

UTILISATION PRATIQUE DE L'ANALYSE FOLIAIRE DANS L'ÉTUDE DE LA NUTRITION D'ESSENCES FORESTIÈRES

PAR

G. LÉVY

Assistant à la Station de Recherches
sur les sols forestiers et la fertilisation
(INRA - CNRF - Nancy)

Le diagnostic foliaire est depuis longtemps utilisé en agriculture et a rendu de grands services en matière de fertilisation. L'analyse foliaire pour les essences forestières est beaucoup plus récente et il paraît utile de faire le point sur les méthodes, les possibilités, mais aussi les limites actuelles du diagnostic foliaire pour ces espèces.

1. — Utilité et réalisation de l'analyse foliaire.

Principe du diagnostic foliaire

11. — *Nutrition et production.*

La production et l'état sanitaire d'un peuplement forestier dépendent, entre autres facteurs, de la nutrition minérale des arbres. Il est donc essentiel de bien connaître la façon dont cette nutrition s'effectue: l'on pourra ainsi éventuellement la corriger, par fertilisation, de la façon la plus judicieuse et obtenir la croissance (donc la production) maxima autorisée par les autres conditions de station.

12. — *Comment connaître l'état nutritif des arbres?*

121. — *Les analyses de sol.*

Elles constituent le moyen le plus employé pour étudier la fertilité d'une station: en effet, le prélèvement des éléments nutritifs par les arbres dépend en premier lieu des réserves du sol en ces éléments. Les analyses de sol sont pourtant loin de donner entière satisfaction:

— Les solutions utilisées dans ces analyses n'*extraient* pas forcément les éléments en même quantité que les racines des plantes. D'autre part, les mycorhizes des arbres forestiers leur permettent

souvent un prélèvement plus important que celui des plantes de culture : les solutions d'extraction classiques ne sont alors pas suffisantes. Enfin, les différentes espèces ont des aptitudes inégales à utiliser les réserves du sol ; ainsi le Douglas extrairait mal le phosphore du sol (THEMLITZ, 1963).

— Le prélèvement par les arbres ne dépend pas que des réserves du sol en éléments assimilables mais aussi d'autres facteurs tels que : la façon dont ces éléments sont retenus dans le sol, les interactions des ions, la profondeur de l'enracinement, l'humidité du sol, le climat général, etc...

En conséquence, les analyses de sol ne sont guère satisfaisantes pour se rendre compte des possibilités de nutrition des arbres dans une station. Bien souvent, il n'y a pas corrélation entre leur croissance et la teneur du sol en éléments nutritifs. La nutrition et la croissance sont parfois aussi bonnes en sol moyen qu'en sol riche (NEBE, 1966).

122. — *Les analyses foliaires.*

Les éléments prélevés par les racines se répartissent dans l'arbre : une analyse des éléments qu'il contient fournira donc une bien meilleure idée de sa nutrition qu'une analyse de sol. Ces analyses sont effectuées sur les feuilles pour les raisons suivantes :

— En agriculture, l'analyse foliaire s'est révélée comme un moyen fidèle et sensible pour connaître l'alimentation de la plante ; elle fournit, dans des conditions homologues, des résultats identiques (DEMOLON, 1956).

— Les feuilles des arbres sont les meilleures indicateurs des déficiences nutritives ; c'est dans la composition des feuilles que ces déficiences se reflètent le mieux. En effet, la feuille est un organe actif, très important dans le métabolisme de l'arbre.

— Les feuilles ont un âge connu, une position bien définie, une anatomie relativement uniforme.

Cependant, l'analyse d'autres organes ou tissus (radicelles, phloème) peut, dans certains cas, s'avérer plus intéressante que l'analyse foliaire. Et tout récemment, ROUTCHENKO (1967) a utilisé l'analyse des sucs extraits des tissus conducteurs pour apprécier la nutrition minérale de certains végétaux.

13. — *Le diagnostic foliaire.*

Des observations et essais de fertilisation effectués sur le terrain, ainsi que des cultures en solution artificielle ont permis d'établir certaines relations entre les teneurs des feuilles en éléments nutritifs exprimés en % et la croissance des arbres.

131. — *Teneurs optima.*

De nombreux auteurs ont établi que la meilleure croissance pour une essence donnée correspondait, pour chaque élément essentiel, à une certaine teneur dans les feuilles. Ces *teneurs optima* sont variables pour un large éventail de conditions climatiques. On peut alors les utiliser comme valeurs de référence pour se rendre compte de l'état nutritif des arbres dans une station donnée.

Lorsque la teneur en un élément est inférieure à l'optimum, la croissance est plus ou moins affectée suivant l'élément déficient; ainsi l'Epicéa est de plus en plus tolérant vis-à-vis des déficiences dans les éléments suivants, dans l'ordre: N, Mg, P, K, Ca (INGESTAD, 1959).

En fait,

— Il s'agit souvent non d'une valeur précise, mais d'un *intervalle* optimum: il peut y avoir alors consommation de luxe,

— La teneur optima est fonction de l'âge. Pour l'Epicéa, elle est plus élevée pour N, P, K, Ca, et plus faible pour Mg, chez les jeunes que chez l'adulte (HOFFMAN, 1967).

En réalité, la teneur en un élément la plus favorable à la croissance dépend de la nutrition dans les autres éléments.

Les teneurs optima, pour certains résineux de reboisement (Epicéa, Pin Sylvestre) assez jeunes, sont proches des suivantes (en %):

N: environ 2,0 - P₂O₅: 0,40 à 0,50 - K: 0,60 à 0,70 - Mg: 0,10 à 0,16.

132. — *Seuil de carence.*

Il existe aussi pour chaque essence et chaque élément un seuil de carence. On peut le définir théoriquement par la teneur sous laquelle la croissance est très fortement affectée. Souvent quand la teneur est inférieure au seuil de carence, se trouvent sur les feuilles des signes visibles de déséquilibre nutritif (taches, changements de coloration, nécrose). Entre la teneur optima et le seuil de carence, la croissance est inférieure à l'optimum.

Cependant, le seuil de carence ne correspond pas à une teneur bien définie de l'élément dans les feuilles. En effet, c'est une notion un peu ambiguë et subjective: les premiers signes extérieurs et le début de la forte diminution de croissance ne correspondent généralement pas à la même concentration dans les feuilles et sont plus ou moins faciles à apprécier; et ce seuil varie sans doute dans une certaine mesure avec l'âge. C'est pourquoi les résultats ne sont pas toujours très concordants; et pour la plupart des oligoéléments, les seuils sont mal connus.

Les valeurs des seuils de carence les plus fréquemment mentionnées dans la littérature sont les suivantes :

	Epicéa	Pin sylvestre	Douglas	Bouleau	Peuplier	Divers Eucalyptus
N %	1,3 - 1,5	1,4 - 1,6	—	1,5 - 3,1	—	1,5 - 2,8
P ₂ O ₅ % ..	0,23 - 0,25	0,23 0,30	≤ 0,18	0,28	—	0,25
K %	0,33 -	0,30 - 0,50	—	0,50	1,20	0,90
Mg %	0,05 - 0,11	0,06 0,09	0,03	0,06 - 0,18	0,12	—
Ca %	0,02 - 0,1	0,05	—	0,12	—	—
S %	0,13	0,07	0,08	0,06 - 0,21	—	—
Mn p.p.m. ..	20	30-50	—	12	—	—
B p.p.m. ...	< 14	8-15	—	40-50	—	—
Cu p.p.m. ..	≤ 3,5	5	4,5	—	4	—
Zn p.p.m. ..	< 20	—	—	—	< 20	—
Mo p.p.m. ..	< 0,03	—	—	—	—	—

133. — *Equilibre entre éléments.*

La croissance d'une essence forestière ne dépend pas que du pourcentage de chaque élément nutritif dans les feuilles, mais aussi de la valeur du rapport entre certains éléments.

L'on connaît approximativement les valeurs optima ou du moins normales de certains de ces rapports, spécialement ceux concernant N, P, K, Ca, pour les résineux. Ainsi la valeur optima pour N/P est souvent comprise entre 10 et 13 ou 14 pour le Mélèze du Japon (LEYTON, 1958; VAN GOOR, 1953) et le Pin Sylvestre (PUUSTJARVI, 1962); si ce rapport est supérieur à 16, la croissance est mauvaise. Pour TAMM (1955), un rapport K/Ca de 0,8 à 2,4 est normal pour les semis d'Epicéa; une bonne croissance de ces semis exige $K/Ca > 0,5$ (KELLER, 1966) ou même > 1 , alors que pour des Epicéas plus âgés, un rapport un peu plus petit (de l'ordre de 0,5) peut être suffisant.

Autres exemples : un rapport N/K de 3,5 est favorable au Pin Sylvestre (PUUSTJARVI, 1967), un rapport N/S < 20 l'est au Douglas (BEATON, 1966) alors que Fe/Mn doit être très légèrement inférieur à 2.

Des rapports Ca/Mg et Ca/P trop élevés ont un effet dépressif sur la croissance.

134. *Toxicité.*

Pour certains éléments, si, après le palier de la consommation de luxe (pendant lequel la croissance reste identique) l'absorption de l'élément continue à augmenter, il y a effet toxique (diminution de la croissance).

Ainsi, au delà de 0,18 % de S dans les feuilles, il y a dégâts (dus à des fumées toxiques) chez l'Épicéa et le Pin Sylvestre (FIEDLER et HOHNE); le seuil de toxicité en Bore est proche de 60 p.p.m. pour certains Pins.

135. *Principe du diagnostic foliaire.*

Il consiste donc en une comparaison des résultats de l'analyse foliaire de la station à étudier et des grandeurs indiquées ci-dessus, particulièrement les seuils de carence.

On en déduit l'état nutritif des arbres et, éventuellement, la fertilisation nécessaire pour assurer une bonne nutrition.

14. — *Prélèvement des feuilles et expression des résultats.*

La composition foliaire d'un peuplement forestier varie dans l'espace et le temps, même en station homogène. Les comparaisons d'analyse foliaire ne sont donc valables que si les feuilles ont été prélevées dans des conditions identiques. Ces conditions doivent être celles qui fournissent le maximum de renseignements sur la nutrition des arbres.

141. — *Choix des arbres.*

Il faut choisir des arbres dominants, situés en position normale dans le peuplement. Pour étudier la nutrition sur une station homogène, on mélange les feuilles provenant d'une douzaine environ, de ces arbres. Si l'on désire établir la cause d'une anomalie visible (coloration ou aspect inhabituel des feuilles) que l'on suppose d'origine nutritive (carence, toxicité), il suffit de prélever sur 3 ou 4 arbres des feuilles présentant ces troubles; on comparera leur composition minérale à celle des feuilles prélevées sur 3 ou 4 arbres sains.

142. — *Choix des feuilles.*

La plupart des auteurs prélèvent chez les résineux des feuilles de l'année, d'un verticille situé le plus près possible de la pousse terminale: ce sont celles dont la composition minérale est apparue le plus en relation avec la croissance de l'arbre. Les résultats sont d'ailleurs pratiquement aussi bons pour les feuilles des verticilles 1 à 4. Dès le printemps de leur 2^e année, les feuilles s'appauvrissent très nettement en N, P, K, Mg, alors que le pourcentage de Ca augmente; quant aux aiguilles des verticilles inférieurs, elles ont un rôle moins important que les autres dans le métabolisme de l'arbre (la photosynthèse y est réduite), elles contiennent moins d'éléments actifs. Cependant, il n'y a pas accord complet entre les auteurs; ainsi certains prélèvent les feuilles sur le 5^e verticille; REEMTSA semble obtenir une bonne détermination des carences, en analysant toutes les pousses d'un verticille. Sa méthode permet un échantillonnage des feuilles sur un nombre d'arbres moins important.

Chez les feuillus, on prélève les feuilles de la partie supérieure de la couronne.

De plus, il est nécessaire de prélever des feuilles de même orientation sur des arbres dont on veut comparer la composition foliaire.

143. *Moment du prélèvement.*

Ce devrait être celui où la teneur en éléments nutritifs est la moins variable. Les feuilles sont très souvent prélevées en fin de la saison de croissance. Ainsi THEMLITZ (1967) effectue ce prélèvement, pour les essences feuillues, peu avant le début du jaunissement. A la station Sols Forestiers du C.N.R.F., les époques choisies sont: la période d'octobre à décembre pour les Résineux et, en principe, le mois d'août pour les feuillus; en fait, la période optima est très mal connue pour les feuillus; LEROY (non publié) trouve une variation continue, sans palier, pour la concentration foliaire du chêne en N, Mg, Ca; pour P, il y a un palier de début août à la mi-septembre; pour K, le palier s'étend approximativement du 10 juillet au 15 août.

Il y a même une légère, mais significative, variation diurne de composition foliaire; ainsi BOGGESS (1959) effectue les prélèvements foliaires entre 10 et 15 heures.

144. — *Expression des résultats.*

La teneur d'un élément dans les feuilles est exprimée en général en pourcent ou en p.p.m. (parties par million) du poids sec, car il a été établi que le pourcentage est un indice de la nutrition en cet élément (les teneurs optima et seuils de carence correspondent à des pourcentages) et que la croissance lui est liée.

Cependant, certains auteurs suggèrent d'exprimer les résultats, non seulement en pourcentage, mais aussi en poids effectif de chaque élément contenu, par exemple, pour le Pin Sylvestre, dans 100 paires d'aiguilles. Cette expression serait mieux en rapport en particulier avec la nutrition azotée (HEINSDORF, 1964; KREUTZER, 1965); en effet, par exemple, à une meilleure nutrition azotée, correspond souvent, en plus d'une meilleure croissance, une plus grande taille des aiguilles: la teneur en N dans 100 paires d'aiguilles est augmentée, alors que son % n'est pas forcément accru. De plus, en année très sèche, il peut y avoir diminution du poids de l'aiguille, ce qui augmente le % en N (HEINSDORF, 1964).

Quelques auteurs expriment les résultats en milliéquivalents pour 100 g de matière sèche.

2. — Utilisation pratique de l'analyse foliaire

L'utilisation du diagnostic foliaire n'est pas aussi simple qu'il paraît. Il est nécessaire d'*interpréter* un résultat d'analyse foliaire, car il dépend de nombreux facteurs, en particulier:

- Les éléments prélevés dans les sol (cf. paragraphe 121).
- Les relations entre le prélèvement d'un élément, sa teneur dans les feuilles et la croissance de l'arbre.
- Le rôle de chaque élément dans le métabolisme de l'arbre, sa distribution dans les tissus, ainsi que les inter-relations internes (par exemple, entre N, K, Mg, etc...) plus ou moins indépendantes de l'absorption totale (CAIN, 1956).
- Les prélèvements de l'année, mais aussi ceux de l'année précédente.
- Le lessivage de certains éléments minéraux (K, etc...) des feuilles par la pluie.
- La croissance de l'arbre, donc les facteurs dont cette croissance dépend, en dehors de la nutrition: climat, situation topographique, état de santé, etc...
- L'âge de l'arbre.

L'on doit tenir compte de ces phénomènes pour interpréter une analyse foliaire. De plus, il faut se rendre compte qu'une amélioration de la nutrition ne se traduira pas forcément par une meilleure croissance, car d'autres facteurs, comme le climat, peuvent être limitants; pour cette raison, la recherche d'une liaison entre la composition foliaire et la croissance doit s'effectuer dans une zone climatique relativement homogène et des conditions topographiques identiques. D'autre part, il est utile de réaliser ces analyses foliaires plusieurs années de suite dans une même station, en particulier après apport d'engrais, en raison de l'influence de la température et la pluviosité sur la composition foliaire.

Enfin, en raison des incertitudes actuelles quant aux valeurs des seuils de carence, teneur optima, etc..., il peut s'avérer intéressant, pour confirmer un diagnostic foliaire, d'effectuer si possible des comparaisons analyse foliaire-croissance dans la station à étudier.

L'analyse foliaire intervient pour déterminer l'état nutritif « actuel » des arbres, ce qui devrait permettre de prévoir une fumure appropriée. Mais on se heurte souvent à de graves difficultés d'interprétation, d'abord au niveau du diagnostic, puis au stade du remède.

21. — Difficultés d'interprétation au niveau du diagnostic.

Il s'agit de déterminer le ou les éléments nutritifs dont une déficience (ou éventuellement une mauvaise utilisation) limite, dans l'état « actuel » de la nutrition, la croissance des arbres.

211. — Cas simple.

Un élément apparaît nettement carencé par rapport aux autres. Il est visiblement limitant de la croissance. Un apport de cet élément améliorera très souvent nutrition et croissance.

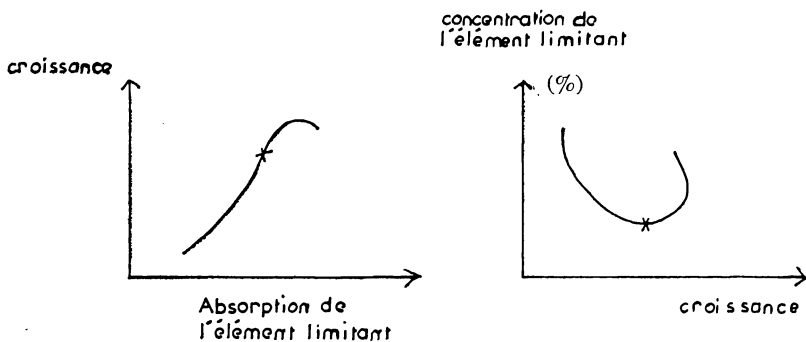
212. — Cas complexes.

212-1. — Effet STEENBJERG.

Il résulte des constatations suivantes :

La courbe représentative de la croissance en fonction de la quantité d'un élément limitant absorbé apparaît parfois comme une sigmoïde, dont un exemple schématisé est fourni sur la figure 1.

Par conséquent (fig. 2), lorsque son absorption augmente, la concentration de l'élément limitant dans les feuilles diminue d'abord alors que la croissance augmente, passe par un minimum (corres-



(Fig. 1 et 2: STEENBJERG et JAKOBSEN, 1963).

pondant au point d'inflexion marqué d'une croix sur la figure 1). Au-delà du minimum, pour une absorption supplémentaire de l'élément limitant, la corrélation devient positive. Puis la toxicité peut apparaître : la concentration continue à augmenter alors que la croissance diminue.

En fait, ce phénomène fait partie d'une loi plus générale ; mais le point d'inflexion peut être situé par exemple à proximité du zéro, auquel cas il n'est pas observable. L'effet STEENBJERG ne se produit réellement que pour certains éléments (en particulier des oligo-éléments comme le cuivre), et dans un domaine de très faible approvisionnement en cet élément.

Lorsqu'après analyse foliaire subsiste un doute quant à l'élément limitant la croissance, on effectue, dans la mesure où l'on constate dans la station des différences de croissance, une comparaison d'analyse foliaire pour des arbres à bonne et à mauvaise croissance ; mais celle-ci peut ne pas révéler quel élément est limitant si c'est un oligo-élément dont on connaît mal le seuil de carence ; en effet, par suite de l'effet STEENBJERG, il peut y avoir dans un domaine de faible nutrition une relation inverse entre la croissance et la concentration dans les feuilles de cet oligo-élément limitant (fig. 2) (alors qu'en général, la relation croissance-concentration de l'élément limitant est positive).

212-2. — *Déficiences en plusieurs éléments*

(dont la concentration est par exemple proche du seuil de carence).

On ne sait alors lesquels limitent réellement la croissance dans cette station car, dans ce cas, l'augmentation de croissance due à l'application d'un élément est affectée par la concentration des autres éléments dans les feuilles.

S'il n'y a aucune différence nette de croissance dans les conditions d'environnement étudiées, le diagnostic par analyse foliaire seule est impossible.

Dans le cas contraire (différences nettes de croissance), le problème peut parfois être résolu par une analyse statistique : analyse de régression multiple et calcul des coefficients de corrélation partielle entre chaque variable et la croissance des arbres (LEYTON, 1957).

212-3. — *Croissance faible dans toute la station, mais sans déficience marquée.*

Ce résultat est ambigu. En effet, une analyse foliaire ne peut, en général, indiquer que des déséquilibres (assez marqués) de la nutrition : si un élément est très déficient, il sera dilué dans la

matière vivante élaborée sous l'impulsion des autres éléments; par contre, si la nutrition est mauvaise pour tous les éléments, la croissance sera limitée, mais la composition foliaire pourra apparaître normale.

Un résultat normal d'analyse foliaire correspondra donc :

- ou à une bonne nutrition (une mauvaise croissance éventuelle est alors provoquée par un facteur d'origine autre que nutritive)
- ou à une nutrition déficiente en de nombreux éléments, mais sans qu'il y ait déséquilibre nutritif.

212-4. — *Teneur apparemment normale*

en éléments « totaux », mais une analyse plus poussée permet de mettre en évidence un *déséquilibre nutritif* :

— Certains déséquilibres nutritifs se traduisent par des perturbations dans le métabolisme de l'azote (défaut de synthèse des protéines).

— Un quotient cations/anions trop faible dans les feuilles provoque des désordres physiologiques (EVERS, 1964).

— Une accumulation d'acides citrique et malique dans les feuilles de résineux calcifuges indique des désordres liés à la chlorose (EVERS, 1963).

212-5. — *Carence dans une partie de l'aiguille.*

Dans certains cas de carence, lorsque seule l'extrémité de l'aiguille présente des anomalies, il peut être intéressant d'analyser séparément pointes et bases des aiguilles : l'élément carencé peut se révéler plus nettement ainsi (THEMLITZ, 1967).

22. — *Difficultés d'interprétation au niveau des remèdes (la fertilisation).*

L'analyse foliaire ne peut évidemment permettre de prévoir une fertilisation dans les cas, indiqués précédemment, où le diagnostic foliaire n'a pu être établi.

D'autre part, l'apport d'un élément que l'analyse foliaire a montré limitant améliorera en général la croissance. Mais les indications fournies par l'analyse foliaire seule ne permettent que rarement de prévoir la fumure la plus appropriée, en raison de certains phénomènes perturbateurs : l'effet STEENBERG, la consommation de luxe, et surtout les interactions entre ions; ainsi l'apport de l'élément

limitant peut modifier la concentration des autres éléments nutritifs dans les feuilles. Ces interactions entre ions se manifestent de 3 façons :

221. — *L'effet de dilution.*

L'apport d'un élément limitant améliore en général la croissance des arbres ; alors, la fourniture en un autre élément nutritif peut se trouver insuffisante ; il est dilué dans la masse végétale élaborée en plus grande quantité, et sa concentration foliaire peut diminuer fortement, et même avoisiner le seuil de carence (cela peut se produire simultanément pour plusieurs éléments).

222. — *L'antagonisme entre ions.*

L'augmentation de l'absorption d'un élément peut freiner l'absorption d'un ou plusieurs autres éléments nutritifs. La concentration de ceux-ci peut donc, comme par l'effet de dilution, diminuer très fortement et atteindre le seuil de carence.

Un des antagonismes que l'on peut observer est la diminution de la concentration en phosphore dans les feuilles lorsque la fourniture d'azote augmente. De nombreux auteurs citent également les antagonismes Ca - K, Ca - Mg, K - Mg, P - Zn, ainsi que l'antagonisme de plusieurs oligo-éléments. Quand l'absorption de Ca augmente, celle de N, P et K peut diminuer, pour des semis de Pin Weymouth (BISSET, 1966).

L'antagonisme entre 2 éléments peut dépendre de leur concentration, et même de celle d'un 3^e ion.

D'après LUNDEGARDH (1945), en plus des antagonismes réel et faux (dilution), il existe un *antagonisme métabolique* : l'excès d'un élément peut affecter les processus de synthèse dont dépend la concentration foliaire d'autres éléments nutritifs.

223. — *La synergie entre ions.*

Il s'agit de l'effet inverse de l'antagonisme : l'apport d'un élément déficient peut favoriser l'absorption d'un ou plusieurs autres éléments nutritifs. Citons certains de ces effets de synergie : la présence de Mo augmente l'absorption de K (BAROCCIO, 1961) ; un apport de Fe et Zn peut augmenter la concentration foliaire de l'Épicéa en P et K (MATERNA, 1967) ; synergie K - Na, Ca - Mg, Zn - Mg, etc... (SMITH, 1962).

L'on constate qu'il peut y avoir antagonisme et synergie entre 2 mêmes éléments pour une même essence (par exemple, entre P et N) : cela dépend de leur concentration.

3. — Nécessité d'une expérimentation, en complément de l'analyse foliaire

Lorsque l'analyse foliaire s'est montrée insuffisante pour établir un diagnostic sur la nutrition, un essai de fertilisation s'avère indispensable.

Mais dans tous les cas, même celui, simple, d'un seul élément nettement déficient, l'analyse foliaire seule ne permet en général pas de prévoir la fumure la plus appropriée.

La façon la plus logique d'opérer est de procéder à un essai factoriel de fertilisation fondé si possible sur des analyses de feuilles et de sols préalables; cette expérimentation et son contrôle par analyse foliaire permettent d'étudier simultanément l'effet de chacun des éléments apportés sur la nutrition et la croissance, ainsi que l'interaction entre éléments (dilution, antagonisme, etc...); une interprétation statistique de cet essai permet de choisir la fumure en toute connaissance de cause.

Mais les résultats d'un essai de fertilisation ne sont pas généralisables: pour une même composition foliaire du témoin, la fumure optima variera suivant le climat, la topographie, le sol, etc...: le besoin en fertilisation ne peut être déterminé que par type de station (en fait dans un cadre géographique assez étroit). Il est donc de la plus grande utilité d'implanter un réseau d'essais, aussi serré que possible, et à suivre par analyses foliaires, pour différentes essences. Alors, dans une station quelconque, des analyses de feuilles et de sols permettront, en se référant aux résultats des essais effectués dans ce type de station, de prévoir la fertilisation optima (VAN GOOR, 1967).

4. — Conclusion

41. — Utilisations générales de l'analyse foliaire.

— L'analyse foliaire est d'une grande utilité, comme on vient de le préciser, pour étudier l'état nutritif des arbres dans une station donnée et pour déterminer la fumure qui convient:

- employée seule, elle permet de mettre en évidence des carences importantes en éléments nutritifs et parfois des anomalies physiologiques dans l'utilisation de ces éléments.
- en vue de prévoir une fertilisation appropriée, il est en général nécessaire de lui adjoindre d'autres techniques: analyses de sols et surtout expérimentation; l'analyse foliaire permet de déterminer les modalités de ces essais et de contrôler leurs résultats.

— L'analyse foliaire peut être utilisée pour étudier l'influence de divers facteurs sur la nutrition d'un peuplement: structure du sol,

travail du sol (LHOTSKY), végétation secondaire (SEIBT et WITICH), etc...

— Elle peut permettre de comparer les besoins nutritifs des différentes espèces (par exemple différences calcifuges - calcicoles).

— On peut parfois l'utiliser comme critère de classement des stations: ainsi, dans une région déterminée, GAGNON (1964) a établi que le « site index » de peuplements de *Picea mariana* était fortement lié à la teneur en N des aiguilles de l'année.

— L'analyse foliaire peut être employée pour des études plus théoriques mais qui permettront sans doute d'accroître l'efficacité de son utilisation pratique: interactions entre ions dans la nutrition, rôle de chaque élément dans le métabolisme de l'arbre, rapports entre nutrition et physiologie de l'arbre (explication possible de la périodicité des années à glandées), etc...

42. — Amélioration de l'efficacité de l'analyse foliaire.

L'interprétation des résultats d'analyse foliaire est délicate et les enseignements qu'ils fournissent sont souvent limités. Mais on peut envisager pour l'avenir une efficacité accrue de cette analyse, grâce à:

- une standardisation des modalités de prélèvement des feuilles, en fonction de l'essence et du climat;
- une connaissance plus précise des seuils de carence, teneurs optima, équilibres entre éléments, pour de nombreuses espèces et tous les éléments nutritifs (oligo-éléments en particulier);
- des études plus poussées de physiologie végétale: études concernant l'absorption des éléments, leurs interactions, leur transport dans l'arbre, leur rôle dans le métabolisme, etc... Cela permettrait de mieux établir l'origine d'une déficience ou d'un trouble physiologique constaté par l'excès ou le défaut de certains composés dans les feuilles;
- des analyses autres que celle des éléments « totaux »: anions (NO_3 , SO_4), N aminé, certains acides organiques, etc...

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- BAROCCIO A. — 1961. (Interactions between molybdenum and potassium in the potassium nutrition of plants).
Ann. Stoz. Chim. agr. Roma, 3 (182).
- BEATON J.D. — 1966. Sulfur requirements of cereals, treefruits, vegetables, and other crops.
Soil Sci., (4), 267.
- BISSET. — 1966. Calcium and magnesium interaction in White pine (*Pinus Strobus*) seedling grown in a hydroponic medium.
Abstr. of theses, in *dissert. abstr.*, 26 (9).

- BONNEAU M. — 1966. Fertilisation forestière.
Revue agricole de France, 52, 145-157.
- DEMOLON A. — 1956. Croissance des végétaux cultivés.
Dunod édit. Paris, 576 p.
- EVERS F.H. — 1964. Die Bedeutung der Stickstofforn für Wachstum und Ernährung der Pflanzen insbesondere der Waldbäume.
Mitt des Ver. für Forst. Stand. un Forstp., 14, 19-37.
- EVERS F.H. — 1963. Neue Erkenntnisse zur Chlorosebekämpfung durch düngungsmasanahmen.
Allg. Forstz., 18 (32/33), 499-500.
- EVERS F.H. — 1964. Boden- und Nadelanalytische auswertung eines dungungsversuches zu fichte auf einen ehernaligen Streumutzungsfläche.
Die phosphersäuren, 24 (5/6).
- FIEDLER, HOHNE. — 1967. Beitrag zur Stickstoffdüngung mittelalter Kiefernbestände.
Arch. Forstw., 16 (4), 333-355.
- GAGNON J.D. — 1964. Relationship between site index and foliage nitrogen at two crown levels for nature black spruce.
For. Chron., 2, 169.
- HEINSDORF D. — 1964. Über die Zuzammenhänge des Nährstoffgehaltes in Böden un Nadeln und des Wachstums von Kiefernkulturen auf Grundwasserfernen Sanden.
Arch. forstw., 8, 865-888.
- HOFFMANN F. — 1967. Untersuchungen zur Düngung und Ernährung von Fichtenwerschulungen.
Arch. Forstw., 16 (2), 141-158.
- INGESTAD T. — 1959. Studies on the nutrition of forest tree seedlings. II. Mineral nutrition of spruce.
Physiol. Plantarum, 12, 568-593.
- KELLER T. — 1966. Versuche zur Bekämpfung der Winterlichen Nadelverfärbungen an den triebenden der Fichte im Forstplanzgarten.
J. For. Suisse, 10, 706-719.
- LEYTON L. — 1957. The relationship between the growth and mineral composition of the foliage of Japanese larch. II. Evidence from manurials trials.
Pl. Soil, 9, 31-48.
- LHOTSKY. — Bedeutung der Bodenkultivierung für die Ernährung forstliches halzarten.
Tagber. dt. Akad. LandwWiss. Berl., 50.
- LUNDEGARDH H. — 1945. Die blattanalyse. Jena. (édit. anglaise, Londres, 1951, Hilger pub.).
- MATERNA J. — 1967. Einfluss der Blattdüngung von Fichtenpflanzen mit verschiedenen nährelementen auf einige infaltsstoffe in den Nadeln.
Colloque fertil. for., Jyvaskyla.
- NEBE W. — 1966. Über die düngebedürftigkeit von Fichtenbeständen in Mittelgebirge.
Arch. Forstw., 15 (9), 929-952.
- PREVOT P., OLLAGNIER M. — 1957. Méthode d'utilisation du diagnostic foliaire.
Anal. des plantes et probl. des fum. minér. I.R.H.O.
- PUUSTJARVI V. — 1962. (Phosphorus nutrition of wet peatland forest and the P/N ratio in their needles).
Suo, 13, 21-24.
- PUUSTJARVI V. — 1967. Peat as a medium in the raising of forest tree seedlings.
Colloque fertil. forest. Inst. Intern. potasse, Jyvaskyla.

- QURESHI I.M., SRIVASTAVA P.B.L. — 1966. Foliar diagnosis and mineral nutrition of forest trees.
The indian forester, 92 (7).
- REEMTSMA J.B. — 1966. (The nutrient content of needles of different ages in spruce and other conifers).
Flora, 156 B (2), 105-121.
- ROUTCHENKO W. — 1967. Appréciation des conditions de la nutrition minérale des plantes basée sur l'analyse des sucres extraits des tissus conducteurs.
Ann. agron., 18 (4), 361-402.
- SEIBT, WITTICH. — Ergebnisse langfristiger düngungsversuche in gebiet der Nordwestdeutschen diluviums und ihre folgerungen für die praxis.
Schrift der Forstl. fak. der Univ. Göttingen und Mitt. der niedrs. Forstl. Versuch., fasc. 27-28.
- SMITH P.F. — 1962. Minral analysis of plant tissues.
Ann. rev. plant physiology, 13, 81-108.
- STEENBERG F. — 1951. Yield curves and chemical plant analysis.
Pl. Soil, 3 (2), 97-100.
- STEENBERG F., JAKOBSEN S.T. — 1963. Plant and nutrition and yield curves.
Soil Sc., 95 (1), 69-88.
- TAMM C.O. — 1955 et 1956. Studies on forest nutrition.
Meddn. St. Skoogsforsk Inst., 45 et 46.
- TAMM C.O. — 1957. The effects of nitrogen fertilisation on tree growth and foliage composition in a forest stand.
Analyse des plantes et probl. des fum. minér., I.R.H.O., 150-157.
- TAMM C.O. — 1964. Die Blattanalyse als Methode zur Ermittlung der Naturstoffversorgung des Waldes Eine Kritische Betrachtung.
Dt. Landwirt., 66, 7-17.
- THEMLITZ R. — 1963. Erfahrung zum Nährstoffzustand von Böden und pflanzen aus forstpflanzenanzuchtstätten.
Allg. Forst und Jagdz., 134 (7), 173-177.
- THEMLITZ R. — 1967. Aussagewert von Boden und Nadelanalysen.
Inst int. potasse, Colloque fertil. forest, Jyvaskyla.
- VAN GOOR C.P. — 1953. The influence of nitrogen on the growth of Japanese larch (*Larix leptolepis*).
Pl. Soil., 5, 29.
- VAN GOOR C.P. — 1967. Kriterien zur feststellung des Düngungsbedürfnisses in der forstwirtschaft.
Inst int. potasse, Colloque fertil. forest, Jyvaskyla.

RECHERCHE numéros suivants :

- Revue des Eaux et Forêts - année 1944 - numéros de Septembre, Octobre, Novembre, Décembre.
- Revue Forestière Française - année 1951 - numéro de Mars.
Faire offre à :
- M. Jacques THOREAU - « Le Mirador », 142, rue Albert-I^{er} - 41 - BLOIS.
-