

Impact de la conduite des peuplements forestiers sur les ressources en eau

Impact of forest stand management on water resources

par Nathalie Bréda

Unité mixte INRA UHP, Ecologie et Ecophysiologie forestières, équipe phytoécologie, Centre INRA,
54280 Champenoux, France

Bernard Roman-Amat

Office National des Forêts, Direction régionale de Lorraine, 5 Rue Girardet, 54000 Nancy, France

The first part deals with the impact of silviculture on the volume of water available downstream. The "leaf area index" parameter, which is functionally linked with the evapotranspiration of the canopy, looks to be a promising indicator to the forester who wants to control the consumption of water in its stand. However, the examples of practical silviculture aimed at reducing (USA) or increasing (New Zealand) water consumption of forests do not seem to be applicable on a large scale in France. A fine-tuned silviculture, best suited to the french situation, is still to be devised. The second part deals with the impact of silviculture on water quality. The overall quality of waters flowing from french forests is good, but, in some places, acidification is a looming risk. There are many ways by which the silviculturist may increase locally the amount of minerals or solid particles in waters. Preventive measures are now well known and are proven to give good results : they only have to be generally enforced so that the quality of waters flowing from the forests will be guaranteed in the long run. The conclusion presents two challenges that have to be met at the catchment level ; research is needed to develop management tools to be used in selecting zones where action has to take place and the nature of interventions ; on the political level, expertise in getting land-owners participating in the water management activities has to be increased.

I ■ INTRODUCTION

Pour faire face aux responsabilités que leur donne la société par rapport à la ressource en eau, les forestiers peuvent s'appuyer sur de nombreux travaux scientifiques. Comme toutes les opérations sylvicoles sont concernées, depuis l'établissement des peuplements jusqu'aux modalités de la récolte des bois, la question des relations entre la sylviculture et les ressources en eau revêt de multiples facettes. Nous traiterons de l'impact des activités forestières sur la quantité, puis sur la qualité des eaux. En conclusion, nous examinerons selon quelles modalités les forestiers peuvent participer à la gestion collective des ressources en eau.

II ■ SYLVICULTURE ET QUANTITÉ DES EAUX

● II.1 Les mécanismes en jeu, à l'échelle du peuplement

II.1.1 L'indice foliaire, ou LAI, paramètre clé

Par sa densité de feuillage (indice foliaire ou Leaf Area Index) et sa phénologie (variations saisonnières du feuillage), le couvert des peuplements forestiers (i) intercepte les pré-

cipitations et réduit la quantité d'eau qui atteint le sol (flux entrant dans l'écosystème) et (ii) évapotranspire l'eau extraite du sol selon les conditions climatiques, plus précisément selon l'évapotranspiration potentielle (flux sortant de l'écosystème).

Ces deux flux, qui pilotent directement la quantité d'eau dans le sol, réduisent d'autant plus la quantité d'eau drainée que le peuplement présente un LAI fort pendant une période longue dans l'année (à même LAI, un résineux réduit plus la ressource en eau qu'un feuillu parce qu'il peut évapotranspirer toute l'année si l'ETP est suffisante). La résultante de ces effets est présentée sur la *figure 1*, comparant deux peuplements de LAI = 6 sous le climat de Nancy.

II.1.2 Les facteurs dont dépend l'indice foliaire

L'indice foliaire dépend de l'espèce environ 4,5 pour les chênes, 5 pour le châtaignier, 5,5 à 6 pour le hêtre, 4 pour les pins, 6 pour le Douglas, 7 pour l'épicéa. Chez les chênes, l'indice foliaire des peuplements à un seul étage – 5,1 en moyenne – est plus faible que celui des structures à plusieurs étages – 5,6 en moyenne. L'écart est significatif au seuil de 95 % (Bréda, non publié).

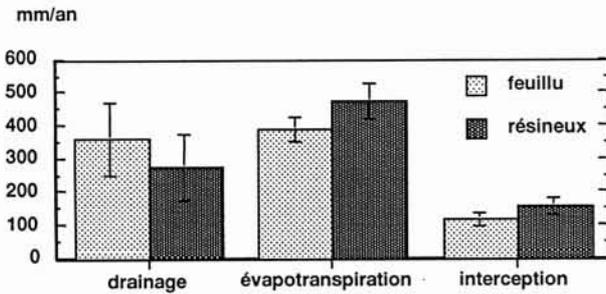


Figure 1 : Comparaison des flux d'eau moyens de deux peuplements forestiers sous le climat de Nancy.

Les relations entre intensité de l'éclaircie des arbres et réduction d'indice foliaire sont encore peu renseignées mais il n'y a pas toujours proportionnalité entre surface terrière ôtée et réduction d'indice foliaire. De plus, cet effet est transitoire et l'indice foliaire de la parcelle éclaircie tend en quelques années à revenir vers une valeur d'équilibre (dépendant de l'espèce, des potentialités du milieu). Par exemple, en taillis-sous-futaie complexe (chênes, charme, tilleul) à la Harth (chênaie de la plaine alsacienne), la relation entre l'Indice foliaire et la surface terrière est indiqué figure 2 :

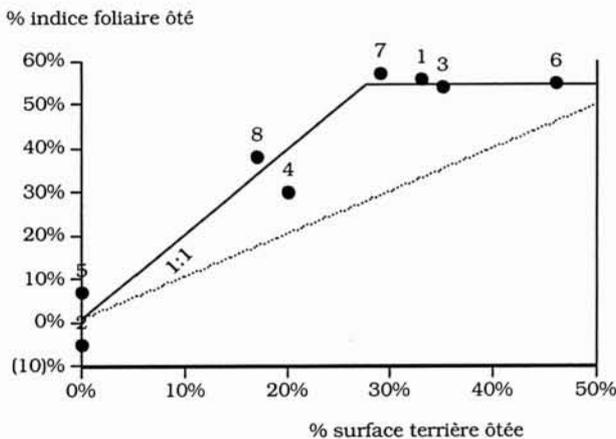


Figure 2 : Relation entre la variation de surface terrière et la variation de LAI dans une expérience (INRA/ONF) d'éclaircie en forêt domaniale de la Harth, Haut Rhin.

Ce que l'on appelle le sous-étage peut participer significativement à la consommation d'eau du peuplement (de 10 à 50 % de l'ETR totale du peuplement), en particulier dans les peuplements de pins à faible indice foliaire. Le contrôle de la consommation en eau de l'écosystème forestier peut donc passer par une réduction ou une élimination de la strate basse. En général, l'augmentation du drainage sera surtout sensible en-dehors de la saison de végétation des arbres.

II.1.3 Est il possible de mettre en relation consommation d'eau et indice foliaire ?

Peu d'études permettent de quantifier « l'économie » d'eau réalisée par réduction du couvert. L'exemple d'un perchis de chêne sessile est donné figure 3 : l'éclaircie réduit la consommation en eau de plus de 80 mm sur la saison de végétation, ce qui s'ajoute à la réduction de l'interception des pluies. Dans l'éclaircie, on note l'année n + 1 une augmentation de la transpiration sans évolution de l'indice foliaire.

transpiration/ETP

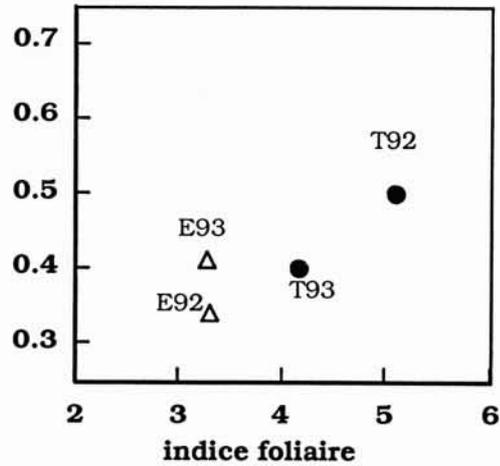


Figure 3 : Réaction de la transpiration d'un perchis de chênes sessiles à une éclaircie, pratiquée fin 1991 ; T parcelle témoin, E parcelle éclaircie. (D'après Bréda et al, 1995).

II.2 Mises en application

II.2.1 Augmentation des ressources en eau à l'échelle du bassin versant : l'exemple des USA

Voici des résultats concernant des paires de bassins versants semblables, l'un traité, l'autre conservé comme témoin, en zone collinéenne et en montage.

Ces deux cas illustrent quelques résultats importants et à portée générale :

- le climat local joue un rôle déterminant ;
- pour produire un effet significatif, l'opération sylvicole doit être forte (20 à 30 % de la surface terrière est la fourchette recommandée) et réalisée de manière adéquate (ici par trouées de 1 à 4 ha ; le même prélèvement réalisé pied à pied aurait eu un effet moindre) ;
- la recolonisation du sol (herbacées, régénération) réduit, ou peut même annuler, l'augmentation de l'écoulement en l'espace de quelques années ;
- grâce aux précautions prises dans le Wyoming (répartition de trouées, respect des rives des cours d'eau), l'augmentation de l'écoulement ne s'est pas accompagnée d'une augmentation de la charge solide des eaux.

Par ailleurs, ces méthodes, valides dans un pays de grands espaces appartenant à un même propriétaire public, sont difficilement envisageables en France.

II.2.2 Augmentation de la consommation d'eau par plantation forestière : référence néo-zélandaise

A l'inverse, dans les situations dans lesquelles un assèchement du sol est recherché, l'aménagiste peut avoir recours à des plantations d'arbres à fort indice foliaire. Ainsi, des plantations de peupliers sont parfois utilisées pour protéger le sol contre l'érosion, augmenter son dessèchement (abaisser le niveau de la nappe) et par là augmenter sa stabilité. En augmentant à la fois l'interception des précipitations et l'évapotranspiration, une plantation de peuplier en Nouvelle Zélande a permis d'augmenter l'évapotranspiration de 35 % par rapport à celle d'une prairie (Guevara-Escobar et al., 2000). Cet effet ne se manifeste toutefois que lorsque la plantation a atteint un certain développement. L'installation et

Tableau 1. Bilans de deux expériences visant à augmenter l'écoulement de bassins versants aux USA.

Situation	Type de forêt	Traitement	Augmentation de l'écoulement	Période de suivi
Massachusetts <ul style="list-style-type: none"> ● alt 250 à 350 m ; ● Pluviométrie moyenne 1 150 mm ; ● Surface : 150-500 ha ; ● Ecoulement moyen annuel : 500 à 600 mm ; (Source : Bent, 2001) 	90 % feuillus (chênes) et 10 % pins	Réduction de la surface terrière de 34 %	<ul style="list-style-type: none"> ● Année : 94 mm (soit 15 à 19 %) ● Hiver : 57 mm ● Été : 37 mm 	6 ans
Wyoming <ul style="list-style-type: none"> ● alt 2 660 à 3 300 m ; ● Pluviométrie moyenne 870 mm ; ● Surface : 900-1 700 ha ; ● Ecoulement moyen : 441 mm ; ● (Source : Troendle et al., 2001) 	100 % Résineux	Coupe rase par trouées sur 24 % de la surface	<ul style="list-style-type: none"> ● Année : 76 mm, (soit 17 %) ● Mai : 36 mm et Juin : 26 mm 	5 ans

le maintien d'un couvert forestier très dense, de LAI maximal, permettent donc de maximiser la consommation d'eau. Encore faut-il que cette consommation se produise au bon moment. De plus, le renouvellement d'un peuplement forestier sur sol engorgé est en général délicat, et les peuplements très denses sont instables et ne produisent que peu de bois d'œuvre de qualité.

● II.3 En conclusion à propos de la quantité de la ressource

Il est donc possible de diminuer significativement la consommation d'eau des peuplements forestiers. Une baisse importante ne peut toutefois être obtenue qu'au prix de la réduction drastique du couvert sur de grandes surfaces ; malgré cela, l'effet n'est obtenu que pendant certaines saisons, et durant une partie du cycle sylvicole. A l'échelle du bassin versant, il semble donc bien qu'une augmentation importante et pérenne de l'écoulement ne puisse être obtenue qu'en remplaçant une partie des peuplements forestiers par d'autres couvertures végétales moins consommatrices d'eau. Telle est la voie choisie par exemple par l'Afrique du Sud (ONF, 1999). La gestion globale des bassins versants implique aussi la connaissance des régimes hydrologiques liés aux diverses formations végétales, et la capacité de raisonner leur assemblage dans l'espace. On remarquera enfin que les forêts sont parmi les formations végétales assurant la meilleure prévention de l'érosion : dans certaines régions, le supplément de ressource en eau procuré par la réduction de la couverture boisée pourrait être accompagné d'une forte baisse de sa qualité (turbidité).

En théorie, il semble possible d'envisager des sylvicultures moins extrêmes, fondées sur une réduction modérée mais

permanente de l'indice foliaire global de l'écosystème (arbres et sous-étage). Ces sylvicultures trouveraient probablement des terrains d'application en France (Alpes du Sud, versant sud du Massif Central). Des recherches de INRA et de l'ONF sont en cours en ce sens. Il est probable que l'économie d'eau réalisable par cette voie sera faible en valeur relative : ces techniques devront être appliquées sur de grandes surfaces. De surcroît, la réduction de l'indice foliaire pourrait entraîner des pertes de production et de qualité sur les arbres (gourmands chez les chênes), et des surcoûts (passages plus fréquents en éclaircie, contrôle de la végétation basse). En contrepartie, la santé de ces peuplements pourrait être améliorée grâce à un meilleur bilan hydrique (ex : chênaies de la plaine alsacienne). Si de telles sylvicultures s'avéraient techniquement possibles et étaient envisagées pour augmenter la ressource en eau, des recherches économiques devraient calculer le coût du m³ d'eau supplémentaire écoulé, afin d'évaluer les éventuelles compensations dues aux sylviculteurs.

A l'inverse, la consommation d'eau d'un peuplement forestier peut être maximisée, mais cela ne semble devoir concerner dans notre pays que des surfaces réduites.

III ■ SYLVICULTURE ET QUALITÉ DES EAUX

● III.1 A l'échelle du territoire

III.1.1 Globalement : pour des eaux pures, plantez des forêts

En première analyse, les activités humaines dégradent les eaux en les chargeant soit de solides (érosion des sols), soit d'éléments dissous (engrais, pesticides,...).

En France, l'emploi d'engrais et de pesticides est par ailleurs limité en forêt. Les pourcentages des surfaces de forêts publiques recevant des fertilisants ou des produits phytocides sont par exemple compris entre 0,3 et 1 % comme indiqué ci-dessous (ONF, 1999) :

Tableau 2. *Emploi des intrants en forêts publiques ([28]).*

	Pourcentages des forêts et recevant des fertilisants	Gérées par l'ONF annuellement des phytocides
Forêts domaniales (1985-1993)	0,4 %	0,5 %
Forêts communales (1989-1993)	0,3 %	1 %

Globalement, les sylviculteurs n'emploient que peu d'engrais. En particulier, les forestiers, à la différence des agriculteurs, ne consomment que très peu – pas du tout pour la majorité d'entre eux – d'engrais azotés. En conséquence, les eaux issues des massifs forestiers sont très faiblement chargées en nitrates comme l'illustre une série de mesures prises à l'aide de bougies poreuses à 60 cm de profondeur dans le périmètre de captage des eaux de Vittel (Vosges), région où les apports atmosphériques azotés sont faibles (ONF, 1999) :

Tableau 3. *Concentration des eaux en nitrates sous divers modes de mise en valeur du sol ([28]).*

Occupation du sol	Teneur moyenne de l'eau en nitrates (en mg/l*)
Forêt	2
Maïs fourrager	126

*Le seuil de potabilité est de 50 mg/l.

Dans les Landes de Gascogne, des mesures effectuées par le CEMAGREF (Groupement de Bordeaux) dans les émissaires de deux bassins versants, l'un entièrement boisé et l'autre à moitié agricole, ont donné les résultats suivants (F. Vernier, comm. pers.) :

Tableau 4. *Flux d'éléments nutritifs dans les Landes de Gascogne, selon l'usage du sol à l'amont.*

Bassin versant	Flux moyen annuel, d'azote nitrique	En kg/ha, de phosphore total
Arriou (50 % maïs ; 50 % pin maritime)	10,7	0,06
Tagon (90 % pin maritime)	0,3	0,08

III.1.2 Des mesures de protection des captages, sources et cours d'eau efficaces

Globalement en France, 600 000 ha de forêts sont situés dans le périmètre de protection des sources d'eau minérale sans que leur gestion forestière fasse l'objet de contraintes particulières.

200 000 ha supplémentaires de forêt sont compris dans les périmètres de captage d'eau potable, et font l'objet de règles particulières de gestion (ni engrais ni pesticides) (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2000).

III.1.3 Une menace à prendre au sérieux : l'acidification

Les forêts reçoivent des apports atmosphériques pouvant être très acides, qui peuvent atteindre 390 g/ha an de protons. Sur substrat acide, ces apports peuvent provoquer ou accélérer la désaturation du sol en bases, et entraîner à la fois des dépérissements forestiers et une forte acidification des eaux. En France, ce processus est localement entamé dans les Vosges et les Ardennes, avec des conséquences sur la potabilité de l'eau et sur la vie aquatique. Face à cette situation, le forestier doit schématiquement réagir en deux étapes :

- identifier et cartographier le risque à l'aide d'une carte des charges critiques¹ d'acidité, et d'une bonne connaissance des dépôts ;
- selon le niveau de risque, et d'apports, il faudra adopter des mesures soit préventives soit curatives :
- les mesures préventives peuvent inclure : le mélange des espèces, une sylviculture active assurant l'arrivée de lumière au sol et le développement d'une strate basse, la réduction des exportations minérales lors des exploitations, le cas échéant et très ponctuellement âge d'exploitabilité plus élevé ;
- les mesures curatives sont principalement l'apport d'amendements calcaires, calciques ou de préférence calco-magnésiens ; Ranger et al. (1993) montrent que dans une pessière vosgienne acidifiée, et après trois à six ans, un apport d'amendements calco-magnésiens a un effet très net sur les solutions du sol jusqu'à 60 cm de profondeur : neutralisation de l'acidité, enrichissement en cations Ca^{2+} et Mg^{2+} , diminution des concentrations de NO_3^- , SO_4^{2-} et Al^{3+} .

Des applications à grande échelle d'amendements sont réalisées actuellement en Allemagne dans le land de Rhénanie-Palatinat, afin de compenser « en continu » (soit tous les dix ans) les apports acides atmosphériques. On remarquera que ces mesures, préventives comme curatives, ont d'abord pour but de corriger l'acidité des sols forestiers. Leur effet sur les eaux est relativement faible, et très différé dans le temps (parfois plus de dix ans). Dans le contexte suédois, Dickson et Brodin (1995) admettent que l'amendement des sols des bassins versants est en principe préférable à l'amendement annuel des lacs et des rivières, alors que seul ce dernier est pratiqué. Toutefois, amender les sols forestiers dans le but de relever le pH des eaux n'a de sens que sous les conditions suivantes :

- si le pH du sol forestier doit être lui-même relevé ;
- si l'eau n'est pas neutralisée dans les couches profondes du sol ;
- si une stratégie globale de lutte contre l'acidification est mise en œuvre : mesures préventives après les mesures curatives ;

1. Charge critique : quantité maximale d'un élément qu'un écosystème peut recevoir sans que ses propriétés principales soient altérées.

- si l'on raisonne à grande échelle (un bassin versant au moins) ;
- si l'on est dans une stratégie à long terme ;
- si l'on accepte que seulement 10 à 20 % des cations apportés au sol se retrouvent dans les eaux ;
- si l'on adopte une attitude écologiquement responsable : respect des biotopes et des espèces protégés ou remarquables (ex. les tourbières).

● III.2 A l'échelle locale : les pratiques du sylviculteur pour ne pas dégrader les eaux

III.2.1 Faut-il proscrire les coupes rases ?

La coupe rase d'un peuplement conduit à la minéralisation rapide d'une partie de l'humus. Les produits de cette minéralisation ne sont pas absorbés et peuvent être lessivés vers les cours d'eau. Didon-Lescot et al. (1998), au Mont Lozère, ont étudié une pessière d'altitude sur sol podzolique. La coupe à blanc, suivie du décapage du sol et de l'andainage des rémanents, a fait passer le flux de sortie de l'azote nitrique de 4 à 25 kg/ha-an pendant cinq ans. La concentration de nitrate dans les eaux a augmenté parallèlement de presque zéro à un maximum de 26 mg/l. Au total, le stock d'azote du sol n'a été diminué que de 9 % (98 kg/ha sur 1 070). En quelques années, l'écosystème est redevenu fixateur net d'azote, en raison de la réinstallation d'une couverture complète du sol (fig. 4).

En pratique, le forestier peut éviter que les coupes rases aient des conséquences importantes sur la qualité des ressources en eau de plusieurs manières :

- en limitant leur surface ; à l'extrême, mais la gestion des ressources en eau ne semble pas l'imposer en général, le peuplement peut être géré sans coupe de régénération : futaie jardinée pied à pied, taillis sous futaie, taillis fureté ;
- en évitant l'apparition de sol nu : ouvrir le peuplement progressivement, pour installer une régénération avant la

coupe définitive ; si des travaux du sol sont nécessaires, ne pas décapier l'humus ;

- en maintenant le long des ruisseaux et cours d'eau intra-forestiers des bandes boisées assez larges, au couvert clair et à la strate basse dense, qui éviteront que les eaux de ruissellement se déversent directement dans les cours d'eau ; de chaque côté des ruisseaux, ces bandes auront une largeur d'au moins 5 m, et jusqu'à trois fois la largeur du cours d'eau (Forestry Commission, 1988).

III.2.2 Du bon usage des engrais

Comme indiqué plus haut, l'emploi d'engrais en sylviculture est limité. Lorsque des engrais sont employés, les précautions à prendre sont bien connues :

- éviter des applications sur sol nu, à l'automne, en plein ; surtout pour l'azote ;
- éviter toute application à proximité des eaux de surface ;
- lorsque des risques de drainage important existent, choisir des formes peu solubles d'engrais et fractionner les apports (exemple les phosphates naturels et de scories employés dans le massif landais (Bonneau, 1995)).

III.2.3 Des sols perméables pour favoriser l'infiltration des eaux de pluie et de la neige pour limiter le ruissellement

Le ruissellement des eaux est une cause importante de dégradation de la qualité des cours d'eau : turbidité, charge élevée en minéraux... Pour favoriser l'infiltration des eaux, les techniques sont les suivantes :

- limiter le tassement des sols ; notamment concentrer la circulation des engins sur les cloisonnements ; sur les cloisonnements d'exploitation, exiger des engins à pneus basse pression, recouvrir le sol de rémanents sont très efficaces ;
- éviter la mise à nu du sol sur de grandes surfaces, surtout en période hivernale : régénération naturelle progressive, replantation rapide ;

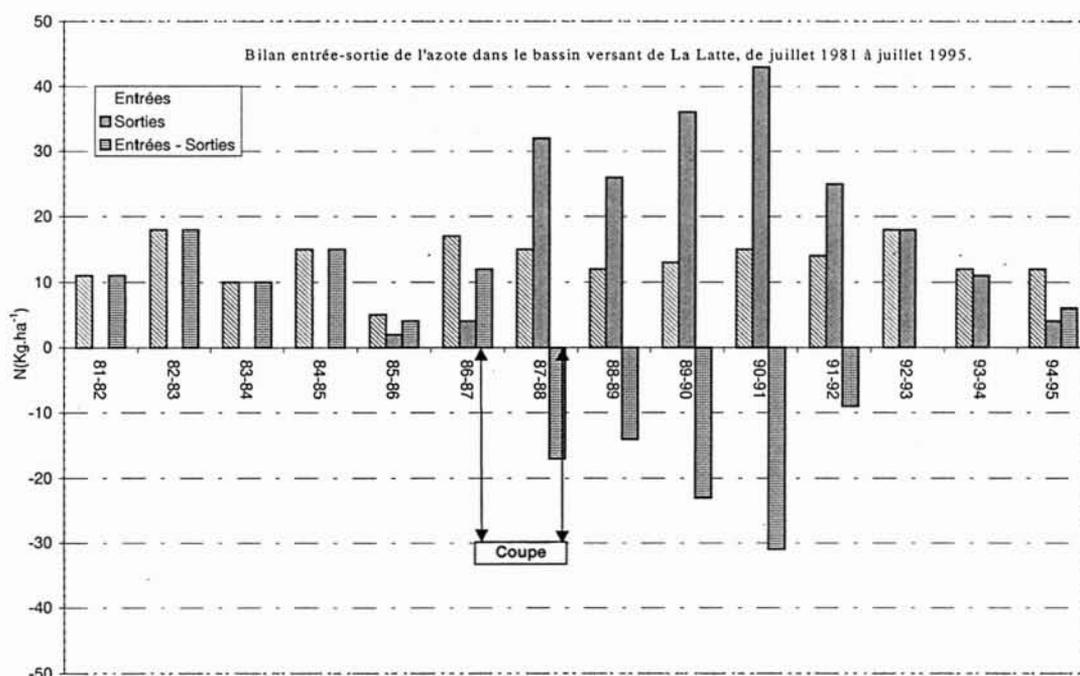


Figure 4 : Bilan de l'azote dans un bassin versant du Mont Lozère, avant, pendant et après une phase de dépérissement et une coupe rase. (d'après : Didon-Lescot et al., 1998).

– installer le long des cours d'eau, des étangs et mares, des bandes boisées protectrices, à couvert léger et à sol complètement enherbé.

III.2.4 Ne pas nuire directement aux eaux forestières

Dans ce domaine, trois séries de recommandations doivent être faites :

– doser la lumière arrivant sur le plan d'eau en fonction des objectifs de gestion des eaux poursuivis ;
 – ne laisser séjourner aucun rémanent d'exploitation dans les cours d'eau, mares et étangs ;
 – éviter toute contamination ponctuelle par des polluants ; deux catégories de produits employés en forêt sont concernées :

- les produits agro-pharmaceutiques : respect des produits et des doses homologués, non traitement à proximité des eaux, non traitement des périmètres de captage, non traitement avant une pluie, rinçage des appareils hors forêt. Si possible, choisir entre plusieurs produits aussi efficaces celui dont la solubilité dans l'eau est la plus faible (exemple le graminicide fusilade moins soluble dans l'eau que le dalapon (Gama, CEMAGREF Nogent, com. pers.) ;
- les huiles et carburants : proscrire les vidanges en forêt, et la dispersion accidentelle des produits ; de nouveaux lubrifiants, huiles végétales et esters de synthèse, non écotoxiques et biodégradables font leur apparition sur le marché. Les fluides hydrauliques et huiles de chaîne sont encore nettement plus chers que les produits d'origine minérale, mais les huiles végétales sont déjà compétitives pour les moteurs à 2 temps (Nguyen-The et al., 2001).

● III.3 Cas particulier : l'épuration des eaux usées, urbaines ou industrielles

Les peuplements forestiers absorbent les éléments nutritifs (azote, phosphore, potasse...) et peuvent donc épurer, au moins partiellement, certaines eaux usées, tout en bénéficiant d'un effet de fertilisation. Cette pratique concerne davantage des plantations d'espèces à croissance rapide (pins, eucalyptus...) que des forêts gérées dans un objectif multifonctionnel. Elle est encore peu répandue en France (Carnus et al., 1996), plus utilisée à l'étranger : USA, Nouvelle-Zélande.

● III.4 Conclusion partielle à propos de la qualité de la ressource en eau

Les auteurs anglo-saxons ont publié au cours des deux dernières décennies des recommandations (« Guidelines ») ou des codes de bonnes pratiques (« Best management practices ») très concrets ; (voir notamment Forestry Commission 1988 pour la Grande Bretagne, et Ice et al 1997 pour les USA). Dans ces deux pays, l'évaluation a posteriori des résultats acquis grâce à ces recommandations ou réglementations est largement positive. On remarquera que la fourniture d'une eau de bonne qualité résulte en général non pas de l'excellence d'une pratique unique, mais plutôt d'un éventail de « bonnes pratiques », bien adaptées aux conditions locales, et mises en œuvre de manière coordonnée et sur une grande étendue. Les techniques à appliquer en sylviculture et assurant que l'eau issue des forêts est de qualité sont maintenant bien connues. La mise en application généralisée de ces techniques en France permettrait de passer d'une situation bonne en moyenne mais vulnérable à des accidents, à une situation meilleure encore et pouvant être garantie. Pour cela,

un effort de vulgarisation auprès des sylviculteurs, des entrepreneurs de travaux et des exploitants forestiers serait encore nécessaire. La démarche de mise en place d'indicateurs de la gestion durable dans le cadre des processus d'écocertification, tel celui de PEFC², pourrait faciliter et accélérer le mouvement.

IV ■ CONCLUSION GÉNÉRALE

Les mécanismes de base influant sur la quantité et la qualité des eaux issues de forêt sont maintenant bien connus. Ce qui se passe ponctuellement est compris et peut être prédit. Mais la ressource en eau se constitue, donc se raisonne et doit se gérer, à l'échelle du bassin versant. De nombreux pays l'ont compris. La relative pauvreté de la littérature française sur ce sujet montre que notre pays a encore des progrès à faire pour maîtriser cette approche. Par ailleurs, la gestion de la ressource en eau implique de fixer des priorités claires, à l'échelle du bassin versant, donc de réaliser des choix. Si l'objectif est de maximiser l'écoulement d'eau à l'aval, il peut être nécessaire de réduire la surface boisée, ou de conduire des peuplements forestiers très clairs, et, dans ce cas, il peut être impossible de garantir qu'aucune érosion, source de turbidité, ne se produira. Si l'objectif est de garantir la pureté de l'eau, les « bonnes pratiques » ne suffisent pas et le strict respect sur toute la surface du bassin versant des règles de sylviculture, de la plantation à la récolte, est indispensable.

En matière de recherche, des démarches pluridisciplinaires, aux échelles d'espace et de temps appropriées, et orientées vers l'action, semblent à promouvoir. La région méditerranéenne et le sud du Massif central, où la question de la quantité d'eau disponible à l'aval est clairement posée, pourraient par exemple servir de cadre à des recherches en vraie grandeur sur la « sylviculture économe en eau ». Par ailleurs, dans le domaine de la gestion des ressources en eau, de nombreux facteurs interagissent, et la prise de décision est souvent difficile, faute d'évaluer les répercussions réelles des mesures envisagées. Il convient donc de développer des outils d'aide à la décision, permettant d'identifier et de quantifier les opérations de gestion à privilégier pour répondre à une demande précisée dans un bassin versant défini ; la formalisation et l'assemblage des connaissances scientifiques, et la prise en compte de l'espace avec l'outil SIG, offrent des perspectives intéressantes (Twery et Hornbeck, 2001).

Dans notre pays, le foncier appartient en général à de nombreux propriétaires. La mise en œuvre d'une gestion à l'échelle du bassin versant nécessitera donc plus que des outils techniques permettant d'identifier les sites et les modalités d'intervention. Il faudra que les gestionnaires des espaces d'un même bassin participent consciemment à la gestion de la ressource en eau. La loi sur l'eau de 1992 fournit un cadre pour cela. Il faudra en pratique réussir la mise en place d'une animation/coordination efficace, et apporter aux propriétaires souffrant de coûts supplémentaires ou de manques à gagner une juste compensation. Gageons que le succès dépendra finalement davantage de ces aspects sociologiques et politiques que des techniques.

2. PEFC : Pan-European Forest Certification ; schéma de définition et de certification de la gestion durable des forêts dans le cadre des recommandations des conférences pan-européennes pour la protection des forêts (Strasbourg, Helsinki, Lisbonne).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AUSSENAC G., BOULANGEAT C. (1980). — Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Ann. Sci. For.*, 37, 91-107.
- [2] AUSSENAC G., GRANIER A., NAUD R. (1982). — Influence d'une éclaircie sur la croissance et le bilan hydrique d'un jeune peuplement de douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Can. J. For. Res.*, 12, 222-231.
- [3] AUSSENAC G., GRANIER A. (1988). — Effects of thinning on water stress and growth in douglas fir. *Can. J. For. Res.*, 18, 100-105.
- [4] AUSSENAC G. (2000). — Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann. For. Sci.*, 57, 287-301.
- [5] AUSSENAC G., GRANIER A., BRED A N. (1995). — Effets des Modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Rev. For. Fr.*, 54-62.
- [6] BENOIT M., FIZAINE G. (1999). — Qualité des eaux en bassins d'alimentation forestiers. *Rev. For. Fr.*, LI, 2, 162-172.
- [7] BENT G.C. (2001). — Effects of forest management activities on runoff components and ground-water recharge to Quabbin reservoir, central Massachusetts. *Forest Ecology and Management*, 143, 115-129.
- [8] BLACK T.A., TAN C.S., NYAMAH J.U. (1980). — Transpiration rate in Douglas fir trees in thinned and unthinned stands. *Can J Soil Sci.*, 60, 625-631.
- [9] BOBAY V. (1990). — Influence d'une éclaircie sur le flux de sève et la transpiration d'un taillis de chataignier. Thèse de l'Université Paris-Sud, 142 p.
- [10] BONNEAU M. (1995). — Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF éditeur, 367p.
- [11] BRED A N. (1999). — L'indice foliaire des couverts forestiers : mesures, variabilité et rôle fonctionnel. *Rev. For. Fr.*, LI, 2, 135-150.
- [12] BRED A N., GRANIER A. (1996). — Intra- and Inter-annual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Ann. Sci. For.*, 53, 521-536.
- [13] BRED A N., SOUDANI K. (2001). — Analyse bibliographique des différentes méthodes de mesures du LAI en forêt, au regard d'objectifs donnés. Précis méthodologique à l'usage des utilisateurs. GIP ECOFOR eds., sous presse.
- [14] BRED A N., GRANIER A., AUSSENAC G. (1995). — Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea*). *Tree Physiology*, 15, 295-306.
- [15] CARNUS J.M., CHOSSAT J.C., LOUSTAU D. (1996). — La valorisation sylvicole des eaux usées et des boues d'épuration : les expériences néo-zélandaise et française. *Revue Forestière Française*, XLVIII, 5-1996.
- [16] COSANDEY C. (1999). — Forêt et régime des eaux, Conséquences de la forêt sur les écoulements naturels. Actes du colloque AICEF « La forêt : sources d'équilibres ? », Dijon, 25 & 26 Novembre 1999, pp 93-106.
- CUTINI A., MATTUEUCCI G., SCARRASCIA MUGNOZZA G. (1998). — Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 105, 55-65.
- [17] DICKSON W., BRODIN Y.W. (1995). — Strategies and methods for fresh-water liming. In Liming of acidified surface waters, a swedish synthesis. Henrikson & Brodin eds, Springer, chap. 4, 81-124.
- [18] DIDON-LESCOT J.F., GUILLET B., LELONG F. (1998). — Le nitrate des ruisseaux, indicateur de l'état sanitaire et des perturbations de l'écosystème forestier. Exemple du Mont Lozère. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, série II, tome 327, n° 2, Juillet 1998, pp 107-113.
- [19] DUCREY M., HUC R. (1999). — Effets de l'éclaircie sur la croissance et le fonctionnement écophysologique d'un taillis de chêne vert. *Rev. For. Fr.*, LI, 2, 326-340.
- [20] FORESTRY COMMISSION (1988). — Forests and Waters Guidelines, first edition. HMSO, London, UK, 24p.
- [21] GUEVARA-ESCOBAR A., EDWARDS W.R.N., MORTON R.H., KEMP P.D., MACKAY A.D. (2000). — Tree water use and rainfall partitioning in a mature poplar-pasture system. *Tree Physiol.*, 20, 97-106.
- [22] ICE G.G., STUART G.W., WAIDE J.B., IRLAND L.C., ELLEFSON P.V. (1997). — 25 years of the Clean Water Act: how clean are forest practices? *Journal of forestry*, 95 (7), July 1997.
- [23] MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE, DERF (2000). — Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises, édition 2000, 129p.
- [24] MINISTÈRE DE LA RÉGION WALLONNE, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Division de la Nature et des Forêts, 1998, Circulaire n° 2633, Visant à la réglementation des amendements en forêts soumises, 17p.
- [25] NGUYEN-THIE N., DE CARO P., CECUTTI C., AGIUS D. (2001). — Utilisation des huiles biodégradables d'origine végétale en exploitation forestière. AFOCEL, Fiches Informations forêt n° 1-2001.
- [26] NISBET T.R. (2001). — The role of forest management in controlling diffuse pollution in UK forestry. *Forest Ecology and Management*, 143, 215-226.
- [27] NIZINSKI J.J., SAUGIER B. (1989). — Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. *Ann. Sci. For.*, 46, 173-186.
- [28] OFFICE NATIONAL DES FORÊTS, Direction Technique et Commerciale, 1999, Bulletin Technique de l'ONF, n° 37, « L'eau et la forêt ». Synthèse bibliographique réalisée par Christine Fort, 240 p.
- [29] RANGER J., MOHAMED A.D., BONNEAU M. (1993). — Effet d'un amendement calco-magnésien sur les solutions d'un sol acide sous pessière déperissante dans les Vosges. INRA, Centre de Nancy, brochure « forêt et amendements calcaires » (journée d'information et de discussion, mardi 26 Janvier 1993, CI NYS éditeur, 139-154.
- [30] TROENDLE C.A., WILCOX M.S., BEVENGER G.S., PORTH L.S. (2001). — The Coon Creek Water Yield Augmentation Project : implementation of timber harvesting technology to increase streamflow. *Forest Ecology and Management*, 143, 179-187.
- [31] TWERY M.J., HORNBECK J.W. (2001). — Incorporating water goals into forest management decisions at a local level. *Forest Ecology and Management*, 143, 87-93.
- [32] ULRICH E., LANIER M., SCHNEIDER A. (1995). — Dépôts atmosphériques et concentrations des solutions du sol dans le sous-réseau Cataenat de Renecofor. Rapport scientifique sur les années 1993-1994. ONF, Direction Technique et Commerciale, Département des recherches techniques. ONF Ed., 165 p.
- [33] ULRICH E., WILLIOT B. (1993). — Les dépôts atmosphériques en France de 1850 à 1990. Editeur Office National des Forêts (Département Recherche et Développement, Fontainebleau), 154p.
- [34] VERNIER F., BEUFFE H. (1999). — Soil occupation, human activities and water quality in the sandy "Landes de Gascogne" ecosystem. In "Rural landscape and environment; ecological principles of management in Europe and Canada", CNRS éditions, 1999, pp 311-322.
- Colloque SHF "forêts et eau" - Nancy, Septembre 2001 - Breda & Roman-Amat - Sylviculture et ressources en eau.