

# INFLUENCE DES ESSENCES SUR LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS. CONSÉQUENCES SUR LES CHOIX SYLVICOLES

L. AUGUSTO – J. RANGER – M. BONNEAU

## LE CONTEXTE DES SOLS FORESTIERS

Le sol constitue une ressource non renouvelable du patrimoine naturel. C'est pourquoi il convient d'adopter une gestion qui garantisse le maintien de sa fertilité. Une gestion durable des sols forestiers passe par un choix de l'essence approprié aux conditions du milieu. Ceci est d'autant plus vrai que, de par leur histoire, les sols forestiers sont en moyenne plus pauvres que les sols agricoles.

Au début de l'ère chrétienne, la grande majorité de la France était occupée par la forêt. Avec le développement des sociétés humaines et la nécessité de mettre en culture de nombreuses terres pour produire de la nourriture, la part de la forêt a progressivement été réduite jusqu'à ne plus représenter que 8 à 10 millions d'hectares au début du XIX<sup>e</sup> siècle (Cinotti, 1996). Cependant, les mises en culture n'ont pas été faites de manière aléatoire et ce sont en priorité les sols les plus fertiles <sup>(1)</sup>, les moins caillouteux et les moins hydromorphes qui ont fait l'objet de déforestation. Par ailleurs, la reconquête de la forêt qui ramena la surface de celle-ci à 14,5 millions d'hectares en 1990 a majoritairement concerné les sols agricoles les plus défavorables (Koerner, 1999).

Ainsi, si seulement 12 % des sols agricoles sont acides (pH < 5,5), c'est le cas de 62 % des sols forestiers (Badeau *et al.*, 1999). De même, la capacité d'échange cationique <sup>(2)</sup> et le taux de saturation en cations non acides <sup>(3)</sup> sont beaucoup plus favorables dans les sols agricoles que dans les sols forestiers (Badeau *et al.*, 1999).

À cela, il faut ajouter que, contrairement aux sols agricoles, les sols forestiers n'ont pas été enrichis par l'homme mais au contraire appauvris par des prélèvements répétés de biomasse ou des pratiques très contraignantes pour la fertilité des sols (soutrage <sup>(4)</sup> ; écobuage ; pâturage en forêt).

(1) Voir Bonneau et Ranger (1999) pour une définition complète de la fertilité chimique des sols.

(2) Souvent désignée par le sigle CEC, elle représente la capacité totale d'un compartiment à adsorber des cations échangeables.

(3) Le taux de saturation est le pourcentage de la CEC occupé par des cations non acides (K<sup>+</sup> ; Na<sup>+</sup> ; Ca<sup>2+</sup> ; Mg<sup>2+</sup>). Le reste de la CEC est occupée par des cations acides (H<sup>+</sup> ; Fe<sup>2+</sup> ; Mn<sup>2+</sup> ; Al<sup>3+</sup>).

(4) Exportation des litières.

## FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS

Dans les écosystèmes terrestres, une certaine quantité d'éléments chimiques (azote = N, phosphore = P, potassium = K, calcium = Ca, magnésium = Mg) est disponible dans les sols pour la nutrition des arbres. Cependant, ce stock d'éléments nutritifs est une quantité finie qui est, comme nous l'avons vu, souvent faible dans les écosystèmes forestiers. Ce stock de fertilité chimique est susceptible d'augmenter ou de diminuer en fonction des flux d'éléments entrant ou sortant de l'écosystème (figure 1, ci-dessous) :

- des éléments arrivent à l'écosystème par le biais des **dépôts atmosphériques**. Toutefois, si des quantités non négligeables d'éléments nutritifs comme le calcium ou le potassium peuvent enrichir le sol, s'y ajoutent des composés acides (par exemple  $H_2SO_4$  et  $HNO_3$  : acides sulfurique et nitrique) ou générateurs d'acidité ( $NH_4^+$  : ammonium) issus de la pollution atmosphérique.

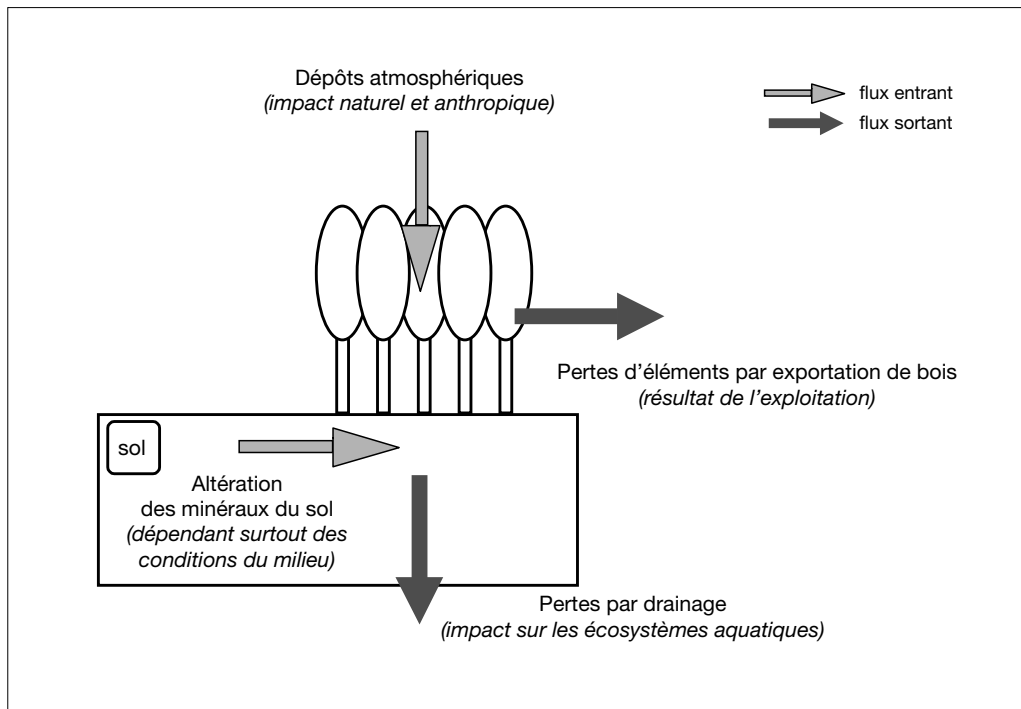
- les minéraux du sol contiennent des quantités plus ou moins importantes d'éléments nutritifs. Lorsque ces **minéraux s'altèrent**, sous l'effet de paramètres physiques, chimiques et biologiques, ils libèrent des éléments qui n'étaient pas auparavant disponibles pour la végétation. Les minéraux du sol constituent donc une réserve de fertilité pour l'écosystème ; mais celle-ci est plus ou moins limitée en fonction de la composition minéralogique du sol et de sa roche-mère.

- lors des **récoltes de biomasse**, le gestionnaire soustrait à l'écosystème la quantité d'éléments nutritifs présents dans les tissus végétaux. Les quantités perdues de cette manière par l'écosystème dépendent fortement des pratiques sylvicoles (par exemple, le traitement des rémanents ; Bonneau et Ranger, 1999).

- les **eaux qui percolent** dans le sol entraînent vers les aquifères des éléments qui sont alors perdus pour l'écosystème forestier.

Figure 1

### LES FLUX DE FERTILITÉ DANS LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS



Si, pour un élément donné, la somme des quantités entrant dans l'écosystème est inférieure à la somme des quantités sortant, alors les réserves du système diminuent et la fertilité peut être menacée si celles-ci sont modestes. La forêt, comme tous les écosystèmes terrestres, est régie par les lois de l'agronomie et il est important d'établir des bilans de fertilité tenant compte de la durée complète de la révolution forestière.

### GESTION DURABLE DE LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS

Du fait même que les sols forestiers sont en moyenne plus pauvres que les sols agricoles, ils nécessitent une gestion qui permette une utilisation durable de leur capacité à produire. À cette fin, il convient d'adapter les pratiques sylvicoles aux conditions de la station considérée. Les principales variables sur lesquelles le gestionnaire peut intervenir sont (Bonneau et Ranger, 1999) :

- la longueur des révolutions,
- la récolte de tout ou partie de la biomasse,
- la méthode de récolte,
- le traitement des rémanents,
- le choix de l'essence.

L'objectif de cet article est de fournir aux gestionnaires forestiers un outil d'aide à la décision, visant à diagnostiquer les essences les plus propices au maintien de la fertilité chimique du sol dans un contexte stationnel donné. Il n'est en effet ni souhaitable ni possible de fertiliser l'ensemble des forêts productrices pour améliorer leur productivité. Il est par contre illusoire de prétendre que la récolte de biomasse n'a aucun impact sur la durabilité de l'écosystème. Cette étude concerne quelques-unes des espèces les plus représentées en France (Épicéa commun = *Picea abies* ; Sapin pectiné = *Abies alba* ; Pin sylvestre = *Pinus sylvestris* ; Douglas = *Pseudotsuga menziesii* ; Mélèze d'Europe = *Larix decidua* ; Hêtre = *Fagus sylvatica* ; Chêne sessile = *Quercus petraea* ; Chêne pédonculé = *Quercus robur*).

### INFLUENCE DES ESSENCES SUR LES ENTRÉES ET PERTES D'ÉLÉMENTS

De par leurs caractéristiques physiques (géométrie et dimensions du houppier), biologiques (composition du bois et du feuillage, dureté des feuilles ou des aiguilles) et physiologiques (consommation en éléments nutritifs, émission d'acides par les racines, persistance du feuillage en hiver), les essences modifient les flux d'éléments entrant et sortant de l'écosystème forestier.

#### Dépôts atmosphériques

En forêt, les houppiers ont un rôle important de filtrage de la basse atmosphère. C'est pourquoi les quantités d'éléments arrivant au sol sont notablement plus importantes sous forêt que dans les zones découvertes adjacentes. Ce phénomène est plus ou moins accentué en fonction de l'essence car il est fonction de la taille, de la géométrie et du caractère sempervirent ou caduc du houppier. Ainsi, les essences résineuses captent en moyenne plus de dépôts atmosphériques que les feuillus (tableau I, p. 510). Les zones forestières soumises aux dépôts atmosphériques acides sont donc d'autant touchées que leur canopée est composée d'essences résineuses.

Notons par ailleurs que les essences résineuses interceptent également plus les précipitations que les essences feuillues (respectivement environ 30 à 40 % et 20 à 30 % ; Augusto, 1999), ce qui conduit à une alimentation en eau moindre pour les premières.

Tableau I **Influence des essences sur les quantités de soufre (S-SO<sub>4</sub>) arrivant au sol**

Essences	Épicéa	Hêtre	Chêne	Pluie
Quantité de soufre arrivant au sol <sup>(a)</sup> . . . . .	287	198	199	100
Nombre d'études répertoriées . . . . .	7	9	4	-

(a) En % par rapport à la pluie en zone découverte.

Tableau II **Influence des essences sur l'altération des minéraux du sol**

Site	Essence	Flux de calcium (Ca) issu de l'altération (kg/ha/an)
Mont Lozère . . . . . (Lelong <i>et al.</i> , 1990) <sup>(a)</sup>	Épicéa	11,2
	Hêtre	2,7
Munkarp (Suède) . . . . . (Bergkvist et Folkesson, 1995) <sup>(a)</sup>	Épicéa	13,5
	Hêtre	2,4
Nythem (Suède) . . . . . (Bergkvist et Folkesson, 1995) <sup>(a)</sup>	Épicéa	10,6
	Hêtre	3,9
Vosges . . . . . (Fichter <i>et al.</i> , 1998) <sup>(b)</sup>	Épicéa	0,8
	Hêtre	0,2

(a) Calculé par la méthode des bilans (altération = {drainage + récolte} – dépôts).

(b) Calculé en modèle géochimique par l'étude quantitative de la minéralogie du sol.

### Altération des minéraux du sol

L'étude de ce flux est difficile à mener. C'est pourquoi, peu de résultats sont disponibles sur ce sujet. Néanmoins, il apparaît que des essences résineuses, comme l'Épicéa commun ou le Pin sylvestre, conduisent à une altération des minéraux 3 à 4 fois plus forte que les essences feuillues, comme le Hêtre ou le Chêne (Augusto, 1999 et tableau II, ci-dessus). Le renouvellement du stock d'éléments immédiatement disponibles pour les arbres par altération des minéraux du sol est donc plus rapide sous les essences résineuses que sous les essences feuillues. De façon concomitante, les réserves d'éléments nutritifs présents dans les minéraux du sol s'épuisent relativement plus vite sous les essences résineuses que sous les essences feuillues.

### Pertes d'éléments par récolte de biomasse

L'impact de l'essence sur les pertes d'éléments par récolte de biomasse est difficile à mettre en évidence du fait de la variété des gestions appliquées. Par exemple, pour un même volume de bois exporté, les quantités d'éléments perdus par l'écosystème sont plus importantes pour le Hêtre que pour l'Épicéa commun (Augusto *et al.*, 2000). Cependant, l'Épicéa produit plus de bois que le Hêtre pour une même station, ce qui conduit à une exportation d'éléments à peu près équivalente dans le cas de ces deux essences (calcul d'après les données Augusto *et al.*, 2000). En fait, ce sont surtout les pratiques sylvicoles (longueur de la révolution ; intensité et sélectivité des coupes ; traitements des rémanents, etc.) qui déterminent l'intensité de ce flux d'éléments (Ranger *et al.*, 1995). Ainsi, l'exportation d'arbres non matures (c'est-à-dire avant ou aux environs de l'âge d'accroissement maximal) conduit à des pertes importantes d'éléments car leur bois est plus concentré que celui d'arbres plus vieux placés dans des conditions similaires. De même, le bois de tronc étant la partie la moins concentrée de l'arbre, les pertes d'éléments sont d'autant plus élevées que les

parties très concentrées de celui-ci (feuillage ; branchage ; écorce) sont également exportées. Par exemple, l'écorce du tronc contient à peu près autant d'éléments nutritifs que le bois qu'elle recouvre.

De manière générale, une gestion visant à limiter les pertes d'éléments par exportation de biomasse conduit à ne récolter que des arbres matures et à laisser sur place un maximum de rémanents. Notons que ceux-ci ne doivent pas être brûlés car cette opération conduit à des pertes notables par volatilisation, notamment en azote. Cette préconisation ne s'applique pas aux stations exposées à une forte pollution atmosphérique azotée comme c'est le cas dans les Ardennes.

### Pertes d'éléments dans les eaux de drainage

Les pertes par drainage sont habituellement faibles dans les systèmes à l'équilibre (forêts non perturbées et composées d'individus adultes ou présentant toutes les classes d'âge). La substitution d'essence peut être à l'origine d'une modification du fonctionnement biogéochimique et microclimatique de l'écosystème qui conduit *in fine* à une modification des flux de drainage. C'est ce qui a été constaté lorsque l'Épicéa commun remplace des essences feuillues comme le Chêne ou le Hêtre, avec des pertes qui sont multipliées entre 1,5 à 4 fois pour les résineux, au moins lors de la première révolution (tableau III, ci-dessous). Ce résultat implique que la plantation d'essences résineuses sur des stations très pauvres en éléments nutritifs et ayant un régime hydrique très drainant (fortes précipitations annuelles ; texture grossière du sol ; absence d'horizon imperméable) peut conduire à un appauvrissement plus ou moins prononcé du sol.

### Bilan de fertilité = {dépôts + altération} – {récolte de biomasse + drainage}

L'établissement d'un bilan complet de fertilité est particulièrement ardu dans le cas des écosystèmes forestiers. C'est la raison pour laquelle peu d'études présentent des bilans complets concernant des comparaisons entre essences. Toutefois, au vu de celles qui existent (Nys, 1987 ; Bergkvist et Folkesson, 1995 ; Fichter *et al.*, 1998), il apparaît que les peuplements d'essences feuillues spontanées, comme le Hêtre ou le Chêne, ont des bilans proches de l'équilibre alors que les peuplements d'Épicéa commun placés dans les mêmes conditions sont nettement déficitaires. L'Épicéa commun est donc susceptible de réduire la fertilité chimique d'un sol.

Tableau III **Influence des essences sur les pertes d'éléments par drainage**

Site	Essence	Perte de calcium (Ca) par drainage (kg/ha/an)
Mont Lozère (France) . . . . . (Lelong <i>et al.</i> , 1990)	Épicéa Hêtre	17,0 9,3
Munkarp (Suède) . . . . . (Bergkvist et Folkesson, 1995)	Épicéa Hêtre	11,0 2,6
Nythem (Suède) . . . . . (Bergkvist et Folkesson, 1995)	Épicéa Hêtre	9,1 3,7
Vosges (France) . . . . . (Fichter <i>et al.</i> , 1998)	Épicéa Hêtre	11,5 2,4
Solling (Allemagne) . . . . . (Matzner, 1998)	Épicéa Hêtre	14,1 9,4
Ardennes (France) . . . . . (Nys, 1987)	Épicéa Feuillus mélangés	14,0 11,8

## INFLUENCE DES ESSENCES SUR LE FONCTIONNEMENT INTERNE DE L'ÉCOSYSTÈME

### Microclimat forestier

Le changement d'essence conduit à des modifications du microclimat (interception de l'eau et de la lumière ; évapotranspiration) et de la biologie de l'écosystème (quantité et composition des litières et de la matière organique ; composition de la biocénose). Ces modifications ont des répercussions qui peuvent être importantes sur la nutrition des ligneux et le fonctionnement des sols. Notons toutefois que les modifications du microclimat liées au changement d'essence sont quantitativement faibles par rapport à celles apportées par la sylviculture. Ainsi, ce sont essentiellement la densité de plantation et l'intensité des éclaircies qui déterminent les flux de lumière et d'eau arrivant au sol.

### Acidité et taux de saturation du sol

Les flux internes d'acidité (issus de la minéralisation des litières et du prélèvement de cations par les racines) sont plus importants dans les pessières que dans les hêtraies (Matzner et Ulrich, 1983) car les premières ont une plus grande efficacité et une plus grande productivité que les feuillus. Ceci, ajouté aux autres flux d'acidité interceptés (cf. ci-dessus), explique que l'acidité (c'est-à-dire des pH bas) et le rapport C/N<sup>(5)</sup> des sols hiérarchisent les essences de la façon suivante (Augusto, 1999) : (Épicéa et Pin)  $\geq$  (Sapin)  $\geq$  (Douglas)  $\geq$  (Chênes et Hêtre). L'activité biologique des sols étant favorisée par de faibles acidités et rapports C/N, c'est sous les feuillus que celle-ci est, en moyenne, la plus élevée.

Par ailleurs, le taux de saturation en cations non acides des sols sous les espèces résineuses peut diminuer notablement par rapport aux essences feuillues (jusqu'à - 30 %). Toutefois cette diminution est loin d'être systématique. L'acidification d'un sol étant définie comme la baisse de son pH et de son taux de saturation, il apparaît que les essences résineuses comme l'Épicéa ou le Pin acidifient en moyenne plus les sols que les essences feuillues. Notons que l'acidification et la podzolisation d'un sol sont deux processus très différents et que, dans ce domaine, si des études indiquent que l'Épicéa commun peut parfois accentuer la podzolisation, aucune essence ne peut la provoquer sur tous les types de sol<sup>(6)</sup>.

### Les litières

L'acidité des litières (pH) et leur difficulté à se dégrader (rapport C/N<sup>(5)</sup>) discriminent les essences en trois groupes (Augusto, 1999) : l'Épicéa commun et le Pin sylvestre ont les litières les plus acides et les moins biodégradables alors que celles des Chênes ou du Hêtre sont moins acides et se dégradent plus vite. Les litières du Sapin et du Douglas ont un comportement intermédiaire.

### Biocénose et structure du sol

Les modifications biogéochimiques et microclimatiques induites par les essences ont des répercussions sur la flore et sur la faune. Il a été ainsi observé que la flore des pessières est, en moyenne, plus acidiphile que celle d'une hêtraie placée dans les mêmes conditions (Augusto, 1999). De même, la flore qui se développe sous le Douglas est plus nitrophile que sous les autres essences, ce qui suggère une modification du cycle de l'azote sous cette essence. Les modifications de

(5) C/N = rapport carbone/azote. Plus le rapport C/N d'un tissu organique est élevé, et plus sa dégradation (par la microfaune et la microflore) est rendue difficile.

(6) Seuls les sols qui sont issus d'un matériau parental riche en quartz et pauvre en carbonates et ferromagnésiens sont susceptibles d'évoluer vers un podzol (caractérisé par un horizon A<sub>2</sub> gris cendre et un horizon B marron foncé).

biocénose affectent également la faune et notamment la pédofaune (Deharveng, 1996). Le fait le plus remarquable concerne l'importante diminution, voire la disparition, des vers de terre sous l'Épicéa, le Sapin, le Douglas et le Pin par rapport aux essences feuillues (voir Ponge *et al.*, 1986 pour un exemple). La réduction de la pédofaune broyeuse et fousseuse est probablement causée par l'acidification du sol et les caractéristiques de la litière (dureté, épaisseur des cires, composition). Cette réduction de la pédofaune peut ralentir le recyclage des éléments contenus dans les litières et pourrait être à l'origine de la diminution de la structuration du sol observée par plusieurs auteurs (par exemple : Nys, 1987).

### CONSÉQUENCES POTENTIELLES SUR LA FERTILITÉ DES SOLS FORESTIERS

Le choix d'une essence a une influence notable sur le fonctionnement biogéochimique du sol qui peut avoir des conséquences sur sa fertilité chimique. Au vu des données de la littérature scientifique, nous pouvons distinguer trois groupes d'essences par rapport à leur capacité à mettre en danger, à long terme, la fertilité chimique des forêts monospécifiques relativement denses :

- les essences à risque élevé : l'Épicéa commun, le Pin sylvestre et le Mélèze d'Europe <sup>(7)</sup> ;
- les essences à risque modéré : le Sapin pectiné et le Douglas ;
- les essences à risque faible : le Hêtre, le Chêne sessile et le Chêne pédonculé.

Toutefois, il ne s'agit là que de risques potentiels. En effet, la capacité de l'écosystème à supporter des apports d'acidité sans perdre de son potentiel de fertilité varie énormément d'un site à un autre. La plantation d'espèces comme l'Épicéa commun ne représente un danger pour la fertilité totale de l'écosystème que lorsque le sol a un pouvoir tampon <sup>(8)</sup> et des réserves de fertilité faibles. C'est pourquoi, les recommandations de gestion concernant les essences dépendent du type de station. Par ailleurs, l'effet des essences dépend également du traitement sylvicole : plus les peuplements sont denses et plus l'effet est prononcé.

### CARACTÉRISATION DE LA SENSIBILITÉ DE LA STATION

Avant toute intervention et choix d'essence, le gestionnaire doit prendre en compte :

- L'intérêt patrimonial du site (Rameau et Olivier, 1991). Ainsi, il est préférable de ne pas intervenir sur un écosystème ou un groupe d'écosystèmes ayant une forte qualité biologique (par exemple : espèces rares ou typiques ; paysage régional peu répandu) ou une forte valeur biologique (par exemple : protection contre l'érosion).
- Les besoins autoécologiques de chaque essence. Il s'agit, notamment, des conditions relatives au climat (par exemple l'intensité des gelées hivernales), au bilan hydrique (réserve utile, intensité de la sécheresse estivale...), à l'engorgement, à la profondeur du sol ou à la topographie (voir Lanier, 1986 ; Rameau *et al.*, 1989 ; ONF, 1999). Notons que ces critères sont fondamentaux dans le choix de l'essence mais qu'ils ne constituent pas l'objet de cet article, essentiellement centré sur l'impact des essences sur la fertilité chimique des sols.
- La sensibilité de la station aux modifications de fertilité chimique. Les sols peu épais (< environ 60 cm) doivent faire l'objet d'une gestion particulière et ne sont donc pas abordés dans la présente

(7) Le classement du Mélèze se base sur les travaux de Ranger *et al.* (1990) et sur des données non publiées (In : Nys, 1987 ; Ranger, communication personnelle).

(8) Le pouvoir tampon est la capacité à neutraliser les acides (et les bases).

étude. Les sols ont été classés en trois catégories : peu sensibles ; intermédiaires ; très sensibles. La détermination de la catégorie à laquelle appartient un sol donné se fait à partir de sa composition chimique complète ou, à défaut, à partir de la composition du matériau parental et de caractéristiques globales du sol :

– composition chimique du sol (tableau IV, ci-dessous). Si toutes les variables dépassent le seuil supérieur, la station est considérée comme peu sensible. À l'inverse, si toutes les variables

Tableau IV **Détermination de la catégorie de sensibilité des sols<sup>(a)</sup>  
à partir de leur composition chimique (Bonneau et Ranger, 1999)**

Composition du sol	Variable	Catégorie de sol		
		très sensible	intermédiaire	peu sensible
Concentration par unité de masse	K (cmol <sub>c</sub> /kg) <sup>(b)</sup>	< 0,08	[0,08 ; 0,13]	> 0,13
	Ca (cmol <sub>c</sub> /kg) <sup>(b)</sup>	< 0,20	[0,20 ; 1,00]	> 1,00
	Mg (cmol <sub>c</sub> /kg) <sup>(b)</sup>	< 0,15	[0,15 ; 0,40]	> 0,40
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/kg) <sup>(c)</sup>	< 0,04	[0,04 ; 0,07]	> 0,07
	matière organique (%)	< 3	[3 ; 6]	> 6
	C/N	> 23	[23 ; 19]	< 19
Quantité par hectare <sup>(d)</sup>	K (kg/ha)	< 80	[80 ; 130]	> 130
	Ca (kg/ha)	< 100	[100 ; 520]	> 520
	Mg (kg/ha)	< 50	[50 ; 125]	> 125
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha) <sup>(c)</sup>	< 100	[100 ; 180]	> 180
	N (kg/ha)	< 1 500	[1 500 ; 3 400]	> 3 400

(a) Analyse sur les 20 premiers centimètres du sol.

(b) Centimoles de charges par kg de sol (1 cmol de K<sup>+</sup> équivaut à 1 cmol<sub>c</sub> ; 1 cmol de Ca<sup>2+</sup> ou Mg<sup>2+</sup> équivaut à 2 cmol<sub>c</sub>).

(c) Méthode Duchaufour et Bonneau (1959).

(d) Avec une densité apparente de 1,1.

Tableau V **Détermination de la catégorie de sensibilité des sols  
à partir du matériau parental et de caractéristiques générales du sol**

Critère	Variable	Catégorie de sol		
		très sensible	intermédiaire	peu sensible
Composition de la roche-mère <sup>(a)</sup> (teneurs en % d'oxydes)	Si	> 65	[65 ; 52[	≤ 52
	(Si + Al) / (Fe + Mg)	≥ 10	[10 ; 5[	≤ 5
	(Na + Ca + Fe + Mg)	≤ 15	[15 ; 25]	> 25
CEC et taux de saturation du sol <sup>(b)</sup>	CEC (cmol <sub>c</sub> /kg)	≤ 10	]10 ; 25]	> 25
	taux de saturation (%)	≤ 20	]20 ; 70]	> 70
Acidité du sol <sup>(b)</sup>	pH <sub>eau</sub>	≤ 4,2	]4,2 ; 5,0]	> 5,0
Présence de carbonates	Effervescence à l'acide (HCl)	nulle	faible	notable à forte
Recyclage des nutriments	Accumulation de litière (t/ha)	–	–	mull < 5,0

(a) La plupart des cartes géologiques au 1/50 000 fournissent dans leur notice des compositions de roches.

(b) Analyse sur le volume de sol situé entre 5 et 10 centimètres de profondeur.



sont en deçà du seuil inférieur, la station est considérée comme très sensible. Dans les autres cas, la station est considérée comme intermédiaire.

— composition du matériau parental et caractéristiques globales du sol (tableau V, p. 514). La détermination de la catégorie de sensibilité suit le même principe que ci-dessus : si toutes les variables dépassent le seuil supérieur, la station est considérée comme peu sensible. À l'inverse, si toutes les variables sont en deçà du seuil inférieur, la station est considérée comme très sensible.

## CHOIX DES ESSENCES ET TYPE DE STATION

### Station peu sensible

Dans le cas d'un sol peu sensible, le pouvoir tampon du système est suffisant pour neutraliser un surplus d'acidité lié à des activités sylvicoles relativement intensives. C'est pourquoi toutes les essences étudiées ici pourraient être plantées sur ce type de station, y compris l'Épicéa ou le Pin qui sont les plus néfastes pour la fertilité chimique du sol. De plus, une sylviculture relativement intensive ne devrait pas mettre en péril la fertilité chimique de ce type de station.

### Station très sensible

Les sols très sensibles ont un pouvoir tampon très faible. Il convient donc d'éviter de planter les essences provoquant une forte acidification du milieu. La plantation d'essences résineuses, si elle conduit à une production généralement plus élevée que celle des feuillus (Vannière, 1984), peut provoquer ici une perte importante de fertilité à moyen terme, ainsi qu'une acidification du milieu. En conséquence, la conduite à tenir dépend d'abord des objectifs de production de bois.

- *1<sup>er</sup> cas : les objectifs de production sont faibles*

Nous considérerons l'objectif de production comme faible lorsque, pour une essence donnée, la longueur de la révolution est supérieure à celle communément appliquée et que le volume de bois exporté est faible. Dans ce cas, les plantations d'essences résineuses telles que l'Épicéa ou le Pin sont à éviter. Il est préférable de privilégier les essences présentes à l'état naturel ou les plantations d'essences feuillues telles que le Hêtre ou les Chênes.

De plus, la gestion sylvicole devra être adaptée de manière à éviter toute perte de fertilité (par exemple : exportation uniquement du bois de tronc sans écorce ; abandon sur place des rémanents ; régénération naturelle des peuplements ; Bonneau et Ranger, 1999).

- *2<sup>e</sup> cas : les objectifs de production sont relativement élevés*

Nous considérerons l'objectif de production comme élevé lorsque l'ensemble des opérations sylvicoles visent à accroître rapidement le volume de bois sur pied et la rentabilité (plantation dense ; récolte aux environs de l'âge d'accroissement maximum ; récolte de l'arbre entier). Dans ce cas, l'aménagiste peut décider de planter malgré tout des essences productives et croissant rapidement. Ce type d'aménagement a de fortes chances de provoquer des pertes de fertilité chimique néfastes pour la pérennité de l'écosystème et de la production future. C'est pourquoi il est nécessaire d'appliquer une gestion sylvicole adaptée et de prévoir des mesures compensatoires (restitutions par amendements et fertilisations). Il est également possible d'atténuer les effets des essences les plus néfastes en les mélangeant lors de la plantation avec des essences peu acidifiantes et altérantes. Notons enfin que, même avec des restitutions chimiques importantes, il est préférable de limiter l'utilisation d'engins lourds sur les sols sensibles au tassement. En effet, le tassement d'un

sol est préjudiciable à la porosité et à la matière organique de celui-ci, deux caractéristiques importantes dans le bon fonctionnement des sols forestiers.

### Station intermédiaire

Le choix d'une essence pour les stations intermédiaires se fait en prenant en compte l'ensemble des critères permettant d'évaluer la sensibilité de la station et les contraintes qui s'y appliquent (tableau VI, ci-dessous). Ici, il n'est pas possible d'établir un système de notation de chaque critère permettant une évaluation chiffrée de la situation. En effet, chaque facteur n'a pas la même importance et la pondération de ceux-ci peut varier géographiquement. L'aménagiste devra donc apprécier l'importance relative de chaque critère afin d'estimer la sensibilité de la station. En fonction de cette estimation, il sera alors possible de sélectionner l'essence la plus appropriée aux exigences économiques et écologiques ainsi qu'aux impératifs biogéochimiques de la situation.

### CONCLUSIONS

Toute intensification de la sylviculture, y compris le changement d'essence et de traitement, doit être précédée d'une estimation de son impact sur la fertilité chimique du sol, qui est une ressource

Tableau VI **Caractérisation de la sensibilité d'une station intermédiaire**

Critère	Variable	Impact de la variable sur la sensibilité			
		très négatif	négatif	positif	très positif
Composition de la roche-mère <sup>(a)</sup> (teneurs en % d'oxydes)	Si (Si + Al) / (Fe + Mg) (Na + Ca + Fe + Mg)	[65; 61[ [10; 9[ [15; 18]	[61; 58[ [9; 7,5[ [18; 20]	[58; 55[ [7,5; 6[ [20; 22]	[55; 52[ [6; 5[ [22; 25]
CEC et saturation du sol <sup>(b)</sup>	CEC (cmol <sub>c</sub> /kg) taux de saturation (%)	[10; 14] [20; 35]	[14; 18] [35; 45]	[18; 22] [45; 55]	[22; 25] [55; 70]
Acidité du sol <sup>(b)</sup>	pH	]4,2; 4,4]	]4,4; 4,6]	]4,6; 4,8]	]4,8; 5,0]
Climat	précipitations (mm/an)	≥ 1 300	]1 300; 1 100]	]1 100; 900]	< 900
Pollution atmosphérique <sup>(c)</sup> (kg/ha/an)	(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	≥ 14,0 ≥ 16,0	]14,0; 8,5] [16,0; 9,5]	]8,4; 2,8] [9,5; 3,2]	< 2,8 < 3,2
Sylviculture envisagée	type de régénération âge de récolte <sup>(d)</sup> type de récolte <sup>(e)</sup>	coupe à blanc ≤ 1 âam <sup>(d)</sup> arbre entier	- ]1,0; 1,5] tc + éc + br	- [1,5; 2,0] tc + éc	naturelle > 2 âam <sup>(d)</sup> tc
Profondeur du sol	prof. (cm)	]60; 80]	]80; 120]	]120; 200]	> 200
Histoire du sol	type d'activité <sup>(f)</sup>	-	appauvrissante	fertilisante	-

(a) La plupart des cartes géologiques au 1/50 000 fournissent des compositions de roches dans leur notice.

(b) Analyse sur le volume de sol situé entre 5 et 10 centimètres de profondeur.

(c) Si aucune donnée chiffrée n'est disponible, le gestionnaire pourra se référer à la liste suivante des zones recevant de forts dépôts atmosphériques liés à la pollution : Ardennes ; Alsace-Lorraine ; couloir Rhodanien ; bassins de la Gironde et de la Seine.

(d) âam = âge d'accroissement maximum.

(e) tc = tronc ; éc = écorce ; br = branches.

(f) Appauvrissante : pâtures, forêts intensément exploitées, forêts sotrées ; forêts essartées ; fertilisante = anciens champs ; anciens jardins.

non renouvelable. La plantation d'une essence donnée ne conduit pas toujours à une perte, ou au maintien, de la fertilité du sol. L'effet des essences et de leur traitement est en forte interaction avec les conditions de station et ce sont surtout les caractéristiques géologiques, pédologiques et climatiques qui déterminent la fertilité et la sensibilité du milieu. Un outil d'aide à la décision a été proposé afin de caractériser la station. Sur les stations très sensibles, certaines essences comme l'Épicéa commun ou le Pin sylvestre sont à éviter, ou devront être accompagnées d'une sylviculture très extensive et éventuellement d'amendements.

Laurent AUGUSTO  
Jacques RANGER – Maurice BONNEAU  
Équipe Cycles biogéochimiques  
INRA-Centre de Nancy  
F-54280 Champenoux

## BIBLIOGRAPHIE

- AUGUSTO (L.). — Étude de l'impact de quelques essences forestières sur le fonctionnement biogéochimique et la végétation de sols acides. — Université de Nancy I, 1999. — 161 p. (Thèse de Doctorat).
- AUGUSTO (L.), RANGER (J.), PONETTE (Q.), RAPP (M.). — Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount. — *Annals of Forest Sciences*, vol. 57, n° 4, 2000, pp. 305-392.
- BADEAU (V.), DAMBRINE (E.), WALTER (Ch.). — Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. — *Étude et Gestion des Sols*, 6, 1999, pp. 165-180.
- BERGKVIST (B.), FOLKESON (L.). — The influence of tree species on acid deposition, proton budgets and element fluxes in south Swedish forest ecosystems. — *Ecological Bulletin*, 44, 1995, pp. 90-99.
- 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.
- CINOTTI (B.). — Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle. — *Revue forestière française*, vol. XLVIII, n° 6, 1996, pp. 547-562.
- DEHARVENG (L.). — Soil Collembola diversity, Endemism, and reforestation : A case study in the Pyrenées (France). — *Conservation Biology*, vol. 10, 1996, pp. 74-84.
- DUCHAUFOUR (P.), BONNEAU (M.). — Une nouvelle méthode de dosage du phosphore assimilable dans les sols forestiers. — *Bulletin de l'Association française pour l'Étude du Sol*, 4, 1959, pp. 193-198.
- FICHTER (J.), DAMBRINE (E.), TURPAULT (M.-P.), RANGER (J.). — Base cation supply in spruce and beech ecosystems of the Strengbach catchment (Vosges mountains, N-E France). — *Water Air and Soil Pollution*, 105, 1998, pp. 125-148.
- KOERNER (W.). — Impacts des anciennes utilisations agricoles sur la fertilité du milieu forestier actuel. — Université de Paris VII, 1999. — 236 p. (Thèse de Doctorat).
- LANIER (L.). — Précis de sylviculture. — Nancy : ENGREF, 1986. — 468 p.
- LELONG (F.), DUPRAZ (C.), DURAND (P.), DIDON-LESCAT (J.-F.). — Effects of vegetation type on the biogeochemistry of small catchments (Mont Lozère, France). — *Journal of Hydrology*, 116, 1990, pp. 125-145.
- MATZNER (E.). — Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling. — Université de Göttingen (Allemagne), 1988. — 217 p. (Thèse de Doctorat).
- MATZNER (E.), ULRICH (B.). — The turnover of protons by mineralization and ion uptake in a beech (*Fagus sylvatica*) and a Norway spruce Ecosystem. In : Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems / B. Ulrich, J. Pankrath Eds. Proceedings of a workshop, Göttingen. — London : D. Reidel Publishing Company, 1983. — pp. 93-103.
- NYS (C.). — Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier. Conséquences des enrésinements. — Université de Nancy I, 1987. — 207 p. (Thèse de Doctorat).

- OFFICE NATIONAL DES FORÊTS. — L'Eau et la forêt. — *Bulletin technique de l'ONF*, n° 37, 1999, 240 p.
- PONGE (J.-F.), VANNIER (G.), ARPIN (P.), DAVID (J.-F.). — Caractérisation des humus et des litières par la faune du sol. Intérêt sylvicole. — *Revue forestière française*, vol. XXXVIII, n° 6, 1986, pp. 509-516.
- RAMEAU (J.-C.), MANSION (D.), DUMÉ (G.), TIMBAL (J.), LECOINTE (A.), DUPONT (P.), KELLER (R.). — Flore forestière française. Guide écologique illustré. Tome 1 Plaines et collines. — Paris : IDF ; DERF Ministère de l'Agriculture et de la Forêt ; ENGREF, 1989. — 1785 p.
- RAMEAU (J.-C.), OLIVIER (L.). — La Biodiversité forestière et sa préservation. Intérêt patrimonial de la flore, de la végétation et des paysages forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° spécial "Patrimoines naturels forestiers", 1991, pp. 19-27.
- RANGER (J.), MARQUES (R.), COLIN-BELGRAND (M.), FLAMMANG (N.), GELHAYE (D.). — The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. — *Forest Ecology and Management*, 72, 1995, pp. 167-183.
- RANGER (J.), ROBERT (M.), BONNAUD (P.), NYS (C.). — Les Minéraux-test, une approche expérimentale *in situ* de l'altération biologique et du fonctionnement des écosystèmes forestiers. Effets des types de sols et des essences feuillues et résineuses. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 47, 1990, pp. 529-550.
- VANNIÈRE (B.). — Tables de production pour les forêts françaises. — 2<sup>e</sup> édition. — Nancy : ENGREF, 1984. — 158 p.

---

**INFLUENCE DES ESSENCES SUR LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS. CONSÉQUENCES SUR LES CHOIX SYLVICOLES (Résumé)**

Une analyse bibliographique permet de déterminer l'impact de quelques essences forestières françaises majeures sur la fertilité chimique des sols pauvres. Trois groupes d'essences ont été répertoriés : celles qui présentent un risque élevé pour le maintien de la fertilité chimique des sols (Épicéa commun, Pin sylvestre, Mélèze d'Europe) ; celles qui présentent un risque modéré (Sapin pectiné, Douglas) ; celles qui présentent un risque faible (Hêtre, Chêne sessile, Chêne pédonculé).

Une méthode d'estimation de la sensibilité chimique des sols forestiers à partir de critères simples a été proposée. Les critères reposent sur la composition chimique du sol, celle du matériau parental du sol, et sur les caractéristiques stationnelles et sylvicoles de la station concernée.

**THE INFLUENCE OF SPECIES ON THE CHEMICAL FERTILITY OF SOILS - CONSEQUENCES FOR SILVICULTURAL CHOICES (Abstract)**

The impact of a number of major species used in French forests on the chemical fertility of poor soils is derived from a bibliographical analysis. Three groups of species have been examined – those that present a high risk for maintaining chemical fertility in soils (common spruce, Scots pine, European larch), those that present a moderate risk (silver fir, Douglas fir), and those that present a low risk (beech, sessile oak, pedunculate oak).

A method based on simple criteria for assessing the chemical sensitivity of forest soils is proposed. The criteria are derived from the chemical composition of the soil and of its parent material and from the site's features and silvicultural characteristics.

---