

Conséquences des mises à blanc sur la qualité de l'eau et des sols

Article rédigé sur base d'une étude réalisée dans le cadre de la convention "sectorialisation de l'espace forestier dans la zone 5B" entre le Ministère de la Région Wallonne et la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux d'une part et l'Université Catholique de Louvain d'autre part.

En région tempérée, la pratique de la mise à blanc" provoque simultanément une augmentation de la minéralisation de la matière organique (LAU-DELOUT *et al.*, 1978) et une réduction du prélèvement des éléments minéraux par la végétation.

Lors de cette minéralisation, des nitrates sont produits et, s'ils ne sont pas retenus par la végétation, sont lessivés.

Dans ce cadre, l'article tentera de répondre à trois questions.

- Dans quelles conditions les risques de production et de lessivage de nitrates suite à une mise à blanc sont-ils importants?

- Quels risques présentent cette production et ce lessivage sur la qualité de l'eau et du sol?

- Comment le choix des essences et l'éducation des peuplements par les éclaircies peuvent-ils limiter ces risques?

Les grands facteurs influençant la production et le lessivage des nitrates

Les résultats des études traitant de la quantité de nitrates produits et lessivés suite à une coupe à blanc sont très contrastés: les concentrations moyennes annuelles mesurées aux exutoires de bassins versants entièrement mis à blanc vont de quelques centièmes de ppm* à plus de 50 ppm et la durée de l'effet d'une coupe sur la libération de nitrates peut aller de 1 à 5-6 ans. (MARTIN & HAAR, 1989; REYNOLDS *et al.*, 1992; LIKENS *et al.*, 1970).

Pour comprendre cette disparité et évaluer les risques pour les régions forestières tempérées, il importe de décrire les facteurs principaux qui régissent la production et le lessivage de nitrates.

Les conditions édaphiques et climatiques exercent un rôle essentiel dans ces mécanismes car elles influencent la dynamique de la matière organique à la fois durant la vie du peuplement et après la mise à blanc. En outre, elles conditionnent l'abondance de la végétation** en sous-étage ainsi que la vitesse de reprise de celle-ci après l'exploitation.

En conditions édaphiques et climatiques favorables (dans les stations où les sols sont riches en bases et le climat est doux et humide), de nombreux organismes lignivores et minéralisateurs sont présents. Dans ce cas, quel que soit le type de peuplement, l'accumulation de matière organique est faible. Après une mise en lumière brutale, la diversité et l'activité de la pédofaune et de la pédoflore sont telles que la minéralisation de la faible quantité de matière organique restante et des déchets de coupe provoquerait un « pic » de production de nitrates relativement élevé mais durant une courte période (VITOUSEK *et al.*, 1982).

De plus, en conditions édaphiques et climatiques favorables, la végétation en sous-bois est généralement plus exubérante. Après l'exploitation des arbres, cette végétation se développe rapidement et contribue à prélever l'essentiel des nitrates produits.

Pour toutes ces raisons, les risques de lessivage de nitrates sont très limités dans des stations riches à humus de type mull comme par exemple en Condroz, en Famenne, en Calestienne ou en Gaume.

En conditions édaphiques et climatiques défavorables (dans les sites pauvres et acides et au climat plus froid ou plus sec), le problème est plus complexe. Dans ces stations, la matière organique a tendance à s'accumuler (faible présence notamment d'organismes lignivores) et la végétation en sous-bois est moins vigoureuse.

L'acidité du sol semble être un frein à la nitrification. Toutefois, des micro-organismes nitrificateurs se développent dans les sols acides (STEVENS & HORNUNG, 1988; TIETEMA *et al.*, 1992). De plus, l'acidité dans un sol n'est

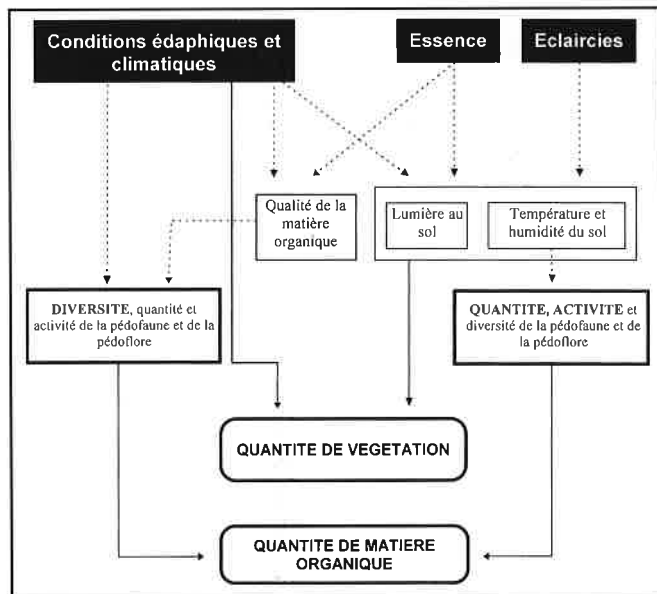


Fig. 1. Influence des conditions stationnelles, du choix de l'essence et de l'intensité de l'éclaircie sur les dynamiques de la matière organique et de la végétation.



Lorsque les rémanents sont mis en andain, la recolonisation par la végétation naturelle est plus rapide, ce qui limite le lessivage des nitrates. Par contre, la préparation du sol entraîne une destruction quasi complète de la végétation ce qui accroît les risques de lessivage.



pas homogène et il est très probable de trouver des micro-sites dont le pH plus élevé permet l'activité de bactéries moins acidophiles (DOMMERGUES & MANGENOT, 1970; DUCHAUFOR, 1988; THIERRON, 1995). Dans nos Ardennes, les processus de nitrification après coupe à blanc se développent également de manière régulière même dans des conditions de forte acidité (couche organique, pH eau = 3,5 et pH KCl = 3; Horizon Ah, pH eau = 4 et pH KCl = 3,6) (WEISSEN, 1977).

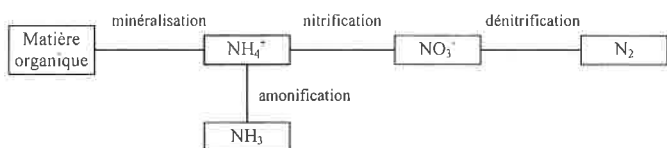
Dès lors, si l'accumulation de matière organique est importante et la végétation en sous-étage absente avant la coupe, la mise en lumière brutale du sol, après exploitation des arbres, améliore les conditions d'humidité et de température et augmente la minéralisation et la nitrification. Dans ce cas, la production de nitrates pourrait être importante. Elle atteindrait un niveau moindre que dans des sites plus riches mais elle se maintiendrait plus longtemps (VITOUSEK *et al.*, 1982). Dans ces stations, la reprise de la végétation est lente et les nitrates sont, parce que peu prélevés, potentiellement lessivables.

Les risques de lessivage de nitrates dans les stations pauvres et acides caractérisées par des humus de type moder à dysmoder seraient donc plus grands que dans les situations plus favorables.

Outre le rôle de la végétation, les pertes en nitrates sont également fonction de la pluviosité; les nitrates étant très peu retenus par le sol, les pertes sont d'autant plus fortes que les précipitations sont élevées. LIKENS *et al.* (1978) ont néanmoins montré que des pertes importantes en nitrates pouvaient se produire dans des sites où la pluviosité était de l'ordre de 1200 mm/an répartie régulièrement sur l'année, c'est-à-dire des pluviosités proches de celles rencontrées en Ardenne. Le lessivage sera d'autant plus marqué que les sols sont filtrants et/ou qu'ils permettent d'importants écoulements hypodermiques (écoulement à travers les premières dizaines de centimètres du sol capable d'apporter des quantités non négligeables d'eau aux exutoires).

Certains phénomènes biologiques et chimiques peuvent réduire la production et le lessivage des nitrates. La volatilisation de l'ammonium en ammoniac (qui soustrait une part de l'azote à la nitrification) est effective dans les sols basiques ou légèrement acides mais reste, en général, peu importante en quantité (VITOUSEK *et al.*, 1982). La dénitrification est significative en condition d'anaérobiose, régnant notamment dans les sols hydromorphes (DEBBAUT *et al.*, 1991). Elle peut également apparaître dans des sols dépourvus de marques d'hydromorphie où elle pourrait atteindre voire dépasser les 10% (VAN PRAAG & WEISSEN, 1984).

Quelques étapes du cycle de l'azote.



Certaines opérations effectuées pendant ou après l'exploitation peuvent également modifier la dynamique de la minéralisation et de la végétation. Ainsi, lorsque les rémanents de coupes sont mis en andain, le lessivage de nitrates est moindre en raison d'une recolonisation plus rapide et plus abondante de la végétation naturelle (FAHEY *et al.*, 1991 (a)). Par contre, les techniques de préparation de sols qui détruisent la végétation augmentent le risque de lessivage.

En résumé, pour les régions forestières tempérées, le risque de lessivage des nitrates serait important dans les sols perméables à humus de type moder à dysmoder lorsque l'accumulation de la matière organique est importante et lorsque la végétation est quasi absente. Ce n'est que dans ces conditions qu'une mise à blanc risque de perturber la qualité des eaux et des sols.

Conséquences de la production et du lessivage des nitrates

Les risques de contamination des eaux de surface et souterraines par les nitrates suite à une mise à blanc ne sont réels que dans certaines conditions. Tout d'abord, les risques de production et de lessivage de nitrates sont limités aux stations où la quantité de matière organique accumulée est importante et où la reprise de la végétation est lente ou retardée. Ensuite, dans nos régions, les surfaces de coupes sont généralement de faible étendue (1 à 10 ha) et sont espacées dans le temps (de 60 à 200 ans). Pour ces deux raisons, les risques de pollution ne concernent pas les grandes nappes ou les rivières importantes mais plutôt, de manière ponctuelle, les ruisseaux ou les nappes peu profondes des bassins versants de faible surface. En effet, dans ces bassins versants, l'effet

de dilution est plus faible puisqu'une coupe peut couvrir une proportion importante du bassin.

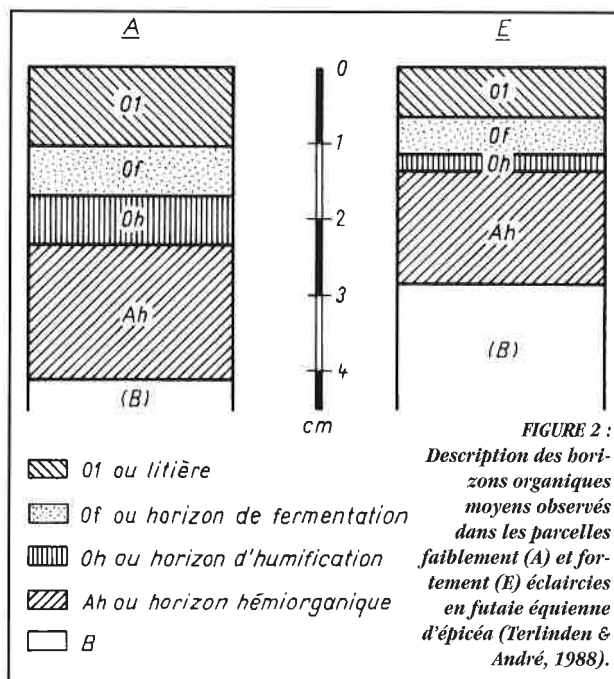
C'est ainsi que le risque d'atteindre une concentration nocive pour l'homme (50 ppm de nitrates, directive européenne 80/778) dans les captages d'eau en forêt est faible. Par contre, dans les eaux de surfaces naturellement pauvres en nitrates, une augmentation de quelques ppm de cet élément peut entraîner des risques d'eutrophisation.

En ce qui concerne les risques de détérioration de la qualité du sol suite à une mise à blanc, la prudence s'impose surtout dans les sols sur des substrats acides qui sont pauvres en bases échangeables. En effet, d'une part, la mise en lumière du sol favorise la réaction de nitrification qui génère, par la production de H⁺, une acidification supplémentaire du sol; d'autre part, le lessivage des nitrates produits entraîne par équilibre ionique une perte de cations basiques et donc une diminution du taux de saturation, déjà faible, de ces sols.

Les choix sylvicoles à adopter dans l'optique d'une mise à blanc

La quantité de matière organique présente au moment de la mise à blanc joue un rôle important puisqu'elle influence la quantité potentielle de nitrates produits à la suite d'une coupe. Cette quantité dépend principalement de l'activité, de l'abondance et de la diversité des organismes minéralisateurs responsables du recyclage de la matière organique. En outre, la qualité de la litière influence le taux de minéralisation et donc à la fois la durée de la production et la quantité de nitrates produits. Ce taux sera d'autant plus élevé que les réserves en azote et en carbone organique encore facilement minéralisables seront grandes.

La présence de végétation herbacée et arbustive, de régénération naturelle ou artificielle assure un certain prélèvement des nitrates et limite ainsi leur lessivage.



Les dynamiques de la matière organique et de la végétation constituent donc les éléments de base qui influencent la production et le lessivage des nitrates. Si le forestier veut exploiter les peuplements par coupe à blanc, il est intéressant d'analyser comment les choix sylvicoles, et plus particulièrement les choix des essences et de l'intensité des éclaircies, agissent sur ces dynamiques. Néanmoins, les choix du forestier seront tributaires du rôle prépondérant que jouent, dans ce domaine, les conditions édaphiques et climatiques (fig. 1).

Influence des conditions édaphiques et climatiques

Les facteurs déterminant la quantité de matière organique accumulée et le type d'humus

La richesse du sol en fer, en calcium, en phosphore, en carbone organique dissous (élément énergétique indispensable pour les hétérotrophes) et en azote exerce une influence considérable sur la diversité et la quantité des organismes du sol (VITOUSEK *et al.*, 1982; JOHNSON & EDWARDS, 1979) et donc sur l'évolution de la quantité de matière organique durant la vie du peuple-

ment (fig. 1). TOUTAIN (1974) montre le rôle essentiel du fer sur le bon développement de la pourriture blanche responsable en grande partie de la ligninolyse et de la dégradation des tanins.

Les lombrics, du genre épianécique, responsables d'une transformation rapide du matériel foliaire et d'une incorporation active et profonde des substances organiques dans les horizons minéraux, sont le plus souvent rencontrés abondamment dans les sols riches en bases (TOUTAIN, 1981).

L'aération du sol est très importante car, en anaérobiose (nappe d'eau proche de la surface), des organismes tels que les vers et la pourriture blanche sont exclus ce qui ralentit la décomposition de la matière organique.

Le recyclage rapide de la matière organique est également favorisé si les conditions de température et d'humidité de la station sont optimales pour la quantité et l'activité de la pédofaune et de la pédoflore du sol (fig. 1).

Le type d'humus est également fortement lié aux facteurs écologiques stationnels puisqu'il dépend de la diversité et de l'activité microbiologique. Dans des conditions climatiques et édaphiques favorables, l'humus est de type mull et l'accumulation de litière au cours de la vie d'un peuplement est généralement très limitée; elle est plus importante dans des stations au climat plus rude et au sol moins riche où l'humus est de type moder à mor.

Les facteurs déterminant l'abondance de la végétation du sous-bois

Ces facteurs sont approximativement les mêmes que ceux qui régissent le cycle de la matière organique. C'est ainsi que, pour un même peuplement (composition en essences et surface terrière identiques), la végétation en sous-bois est plus exubérante (si la luminosité au sol le permet) dans une station riche en bases avec un climat doux et humide (humus mull) que dans une station plus pauvre (fig. 1).

La stabilité des formes d'humus

Pour les écosystèmes dont les sols sont à texture fine et riches en éléments échangeables (sols carbonatés ou à fortes réserves minérales), le risque d'altération biologique et chimique encouru à la suite de certaines pratiques sylvicoles est faible. Par contre, ce risque est beaucoup plus élevé pour les sols dont la désaturation du complexe adsorbant a atteint un niveau extrême.

Des sols naturellement acides, pauvres en fer et en bases échangeables, risqueraient plus facilement de voir évoluer leur humus d'un moder à un dysmoder par un choix inadéquat d'essence ou de l'intensité des éclaircies (BONNEAU *et al.*, 1979; TOUTAIN, 1981).

Cette évolution aura des conséquences défavorables sur la quantité et la qualité de matière organique accumulée ainsi que sur la présence de la végétation en sous-étage avant la mise à blanc.

Impact de l'intensité des éclaircies

Des éclaircies de forte intensité (de préférence mixtes) sont susceptibles d'améliorer les conditions de température, d'humidité et de lumière au niveau du sol ce qui permet d'une part à la végétation en sous-bois de se développer et, d'autre part, de favoriser la quantité et l'activité des organismes du sol et donc le recyclage de la matière organique (fig. 1).

Ceci expliquerait les résultats obtenus pour des expériences d'éclaircies très fortes de peuplements d'épicéa situés en Ardenne et en Famenne. Les placettes éclaircies de cette manière présentaient une couche de matière organique moins épaisse que celles éclaircies plus faiblement (TERLINDEN & ANDRE, 1988; ANDRE *et al.* 1994).

PIENE & VANCLEVE (1978) ont également mis en évidence pour des épicéas (*Picea glauca*) de 70 ans (en Alaska) un effet positif des éclaircies très fortes sur le recyclage de la matière organique.

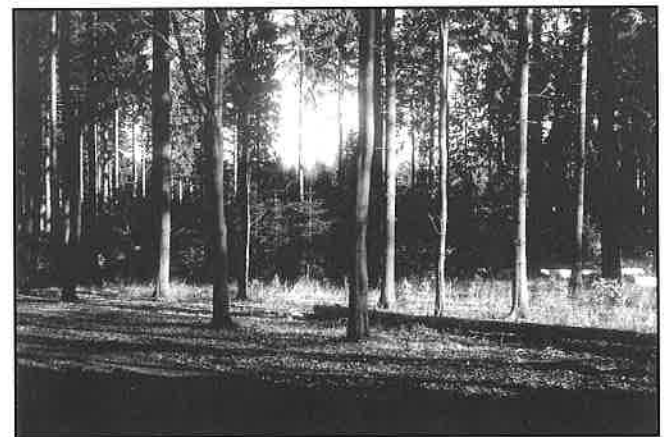
Cependant, d'autres auteurs observent un effet nul ou même négatif de l'éclaircie sur le taux de décomposition de la litière. Aucun impact de l'éclaircie sur la vitesse de décomposition de la litière pour des peuplements de pin rouge et de chêne rouge n'a été relevé par KIM *et al.* (1996). Une diminution du taux de décomposition de la matière organique suite à une coupe de régénération dans des peuplements de chêne rouge a également été observée (YIN *et al.* 1989).

En réalité, la corrélation négative ou positive entre les éclaircies et la vitesse de décomposition de la litière semble s'expliquer principalement par le fait que l'effet de l'éclaircie est variable suivant le climat. Lorsque, dans un peuplement fermé, les conditions de température et d'humidité ne sont pas optimales pour l'activité de la pédofaune et de la pédoflore, l'éclaircie aura un effet positif sur le taux de décomposition de la litière puisqu'elle améliorera ces conditions.

En revanche, si l'éclaircie n'améliore pas ou même détériore les conditions



La végétation de sous-bois, une question d'essence mais aussi d'éclaircie: ci-dessus une peșsière, ci-dessous une bêtraie...



L'exploitation par bandes étroites modifie peu les conditions écologiques de la station. L'augmentation de la minéralisation et donc de la production de nitrates y seront limitées. En outre, les coupes de faible superficie et espacées dans le temps évitent, en raison de l'important effet de dilution, les risques de pollutions des cours d'eau et des nappes.

d'activités des organismes du sol (sécheresse, température trop élevée,...), la décomposition de la matière organique ne sera pas plus rapide ou sera même ralentie.

Dans nos régions tempérées, et particulièrement en Ardenne, où le climat est relativement froid et humide, l'activité de la pédofaune et de la pédoflore doit être corrélée positivement avec l'intensité de l'éclaircie. En outre, l'impact de cette dernière sera d'autant plus marqué qu'elle s'applique à des peuplements composés d'essences à couvert dense (hêtre, épicéa, douglas...) puisque son effet sur la modification des conditions de température et d'humidité sera plus sensible.

Impact de l'essence

Les propriétés histo-chimiques du feuillage déterminent, en partie, la dégradabilité de la litière (fig. 1). A qualité minérale du sol égale, la composition chimique foliaire (N, P, K, Ca, Mg, Mn) diffère d'une essence à l'autre (DELECOUR & WEISSEN, 1977). Selon NOIRFALISE & VANESSE (1975), les conifères à feuilles dures (épicéa, pin) et le hêtre sont pauvres en protéines et riches en lignine ce qui leur vaut de résister davantage à l'attaque des agents de la décomposition. Sur sols pauvres plus particulièrement, du fait de la quasi absence de vers épianéciques et de pourriture blanche qui sont les principaux lignivores, la proportion de lignine par rapport à la cellulose influence fortement la vitesse de décomposition de la litière. Si le rapport est élevé, cette vitesse est considérablement réduite (BERG *et al.* 1993).

DELECOUR 1989 a classé certaines essences en fonction de la dégradabilité de leur fane en série décroissante:

aulne > frêne > orme > érable > charme > chêne > hêtre > douglas > épicéa > mélèze.

Il est reconnu que la décomposition de la litière d'une essence peut être améliorée par le mélange avec d'autres essences dont la fane est de meilleure qualité.

La structure racinaire influence, dans certains cas, la porosité et la structure d'un sol et donc l'activité microbiologique. L'épicéa, traité en peuplement équienne et éduqué par des faibles éclaircies, risque, en raison de son enrachement traçant, de modifier défavorablement la porosité et la structure des sols limoneux acides et mal drainés et d'y intensifier les phénomènes d'hydromorphie (BONNEAU *et al.*, 1979). Dans ce type de peuplements, la présence d'un sous-étage cultural et d'essences d'accompagnement à enrachement profond peut être particulièrement bénéfique.

Les structures racinaire et aérienne, le tempérament, la pérennité du couvert — éléments qui diffèrent également d'une essence à l'autre — exercent une action certaine sur les conditions de température, d'humidité du sol.

Or, ces dernières jouent un rôle important sur la quantité, l'activité de la pédofaune et la pédoflore ainsi que sur le développement de la végétation en sous bois (fig. 1). Les essences résineuses, tels l'épicéa, le douglas... à indice foliaire élevé et à couvert pérenne, créent certainement les conditions les plus sévères.

Pendant, la température et l'humidité du sol sont aussi intimement liées au traitement et notamment à l'intensité des éclaircies. Dès lors, ces dernières pourraient compenser partiellement, voire totalement, les différences qui existent entre essences (au niveau des apports de litière, de l'éclaircie au sol et de la prospection du sol) et donner à la vie du sol et au développement de la végétation les mêmes atouts, quelle que soit l'essence.

Il existe intrinsèquement des différences entre essences. Cependant, d'une part, la qualité du sol et le climat peuvent jouer un rôle important, voire primordial, sur la vitesse de dégradation de la litière (présence ou absence d'organismes lignivores par exemple, température et humidité du sol); d'autre part, les éclaircies et les mélanges peuvent compenser certains impacts intrinsèques négatifs de l'essence principale et permettre à l'écosystème de rester en équilibre avec un recyclage régulier de la matière organique et un bon développement de la végétation en sous-étage.

Conclusions

De manière générale, la mise à blanc n'est pas nuisible à la qualité chimique de l'eau et du sol. Toutefois, ce mode d'exploitation, appliqué sur une grande surface dans des sites particuliers, peut entraîner un lessivage important de nitrates et affecter ponctuellement et temporairement cette qualité.

L'analyse des facteurs qui influencent la production et le lessivage des nitrates permet d'émettre certaines hypothèses quant aux sites à risques et quant à l'impact du choix des essences et de l'intensité des éclaircies sur ces risques.

Dans des stations où les sols sont riches, où le climat est favorable (stations à humus de type mull), le risque de lessivage de nitrates suite à une mise à blanc est très limité quel que soit le type d'essence ou l'intensité des éclaircies réalisées précédemment. En effet, d'une part, l'importante activité de la pédofaune et de la pédoflore limite l'accumulation de litière durant la vie du peuplement, d'autre part, l'exubérance de la végétation après la mise à blanc assure le prélèvement de l'essentiel des nitrates produits.

Pendant, dans de tels sites, des coupes à blanc prématurées (au moment où l'accumulation de litière peut être forte) associées à l'éradication (par herbicides) de la végétation après l'exploitation pourraient engendrer de sérieux risques de lessivage de nitrates.

Dans des stations plus pauvres et au climat plus rigoureux (sols acides à humus moder et dysmoder), la possibilité d'une forte accumulation de matière organique et la reprise plus lente de la végétation après la mise à blanc augmentent le risque d'une production et d'un lessivage de nitrates pouvant avoir des conséquences sur la qualité chimique de l'eau et du sol.

Dans ces conditions, si le forestier maintient la pratique de coupes à blanc, il convient d'opter pour des choix sylvicoles qui contribuent à limiter ce risque. Ces choix passent principalement par la réalisation d'éclaircies mixtes, suffisamment fortes et fréquentes dans les peuplements à couvert dense pour permettre à la régénération naturelle ou à la végétation en sous-loge de se développer, et de limiter l'accumulation de matière organique. La présence de végétation en sous-étage peut également être obtenue par des plantations sous abri.

Le forestier peut également opter pour des coupes de forme et de taille telles qu'elles modifient peu les conditions écologiques de la station (coupe par bande étroite par exemple).

FRANÇOIS BAAR

Assistant de recherche*

PIERRE GIGOUNON

Assistant de recherche*

PIERRE ANDRÉ

Professeur de Sylviculture*

(*) : Unité des Eaux et Forêts

Fac. des Sciences Agronomiques, U. G. L.

Place Croix du Sud, 2 - 1348 Louvain-la-Neuve

(*) Dans cet article, la mise à blanc est considérée comme une coupe finale d'un peuplement de forme et de surface telles que les peuplements avoisinants n'exercent plus, au niveau des conditions écologiques, une influence sensible sur la zone exploitée. Une coupe rase par bandes étroites, par exemple, ne répondrait pas à cette définition de la mise à blanc.

(**) ppm = part par million = mg/l

(***) La végétation est un terme générique qui sous-entend: la végétation spontanée (y compris la régénération naturelle) et/ou la régénération artificielle.

Bibliographie :

- ANDRÉ F., BI CHET C., MOFFET P., 1989 P. - 1994 - Intensité de l'éclaircie en futaie résineuse. U.G.L. Faculté des sciences agronomiques. Unité des Eaux et Forêts. 123 p.
- BERG B., MACLEACHERRY, JOHANSSON M. B. - 1993 - Litter mass loss rates in late stages of decomposition at some climatically and nutritionally different pine sites - Long term decomposition in a Scots pine forest. *Canadian Journal of Botany*, 71 (5): 680-692.
- BONNEAU M., BRETHERS A., LEONG F., LEY C., PIS C., SOUCHER B. - 1979 - Effets de boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol. *Revue forestière française*, 31: 199-207.
- DEBAUT V., TICHON B., VANDER HORCHT P. - 1991 - Transfert des nitrates et qualité des eaux souterraines en Lorraine belge. In *Castion de l'azote agricole et qualité des eaux. Edited by VANDER HORCHT P., TICHON B., CEBEDOC. Actes du séminaire scientifique*. F.H. Arlon: 145-165.
- DELECOUR F., WEISSEN F. - 1977 - Les sols bruns acides. *Actes forestiers de l'Ardenne : définition et amélioration. Annales de Gembloux*, 83: 27-42.
- DELECOUR F. - 1989 - Dossier : les champignons. I. Champignons et humus (fiches). *Doc. Wallonie* 6: 3-8.
- DOMMINGUEZ M., MANGENOT P. - 1970 - *Écologie microbienne des sols*. Masson, Paris.
- DUCHAUFOUR P. - 1988 - *Pédologie*. Masson, Paris: 224p.
- FHIEY T. J., HILL M. G., STEVENS P. A., HORNUNG M., ROWLAND P. - 1991(a) - Nutrient accumulation in vegetation following conifer cut and whole-tree harvest of silver spruce plantations in north Wales. *Forestry*, 64 (3): 271-288.
- FHIEY T. J., STEVENS P. A., HORNUNG M., ROWLAND P. - 1991(b) - Decomposition and nutrient release from logging residue following conventional harvest of silver spruce in north Wales. *Forestry*, 64 (3): 290-301.
- FRANÇOIS F., ANDRÉ P., DEVILLEZ F. - 1985 - Effet de l'intensité de l'éclaircie sur l'extension du rayonnement solaire en jeunes futaies de Picea abies (L.) Karst. *Ann. Sci. For.*, 42 (3): 323-338.
- FRANÇOIS F., MERTENS Y., ANDRÉ P., DEVILLEZ F. - 1984 - Efficacité en jeunes peuplements et intensité de la première éclaircie. *Ann. Sci. For.*, 41 (4): 439-448.
- Johnson D. W. et Ehrlich R. T. - 1979 - The effects of stem girdling on biological cycles within a mixed deciduous forest in eastern Tennessee. *Oecologia*, 40: 259-271.
- KIM C., SHARIT T., JURGENSEN A.F. - 1996 - Canopy cover effects on mass loss and nitrogen and phosphorus dynamics from decomposing litter in oak and pine stands in northern Lower Michigan. *For. Ecol. Mgmt.*, 80: 13-20.
- LALUELOUT H., LAMBERT R., PHAM M. L. - 1978 - Virulence souterraine de la population microbienne du sol. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 15 (2): 147-158.
- LIKENS G. E., BOORMAN F. H., JOHNSON M. M., FISHER D. W., PIERCE R. S. - 1970 - Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed ecosystem. *Ecological Monographs*, 40 (1): 23-47.
- LIKENS G. E., BOORMAN F. H., PIERCE R. S., JOHNSON M. M. A. - 1978 - Recovery of deforested ecosystem. *Science*, 199: 492-496.
- MARIN C. W., HARR R. D. - 1989 - Logging of mature Douglas fir in western Oregon has little effect on nutrient output budgets. *Can. J. For. Res.*, 19: 35-43.
- NOIRFALISE A., VANESSE R. - 1975 - Conséquences de la monoculture des conifères pour la conservation des sols et pour le bilan hydrologique. *Association des Espaces Verts*. Bruxelles: 45 p.
- PIENE H., VANCLEVE K. - 1978 - Weight loss of litter and cellulose bags in a humid white spruce forest in interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, 8: 42-46.
- REYNOLDS B., STEVENS P. A., ADAMSON J. K., HUGHES S., ROBERTS J. D. - 1992 - Effects of clearfelling on stream and soil water aluminium chemistry in three UK forests. *Environmental Pollution*, 77: 157-165.
- STEVENS P. A., HORNUNG M. - 1988 - Nitrate leaching from a felled silver spruce plantation in *Hummocky Forest, North Wales. Soil Use and Management*, 4 (1): 3-9.
- THILANDER M., ANDRÉ P. - 1988 - Effets de l'intensité d'éclaircie sur les horizons organiques et biogéochimiques du sol en futaie équienne de Picea abies (L.) Karst. *Biogéochimie*, 32: 301-309.
- THERRON V. - 1995 - *Soil microclimate in a broad-leaf ecosystem. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain*.
- TREHVA A., DE BOER W., REIJER L., VERSTRAEVEN J. M. - 1992 - Nitrate production in nitrogen-saturated acid forest soils: vertical distribution and characteristics. *Soil Biol. Biochem.*, 24 (3): 235-249.
- TOUTAIN F. - 1974 - *Etude écologique de l'humification dans les forêts acides de la région de la Vallée de la Sambre. Thèse de Doctorat, Université de Nancy*: 1147.
- TOUTAIN F. - 1981 - Les humus forestiers. *Structure et mode de fonctionnement. Revue forestière française*, 33: 419-477.
- VAN PRAG H. J. & WEISSEN F. - 1984 - *Practical nitrogen budget and regulation through brown acid soils under beech and spruce stands. Plant and Soil*, 82: 179-191.
- Wassink P. M., Gasc J. R., Grier C. C., Johnson J. M., Petersen W. A. - 1982 - A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems. *Ecological Monographs*, 52: 155-177.
- WEISSEN F. - 1977 - Evolution of species richness in a *Forest Ecology Bull. Tech. Agron. Gembloux* 1977, 12 (1-2): 135-158.
- YINX, PERRY J.A., DYON R. K. - 1989 - Influence of canopy removal on oak forest floor decomposition. *Can. J. For. Res.*, 19: 304-314.