

## **ANALYSES DE SOL EN FORÊT : LES CHOIX DU PHYTOÉCOLOGUE DANS LE CADRE DES TYPOLOGIES DE STATIONS OU DES ÉTUDES SCIENTIFIQUES**

---

**JEAN-CLAUDE GÉGOUT - BERNARD JABIOL**

---

L'interprétation des analyses de sols en matière forestière et leur utilisation dans la gestion sont souvent problématiques du fait de l'impossibilité qu'ont les chercheurs à pouvoir fournir, pour chaque essence, des besoins précis de chaque élément nutritif. Il est très difficile en effet d'établir en forêt des modèles de fonctionnement nutritionnel, comme le font les agronomes, en équilibrant les "entrées" et les "sorties" sur toute une révolution (Bonneau et Ranger, 1999). De ce fait, les données analytiques, bien que chacun les juge indispensables, sont souvent mal maîtrisées (voir article précédent, Larrieu et Jabiol, 2001) même par les chargés d'étude qui réalisent des typologies de stations.

On s'aperçoit en effet que les analyses de sols dans les typologies forestières (catalogues de types de stations) sont actuellement très hétérogènes, souvent incomplètes, voire non sensées, soit du fait que le responsable n'ait pas su raisonner ses choix en fonction du budget disponible, soit que ses connaissances ne lui aient pas permis de choisir les méthodes analytiques les plus appropriées. On a déjà cité en préambule l'absence de l'analyse du phosphore dans bien des cas, ou dans d'autres cas son analyse par des méthodes peu coûteuses mais pour lesquelles on ne dispose d'aucune référence forestière ; on pourrait citer des choix de méthode inadaptée pour l'analyse de la capacité d'échange, des analyses de l'azote sans l'analyse du carbone, ou, dans le cas d'un budget mal géré, des analyses granulométriques dans des successions d'horizons texturalement homogènes, etc.

Cette hétérogénéité nuit à une vision claire et générale des conditions physico-chimiques des sols forestiers français et à celle de leurs relations avec la végétation et les potentialités forestières.

L'objectif de cet article est donc de fournir une aide dans le choix des analyses mais aussi de présenter les méthodes analytiques les plus appropriées à l'heure actuelle dans le domaine forestier. L'optimisation des données est aujourd'hui d'autant plus intéressante que la Direction de l'Espace rural et de la Forêt (DERF, Ministère de l'Agriculture), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et l'École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) financent la réalisation d'une base de données phytoécologiques qui n'aura toute son utilité que si les données introduites présentent une homogénéité suffisante (Gégout, 2001). Les recommandations et les listes de données présentées dans cet article ont été élaborées en prenant le plus grand compte de la base nationale de données pédologiques DONESOL (Gaultier *et al.*, 1993).

Il faut rappeler enfin qu'une analyse n'a de sens que si l'on a réalisé une description complète du sol qui permet :

- de décrire les paramètres physiques qui ont une importance fondamentale sur le comportement des arbres (hydromorphie, structure, enracinement et profondeur prospectable...) ;
- de préciser le choix des analyses (voir ci-dessous) ;
- d'interpréter correctement ces dernières (prise en compte des profondeurs d'enracinement, de la forme d'humus...).

La description et les analyses de sol réalisées sur un exemple représentatif d'un type de station seront présentées, dans un catalogue, accompagnées d'un schéma du sol (Jabiol et Gégout, 1992), du relevé floristique en abondance dominance réalisé sur la placette, et des informations écologiques (topographie, géologie, couvert des strates...) ou informatives (coordonnées géographiques, date du relevé, auteur) nécessaires à une description complète du relevé.

## **MÉTHODE DE PRÉLÈVEMENT, CHOIX DES HORIZONS ET DES PARAMÈTRES À ANALYSER**

### **Méthodes de prélèvement (Baize et Jabiol, 1995)**

Une fosse sera implantée dans une zone physionomiquement et écologiquement homogène, non perturbée, parfaitement représentative du type de station. Le prélèvement sera effectué sur toute l'épaisseur de chaque horizon à échantillonner à l'exception des zones de transition. Des prélèvements par tranche de sol d'épaisseur constante doivent être évités autant que possible afin de ne pas risquer de prélever des échantillons très hétérogènes, à cheval sur deux horizons. Pour les sols non caillouteux, il est nécessaire de prélever environ un kilogramme de terre qui, une fois bien homogénéisée et séchée, pourra être réduit à quelques centaines de grammes.

Lors du prélèvement, il est nécessaire de ne pas éliminer les éléments grossiers dont on souhaite connaître un pourcentage pondéral lors de l'analyse. Le volume prélevé devra être d'autant plus important que la quantité et la taille de ces éléments grossiers seront grandes : pour l'évaluation des blocs (> 20 cm), un prélèvement représentatif est illusoire en routine ; pour les pierres (7,5 à 20 cm), il reste difficile.

L'échantillon sera ensuite séché à l'air au plus vite (sauf dans le cas des andosols : voir Baize, 2000) en le protégeant des rayons du soleil, ou mieux, pour limiter les actions microbiennes, mis à l'étuve à 40 °C (voir en annexe 1, p. 577, normes AFNOR et ISO ; Baize, 2000). L'envoi de l'échantillon sec au laboratoire devra intervenir dès que possible.

### **Choix des horizons à analyser**

Idéalement, tous les horizons du sol devraient être analysés jusqu'à la profondeur de sol prospectée ou jugée prospectable par les racines... ce qui est parfois considérable. Pour faire des économies, il est possible de transiger sur le choix des horizons en négligeant les plus minces à condition qu'ils soient peu contrastés. Selon le cas, ils seront alors considérés comme semblables à un horizon adjacent, ou intermédiaires entre deux horizons. Lors du calcul de certaines variables (comme la réserve utile...) nécessitant leur prise en compte, on utilisera alors soit la valeur calculée sur l'horizon voisin le plus semblable soit la moyenne sur les deux horizons adjacents. Une parfaite description du profil est indispensable pour ce choix. Cependant les horizons fins très contrastés par rapport à leurs voisins, comme les horizons podzolisés BPh situés entre des horizons E et BPs, seront analysés. Les horizons A même très minces sont

également indispensables à analyser en phytoécologie, mais les variables analysées peuvent y être moins nombreuses comme on le verra.

### **Généralités sur le choix des analyses à effectuer**

Les analyses à effectuer doivent être raisonnées pour permettre d'évaluer correctement les potentialités forestières des stations (Bonneau, 1995) ou étudier les relations flore-sol (Gégout, 1995). Voici quelques exemples de raisonnement :

— le choix des analyses dépend, pour beaucoup, des contextes stationnels : **il ne peut se faire que si l'on dispose de descriptions pédologiques et stationnelles précises** : analyse du calcaire si l'effervescence est reconnue ou en présence de quantités importantes de cailloux calcaires, analyse du carbone limité aux horizons de surface ou étendu aux horizons plus profonds seulement lorsqu'un caractère humifère y a été reconnu, etc.

— toutes les variables ne sont pas obligatoirement analysées pour tous les horizons. Pour les horizons les plus minces, des analyses jugées moins importantes pourront souvent être omises (granulométrie, voire même capacité d'échange...).

— de même, certaines analyses sont inutiles dans certains contextes :  $Al^{+++}$  et  $H^+$  en milieu neutre ( $pH > 6$ ),  $Ca^{++}$  en contexte carbonaté ; une mesure du pH peut être effectuée par soi-même préalablement à l'envoi des échantillons au laboratoire, à moins que des conditions puissent être posées à celui-ci, comme par exemple : "analyser  $Al^{+++}$  et  $H^+$  seulement si  $pH > 6$ ".

— les variables telles que le fer ou l'aluminium libres et totaux ne sont utiles que pour des interprétations pédogénétiques (mais ne pas confondre Al libre et  $Al^{+++}$  échangeable).

Il est important de toujours préciser le protocole d'analyse, si possible dans le tableau d'analyse lui-même. C'est évident et indispensable lorsque plusieurs protocoles existent car ils peuvent influencer fortement sur les résultats et leur interprétation (c'est le cas du phosphore ou de la capacité d'échange). Mais, dans les autres cas, il faut penser aussi que les protocoles peuvent évoluer au cours des années (CEC, carbone, azote...).

À la fois pour des raisons de standardisation et surtout d'interprétation des résultats, précisons qu'il est important de respecter les unités préconisées dans les paragraphes suivants. En particulier, ne jamais exprimer les cations échangeables en pourcentage pondéral d'oxyde ou d'élément.

Il ne faut pas oublier que tout échantillon envoyé au laboratoire aura deux coûts dont l'un au moins est incompressible : c'est la prise en charge (de l'ordre de 10 F HT) et la préparation de l'échantillon (de l'ordre cette fois de 30 F HT) ; en conséquence, pour un échantillon donné, bien réfléchir avant envoi aux analyses à demander pour tout faire réaliser en une seule fois et éviter des envois successifs !

### **LISTE DES INFORMATIONS À CONSIGNER ET DES ANALYSES À RÉALISER**

Les variables mentionnées ci-après ne correspondent pas toutes à des analyses. Certaines sont informatives (exemple : date) ou relatives à un protocole d'analyse. Nous tenons à les repréciser ici car la qualité d'un résultat d'analyse et ses possibilités d'utilisation ou d'entrée en base de données dépendent de la qualité avec laquelle toutes ces informations seront consignées. Quelle que soit leur nature, les variables citées devront toutes être stockées et indiquées dans les documents diffusés.

**Dans cette liste, les variables précédées d'une astérisque (\*) seront à renseigner ou à analyser en priorité**, au moins dans certaines conditions de milieu.

Les titres des rubriques correspondant à des *méthodes d'analyse* sont écrits en italiques. Pour ne pas alourdir le texte, la présence d'une norme française (AFNOR) pour une analyse sera mentionnée par un 1 en exposant, la présence d'une norme internationale (ISO) par un 2 en exposant. Les codes des normes proprement dites sont renvoyés en annexe 1 (p. 577).

### Informations générales

Outre les informations générales (et à ne pas oublier !) ayant trait à l'identification de l'auteur des prélèvements et à la numérotation des sols et des horizons analysés, diverses informations sont très intéressantes à relever.

- **\*Date de prélèvement** de l'échantillon sur le terrain.

Commentaire : utilité pour interpréter certaines analyses sensibles à la saison ou aux antécédents climatiques et surtout pour étudier l'évolution des paramètres par des analyses ultérieures de la même fosse pédologique.

- **\*Longitude** de la fosse analysée. Il est préférable de fournir la longitude en coordonnées Lambert (système local). Elle est facile à relever car elle repose, sur les cartes au 1/25 000, sur un réseau de croisillons disposés tous les kilomètres (4 cm sur la carte).

- **\*Latitude** de la fosse analysée. Utiliser le même système de coordonnées que pour la longitude.

Commentaire : la localisation précise des fosses analysées est très importante. Elle permet de retourner sur le site mais aussi, sous système d'information géographique, de croiser les données recueillies avec celles de diverses bases de données spatialisées (météorologiques, altitudinales, géologiques...). La localisation par noms de forêt ou de lieu-dit pourra être ajoutée mais seulement en complément. Elle est en effet peu précise, difficile à retrouver par toute personne étrangère à la région, et difficilement manipulable sous système informatique.

- **\*Méthode de prélèvement** des horizons pour l'analyse. Préciser : si l'échantillon a été prélevé dans un horizon ou selon une tranche de sol d'épaisseur fixée au préalable (la deuxième méthode étant déconseillée comme on l'a déjà dit) ; si l'échantillon a été prélevé à un seul endroit ou s'il provient d'un mélange de plusieurs prélèvements (échantillon composite).

- **Limite supérieure du prélèvement** (cm)

- **Limite inférieure du prélèvement** (cm)

- **\*Nom du laboratoire** d'analyse. Il est obligatoire de réaliser les analyses de sol dans un laboratoire agréé par le ministère de l'Agriculture (liste en annexe 2, p. 578). Il ne faut pas en rester aux catalogues des laboratoires et encore moins aux menus "tout préparés" adaptés aux sols agricoles ou de jardins : des mesures plus spécifiques peuvent souvent être obtenues sur demande. Le laboratoire d'analyse de l'INRA d'Arras est très adapté aux spécificités forestières.

- **Prétraitements granulométriques**. Lors d'une analyse granulométrique, le laboratoire procède, en dehors de toute spécification, à une destruction des matières organiques et une dispersion des agrégats. Certains milieux (ou certains objectifs) nécessitent de réaliser des prétraitements particuliers qu'il faut alors demander et préciser : cas des andosols, sols carbonatés si l'on souhaite une granulométrie après décarbonatation, sols salés, sols à ciments ferrugineux, etc.

## Humidité et caractères physiques

— **Humidité résiduelle** : pourcentage massique d'humidité de l'échantillon utilisé pour les analyses, par rapport à l'échantillon séché à 105 °C (% = g/100 g ou ‰ = g/kg).

Commentaire : les échantillons séchés à l'air ont une humidité résiduelle variable (de quelques %) dont la mesure permet de rapporter les résultats à une masse de sol sec : les valeurs sont ainsi plus justes. Nécessaire lorsque l'on souhaite des résultats très précis.

— **Teneur en éléments grossiers**<sup>1</sup> (ou EG) : c'est la totalité des particules du sol supérieures à 2 mm (le refus du tamis correspondant) (g/kg). Il s'agit d'un pourcentage pondéral exprimé par rapport à la masse de terre brute (terre fine + EG). Cette variable n'a d'intérêt que s'il est possible de prélever un échantillon représentatif (cf. § prélèvement).

Commentaire : sur le terrain, il est possible d'estimer un pourcentage **volumique** des éléments grossiers ; cette estimation est très difficile lorsque la teneur en graviers est forte. Inversement, le prélèvement devient difficilement représentatif en présence de gros éléments. Dans ce cas, on peut se contenter d'une estimation volumique des gros éléments (> 2 cm) et faire mesurer seulement le pourcentage des graviers. Ne pas comparer directement les pourcentages volumiques et massiques. Approximativement, on peut considérer que %Vol = 100 x %Pond / (200 - %Pond).

— **Teneur en graviers** (de 2 à 20 mm) (‰ = g/kg).

Commentaire : voir ci-dessus.

— **Méthode de détermination de la granulométrie**. Préférer la méthode effectuée en routine : méthode de la pipette<sup>1</sup>.

Commentaire : la granulométrie est peu utile pour les horizons minces et peu différenciés du point de vue textural ; cette mesure coûteuse peut être économisée également dans le cas d'une succession de plusieurs horizons texturalement homogènes diagnostiqués par un chargé d'étude bien "étalonné". Les granulométries à 8 fractions sont inutiles en routine. Dans le cas d'horizons carbonatés, des granulométries après décarbonatation pourront également être effectuées pour estimer, par comparaison, les classes granulométriques dans lesquelles se trouvent les carbonates (Baize, 2000). Le total des fractions granulométriques doit faire 100, indépendamment de la matière organique.

— **Teneur en sables grossiers** (200 à 2 000 µm soit 2 mm) (‰ = g/kg).

— **Teneur en sables fins** (50 à 200 µm) (‰ = g/kg).

— **Teneur en limons grossiers** (20 à 50 µm) (‰ = g/kg).

— **Teneur en limons fins** (2 à 20 µm) (‰ = g/kg).

— **Teneur en argiles granulométriques** (< 2 µm) (‰ = g/kg).

## Complexe d'échange et acidité

— **\*pH, dilution** : à l'eau pour la mesure du "pH eau" et au chlorure de potassium pour la mesure du "pH KCl". Les nouvelles normes<sup>1,2</sup> correspondent à un rapport volumique sol/eau (ou KCl) de 1/5.

— **\*pH eau**

— **pH KCl**

— **\*Teneur en carbonates totaux** présents dans la terre fine, ou "calcaire total" : prend en compte le CaCO<sub>3</sub> et les carbonates de magnésium (Ca,Mg)CO<sub>3</sub> ou MgCO<sub>3</sub> (‰ = g/kg). En dehors de spécifications particulières, les carbonates de magnésium sont exprimés en teneur équivalente de CaCO<sub>3</sub>. Mesure au calcimètre de Bernard<sup>2</sup>. **Inutile pour les horizons dont le pH eau est inférieur à 6.**

Commentaire : de faibles teneurs en  $\text{CaCO}_3$  peuvent être rencontrées même si aucune effervescence n'a été reconnue : très faibles pourcentages, répartition hétérogène dans l'horizon, grains de sables calcaires localisés ; il peut s'agir également d'un artefact par broyage de calcaire tendre lors de la préparation de l'échantillon au laboratoire. La part des choses étant difficile à faire, nous insistons sur la nécessité d'observations minutieuses sur le terrain. Attention également à la non effervescence à froid des dolomies.

– **\*Teneur en calcaire actif** présent dans la terre fine ( $\text{‰} = \text{g/kg}$ ). Mesure par la méthode Drouineau-Gallet (extraction à l'oxalate d'ammonium)<sup>1</sup>. Inutile pour les horizons dont le pH eau est inférieur à 6 au moins.

Commentaire : rappelons que cette analyse mesure la quantité du calcaire le plus réactif vis-à-vis des plantes ; si les données relatives à son interprétation sont rares en matière forestière, elles sont particulièrement utilisées en arboriculture fruitière, viticulture et horticulture où la teneur en "calcaire actif"<sup>s.s.</sup>(<sup>1</sup>) est très corrélée à la chlorose ferrique (Baize, 2000). Tout laisse donc penser qu'elles pourraient à terme être utilisables en sols forestiers... à condition qu'un nombre suffisant de données existent.

– **\*Méthode d'extraction des "bases échangeables"** ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) : préférer, par cohérence avec les mesures d'acidité d'échange et de CEC, une extraction au pH du sol (à la cobaltihexammine<sup>1</sup>, au  $\text{BaCl}_2$ <sup>2</sup> ou au  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). À défaut, extraction à l'acétate d'ammonium à pH7<sup>1</sup>. Commentaire : les quantités extraites de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , varient peu entre les méthodes d'extraction ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ , cobaltihexammine au pH du sol et acétate d'ammonium à pH7), sauf pour le calcium en sols carbonatés mais sa mesure est alors inutile (Espiau et Peyronel, 1977 ; Penel, 1979 ; Ciesielski et Sterckeman, 1997).

– **\*Teneur en calcium échangeable** ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{cmol+}/\text{kg}$ <sup>(2)</sup> =  $\text{mé}/100 \text{ g}$ ).

Commentaire : mesure inutile lorsque l'horizon est saturé en  $\text{Ca}^{++}$  par la présence de calcaire (lorsqu'il y a effervescence de la terre fine). Dans ce cas, la mesure n'a plus de sens.

– **\*Teneur en magnésium échangeable** ( $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{cmol+}/\text{kg}$  =  $\text{mé}/100 \text{ g}$ ).

– **\*Teneur en potassium échangeable** ( $\text{K}^+$ ,  $\text{cmol+}/\text{kg}$  =  $\text{mé}/100 \text{ g}$ ).

– **\*Teneur en sodium échangeable** ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{cmol+}/\text{kg}$  =  $\text{mé}/100 \text{ g}$ ).

Commentaire : mesure obligatoire pour les sols situés près des côtes (jusqu'à 50 kilomètres au moins) ou près des axes routiers. Ailleurs, les valeurs sont souvent négligeables.

– **\*Méthode d'extraction de l'ion aluminium  $\text{Al}^{+++}$**  (et du fer et du manganèse) échangeables. Choisir si possible la même méthode que pour les "bases échangeables" (cobaltihexammine,  $\text{BaCl}_2$  ou  $\text{NH}_4\text{Cl}$  au pH du sol).

– **\*Teneur en aluminium échangeable** ( $\text{Al}^{+++}$ ,  $\text{cmol+}/\text{kg}$  =  $\text{mé}/100 \text{ g}$ ).

Commentaire : il est inutile de **faire réaliser cette analyse coûteuse lorsque le pH eau est supérieur à 6,5** voire 6 (Badeau, 1998 ; Penel, 1979 ; Espiau et Peyronel, 1977 ; Baize, 2000). Mais l'aluminium échangeable, bien que coûteux, est important à mesurer en milieu acide car il peut être très abondant et devenir toxique pour les plantes (Andersson, 1988 ou Sverdrup et Warfvinge, 1993 pour une revue bibliographique).

– **Teneur en protons échangeables** ( $\text{H}^+$ ,  $\text{cmol+}/\text{kg}$  =  $\text{mé}/100 \text{ g}$ ).

Commentaire : il est possible de **ne pas faire réaliser cette analyse coûteuse lorsque pH eau > 6,5** voire 6 et/ou lorsque l'on mesure la CEC au pH du sol.

– **Teneur en manganèse échangeable** ( $\text{Mn}^{++}$ ,  $\text{cmol+}/\text{kg}$  =  $\text{mé}/100 \text{ g}$ ).

(1) Le terme "calcaire actif" est souvent utilisé à tort pour désigner le calcaire de la terre fine responsable de l'effervescence.

(2) L'unité internationale  $\text{cmol+}/\text{kg}$  signifie "centimole cationique par kilogramme de terre" ; elle est équivalente au "milli-équivalent pour cent grammes de terre".

Commentaire : l'importance de cette mesure pour la végétation n'a pas été vérifiée. L'analyse est indispensable si l'on souhaite, en milieu acide, une valeur précise de la CEC par somme des cations échangeables, mais  $Mn^{++}$  est très minoritaire par rapport à  $Al^{+++}$  et  $H^+$ .

— **\*Méthode de mesure de la capacité d'échange cationique au pH du sol.** Attention, ce champ ne concerne que la CEC **mesurée au laboratoire** et non la CEC calculée comme étant la somme de tous les cations échangeables ("bases" et acidité d'échange).

Commentaire : choisir si possible la même méthode d'extraction que celle utilisée pour les "bases échangeables" (cobalthexammine par exemple)<sup>1</sup>.

— **\*CEC mesurée au pH du sol** : mesurée à partir de la méthode définie dans le champ précédent. Attention, ne concerne que la CEC mesurée et non la CEC calculée ( $cmol+/kg = mé/100 g$ ). Commentaire : dans les sols peu acides non calcaires (pH supérieur ou égal à 6 ou 6,5), cette mesure est facultative car la CEC peut être estimée valablement comme étant la somme  $Ca^{++} + Mg^{++} + K^+$  (en ajoutant  $Na^+$  dans certains contextes) : ces sols sont "saturés au pH du sol" (Badeau, 1998) ; dans les sols plus acides, cette mesure est également facultative à **condition** d'analyser les cations responsables de l'acidité d'échange  $Al^{+++}$  et  $H^+$ , voire  $Mn^{++}$  ; ces dernières analyses, intéressantes en soi (surtout  $Al^{+++}$ ), sont cependant plus onéreuses. **Dans les sols calcaires**, il est **indispensable de mesurer réellement** la CEC car le dosage de  $Ca^{++}$  n'a pas de signification.

— **CEC mesurée par la méthode de Metson** (après extraction des cations à l'acétate d'ammonium à pH 7)<sup>1</sup> ( $cmol+/kg = mé/100 g$ ).

Commentaire : la mesure de la CEC à pH 7 est déconseillée pour les sols acides ou carbonatés ; elle reste la méthode la plus utilisée en milieu agricole (où les pH sont rarement très acides) et certains laboratoires ne proposent que cette méthode.

## Matière organique et phosphore

### — **\*Méthode de dosage du carbone et de l'azote total**

Commentaire : autrefois la méthode utilisée systématiquement ou presque était la méthode Anne<sup>1</sup> pour le carbone, peu fiable pour les horizons holorganiques, et la méthode Kjeldahl modifiée<sup>1,2</sup> pour l'azote. Depuis plusieurs années, les laboratoires utilisent des appareils permettant l'analyse du carbone et de l'azote totaux par pyrolyse en conditions oxydantes<sup>1,2</sup>. Cette méthode est à préférer. Mais, dans la plupart des résultats d'analyse, la méthode utilisée ne figure pas. Les laboratoires fournissent en principe les résultats en carbone "organique" et non "total" (correction prenant en compte la teneur en carbonates ou destruction de ces derniers avant dosage du carbone).

— **\*Teneur en carbone organique** (‰ = g/kg). Attention, les résultats sont souvent rencontrés en pourcentage.

Commentaire : mesure sans intérêt pour les horizons profonds (> 20 cm) si l'on n'y décèle pas de matière organique sur le terrain (caractère non humifère) ; elle peut cependant y être parfois intéressante (avec N pour le calcul du rapport C/N) lorsqu'on soupçonne une dynamique podzologique (maintien d'un C/N élevé). Elle permet d'estimer la quantité de matière organique du sol (sa "qualité" étant approchée par la mesure concomitante de N) ; cependant, le pourcentage de **matière organique** indiqué dans les résultats d'analyse est généralement redondant et inutile en soi, bien que plus "parlant" que la teneur en carbone ; il est en effet calculé à partir de cette dernière, et de manière peu justifiée en sols forestiers :  $MO = 1,72 \times C$  (ou  $MO = 2 \times C$  dans le cas d'humus très peu actifs). La "perte au feu" n'est pas utile en routine et, de toutes façons, guère plus précise que ce calcul (Baize, 2000).

— **\*Teneur en azote total** (‰ = g/kg)

Commentaire : la teneur en azote total n'est pas corrélée à la nutrition azotée ; pour estimer celle-ci, la **mesure de N n'a d'intérêt que si C est analysé** : le rapport C/N est utilisé comme indicateur de cette nutrition et de la "qualité" des matières organiques, avec une signification variable selon les milieux. Le rapport C/N peut aider également à mettre en évidence une dynamique podzolique. Il n'existe actuellement pas d'autre indicateur fiable, aisé à mesurer, peu cher et parfaitement corrélé à la nutrition azotée.

— **\*Méthode de mesure du phosphore assimilable**

Commentaire : la méthode de Duchaufour a été spécialement mise au point pour estimer la nutrition des essences forestières sur sols non calcaires ; c'est la seule pour laquelle on dispose de références par rapport au comportement des arbres (Bonneau, 1995). Elle n'est pas valable pour les sols calcaires ni, probablement, pour les sols andiques. La méthode de Joret-Hébert<sup>1</sup> est à utiliser de préférence dans **les sols calcaires**. La méthode Olsen<sup>1,2</sup> est utilisée internationalement sur une large gamme de sols (Baize, 2000).

— **\*Teneur en phosphore assimilable** (‰ = g/kg de P)

Toujours bien vérifier le mode d'expression. Contrairement à l'usage de la plupart des laboratoires, nous préconisons l'expression **en masse d'élément** et non d'oxyde ( $P_2O_5$ ), comme recommandé par l'Académie des Sciences et l'Académie d'Agriculture (Baize, 2000).

Commentaire : cette mesure est coûteuse mais importante. Il faut *a priori* privilégier les horizons de surface (présence de mycorhizes), mais l'intérêt ou le non-intérêt pour la nutrition de réserves plus profondes n'a jamais été démontré.

### Analyses complémentaires

— **Oligoéléments** : faute de référence, il n'est pas possible actuellement de conseiller ces analyses. En cas de symptôme constaté, seule l'analyse foliaire renseignera valablement.

Les analyses suivantes n'ont pas d'intérêt pour l'étude des relations sol-végétation mais peuvent être utiles dans certains diagnostics pédogénétiques. Attention, **vérifier si les valeurs du fer et de l'aluminium libres sont exprimées en %, en ‰ ou en ppm et, surtout, si elles le sont en élément (ce qui est préférable) ou en oxyde**.

— **Fer libre, méthode** : préférer la méthode Mehra-Jackson (CBD : citrate-bicarbonate-dithionite). C'est la méthode qui extrait les plus grandes quantités du fer situé en dehors des réseaux cristallins des silicates.

— **Teneur en fer libre** (‰ = g/kg de Fe)

— **Aluminium libre, méthode** : la méthode Tamm (oxalate) est la plus utilisée.

— **Teneur en aluminium libre** (‰ = g/kg de Al).

Pour tout complément sur d'autres types d'analyses ou sur les protocoles, se reporter à Baize (2000) ou AFNOR (1996).

### CONCLUSIONS

Les analyses de sols, réalisées dans le cadre de typologies forestières ou d'autres études phyto-écologiques, présenteront plusieurs intérêts si elles sont réalisées dans le respect des choix analytiques préconisés ci-dessus.

Au niveau de l'étude elle-même, les analyses seront ainsi complètes et permettront un diagnostic correct de la fertilité forestière. Caractéristiques d'un exemple type de station, elles fourniront



une vision générale des principales différences trophiques des types individualisés par le chargé d'étude. Le faible nombre de relevés (souvent un par type de station) ne permettra cependant pas de déterminer la plupart du temps la variabilité de la fertilité chimique à l'intérieur des stations d'un même type ou de comparer précisément les types entre eux. Rappelons encore que des interprétations correctes de ces analyses ne pourront être réalisées que si l'on dispose d'une description précise du sol dont elles sont issues et de son contexte. Il s'agira également de toujours vérifier la **cohérence des résultats** (Baize, 2000) : fourchettes de C/N, de pH en fonction du milieu,  $\text{pH KCl} < \text{pH eau}$ , calcaire actif < calcaire total, granulométrie et texture, etc.

À un niveau plus général, l'harmonisation des analyses rendra possible le stockage des données de plusieurs études dans une base de données unique et correctement renseignée. C'est l'objet de la base de données phytoécologiques, créée par l'ENGREF et financée par la DERF et l'ADEME. Une telle base sera très utile pour réaliser des comparaisons régionales ou des études et des synthèses à différentes échelles variant de la région naturelle à la France entière. Enfin, l'utilisation de nombreux champs communs à d'autres sources ou bases de données telles que DONESOL (Gaultier *et al.*, 1993) ou celle du réseau européen (Badeau, 1998) permettra un échange entre diverses bases de données et une utilisation conjointe de données d'origines variées dans les études pédologiques ou écologiques.

Jean-Claude GÉGOUT  
Maître de Conférences en Écologie forestière et SIG  
ENGREF  
14, rue Girardet  
CS 4216  
F-54042 NANCY CEDEX  
(gegout@engref.fr)

Bernard JABIOL  
Maître de Conférences en Pédologie forestière  
ENGREF  
14, rue Girardet  
CS 4216  
F-54042 NANCY CEDEX  
(jabiol@engref.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. — Recueil de normes françaises. Qualité des sols, environnement. — Paris : Association française de Normalisation, 1996. — 534 p.
- ANDERSON (M.). — Toxicity and tolerance of aluminium in vascular plants. — *Water, Air and Soil Pollution*, 39, 1988, pp. 439-462.
- BADEAU (V.). — Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. — *Les Cahiers du DSF*, 5. — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche - DERF, 1998. — 211 p.
- BAIZE (D.). — Guide des analyses en pédologie. — 2<sup>e</sup> édition. — Paris : INRA, 2000. — 257 p.
- BAIZE (D.), JABIOL (B.). — Guide pour la description des sols. — Paris : INRA, 1995. — 375 p.
- BONNEAU (M.). — Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. — Nancy : ENGREF, 1995. — 367 p.
- BONNEAU (M.), RANGER (J.). — Évolution de la fertilité chimique des sols forestiers. Recommandations pour une gestion durable. — *La Forêt privée*, n° 247, 1999, pp. 51-64.
- CIESIELSKI (H.), STERCKEMAN (T.). — A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. — *Agronomie*, 17, 1997, pp. 9-16.
- ESPIAU (P.), PEYRONEL (A.). — Acidité d'échange dans les sols : application à une séquence altitudinale des sols du massif du Mont Aigoual. — *Science du Sol*, 1977, pp. 25-44.

- GAULTIER (J.-P.), LEGROS (J.-P.), BORNAND (M.), KING (D.), FAVROT (J.-C.), HARDY (R.). — L'Organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. — *Revue de Géomatique*, 3, 1993, pp. 235-253.
- GÉGOUT (J.-C.). — Création d'une base de données phytoécologiques et détermination de l'autécologie des espèces de la flore forestière de France. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001, pp. 397-403.
- GÉGOUT (J.-C.). — Étude des relations entre les ressources minérales du sol et la végétation forestière dans les Vosges. — Université de Nancy I, 1995. — 325 p. (Thèse).
- JABIOL (B.), GÉGOUT (J.-C.). — Recommandations pour la présentation illustrée des descriptions de sols. — *Revue forestière française*, vol. XLIV, n° 6, 1992, pp. 512-520.
- LARRIEU (L.), JABIOL (B.). — Analyses de sol en forêt : les choix du gestionnaire forestier. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 5, 2001, pp. 558-567.
- PENEL (M.). — Caractérisation physico-chimique et classification des humus forestiers acides en relation avec la végétation et ses exigences écologiques. — Université de Nancy I, 1979. — 112 p. (Thèse).
- SVERDRUP (H.), WARFVINGE (P.). — The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio. — Lund University Department of Chemical Engineering II. Report in Ecology and Environmental Engineering - Report 2, 1993. — 108 p.

**ANNEXE 1****LISTE DES NORMES AFNOR (NF) ET ISO CITÉES****d'après AFNOR, 1996 (voir bibliographie) :**

- Échantillonnage en sol agricole : NF X31-100
- Préparation d'un échantillon, éléments grossiers : NF X31-101, ISO 11 464-1994, NF X31-412
- Méthode granulométrie : NF X31-107
- Dilution pH : ISO 10390 ; NF X31-117
- Calcaire total : ISO 10693
- Calcaire actif : NF X31-106
- Extraction des "bases échangeables" à l'acétate d'ammonium (pH7) : NF X31-108
- CEC Metson à pH7 : NF X31-130
- CEC et extraction des "bases échangeables" au pH du sol (cobaltihexammine) : NF X31-130
- CEC et extraction des "bases échangeables" au pH du sol (BaCl<sub>2</sub>) : NF ISO 11260
- Carbone Anne : NF X31-109
- Carbone total par pyrolyse : NF ISO 10694
- Azote Kjeldahl total : NF X31-111, ISO 11261
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Joret-Hébert : NF X31-161

**Normes postérieures à 1996 :**

- Description des sols : NF X31-03
- Azote total par pyrolyse : NF ISO 13878

**ANNEXE 2 LABORATOIRES D'ANALYSES DE TERRE AGRÉÉS PAR LE MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE POUR L'ANNÉE 2002**

Arrêté du 31-10-2001 – Journal officiel du 30-11-2001

Liste classée par départements

Ain	Centre scientifique agricole régional (CESAR)	Les Soudanières – BP 2 – 01250 CEYZÉRIAT	
Aisne	Station agronomique de l'Aisne	Rue Fernand-Christ – BP 101 – 02007 LAON Cedex	03.23.23.64.70
Aisne	Union nationale des coopératives agricoles d'approvisionnement (UNCAA) – Division productions animales	BP 19 – 02402 CHÂTEAU-THIERRY Cedex	03.23.84.80.00
Allier	SELCOVET Laboratoire	Rue de Maupertuis – 03410 DOMÉROT	
Aude	Laboratoires d'analyses des sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aude	ZI de Sautès – 11800 TRÈBES	
Calvados	Laboratoire d'analyses agricoles, d'étude des sols et de l'environnement (LABGRISOL)	Cidex 06 – 14210 GAVRUS	02.31.08.04.43
Charente-Maritime	Laboratoire Centre Atlantique (LCA)	1, rue Champlain – ZI Chef de Baie – 17074 LA ROCHELLE Cedex 9	05.46.43.45-45
Côte-d'Or	Laboratoire départemental d'analyses	21er, rue Hoche – BP 678 – 21017 DIJON Cedex	
Côte-d'Armor	Laboratoire départemental (LDA 22)	5-7, rue du Sabot – Zoopole BP 54 – 22440 PLOUFRAGAN	
Creuse	Laboratoire départemental d'analyses	42-44, route de Guéret – BP 3 – 23380 AJAIN Cedex	05.55.81.87.30
Drôme	Laboratoire coopératif d'œnologie (LACO)	Espace Médicis – Le Château – 26790 SUZE-LA-ROUSSE	04.75.97.21.40
Finistère	Laboratoire d'analyses de terre, de fourrages, d'aliments du bétail (AGRILABO)	5, allée Verte – BP 111 – 29203 MORLAIX Cedex	02.98.62.04.13
Finistère	COOPAGRI Bretagne – Laboratoire central	BP 100 – 29206 LANDERNEAU Cedex	02.98.25.30.24
Garonne (Haute-)	Europe Sols SA	45, rue de Gironis – 31100 TOULOUSE	05.62.20.06.07
Geis	Laboratoire départemental agricole et viticole, division agricole et viticole	Avenue de l'Armagnac – 32800 EAUZE	05.62.09.83.81
Gironde	Laboratoire Centre Atlantique (LCA) – Laboratoire agronomique	39, rue Michel-Montaigne – 33290 BLANQUEFORT	05.56.35.58.60
Hérault	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD-Amis/agronomie)	Avenue d'Agropolis – BP 5035 – 34032 MONTPELLIER Cedex	
Ille-et-Vilaine	Laboratoire départemental d'analyses agricoles	La Madeleine – Route de Rennes – 35270 COMBOURG	02.99.73.02.29
Indre-et-Loire	Laboratoire de Touraine	Le Bas Champeigné – Parçay-Meslay – 37082 TOURS Cedex 2	02.47.29.44.29

Loir-et-Cher	Laboratoire départemental agronomique et œnologique	6, rue Louis-Bodin – 41000 BLOIS	02.54.78.03.84
Loir-et-Cher	Centre de recherches et d'analyses agroalimentaire Franciade (CERAAF)	14, rue Franciade – BP 4 – La Chaussée-Saint-Victor – 41913 BLOIS Cedex 9	02.54.55.88.88
Loire-Atlantique	Coopérative agricole La Noëlle-Ancrenis (CANA) – Laboratoire central	BP 102 – 44157 ANCENIS Cedex	02.40.98.91.84
Loire-Atlantique	Institut départemental d'analyse et de conseil (IDAC)	Route de Gachet – BP 80603 – 44306 NANTES Cedex 3	02.51.85.44.44
Loiret	SAS – Laboratoire agronomique	Avenue de la Pomme-de-Pin – 45160 ARDON	02.38.69.26.31
Loiret	Chambre d'agriculture du Loiret – Laboratoire	13, avenue des Droits-de-l'Homme – 45921 ORLÉANS Cedex 9	02.38.71.90.64
Manche	Laboratoire agronomique de Normandie (LANO)	Quartier du Bois-Arden – 23, rue A.-Grandin – 50008 SAINT-LÔ Cedex	02.33.77.38.10
Marne	Laboratoire chaîne d'analyses Mame-Ardenne (CAMA)	2, esplanade Rolland-Garros – BP 205 – 51686 REIMS Cedex 2	
Mayenne	Coopérative des agriculteurs de la Mayenne (CAM), laboratoire	ZI Les Touches – Rue Édouard-Briault – 53000 LAVAL	
Mayenne	Laboratoire vétérinaire départemental	224, rue du Bas-des-Bois – BP 1427 – 53014 LAVAL Cedex	02.43.56.36.81
Morbihan	Laboratoire départemental d'analyse du Morbihan (LDA 56) – Service Chimie	6, avenue Edgar-Degas – BP 528 – 56019 VANNES Cedex	02.97.46.14.15
Nord	Institut Pasteur de Lille	1, rue du Professeur-Calmette – BP 245 – 59019 LILLE Cedex	
Pas-de-Calais	Institut national de la recherche agronomique (INRA) – Laboratoire d'analyse des sols	273, rue de Cambrai – 62000 ARRAS	03.21.21.86.00
Pas-de-Calais	Laboratoire AGRÉN SA	Domaine du lycée agricole – 62310 RADINGHEM	02.21.47.21.22
Pyrénées (Hautes-)	Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CAG) – Laboratoire agronomique	Chemin de l'Alette – BP 449 – 65004 TARBES Cedex	05.62.51.71.99
Pyrénées-Orientales	Laboratoire d'analyses agricoles – MEDIT LABO	77, avenue Victor-Dalbiez – 66027 PERPIGNAN Cedex	04.68.85.68.68
Rhin (Haut-)	Société alsacienne pour le développement et l'étude de la fertilité (SADEF)	Rue de la Station – 68700 ASPACH-LE-BAS	03.89.48.91.67
Saône-et-Loire	Laboratoire départemental de chimie agricole et d'œnologie	98, rue Pasteur – 71000 MÂCON	03.85.39.29.80
Sarthe	Laboratoire d'analyses et de recherches de la Chambre d'Agriculture de la Sarthe (LARCA 72)	126, route de Beaugé – 72000 LE MANS	02.43.28.65.86
Seine-Maritime	Laboratoire CAP Seine-Univert	1, rue François-Perroux – BP 108 – Parc de la Vatine – 76134, MONT-SAINT-AIGNAN Cedex	02.35.88.45.44
Tarn-et-Garonne	Chambre d'Agriculture Tarn-et-Garonne – Laboratoire d'analyses agricoles	130, avenue Marcel-Uhal – 82017 MONTAUBAN	05.63.63.30.25
Vienne (Haute-)	Chambre d'Agriculture départementale de la Haute-Vienne – Laboratoire	Avenue du Président-de-Léobardy – 87000 LIMOGES	05.55.34.14.10
Yonne	Institut départemental de l'environnement et d'analyses (IDEA)	10, avenue du 4 <sup>e</sup> -R.-I. – BP 9002 – 89011 AUXERRE Cedex	03.86.42.03.85

**ANALYSES DE SOL EN FORÊT : LES CHOIX DU PHYTOÉCOLOGUE DANS LE CADRE DES TYPOLOGIES DE STATIONS OU DES ÉTUDES SCIENTIFIQUES (Résumé)**

Le domaine des analyses chimiques du sol est un domaine très spécialisé et évolutif qui déroutent souvent les chargés d'études en phytoécologie. Cet article s'adresse essentiellement à ces derniers avec plusieurs finalités : afin que les données analytiques des documents de typologie de stations ou des études phytoécologiques correspondent au mieux aux données interprétatives nécessaires dans les contextes de milieu où elles sont faites ; afin qu'elles tiennent compte au mieux des protocoles analytiques les plus récents et les plus adaptés au contexte ; avec le souci d'une harmonisation minimale pour leur gestion en base de données à l'échelle nationale ; et avec également le souci d'optimiser les choix dans des conditions où les moyens financiers sont parfois limitants. Il présente donc un ensemble de conseils sur le choix des analyses à effectuer et des protocoles à privilégier. Des précisions sont données aussi sur les opérations annexes depuis les prélèvements jusqu'à l'expression des résultats. Il n'est pas donné ici de conseils à l'interprétation.

**SOIL ANALYSES IN FORESTS – THE PLANT ECOLOGIST'S CHOICES IN THE CONTEXT OF SITE TYPOLOGIES OR SCIENTIFIC RESEARCH (Abstract)**

Soil analysis is a highly specialised and rapidly changing area that often baffles plant ecology researchers. This article is essentially designed the latter to achieve the following : i) ensure that the analytical data in site typology documents or in plant ecology surveys match, as far as possible, the interpretation data necessary in the actual environment where they are collected ; ii) ensure that they comply as far as possible with the most recent and most appropriate test protocols in that context ; iii) provide for a minimal degree of harmony so they can be included in a national data base and iv) ensure that the choices are optimal where conditions or financial resources are a limiting factor. It offers advice on the choice of analyses to be performed and protocols to be preferred. Additional information about auxiliary operations, from sampling to presentation of results, is also given. The article does not give advice on interpretation.

---