DISPONIBILITÉ DE L'AZOTE NITRIQUE ET AMMONIACAL DANS CERTAINS SOLS DE L'EST DE LA FRANCE

INFLUENCE SUR LA NUTRITION ET LA CROISSANCE DE L'ÉPICÉA COMMUN (*Picea abies* KARST.)

F. LE TACON

avec la collaboration technique de
Maryse BITSCH, D. BOUCHARD, Françoise GEORGES
et Danielle SALMON

*Station de Recherches sur les Sols forestiers
et la Fertilisation
Centre national de Recherches forestières, I.N.R.A.,
54 - Nancy*

RÉSUMÉ

Nous avons étudié par incubation à l'étuve le pouvoir de minéralisation de l'azote nitrique et ammoniacal de 42 sols des plateaux calcaires de l'Est de la France (calcaire de A₁ variant de 0 à 50 % et le pH de A₁ variant de 4,5 à 8,7). Nous avons recherché les liaisons existant entre production d'azote minéral, production et niveau de nutrition de l'épicéa d'une part et d'autre part entre production d'azote minéral et les autres caractéristiques du sol (pH, calcaire, etc.).

L'ammonification réelle est liée négativement au pH et aux facteurs apparentés. La nitrification, au contraire, n'apparaît liée ni au pH, ni au taux de saturation, ni à la teneur en calcaire. Il y a seulement une très légère chute de la nitrification lorsque l'on passe de pH 7 à pH 8,3. Il en résulte que la disponibilité en azote ammoniacal devient plus faible en sol carbonaté, non par augmentation de la nitrification qui reste à peu près constante quel que soit le pH, mais par diminution de la minéralisation nette d'azote.

La diminution de l'ammonification pourrait s'expliquer par une augmentation des produits organiques oxydés peu fragmentés dérivant de la lignine. Il semble qu'en sol décarbonaté à pH inférieur à 7 en A₁, l'épicéa puisse s'alimenter de manière mixte à la fois à partir de l'azote ammoniacal et nitrique. A pH supérieur à 7, l'alimentation de l'épicéa semble se faire essentiellement à partir de l'azote nitrique qui, au fur et à mesure que le pH augmente, devient la seule source d'azote utilisable. Comme lorsque le pH augmente, la disponibilité en azote ammoniacal diminue, sans que pour autant il y ait augmentation de la production d'azote nitrique, le niveau d'azote dans les aiguilles de l'épicéa diminue et corrélativement la production chute.

INTRODUCTION

DUCHAUFOUR (1960), puis DUCHAUFOUR et BONNEAU (1962) ont montré que la présence de calcaire induisait une déficience en azote chez les jeunes plants de résineux acidiphiles.

Nous avons nous-mêmes montré (LE TACON, MILLIER - 1970) que sur les plateaux calcaires de l'Est de la France, la nutrition azotée semblait avoir un rôle prépondérant dans l'explication des variations de production de l'épicéa et que la chute de production observée en sol calcaire était due, pour une certaine part, à des difficultés de nutrition azotée.

DUCHAUFOUR (1960) explique ces phénomènes par la minéralisation très rapide de la matière organique, ce qui entraînerait des pertes par lessivage ou par départ sous forme gazeuse, et par la nature de la matière organique humifiée, qui est très liée aux colloïdes minéraux et qui, de ce fait, est très résistante à l'action des organismes minéralisateurs.

En raison du rôle essentiel joué par l'azote, il nous a semblé important d'approfondir le problème de la production d'azote minéral dans ces sols des plateaux calcaires de l'Est de la France.

L'appréciation du potentiel de production azotée d'un sol forestier est extrêmement difficile. La disponibilité en azote minéral varie suivant les périodes de l'année et à un instant donné la quantité d'azote minéral présent dans un horizon est la résultante d'un grand nombre de phénomènes : minéralisation brute, réorganisation, absorption par les racines des végétaux, pertes par drainage ou échanges gazeux, fixation d'azote atmosphérique, apport par les eaux de pluie et par les eaux de percolation à travers la masse foliaire, etc.

Trois séries de méthodes sont depuis longtemps utilisées pour tenter d'apprécier la disponibilité en azote minéral des sols.

La meilleure méthode est de doser périodiquement l'azote minéral dans le sol et les eaux de drainage d'un lysimètre. Cette méthode est malheureusement inapplicable à un grand nombre de stations.

Une autre méthode voisine consiste à doser périodiquement in situ l'azote minéral existant dans le sol, soit sans prendre de précautions particulières, soit en protégeant les horizons contre les apports extérieurs ou les pertes par drainage.

Ce deuxième type de méthode, s'il est un peu moins lourd que le précédent, n'est cependant pas applicable à un grand nombre de sols à moins de disposer de moyens considérables.

Nous nous sommes donc tournés vers le troisième type de méthode qui consiste à mesurer la production d'azote minéral d'un échantillon après incubation à l'étuve dans des conditions bien contrôlées. Cette méthode a l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et par conséquent d'être applicable à un grand nombre de stations.

Malheureusement, c'est aussi la méthode qui donne la moins bonne approche des possibilités de minéralisation d'un sol. LEMEE par exemple a montré que le pouvoir minéralisateur mesuré à l'étuve était différent du pouvoir minéralisateur mesuré in situ.

Néanmoins par ce procédé, nous pouvons espérer comparer, au moins approximativement, le pouvoir de minéralisation d'un grand nombre de stations. Nous nous proposons ainsi par cette méthode de rechercher les liaisons pouvant exister entre production d'azote minéral, production et niveau de nutrition de l'épicéa d'une part et d'autre part entre pro-

duction d'azote minéral et les autres caractéristiques du sol (pH, présence ou absence de calcaire, etc.)

I. — LE MILIEU

Les formations calcaires du secondaire qui s'échelonnent du Muschelkalk au Crétacé intéressent près de deux millions d'hectares de forêt dans l'Est de la France. Ces formations calcaires peuvent être recouvertes d'éléments décarbonatés (limons et terra-fusca), ce qui entraîne l'existence de deux grands ensembles de sols : les sols décarbonatés (sols bruns calciques, sols bruns eutrophes, sols bruns lessivés) et les sols carbonatés (rendzines brunifiées, rendzines et sols bruns calcaires).

La teneur en calcaire total des sols varie de 0 à 50 % en surface et corrélativement le pH des horizons A_1 varie de 4,5 à 8,3. Même lorsqu'ils sont acides, ces horizons A_1 sont tous des mulls biologiquement actifs. Il n'existe aucun moder ni mor dans notre échantillonnage.

Le climat est de type semi-continental. La pluviosité annuelle varie de 750 à 1 000 mm et l'altitude est comprise entre 200 et 440 m.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES DE TRAVAIL

Nous avons installé des microplacettes dans 42 peuplements d'épicéa d'âge compris entre 35 et 50 ans. Nous y avons évalué la hauteur dominante en prenant comme définition la moyenne arithmétique des hauteurs des 10 % plus gros arbres. Par analyse de tige de l'arbre dont la hauteur était la plus proche de la hauteur dominante, nous avons reconstitué pour chaque placette l'évolution de la hauteur dominante dans le temps. Par ce procédé nous pouvons ramener toutes les hauteurs dominantes à un même âge et comparer ainsi toutes les microplacettes.

Dans chacun de ces peuplements, nous avons choisi cinq arbres de l'étage dominant, sur lesquels nous avons prélevé en période d'arrêt de la végétation, des aiguilles de l'année dans le tiers supérieur de la cime.

Sur chacun des prélèvements, nous avons effectué une analyse totale des éléments suivants : N P_2O_5 K Ca Mg Fe et Mn.

Dans chaque placette, nous avons également effectué des prélèvements de sol dans chaque horizon. Sur ces échantillons nous avons déterminé le carbone total par la méthode Anne, l'azote total par la méthode Anstett, les éléments échangeables et la capacité d'échange par percolation à l'acétate d'ammonium, le phosphore assimilable par extraction à H_2SO_4 et Na OH et le pH électrométriquement dans l'eau.

Au printemps 1969 nous avons prélevé pour chaque placette, 10 échantillons de l'horizon A_1 (0 à 10 cm). Les 10 échantillons ont été soigneusement mélangés. Nous avons cherché à avoir une évaluation de la possibilité de minéralisation de l'azote de ces horizons A_1 .

Pour cela, nous avons dosé la quantité d'azote minéral produit par les divers horizons A_1 en incubation pendant six semaines à 28° et à l'humidité équivalente (minéralisation nette).

L'azote nitrique a été extrait par du sulfate de cuivre N/50 (200 ml pour 50 g de sol) et dosé par colorimétrie à l'acide phénoldisulfonique.

L'azote ammoniacal a été extrait par une solution de $CaCl_2$ N (500 ml pour 25 g de sol) et dosé, soit par distillation, soit quand les quantités étaient trop faibles, par colorimétrie (méthode de Lubochinsky Zalta).

Rappelons que les valeurs ainsi obtenues ne constituent qu'une approximation de la quantité d'azote minéral réellement mise à la disposition de l'arbre par un sol, pendant la période de végétation (minéralisation différente des horizons inférieurs suivant les types de sols, perte plus importante de l'azote minéral par drainage dans les sols superficiels que dans les sols profonds, etc.).

Nous avons ensuite recherché les liaisons existant entre les différents paramètres mesurés uniquement par des procédés statistiques très simples (comparaison de moyenne ou calcul des coefficients de corrélation totaux).

III. — RÉSULTATS

3.1. — *Comparaison de la production d'azote minéral des horizons A₁ des sols carbonatés et décarbonatés*

En moyenne, il n'existe aucune différence significative dans la teneur en azote total des deux types d'horizon A₁, si on exprime N en % de la terre fine (tableau 1).

Par contre, le taux de minéralisation net est très différent d'un type d'horizon A₁ à l'autre. Le taux de minéralisation net est en moyenne de 1,15 % dans les horizons A₁ des sols carbonatés et est près du double (2,11 %) dans les horizons A₁ des sols décarbonatés.

En moyenne, la production d'azote minéral total des horizons A₁ des sols décarbonatés est très significativement supérieure à celle des horizons A₁ des sols carbonatés.

Mais si nous examinons la forme d'azote minéral produite, nous constatons qu'en moyenne, il n'y a aucune différence dans la production d'azote nitrifié entre les deux types de sol. Par contre, la différence est très significative pour l'azote ammoniacal ou plus exactement pour l'azote minéral non nitrifié. En moyenne, 50 % environ de l'azote minéral est nitrifié en sol décarbonaté contre 70 % en moyenne en sol carbonaté. Comme la production d'azote minéral est nettement moins importante en sol carbonaté et que la quantité d'azote nitrifié reste constante, il y a une chute importante de la disponibilité en azote ammoniacal dans les horizons A₁ des sols carbonatés.

3.2. — *Influence des propriétés du sol sur la minéralisation de l'azote et la nitrification*

Nous avons calculé la matrice des coefficients de corrélation totaux entre les caractéristiques des divers horizons et la production de l'azote. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les caractéristiques des horizons A₁, mais sont très voisins de ceux obtenus avec les horizons plus profonds. Néanmoins, pour des raisons de clarté, nous n'utiliserons que les calculs effectués pour les horizons A₁ (le détail des résultats analytiques est donné en annexe).

3.21. *Ensemble des sols*

3.211. *Minéralisation totale nette.* — La quantité d'azote minéral net total produit, autrement dit l'ammonification nette, apparaît liée à cinq facteurs : le pH, le taux de saturation, la teneur en calcium échangeable, la teneur en calcaire total (liaisons négatives) et enfin à la disponibilité en phosphore (liaison positive).

Des quatre facteurs qui sont liés négativement avec l'ammonification, nous ne retiendrons véritablement que le pH qui intègre d'ailleurs les trois autres S/T, Ca⁺⁺, et calcaire

TABLEAU 1 — TABLE 1

Production d'azote minéral après six semaines d'incubation à l'étuve des horizons A₁ des sols carbonatés et des sols décarbonatés (comparaison de moyennes).

Ammonium and nitrate production, after six weeks incubation in A₁ horizons of carbonated and decarbonated soils.

	Nombre d'observations	Azote total en % de terre fine sèche à l'air (moyenne)	N NH ₄ en mg pour 100 g t.s (moyenne)	N NO ₃ en mg pour 100 g t.s (moyenne)	N NO ₃ + N NH ₄ en mg pour 100 g t.s (moyenne)	N NO ₃ + N NH ₄ en % de N total (moyenne)	N NO ₃ en % de N minéral total (moyenne)
Sols décarbonatés	21	0,373	3,07	3,55	6,57	2,11	54,03
Sols carbonatés	21	0,341	1,34	3,180	4,52	1,15	70,30
Test t		NS	xx	NS	xx	xx	xx

total). En effet, dans les sols décarbonatés, la teneur en calcaire est évidemment égale à 0 en A_1 , alors que dans les sols carbonatés, le taux de saturation est constant et égal à 100 %, ce qui rend les calculs des coefficients de corrélation douteux. De même le dosage du calcium échangeable dans les horizons A_1 des sols carbonatés est sujet à caution; nous l'avons estimé en effectuant la différence entre capacité totale d'échange et la somme des autres cations échangeables Mg^{++} et K^+ .

Il est donc préférable de ne retenir que le pH qui apparaît ainsi avoir une influence considérable sur l'ammonification : l'intensité de l'ammonification diminue quand le pH augmente.

D'autre part, la disponibilité en phosphore a un effet inverse puisque l'ammonification augmente lorsque la disponibilité en phosphore augmente ($r = +0,403$).

FIG. 1. — Ensemble des 42 placettes : liaison entre la production totale d'azote minéral ($NO_3^- + NH_4^+$) des horizons A_1 , nitrification (NO_3^-), disponibilité en azote ammoniacal (NH_4^+) (obtenus par incubation pendant six semaines à 28° à l'humidité équivalente) et les caractéristiques chimiques de ces horizons (seules les liaisons présentant un coefficient de corrélation significatif sont matérialisées).

$$n = 42 \text{ d.d.l.} = 40 \quad r \begin{matrix} 5\% = 0,3044 \\ 1\% = 0,3932 \end{matrix}$$

FIG. 1. — All plots : correlations between total nitrogen production (NH_4^+) of A_1 horizons, nitrate nitrogen production (NO_3^-), ammonium nitrogen availability (NH_4^+) (obtained by incubation after six weeks at 28° C and at field capacity) and chemical characteristics of these horizons (only the significative correlations are mentioned).

$$n = 42 \text{ d.d.l.} = 40 \quad r \begin{matrix} 5\% = 0,3044 \\ 1\% = 0,3932 \end{matrix}$$

Tous les autres facteurs que nous avons mesurés ne jouent, semble-t-il, aucun rôle sur l'intensité de l'ammonification : matière organique, azote total, rapport C/N, potassium échangeable, magnésium échangeable.

3.212. *Nitrification et disponibilité en azote ammoniacal.* — La nitrification est absolument indépendante du pH ou de tout autre facteur lié au pH (calcium échangeable, calcium, etc.). L'intensité de la nitrification ne dépend que de la disponibilité en phosphore du sol.

Par contre, la disponibilité en azote ammoniacal des horizons A_1 dépend considérablement du pH ou des facteurs apparentés, ce qui est parfaitement logique et en accord

FIG. 2. — Sols décarbonatés et sols carbonatés : liaison entre production d'azote minéral ($NO_3^- + NH_4^+$), nitrification (NO_3^-), disponibilité en azote ammoniacal (NH_4^+) et les caractéristiques chimiques des horizons A_1 (seules les liaisons présentant un coefficient de corrélation significatif sont matérialisées).

$$n = 21 \text{ d.d.l.} = 19 \quad r \begin{matrix} 5\% \\ 1\% \end{matrix} = \begin{matrix} 0,4329 \\ 0,5487 \end{matrix}$$

FIG. 2. — Decarbonated soils and carbonated soils. Correlations between total nitrogen production ($NO_3^- + NH_4^+$) of A_1 horizons, nitrate nitrogen production (NO_3^-), ammonium nitrogen availability (NH_4^+) and chemical characteristics of these A_1 horizons (only the significant correlations are mentioned).

$$n = 21 \text{ d.d.l.} = 19 \quad r \begin{matrix} 5\% \\ 1\% \end{matrix} = \begin{matrix} 0,4329 \\ 0,5487 \end{matrix}$$

avec les observations effectuées aux paragraphes précédents. L'ammonification, c'est-à-dire la production d'azote minéral total, diminue quand le pH augmente. La nitrification est indépendante du pH. Par conséquent, la disponibilité en azote ammoniacal dans les horizons A₁ diminue lorsque le pH augmente.

L'allure des phénomènes de minéralisation de l'azote pouvant ne pas être continue ou linéaire à l'intérieur d'une gamme étendue de sols, nous avons effectué les mêmes calculs pour les sols décarbonatés d'une part et pour les sols carbonatés d'autre part. Nous avons ainsi distingué deux zones de pH : la première allant de 4,5 à 7,0, l'autre de 7,0 à 8,3 (fig. 2).

3.22. Sols décarbonatés (pH variant de 4,5 à 7,0).

Dans la gamme de pH compris entre 4,5 et 7,0, l'ammonification présente un coefficient de corrélation assez élevé et négatif avec le calcium et le potassium échangeable, le pH et le taux de saturation et un coefficient positif avec le phosphore. Notons que seuls les coefficients de corrélation avec les éléments échangeables calcium et potassium, sont significatifs au seuil de 5 %, les autres étant juste au-dessous de ce même seuil.

La nitrification est toujours indépendante du pH ou des facteurs qui y sont liés et ne dépend (liaison positive) que de la disponibilité en phosphore.

La disponibilité en azote ammoniacal dépend donc du pH et des facteurs qui y sont liés (taux de saturation, calcium et potassium échangeables).

3.23. Sols carbonatés.

Dans la gamme de pH compris entre 7,1 et 8,3, l'ammonification continue à diminuer quand le pH augmente. Mais de plus, la nitrification a également tendance à diminuer. Cette baisse de la nitrification est faible mais réelle (r significatif à 5 %).

Comme dans le cas des sols décarbonatés, la disponibilité en azote ammoniacal et le pH ont un coefficient de corrélation négatif très élevé ($r_{\text{pH}} = -0,817$).

3.3. — *Influence de la forme et de la quantité d'azote minéral produit par le sol sur l'absorption de cet élément par l'épicéa et sur la croissance de l'épicéa*

Il est bien évident que pour connaître les réactions, vis-à-vis des formes d'azote, d'arbres ayant plusieurs dizaines de mètres de hauteur, nous ne pouvions travailler expérimentalement.

La seule possibilité était de calculer les coefficients de corrélation totaux entre les différentes variables.

Dans ces conditions, nous ne pouvons espérer obtenir des résultats rigoureux; aussi nous formulerons nos conclusions plus sous forme d'hypothèses que de certitudes.

D'autre part, nous assimilons les possibilités d'absorption de l'azote d'un peuplement au niveau atteint par cet élément dans les aiguilles, ce qui évidemment est une approximation.

3.31. Ensemble des peuplements.

Nous avons tout d'abord effectué les calculs pour tous les peuplements qu'ils soient situés sur sols décarbonatés ou sur sols carbonatés.

La teneur en azote des aiguilles apparaît liée à la fois à la disponibilité en azote nitrique et à la disponibilité en azote ammoniacal. D'autre part la liaison est meilleure ($r = 0,552$) si l'on fait intervenir la quantité totale d'azote minéral, c'est-à-dire la somme des deux formes.

Les résultats obtenus pour la croissance déterminée par la hauteur dominante atteinte à 50 ans sont parfaitement identiques. La croissance est liée à la fois à la disponibilité en azote ammoniacal et nitrique, la liaison étant meilleure lorsque nous faisons intervenir la somme des deux formes.

FIG. 3. — Liaison entre la hauteur dominante de l'épicéa à 50 ans et la production totale d'azote minéral (NO₃⁻ + NH₄⁺), la production d'azote nitrique (NO₃⁻) et la disponibilité en azote ammoniacal (NH₄⁺) des horizons A₁ (seules les liaisons présentant un coefficient de corrélation significatif sont matérialisées).

FIG. 3. — Correlations between 50 years old dominant height of Norway spruce and total nitrogen production (NO₃⁻ + NH₄⁺), nitrate nitrogen production (NO₃⁻) and ammonium nitrogen availability (NH₄⁺) in A₁ horizons (only the significant correlations are mentioned).

FIG. 4. — Liaison entre la teneur en azote total des aiguilles d'épicéa et la production totale d'azote minéral ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$), la production d'azote nitrique (NO_3^-) et la disponibilité en azote ammoniacal des horizons A_1 (seules les liaisons présentant un coefficient de corrélation significatif sont matérialisées).

FIG. 4. — Correlations between total nitrogen content of Norway spruce needles and total nitrogen production ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$), nitrate nitrogen production (NO_3^-) and ammonium nitrogen availability (NH_4^+) in A_1 horizons (only the significative correlations are mentioned).

Nous avons effectué ensuite les mêmes calculs en séparant les peuplements situés sur sols carbonatés et ceux situés sur sols décarbonatés.

3.32. Peuplements situés sur sols carbonatés.

La teneur en azote des aiguilles apparaît liée uniquement à la disponibilité en azote nitrique. L'absorption serait donc faite uniquement sous cette forme bien que la disponibilité en azote ammoniacal ne soit jamais nulle en sol carbonaté et que le coefficient de corrélation soit légèrement amélioré lorsque l'on effectue la somme $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$.

La croissance semble obéir au même phénomène et ne dépendre que de la disponibilité en azote nitrique.

3.33. *Peuplements situés sur sols décarbonatés.*

Les résultats sont moins clairs que dans le cas précédent. On remarquera que les coefficients de corrélation totaux sont toujours positifs et relativement élevés entre NO_3 et NH_4 d'une part et teneur en azote des aiguilles et croissance d'autre part. Mais dans un cas, le coefficient de corrélation est significatif pour NH_4 et $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ et dans l'autre pour NO_3 et $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$, ce qui apparaît assez contradictoire.

Mais il semble que cette relative contradiction soit le fait du faible effectif (21) de notre échantillon. Il suffit de quelques mesures douteuses pour qu'avec un si petit échantillon les coefficients franchissent ou ne franchissent pas le seuil de signification.

Dans le cas des sols décarbonatés, il semble qu'en fait, l'absorption d'azote et la croissance dépendent à la fois de la disponibilité en azote ammoniacal et de la disponibilité en azote nitrique.

IV. — DISCUSSION

Il est admis *in vitro* que l'ammonification est relativement indépendante du pH (DOMERGUES, MANGENOT) ou qu'elle est un peu plus active en milieu neutre ou alcalin qu'en milieu acide.

Toujours *in vitro*, la nitrification au contraire dépend beaucoup du pH. Les organismes nitrifiants en effet apparaissent être des basiphiles, leur activité optimale se situant aux environs de pH 8,5.

Les observations que nous avons pu effectuer sur les quarante deux sols que nous avons étudiés sont assez différentes de ce schéma général.

Le rapport entre la quantité nette d'azote nitrique apparemment produite et l'azote minéral total est nettement plus important en moyenne pour les sols carbonatés à pH compris entre 7 et 8,3 que pour les sols décarbonatés à pH compris entre 4,5 et 7 (70 % contre 55 %), ce qui est conforme au schéma général habituellement admis.

Cependant en valeur absolue la production nette d'azote nitrique dans les deux types de sol est équivalente. Par contre la production nette d'azote minéral total ou ammonification nette est très différente. L'ammonification nette est moins importante pour les sols à pH supérieur à 7 que pour les sols à pH inférieur à 7. La disponibilité en azote ammoniacal devient donc plus faible en sol carbonaté non pas par augmentation de la nitrification qui, nous l'avons vu, reste apparemment constante, mais par diminution de la minéralisation nette d'azote.

L'étude de l'influence des autres propriétés du sol sur l'ammonification et la nitrification à l'intérieur des quarante deux placettes confirment parfaitement ce résultat.

Globalement l'ammonification nette semble liée négativement au pH ou aux facteurs apparentés (S/T, Ca échangeable, calcaire total) et positivement à la disponibilité en phosphore.

L'augmentation du pH ou des facteurs qui lui sont apparentés entraînent une réduction significative de la production nette d'azote minéral total, estimée par incubation (coefficient de corrélation total avec le pH = 0,60).

D'autres facteurs comme la teneur en matière organique, la richesse en azote total ou le rapport C/N n'apparaissent jouer aucun rôle. Cette indépendance vis-à-vis du C/N ne s'applique évidemment que dans la gamme de notre échantillon où les humus les plus acides sont encore des mulls actifs.

La nitrification nette au contraire n'apparaît liée, ni au pH, ni aux taux de saturation, ni à la teneur en calcaire.

Un seul facteur : la richesse en phosphore semble avoir une influence sur la nitrification apparente ($r = 0,431$).

Nous avons ensuite essayé d'affiner les résultats en effectuant les mêmes calculs séparément pour la gamme de sols compris entre pH 4,5 et 7 et la gamme de sols compris entre pH 7 et 8,3. L'ammonification nette chute un peu plus rapidement, semble-t-il, lorsque le pH passe de 7 à 8,3 que lorsqu'il passe de 4,5 à 7.

D'autre part si, globalement, la nitrification nette semble indépendante du pH, on s'aperçoit en réalité que la nitrification nette chute lorsque le pH passe de 7 à 8,3 alors qu'elle reste indépendante du pH dans la gamme des sols à pH compris entre 4,5 et 7.

De plus une plus grande richesse du sol en phosphore améliore la nitrification surtout dans le cas des sols décarbonatés.

Ces différents résultats, c'est-à-dire l'indépendance de la nitrification nette vis-à-vis du pH 4,5 et 7, la légère diminution de la nitrification nette lorsque le pH des sols passe de 7 à 8,3, enfin la chute importante de l'ammonification nette quand le pH et les caractéristiques du sol qui y sont associées augmentent pour passer de 4,5 à 8,3, sont en contradiction avec les résultats obtenus *in vitro*, à savoir : relative indifférence des organismes ammonificateurs vis-à-vis du pH avec légère augmentation d'activité à pH supérieur à 7, activité optimale des organismes nitrificateurs à pH 8 à 8,5. Néanmoins de nombreux travaux consacrés à la nitrification *in situ* dénotent une certaine indépendance du phénomène vis-à-vis du pH, contrairement à ce qui se passe *in vitro*.

Nous allons tenter maintenant de fournir quelques hypothèses pour tenter d'expliquer ces contradictions.

Lorsque le pH augmente dans le sol, nous savons que les sources de carbone utilisables par les organismes utilisateurs subissent des modifications considérables. DUCHAUFOR (1962), rappelons-le, estimait qu'en milieu calcaire la matière organique fraîche se minéralisait très rapidement entraînant des pertes importantes d'azote minéral et que d'autre part la matière organique humifiée fortement polymérisée et liée aux colloïdes minéraux devenait peu utilisable par les organismes minéralisateurs.

Nous-mêmes (JACQUIN, LE TACON 1970) avons étudié l'influence des formes de calcium sur l'évolution des résidus ligneux.

Il apparaît, lorsque l'on passe du mull eutrophe ou mésotrophe au mull calcique carbonaté, que le taux de minéralisation de la matière organique fraîche reste constant (coefficient L et K_1 similaire).

Par contre, il y a nettement accumulation de matière organique humifiée dans les mulls calciques, donc diminution du coefficient K_2 (paramètre de destruction de la matière organique humifiée).

Cette augmentation de la teneur en matière organique humifiée s'accompagne égale-

ment d'une modification de la nature de cette matière organique : en effet, la proportion d'humine augmente considérablement dans les mulls calciques carbonatés. De plus, cette humine serait une humine d'oxydation essentiellement formée de lignine peu transformée, difficilement biodégradable, par opposition à l'humine résiduelle des autres composés humiques des mulls mésotrophes ou eutrophes, qui résulteraient d'une fragmentation beaucoup plus poussée de la lignine en l'absence de carbonate de calcium, et qui seraient ainsi beaucoup plus facilement biodégradables.

La diminution de l'ammonification nette lorsque l'on passe des sols décarbonatés aux sols carbonatés pourrait s'expliquer par l'augmentation des produits organiques oxydés peu fragmentés dérivant de la lignine (humine d'oxydation) et très résistants à l'activité microbienne. Mais il faudrait savoir quelle est la part de l'azote ammoniacal nécessaire à la nitrification qui provient des composés humiques et la part qui provient de matières organiques moins évoluées. D'autre part l'humine est pauvre en azote et il faudrait donc admettre qu'elle puisse bloquer la minéralisation des composés azotés labiles en formant par exemple un complexe. D'autres hypothèses pourraient également être avancées : existence de microsites dont le pH par suite de fixation d'ammoniac est plus élevé que le pH moyen mesuré ; différences possibles dans la vitesse de réorganisation.

Quels que soient les facteurs en cause, il reste que la quantité d'azote minéral produit diminue lorsque le pH augmente. Cette chute de production azotée se traduit presque exclusivement par une diminution de l'azote ammoniacal disponible, la disponibilité en azote nitrique restant quasiment constante.

Il semble qu'en sol décarbonaté à $\text{pH} < 7$ en A_1 l'épicéa s'alimente de manière mixte à la fois à partir de l'azote ammoniacal et nitrique. In situ à $\text{pH} > 7$, l'alimentation de l'épicéa semble se faire uniquement à partir de l'azote nitrique probablement en raison de la diminution de la disponibilité en azote ammoniacal. In situ la croissance ne dépend plus que de la disponibilité en azote nitrique, qui a d'ailleurs également tendance à diminuer aux pH les plus élevés.

Ce fait peut donc permettre d'expliquer la plus faible production de l'épicéa en sol carbonaté qu'en sol décarbonaté.

On peut donc aussi supposer qu'à une diminution de la disponibilité en azote minéral viennent s'ajouter en sol carbonaté des difficultés d'utilisation de l'azote nitrique, qui est seul disponible (difficulté d'absorption ou difficulté de réduction).

V. — CONCLUSIONS

La production nette d'azote nitrique obtenue par incubation à l'étuve est en moyenne équivalente dans les horizons A_1 des sols carbonatés à pH compris entre 7 et 8,3 et dans les horizons A_1 des sols décarbonatés à pH compris entre 4,5 et 7. Par contre la production nette d'azote minéral total est très différente dans les deux types de sol. L'ammonification nette est moins importante pour les sols à pH supérieur à 7 que pour les sols à pH inférieur à 7. La disponibilité en azote ammoniacal devient plus faible en sol carbonaté non pas augmentation de la nitrification qui reste constante quel que soit le pH, mais par diminution de la minéralisation nette d'azote.

Cette ammonification nette est en effet liée négativement au pH ou aux facteurs apparentés.

La nitrification, au contraire, n'apparaît liée ni au pH, ni au taux de saturation, ni à la teneur en calcaire. Il y a seulement une très légère chute de la nitrification lorsque l'on passe de pH 7 à pH 8,3.

La diminution de l'ammonification nette lorsque l'on passe des sols décarbonatés aux sols carbonatés à pH supérieur à 7, pourrait s'expliquer par une augmentation des produits organiques oxydés peu fragmentés dérivant de la lignine (humine d'oxydation) et très résistants à l'activité microbienne.

D'autre part, la constance du niveau de la nitrification lorsque l'on passe des humus de pH 4,5 aux humus de pH 8 (ainsi que la légère diminution de la nitrification à pH supérieur à 8), peut s'expliquer par la diminution de cette source d'azote ammoniacal. Deux facteurs entrent en compétition :

- l'activité des organismes nitrificateurs qui augmente lorsque le pH augmente,
- la diminution de la quantité d'azote transformable (azote ammoniacal).

On peut supposer que la résultante de ces phénomènes antagonistes se traduit par la constance de la production d'azote nitrique.

A pH élevé aux environs de 8, c'est le deuxième phénomène qui commence à l'emporter, d'où une légère diminution de la nitrification.

Il semble qu'en sol décarbonaté à pH inférieur à 7 en A_1 , l'épicéa puisse s'alimenter de manière mixte à la fois à partir de l'azote ammoniacal et nitrique. A pH supérieur à 7, l'alimentation de l'épicéa semble se faire essentiellement à partir de l'azote nitrique qui, au fur et à mesure que le pH augmente, devient la seule source d'azote utilisable.

On voit donc une explication possible à la chute de production de l'épicéa observée lorsque le pH du sol augmente (DECOURT, LE TACON, 1970). A pH inférieur à 7, la minéralisation de l'azote est forte et l'épicéa peut s'alimenter à partir des deux formes ammoniacale et nitrique. Progressivement lorsque le pH augmente, la source d'azote ammoniacal diminue sans que pour autant il y ait augmentation de la production d'azote nitrique. Le niveau d'azote dans les aiguilles diminue et corrélativement la production chute dans des proportions importantes.

De plus à pH très élevé supérieur à 8, il y a même une légère diminution de la production d'azote nitrique, ce qui contribue encore à aggraver la carence en azote.

Il n'est pas non plus impossible de penser que l'épicéa puisse avoir des difficultés à assimiler l'azote nitrique lorsque cette forme devient la seule utilisable (difficultés d'absorption ou de réduction).

Reçu pour publication en janvier 1972.

SUMMARY

AMMONIUM AND NITRATE AVAILABILITY IN SOME SOILS OF EAST OF FRANCE
INFLUENCE ON NORWAY SPRUCE NUTRITION AND GROWTH

The net nitrate nitrogen production obtained by incubation is roughly the same in A_1 horizon of carbonated soils (pH 7 to 8,3) and in A_1 horizons of decarbonated soils (pH 4,5 to 7).

But net total nitrogen production is very different in the two types of soil. Net ammonium nitrogen production is less important in the soils with high pH (> 7) than in the soils with low pH (< 7). So, ammonium nitrogen availability is lower in carbonated soils than in decarbonated soils.

Ammonium nitrogen availability becomes lower in carbonated soils, not because of nitrification increase, which remains constant for any pH, but because of nitrogen mineralization decrease (= ammonification).

In effect, this net ammonification presents negative correlations with pH or factors influencing pH.

On the contrary there are no correlations between nitrate nitrogen production and pH, or saturation indice, or calcium carbonate content.

There is only a very small decrease of nitrate nitrogen production when pH increases from 7 to 8,3.

The decrease of net nitrogen mineralization when pH increases could be explicated by increasing of oxydated organic compounds coming from lignine and very resistant to microorganisms activity (humine of oxydation).

In decarbonated soils with pH lower than 7 in A_1 horizons, Norway spruce seems to use both nitric and ammonium nitrogen. For pH higher than 7, it uses only nitric nitrogen which becomes the only available form of nitrogen as pH increases. This could explain the yield decay of Norway spruce when soil pH increases (DECOURT, LE TACON, 1970).

For pH lower than 7, nitrogen mineralization is important and Norway spruce can use both nitric and ammonium nitrogen.

As pH increases, ammonium nitrogen becomes rare and cannot be used any more, and nitric nitrogen does not increase. The amount of total nitrogen in needles decreases and the yield too.

Moreover at pH higher than 8 nitrate nitrogen production slightly decreases, which makes nitrogen deficiency more serious.

It is also possible that Norway spruce has difficulties to use nitrate nitrogen when this only form is available (difficulties of absorption or reduction).

ZUSAMMENFASSUNG

DER VERFUGBARE NITRAT- UND AMMONIAKSTICKSTOFF IN EINIGEN BODEN
OSTFRANKREICHS UND SEIN EINFLUSS AUF DEN ERNAHRUNGSZUSTAND UND
DAS WACHSTUM DER FICHTE (*Picea abies* KARST.)

An 42 Böden der Kalkplateau's in Ostfrankreich wurde das Mineralisationsvermögen von Nitrat-u. Ammoniakstickstoff im Brutschrank untersucht. Der Karbonatgehalt im A_1 betrug 0 bis 50 % und der pH-Wert schwankte zwischen 4,5 und 8,7. Es wurden insbesondere die Zusammenhänge zwischen der Bildung von Mineralstickstoff, der Wuchseistung und dem Ernährungszustand der Fichte untersucht, aber auch die Beziehungen zwischen der Mineralstickstoffbildung und verschiedenen Bodenmerkmalen (pH, $CaCO_3$, etc.).

Es zeigte sich ein negativer Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Ammoniakbildung und dem pH-Wert sowie mit ihm verwandten Merkmalen. Die Nitratbildung scheint jedoch weder an den pH-Wert und die Basen sättigung noch an den Karbonatgehalt gebunden. Es zeigt sich nur eine geringe Abnahme der Nitratbildung, wenn der pH-Wert sich von pH 7 auf pH 8,3 ändert. Es folgt daraus, dass die Verfügbarkeit an Ammoniakstickstoff in Karbonatböden abnimmt und zwar nicht durch eine erhöhte Nitratbildung, welche, unabhängig vom pH-Wert, annähernd gleich bleibt, sondern durch eine deutliche Abnahme der Stickstoffmineralisation.

Die Abnahme der Ammoniakbildung könnte auf die Zunahme von gering fragmentierten organischen Oxydationsprodukten (Ligninderivate) zurückzuführen sein. In entkalkten Böden mit einen

pH-Wert unter 7 im A1 scheint die Fichte sowohl Ammoniak- als auch Nitratstickstoff aufzunehmen. Bei pH-Werten über 7 dürfte sich die Fichte vorwiegend mit Nitratstickstoff versorgen, welcher bei zunehmendem pH-Wert die ausschliessliche Quelle verfügbaren Stickstoffs darstellt.

Wenn bei zunehmendem pH-Wert die Verfügbarkeit an Ammoniakstickstoff abnimmt und dies ohne Zunahme der Nitratbildung, so zeigt sich eine deutliche Abnahme des N-Spiegels in den Nadeln der Fichte und damit auch ein korrelativer Produktionsabfall.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BONNEAU M., 1971. — Nouvelles observations sur la minéralisation de l'azote dans deux sols des Hautes-Vosges. *Science du Sol*, n° 1, p. 31-46.
- BONNEAU M., 1967. — Minéralisation de l'azote de deux sols des Hautes-Vosges. Allures des phénomènes et tentatives d'amélioration. *Science du Sol*, n° 1, p. 19-48.
- DECOURT N., LE TACON F., 1970. — L'épicéa commun (*Picea excelsa*) sur les plateaux calcaires de l'Est de la France. Essai de prévision de la production à l'aide de déterminations pédologiques simples. *Ann. Sci. forest.* 27 (3), p. 255-286.
- DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970. — Écologie microbienne du sol. Masson et Cie, 120, bd St-Germain.-Paris-6^e.
- DROUINEAU G., LEFEVRE G., 1949. — Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.*, 19, 518-536.
- DUCHAUFOUR P., 1953. — Humus actif et humus inerte. Recherches expérimentales sur la minéralisation de l'humus forestier. *Ann. Écol. nat. Eaux et Forêts, Nancy*, 13, p. 403-453.
- DUCHAUFOUR P., MANGENOT F., 1956. — Recherches sur l'évolution expérimentale de certains humus. *Ann. agron.* 7, p. 159-181.
- DUCHAUFOUR P., JACQUIN F., 1966. — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. E.N.S.A.N.*, VIII, p. 1-24.
- DUCHAUFOUR P., BONNEAU M., 1962. — Étude expérimentale de l'influence du calcaire sur la nutrition et la croissance d'un résineux acidiphile. *Ann. de l'E.N.E.F. et de la Station de Recherches et Expériences*, tome XIX, fasc. 3.
- DUCHAUFOUR P., 1960. — Notes sur l'origine de la chlorose de certains conifères sur sol calcaire. *Bull. Soc. Bot. de France*, 107 (1-2), p. 8-12.
- DURZAN D.J., STEWARD F.-C., 1967. — The nitrogen metabolism of *Picea glauca* and *Pinus banksiana* as influenced by mineral nutrition. *Canad. J. Bota.*, 45, p. 695-719.
- ENO C.-F., 1960. — Nitrate production in the field by incubating the soil in polyethylene bags. *Soil Sci. soc. Amer. Proc.*, 24, p. 277-279.
- EVERS F.-H., 1964. — Die bedeutung der Stickstoffform für Wachstum ernährung der Pflanzen, insbesondere der Waldbäume Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung n° 14, juin 1964, p. 19-37.
- FOGUELMAN D., 1966. — Étude de l'activité biologique en particulier de la minéralisation de l'azote, de quelques sols du Languedoc et du Massif de l'Aigoual. *Centre d'ét. phytosociol. et écol. du C.N.R.S. Montpellier*, doc. n° 30, 152 p.
- FROMENT A., 1971. — La minéralisation de la matière organique dans les sols calcimorphes du plateau forestier de Virelles (Belgique). *Bulletin A.F.E.S.* n° 3, p. 39-44.
- HAUCK R., 1967. — Nitrogen source requirements in different soils — Plant systems. *Extrait de Forest fertilization — Theory and practice*. — Tennessee Valley authority.
- HOFFMANN F., 1966. — Untersuchungen zur Stickstoffernährung junger Koniferen. II. Die Aufnahme von Ammonium und nitratstickstoff durch Fichtensamlinge unter verschiedenen Bedingungen. *Archiv für Forstwesen* 15, n° 10, p. 1093-1103.
- JACQUIN F., LE TACON F., 1970. — Influence des formes de calcium sur l'évolution des résidus ligneux sous climat tempéré. *Bulletin de l'École nationale supérieure agronomique de Nancy*. Tome XII, fasc. I-II, p. 12-20.
- JACQUIN F., 1963. — Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. *Thèse Doct. Etat, Fac. Sci. Nancy*. — *Bull. E.N.S.A.N.* V, 141 pages.
- JUSTE C., DELAS J., 1970. — Étude de quelques propriétés des complexes formés par les acides humiques et les cations. *Bull. A.F.E.S.* n° 4.
- KICKUTH R., MEYER B., SCHONLAU H.-J., 1969. — Die divergierende Humus-Metabolik benachbarter Sauer-Braunerden und Rendsinen unter Wald im Licht organischer Stoffgrupper Untersuchungen. *Gottinger Bodenkunliche Berichte*, 8, 1-61.
- KIFFER E., MANGENOT F., 1968. — Activités cellulolytiques de quelques sols forestiers. *Ann. Inst. Pasteur* 115-4, p. 582-595.
- LEFEVRE G., HIROUX G., 1958. — Essai de bilan de la production d'azote minéral d'un sol en place. *Ann. agron.* 9, 23-50.

- LEHMANN H., MEYER B., SCHONLAU J., 1969. — Die divergierende Humus-Metabolik benachbarter Sauer-Braunerden und Rendsinen unter Wald im Licht standortsbiologischen Untersuchungen. *Göttinger Bodenkundliche Berichte*, **9**, p. 1-63.
- LEMEE G., 1967. — Investigations sur la minéralisation de l'azote et son évolution annuelle dans les humus forestiers in situ. *Oecol. Plant.*, vol. 2, p. 285-324.
- LOSSAINT P., ROUBERT R.-M., 1964. — La minéralisation de l'azote organique dans quelques humus forestiers acides. *Ann. inst. Pasteur* **108**, suppl. au n° 3, 178-187.
- LE TACON F., MILLIER C., 1970. — La nutrition minérale de l'épicéa commun (*Picea excelsa* Link.) en sols carbonatés et en sols décarbonatés. Essai sur le comportement du calcium et du manganèse. *Ann. Sci. Forest.* **1**, p. 1-24.
- LE TACON F., MILLIER C., 1970. — Influence des conditions de nutrition minérale sur la croissance de l'épicéa commun sur les plateaux calcaires de l'Est de la France. *Ann. Sci. forest.*, **27** (4), p. 335-355.
- PRAAG H.-Van, MANIL G., 1965. — Observations in situ sur les variations des teneurs en azote minéral dans les sols bruns acides. *Ann. Inst. Pasteur*, **109**, suppl. au n° 3, 256-271.
- TAMM C.-O., PETTERSON A., 1969. — Studies on nitrogen mobilisation in forest soils. *Studia forestalia suecica*, **75**, p. 1-39.
- TROEDSSON T., TAMM C.-O., 1969. — Small-scale variation in forest soil properties and its implications for sampling procedures. *Studia forestalia suecica*, **74**, p. 1-30.
- VAN DEN DRIESSCHE R., 1971. — Response of conifer seedlings to nitrate and ammonium sources of nitrogen. *Plant and soil*, n° **34**, p. 421-439.
- ZÖTTL H., 1960 a. — Methodologische Untersuchungen zur Bestimmung der Mineralstickstoffnachlieferung des Waldbodens. *Forstw. Centralbl.*, **79**, 72-90.
- ZÖTTL H., 1960 b. — Dynamik der Stickstoffmineralisation im organischen Waldbodenmaterial I — Beziehung zwischen Bruttomineralisation und Nettomineralisation. *Plant and Soil*, **13**, 166-182.
- ZÖTTL H., 1960 c. — Dynamik der Stickstoffmineralisation im organischen Waldbodenmaterial II — Einfluss des Stickstoffgehaltes auf die Mineralstickstoff-Nachlieferung. *Plant and Soil*, **13**, 183-206.
-

ANNEXE 1

Production d'azote minéral des horizons A₁ après six semaines d'incubation :

— Principales caractéristiques des horizons A₁.

— Teneur en azote des aiguilles d'épicéa.

— Hauteur dominante atteinte à 50 ans par l'épicéa.

Total nitrogen production in A₁ horizons after six weeks of incubation :

— Principal chemical characteristics of A₁ horizons.

— Nitrogen content of Norway spruce needles.

— 50 years old dominant height of Norway spruce.

N° placette	Horizons A ₁ Azote minéralisé après 6 semaines d'incubation à 28°			Principales autres caractéristiques des horizons A ₁												Teneur en azote des aiguilles d'épicéa en %	Hauteur de l'épicéa à 50 ans en m	
	NH ₄ en mg/100 g t.s.	NO ₃ en mg/100 g t.s.	NO ₃ + NH ₄ en mg/100 g t.s.	N total	Taux de miné- ralisation	m.o. %	C/N	pH eau	Bases échangeables en m.e. pour 100 g de terre fine					P ₂ O ₅ ‰	CO ₃ Ca actif %			CO ₃ Ca total %
									Ca	K	Mg	T	S/T					
05	4,83	8,38	13,21	0,34	3,88	16,9	24,7	4,9	10,0	0,46	0,88	34,0	33,4	0,30	0,00	0,00	1,60	26,60
06	5,29	6,94	12,23	0,33	3,70	13,6	21,0	4,8	12,5	0,69	1,05	25,6	55,6	0,36	0,00	0,00	1,66	29,60
07	3,28	2,30	5,58	0,27	2,06	6,9	14,8	7,6	21,2	1,20	1,05	23,5	100,0	0,40	6,73	18,30	1,28	21,60
08	2,21	2,67	4,88	0,41	1,19	15,7	19,1	7,5	29,7	2,40	1,90	34,1	100,0	0,14	0,04	0,80	1,64	21,80
09	1,73	0,57	2,30	1,23	0,18	8,9	22,5	5,7	18,7	0,90	0,96	26,0	79,1	0,14	0,00	0,00	1,33	23,90
10	1,34	5,38	6,72	0,31	2,16	12,9	20,8	6,4	30,0	0,87	0,96	32,0	99,5	0,14	0,00	0,00	1,44	21,30
11	5,12	3,48	8,60	0,28	3,07	12,9	23,1	5,9	15,1	0,70	0,99	28,8	58,3	0,04	0,00	0,00	1,34	26,10
12	1,22	3,56	4,78	0,34	1,40	9,0	15,5	6,8	32,5	1,06	1,35	40,0	87,2	0,09	0,00	0,00	1,42	25,40
14	1,86	3,14	5,00	0,42	1,19	22,0	26,2	7,1	38,2	0,94	1,05	40,1	100,0	0,06	0,15	2,50	1,41	14,50
18	0,69	1,63	2,32	0,60	0,38	23,2	19,4	8,0	32,6	0,31	1,06	34,0	100,0	0,04	8,67	37,10	1,14	14,60
20	1,30	0,67	1,97	0,23	0,85	7,6	19,3	8,3	27,4	0,35	0,63	28,4	100,0	0,04	14,88	50,70	0,68	10,90
21	1,44	3,01	4,45	0,27	1,64	8,3	17,7	7,9	29,7	0,41	1,11	31,2	100,0	0,07	12,77	36,80	0,77	13,70
22	1,15	6,43	7,58	0,42	1,80	15,5	18,4	7,6	26,9	0,68	1,45	29,0	100,0	0,06	12,80	33,00	1,25	19,10
23	1,75	5,19	6,94	0,37	1,87	12,2	16,4	6,9	31,4	1,69	2,05	35,2	99,8	0,06	0,00	0,00	1,68	24,40
24	2,80	2,16	4,96	0,36	1,37	8,3	13,3	5,7	19,4	0,88	1,22	24,6	87,4	0,07	0,00	0,00	1,46	25,50
26	2,00	2,38	4,38	0,32	1,37	13,1	21,3	6,2	24,8	1,49	1,65	34,0	82,2	0,11	0,00	0,00	1,53	21,30
27	1,23	7,93	9,16	0,83	1,10	26,9	16,2	7,5	35,7	0,57	1,30	37,6	100,0	0,10	8,22	41,20	1,35	22,80
30	7,01	0,10	7,11	0,16	4,44	5,4	19,6	4,5	1,8	0,27	0,33	8,8	27,3	0,12	0,00	0,00	1,42	27,30
31	6,46	6,67	13,13	0,30	4,37	12,2	20,3	5,4	17,4	0,48	1,21	26,4	72,3	0,12	0,00	0,00	1,59	26,10

N° placette	Horizons A ₁ Azote minéralisé après 6 semaines d'incubation à 28°			Principales autres caractéristiques des horizons A ₁													Teneur en azote des aiguilles d'épicéa en %	Hauteur de l'épicéa à 50 ans en m
	NH ₃ en mg/100 g t.s.	NO ₃ en mg/100 g t.s.	NO ₃ + NH ₄ en mg/100 g t.s.	N total	Taux de miné- ralisation	m.o. %	C/N	pH eau	Bases échangeables en m.e. pour 100 g de terre fine					P ₂ O ₅ ‰	CO ₃ Ca actif %	CO ₃ Ca total %		
									Ca	K	Mg	T	S/T					
33	1,34	6,76	8,10	0,50	1,62	13,7	13,7	7,7	29,7	1,47	2,00	33,2	100,0	0,24	10,52	17,80	1,56	26,50
34	1,07	6,06	7,13	0,45	1,58	8,6	11,1	7,7	28,7	0,17	0,33	29,2	100,0	0,15	0,82	5,40	1,39	28,10
37	1,15	0,78	1,93	0,40	0,48	14,8	19,4	7,7	26,7	1,56	1,40	29,8	100,0	0,08	10,97	19,50	1,04	17,40
38	1,01	4,57	5,58	0,58	0,96	16,1	13,8	7,7	27,1	1,74	1,20	30,0	100,0	0,08	12,85	21,90	1,23	18,90
39	1,49	0,31	1,80	0,52	0,35	17,7	17,0	7,9	42,2	1,77	1,00	45,0	100,0	0,07	12,30	26,70	1,29	13,80
41	1,11	1,30	2,41	0,19	1,27	6,0	18,5	8,2	26,4	0,79	1,25	28,4	100,0	0,05	2,58	39,40	1,03	13,10
42	0,95	1,86	2,81	0,21	1,33	6,0	16,7	7,6	28,9	1,60	1,28	31,6	100,0	0,05	8,16	15,90	1,25	17,20
43	1,23	1,74	2,97	0,29	1,02	8,9	17,8	7,5	37,1	1,80	1,74	40,6	100,0	0,15	0,01	2,80	1,44	23,20
44	1,11	2,98	4,09	0,35	1,17	12,5	17,9	7,7	34,4	1,19	1,27	36,9	100,0	0,13	0,08	4,70	1,37	25,00
45	1,02	4,29	5,31	0,50	1,06	14,8	14,8	7,8	38,4	0,34	1,26	40,0	100,0	0,03	6,20	20,10	1,40	20,24
60	1,09	2,86	3,95	0,39	1,01	12,9	20,8	5,8	18,7	1,02	1,52	26,0	81,7	0,08	0,00	0,00	1,27	26,40
61	1,53	1,51	3,04	0,41	0,49	15,3	18,7	5,7	26,1	0,74	1,41	34,0	83,0	0,07	0,00	0,00	1,48	24,00
62	1,49	0,50	1,99	0,18	1,10	9,4	18,7	5,7	19,5	0,93	0,93	28,0	76,3	0,04	0,00	0,00	1,33	23,40
63	2,28	0,54	2,82	0,44	0,64	17,5	19,9	6,3	33,8	1,57	1,60	36,0	100,00	0,07	0,00	0,00	1,25	20,60
66	4,13	3,40	7,53	0,33	2,28	8,6	15,0	6,5	29,8	0,58	1,66	32,0	100,0	0,11	0,00	0,00	1,32	24,50
69	0,88	4,31	5,19	0,33	1,57	10,0	17,6	7,2	28,0	0,66	1,12	29,8	100,0	0,09	1,47	1,10	1,39	23,40
70	2,55	3,22	5,77	0,32	1,80	12,4	19,3	6,2	24,8	0,73	1,07	26,0	100,0	0,07	0,00	0,00	1,43	25,70
72	1,27	3,67	4,94	0,45	1,09	14,0	15,5	6,0	32,8	0,84	0,93	36,0	96,0	0,20	0,00	0,00	1,15	24,60
73	1,81	3,96	5,77	0,48	1,20	17,0	17,7	7,5	34,2	2,23	1,59	38,00	100,0	0,07	0,05	1,97	1,08	17,80
75	1,92	2,80	4,72	0,40	1,18	18,7	23,3	5,8	40,4	1,05	1,59	46,0	93,6	0,12	0,00	0,00	1,12	18,60
76	1,55	7,52	9,07	0,29	3,12	8,4	16,8	5,8	20,1	1,16	1,75	24,4	94,3	1,11	0,00	0,00	1,49	26,50
78	7,22	3,72	10,94	0,28	3,91	8,0	16,5	5,6	18,0	0,64	1,62	22,4	9,0	0,22	0,00	0,00	1,47	27,05
85	1,00	0,08	1,08	0,27	0,40	7,3	15,7	8,0	20,7	0,90	1,85	23,5	100,0	0,07	3,47	45,20	1,14	18,40

Localisation, type génétique et roche-mère des différentes placettes.
Situation, genetic type of soils and parent rock material of the different plots.

N° placette	Localisation	Type de sol	Roche-mère	N° placette	Localisation	Type de sol	Roche-mère
05	Ft domaniale du Morthomme (55)	Sol lessivé marmorisé	Limon sur calcaire Kimméridgien.	22	Ft domaniale de Vauhalaise (51)	Sol brun calcaire	Craie cénomanienne colluvionnée
06	Ft domaniale du Morthomme (55)	Sol lessivé marmorisé	Limon sur calcaire Kimméridgien.	23	Ft communale de Jouy-sous-les-Côtes (55)	Sol brun calcique	Argile de décarbonatation sur calcaire argovien
07	Ft domaniale du Morthomme (55)	Sol brun calcaire	Calcaire Kimméridgien colluvionné.	24	Ft communale de Jouy-sous-les-Côtes (55)	Sol brun eutrophe	Argile de décarbonatation sur calcaire argovien
08	Ft communale de Verdun (55)	Rendzine brunifiée	Calcaire séquanien	26	Ft domaniale de Commercy (55)	Sol brun calcique	Argile de décarbonatation sur calcaire rauracien
09	Ft communale de Verdun (55)	Sol lessivé	Argile de décarbonatation sur calcaire séquanien	27	Ft communale de Chaillon (55)	Rendzine	Grouine quaternaire
10	Ft communale de Verdun (55)	Sol brun calcique	Argile de décarbonatation sur calcaire séquanien	30	Ft domaniale de Ligny-en-Barrois (55)	Sol brun légèrement lessivé	
11	Ft communale de Nixéville (55)	Sol lessivé	Argile de décarbonatation sur calcaire séquanien	31	Ft domaniale de Ligny-en-Barrois (55)	Sol lessivé	Limon sur calcaire portlandien
12	Ft communale de Nixéville (55)	Sol brun calcaire	Argile et calcaire séquanien colluvionnés	33	Ft domaniale de Verdun (55)	Sol brun calcaire	Calcaire séquanien colluvionné.
14	Ft communale d'Ippécourt (55)	Rendzine brunifiée	Calcaire portlandien	34	Ft domaniale de Verdun (55)	Sol brun calcaire	Calcaire séquanien colluvionné
18	Ft domaniale d'Auberive (52)	Rendzine	Calcaire bajocien	37	Ft particulière Commercy (55)	Rendzine brunifiée	Grouine quaternaire
20	Ft domaniale de Vauhalaise (51)	Sol brun calcaire	Craie cénomanienne	38	Ft communale de Ligny-en-Barrois (55)	Rendzine	Calcaire portlandien
21	Ft domaniale de Vauhalaise (51)	Sol brun calcaire	Craie cénomanienne colluvionnée				

N° placette	Localisation	Type de sol	Roche-mère	N° placette	Localisation	Type de sol	Roche-mère
39	Ft communale de Ligny - en - Barrois (55)	Rendzine	Calcaire portlandien	70	Ft particulière Ageville (52)	Sol brun lessivé	Argile de décarbonatation sur calcaire bajocien
41	Ft domaniale des Éparges (55)	Sol brun calcaire	Marnes oxfordiennes	72	Ft particulière Mennouveaux (52)	Sol brun eutrophe	Colluvium de bas-fond sur bajocien
42	Ft domaniale des Éparges (55)	Sol brun calcaire	Argile et calcaire argovien	73	Ft particulière Vaudrémont (52)	Sol brun calcaire	Calcaire marneux du rauracien
43	Ft domaniale des Éparges (55)	Sol brun calcaire	Colluvium limoneux sur marnes oxfordiennes	75	Ft particulière Arc-en-Barrois (52)	Sol brun calcaire	Calcaire rauracien
44	Ft domaniale des Éparges (55)	Sol brun calcaire	Colluvium limoneux sur marnes oxfordiennes	76	Ft domaniale de Haye (54)	Sol brun eutrophe	Colluvium de bas-fond sur bajocien
45	Ft communale de Liffol-le-Grand (88)	Rendzine	Calcaire argovien	78	Ft domaniale de Haye (54)	Sol lessivé	Limon et argile de décarbonatation sur calcaire bajocien
60	Ft particulière Clefmont (52)	Sol lessivé	Limons et argile de décarbonatation sur calcaire bathonien	85	Ft communale de Toul (54)	Sol brun calcaire	Alluvions de moyenne terrasse
61	Ft particulière Clefmont (52)	Sol brun lessivé	Argile de décarbonatation sur calcaire bathonien				
62	Ft particulière Clefmont (52)	Sol brun lessivé	Argile de décarbonatation sur calcaire bathonien				
63	Ft particulière Clefmont (52)	Sol brun lessivé	Argile de décarbonatation sur calcaire bathonien				
66	Ft particulière Bourdons (52)	Sol brun lessivé	Argile de décarbonatation sur bajocien				
69	Ft particulière Ageville (52)	Sol brun calcaire	Calcaire bajocien				