0,810</b>	13 <b>0,480</b>	19 <b>0,669</b>	14 -
Douglas . . . . .	n r <sup>2</sup>	6 -	6 -	6 -	6 -
Pin maritime . . . . .	n r <sup>2</sup>	7 -	5 -	7 -	5 -
Pin sylvestre . . . . .	n r <sup>2</sup>	30 <b>0,311</b>	24 -	30 -	19 -
Épicéa commun . . . . .	n r <sup>2</sup>	10 <b>0,463</b>	10 <b>0,581</b>	10 <b>0,601</b>	9 <b>0,557</b>
Sapin pectiné . . . . .	n r <sup>2</sup>	26 <b>0,376</b>	19 -	26 <b>0,516</b>	17 <b>0,421</b>

### Relation entre phosphore du sol et phosphore foliaire

Le tableau II (p. 62) donne, par espèce, le nombre de placettes étudiées, le pourcentage de variation de la richesse foliaire en phosphore expliqué par la teneur du sol en phosphore assimilable (transformation log), et ceci pour les deux méthodes et pour les deux profondeurs auxquelles ont été prélevés les échantillons.

Il est difficile de se prononcer pour le Douglas et le Pin maritime qui ne sont représentés que par un petit nombre de placettes.

En ce qui concerne la profondeur 0-10 cm, la méthode Duchaufour donne les meilleurs résultats, sauf pour l'Épicéa commun et le Chêne pédonculé. En ce qui concerne l'horizon 20-40 cm, la méthode Duchaufour est la meilleure.

Pour les Chênes sessile et pédonculé, l'Épicéa et le Sapin, la relation est meilleure avec le phosphore de l'horizon minéral profond. Pour le Hêtre, la méthode Duchaufour donne de très bons résultats dans les deux profondeurs, tandis que, pour le Pin sylvestre, la meilleure relation est obtenue avec le phosphore de l'horizon organo-minéral superficiel.

### CONCLUSIONS

Dans de nombreuses situations où le niveau de phosphore assimilable du sol est faible, on se trouve au-dessous du seuil de détection de la méthode citrique.

La méthode Duchaufour met en œuvre deux extractions successives, l'une en milieu acide, l'autre en milieu basique, et extrait donc *a priori* plus de phosphore que la méthode citrique qui n'extrait  $P_2O_5$  qu'en milieu acide. La méthode Duchaufour semble notamment mieux rendre compte du phosphore associé à la matière organique, ce qui, par ailleurs, rend mieux compte de la capacité des arbres à extraire ce phosphore par l'intermédiaire des mycorhizes.

Aucune méthode n'étant parfaite, et notre objectif étant de mettre en relation la mesure du phosphore dans le sol avec la nutrition des arbres, le meilleur critère de choix est donc l'aptitude d'une méthode à rendre compte du comportement des arbres. À ce titre, le phosphore extrait par la méthode Duchaufour rend en général mieux compte des teneurs foliaires que la méthode citrique.

Nos résultats conduisent donc à préférer, dans les sols non calcaires, la méthode Duchaufour pour estimer la quantité de phosphore disponible pour les arbres forestiers. La méthode citrique reste cependant valide dans les sols non calcaires, mais elle est moins sensible. Les avantages de la méthode Duchaufour sont encore mieux valorisés si l'on choisit judicieusement l'horizon à étudier : horizon 20-40 cm pour les Chênes sessile et pédonculé, l'Épicéa commun et le Sapin pectiné, horizon organo-minéral 0-10 cm pour le Pin sylvestre et l'un ou l'autre horizon indifféremment pour le Hêtre.

Faute de pouvoir recourir à la méthode Duchaufour, puisque le laboratoire INRA d'Arras est à peu près le seul à la pratiquer en France, la relation entre les deux méthodes peut permettre, pour les sols non calcaires, de déduire la valeur Duchaufour de la valeur citrique, mais seulement dans le cas d'un travail sur un ensemble d'assez nombreux échantillons. **Il ne faut pas, par contre, chercher à calculer, pour un échantillon individuel, une valeur de  $P_2O_5$  Duchaufour à partir d'un résultat obtenu par la méthode citrique, car on s'expose alors à une grande inexactitude qui peut aller jusqu'à réduire de moitié ou doubler la valeur réelle.**

Cette recherche et ses résultats ont donc finalement pour mérite principal de justifier, auprès des praticiens, le conseil qui leur est donné de se référer si possible à la méthode Duchaufour, qui

est d'ailleurs celle sur laquelle sont basées les normes d'interprétation, et de pouvoir *grosso modo* interpréter des résultats obtenus par la méthode citrique.

Maurice BONNEAU  
5, rue de Bastogne  
F-54500 VANDŒUVRE-LES-NANCY  
(maurice.bonneau@wanadoo.fr)

Gérard LÉVY  
18, rue de Provence  
F-54280 SEICHAMPS

Pierre MONTPIED  
UMR INRA UHP  
Écophysiologie et Écologie forestières  
INRA – Centre de Nancy  
F-54280 CHAMPENOUX  
(montped@nancy.inra.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

- BARBIER (G.), FARDEAU (J.-C.), MARINI (P.). — Sur la diffusibilité des ions-phosphate du sol. — *Annales agronomiques*, vol. 22, n° 3, 1971, pp. 309-342.
- BONNEAU (M.). — Un siècle d'enseignement et de recherche en pédologie forestière. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 5, 2001, pp. 585-603.
- BONNEAU (M.), HABIBI (H.), LE TACON (F.). — Comparaison de trois méthodes de dosage du phosphore dans les sols forestiers. — *Bulletin de l'Association française pour l'Étude du Sol*, n° 2, novembre-décembre 1970, pp. 19-27.
- DUCHAUFOUR (P.), BONNEAU (M.). — Une méthode nouvelle de dosage du phosphore assimilable dans les sols forestiers. — *Bulletin de l'Association française pour l'Étude du Sol*, n° 4, 1959, pp. 193-198.
- FARDEAU (J.-C.). — Cinétique de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. — Université de Paris VI, 1981. — 198 p. (Thèse).
- HENRY (E.). — Les sols forestiers. — Nancy : Éd. Berger-Levrault et C<sup>ie</sup>, 1908. — 392 p.
- RENNIE (P.J.). — A semi-micro routine procedure for the partial fractionation of soil phosphorus. — *Journal of the Science of Food and Agriculture*, n° 3, 1956, pp. 227-232.

---

### ÉVALUATION DE LA PERTINENCE DES DEUX MÉTHODES D'ANALYSE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS FORESTIERS (Résumé)

Deux méthodes d'analyse du phosphore biodisponible des sols sont comparées sur des sols non calcaires : la méthode Duchaufour (deux extraits successifs, le premier à l'acide sulfurique dilué, le second à la soude) et la méthode "Dyer" (extraction à l'acide citrique dilué) et sont mises en rapport avec les résultats d'analyses foliaires. Les deux méthodes sont bien corrélées entre elles. La méthode Duchaufour est celle qui rend le mieux compte de la nutrition phosphatée réelle appréciée par analyse foliaire. Pour les Chênes, le Hêtre et l'Épicéa, l'horizon minéral 20-40 cm donne les meilleurs résultats. Pour le Pin sylvestre, c'est le phosphore de l'horizon organo-minéral 0-10 cm qui est le mieux corrélé au phosphore des aiguilles.

### COMPARISON OF TWO METHODS FOR DETERMINING PHOSPHORUS CONTENT IN FOREST SOILS (Abstract)

Two methods for analysing the bioavailable phosphorus of soils were compared in non-calcareous soils - the Duchaufour method (two extracts in succession, first with diluted sulphuric acid, and then with sodium) and the "Dyer" method (extraction using diluted citric acid) - with reference to leaf analysis results. The two methods correlate well. The Duchaufour method most accurately reports the actual phosphate nutrition as assessed by leaf analysis. For oak, beech and spruce, the 20-40 cm mineral horizon yields the best results. For the Scots pine, it is the phosphorus in the 0-10 cm organo-mineral horizon that correlates best with the phosphorus found in the needles.