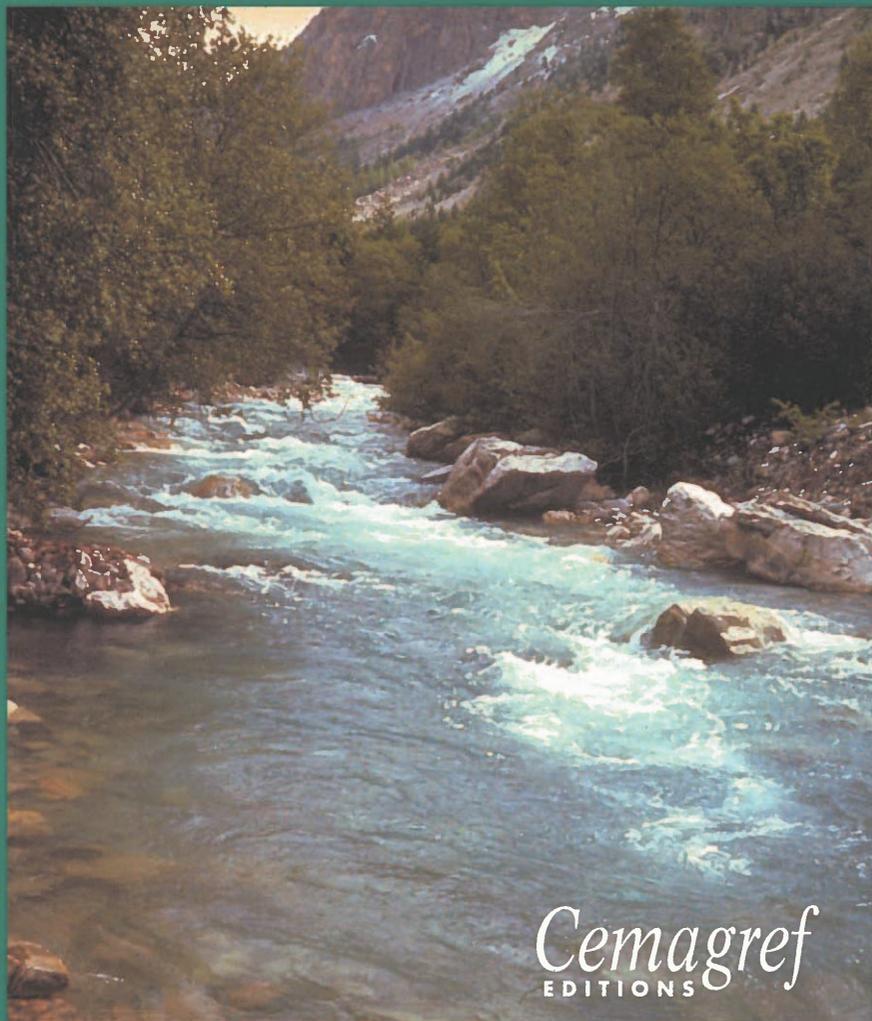




1

EAUX ET FORÊTS
La forêt
Un outil de gestion
des eaux ?



Cemagref
EDITIONS

ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

EAUX ET FORÊTS

La forêt Un outil de gestion des eaux ?

*JACQUES LAVABRE ET VAZKEN ANDRÉASSIAN
avec la collaboration d'OLIVIER LAROUSSINIE*

Ce document présente les résultats d'un groupe de travail, constitué de :

V. ANDRÉASSIAN ⁽¹⁰⁾	J.-L. BALLAIS ⁽¹⁾
Y. BIROT ⁽²⁾	M. BONELL ⁽³⁾
T. CHANGEUX ⁽⁴⁾	E. DAMBRINE ⁽⁵⁾
A. GRANIER ⁽⁵⁾	J. HUMBERT ⁽⁶⁾
J. LAVABRE ⁽⁹⁾	O. LAROUSSINIE ⁽²⁾
C. MILLIER ⁽²⁾	D. NORMANDIN ⁽⁵⁾
M. PHELEP ⁽⁷⁾	J.-M. VALDENAIRE ⁽⁸⁾

(1) CAGEP, Université de Provence, CNRS URA 903, 29 avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence Cedex

(2) GIP ECOFOR, 19 avenue du Maine, 75015 Paris

(3) UNESCO, Division of Water Sciences, 1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15

(4) CSP, 134 avenue de Malakoff, 75116 Paris

(5) INRA Champenoux, 54280 Seichamps

(6) Université Louis Pasteur, URA 95 CNRS, 3 rue l'Argonne, 67083 Strasbourg Cedex

(7) DERF, 19 avenue du Maine, 75015 Paris

(8) IFN, Domaine des Barres, 45290 Nogent-Sur-Vernisson

(9) Cemagref, Groupement d'Aix-en-Provence, Le Tholonet, BP 31, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1

(10) Cemagref, Groupement d'Antony, BP 44, 92163 Antony Cedex

© 2000 Cemagref-Éditions – Collection GIP ECOFOR "Écosystèmes forestiers" Eaux et forêts – La forêt : un outil de gestion des eaux ? de JACQUES LAVABRE et VAZKEN ANDRÉASSIAN avec la collaboration d'Olivier LAROUSSINIE. Photographies de couverture : © Goodshoot pour le bandeau vertical. "Paysage d'automne en montagne de Lure" C. Nouals © Cemagref (Nov. 1994) et "L'Ubaye" J.-P. Canler © Cemagref.

Coordination de l'édition : Julienne Baudel – Infographie : Françoise Peyriguer – Impression : Imprimerie France Quercy, 113 rue André-Breton, BP 49, 46001 Cahors Cedex. ISBN 2-85362-548-6. 1^{re} édition. Dépôt légal : 4^e trimestre 2000. Prix : 210 F (32,01 €).

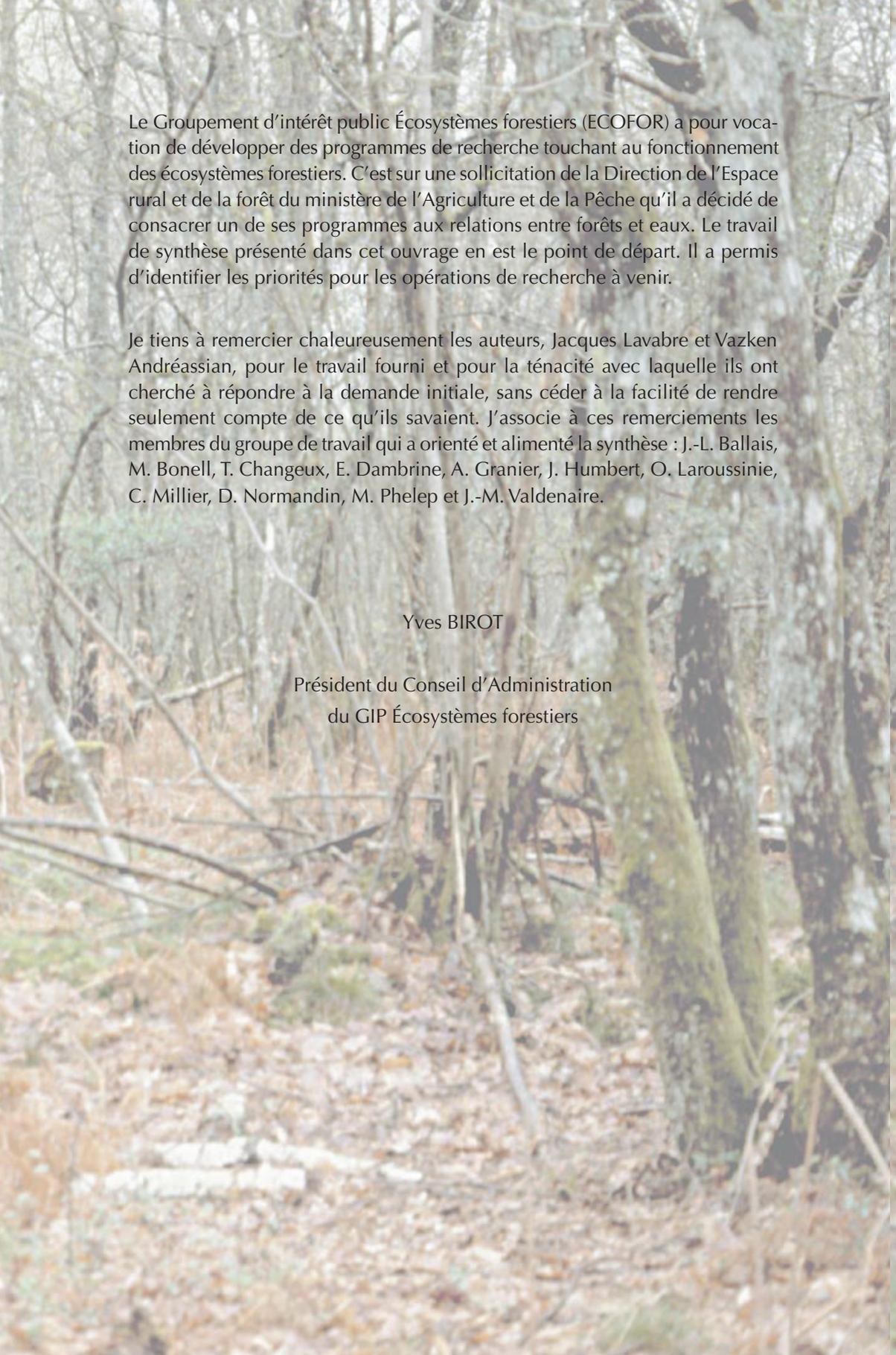
Diffusion : Publi-Trans, ZI Marinière 2, rue Désir Prévost, 91080 Bondoufle, tél. 01 69 10 85 85 – Diffusion aux libraires : Tec et Doc Lavoisier, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex.

| AVANT-PROPOS |

Les relations entre forêts et eaux sont depuis longtemps inscrites parmi les préoccupations de la puissance publique. Le fait d'avoir individualisé en France une Administration des Eaux et Forêts pendant plusieurs siècles en était un bel exemple. Ces préoccupations sont-elles encore justifiées ? En grande partie, oui ! Par rapport à d'autres modes d'occupation du sol, en particulier l'agriculture, la forêt a indéniablement un impact différent sur le cycle de l'eau. Néanmoins, la forêt s'est trouvée pendant longtemps parée de toutes les vertus dans ses effets sur le cycle hydrologique et la qualité des eaux, sans que les arguments avancés reposent sur des bases expérimentales ou scientifiques solidement étayées. Les travaux de recherche réalisés plus récemment à travers le monde conduisent à nuancer cet enthousiasme. Les certitudes sont peu nombreuses, et le sujet reste une préoccupation de recherche très actuelle et mobilisatrice au sein de la communauté scientifique internationale concernée.

Aujourd'hui la forêt a repris une place importante sur le territoire français. Après des siècles de régression, associée au défrichement pour l'agriculture, la tendance s'est inversée avec l'avènement de l'ère industrielle et le mouvement d'exode rural et de déprise agricole qui l'ont accompagnée. Parallèlement la consommation en eau a beaucoup augmenté et les exigences de qualité se sont faites plus fortes. Les dispositions législatives dans le domaine de l'eau et de la forêt tendent à se rejoindre sur la nécessité d'un croisement entre la gestion, de l'eau, de la forêt, avec l'aménagement des territoires. La rencontre entre les eaux et les forêts semble de nouveau inévitable, mais elle ne s'est pas encore faite si l'on en juge par le manque de références réciproques dans les documents de planification des deux domaines.

L'ouvrage que vous allez découvrir est destiné autant aux "gestionnaires de l'eau" qu'aux "gestionnaires forestiers". Il a pour vocation de faire le point sur les connaissances disponibles et sur les interrogations qui nous restent, en se plaçant résolument du point de vue des questions de gestion. La forêt : un outil de gestion des eaux ? Une esquisse générale du sujet et les principales idées qui peuvent en être tirées sont exposées dans la première partie. La deuxième partie vous propose, sous forme de fiches traitant chacune d'un thème particulier, une information plus détaillée.



Le Groupement d'intérêt public Écosystèmes forestiers (ECOFOR) a pour vocation de développer des programmes de recherche touchant au fonctionnement des écosystèmes forestiers. C'est sur une sollicitation de la Direction de l'Espace rural et de la forêt du ministère de l'Agriculture et de la Pêche qu'il a décidé de consacrer un de ses programmes aux relations entre forêts et eaux. Le travail de synthèse présenté dans cet ouvrage en est le point de départ. Il a permis d'identifier les priorités pour les opérations de recherche à venir.

Je tiens à remercier chaleureusement les auteurs, Jacques Lavabre et Vazken Andréassian, pour le travail fourni et pour la ténacité avec laquelle ils ont cherché à répondre à la demande initiale, sans céder à la facilité de rendre seulement compte de ce qu'ils savaient. J'associe à ces remerciements les membres du groupe de travail qui a orienté et alimenté la synthèse : J.-L. Ballais, M. Bonell, T. Changeux, E. Dambrine, A. Granier, J. Humbert, O. Laroussinie, C. Millier, D. Normandin, M. Phelep et J.-M. Valdenaire.

Yves BIROT

Président du Conseil d'Administration
du GIP Écosystèmes forestiers

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

3

INTRODUCTION

7

DEMANDE EN EAU ET EFFETS DE LA FORÊT SUR LA RESSOURCE

10

Utilisations de l'eau et contraintes associées

10

Les forêts et l'eau : effets positifs et effets négatifs

10

PRATIQUES ET CADRE RÉGLEMENTAIRE DE LA GESTION COMBINÉE DES FORÊTS ET DES RESSOURCES EN EAU

17

Cadre économique et financier

17

Comment améliorer la prise en compte
de l'eau dans la gestion forestière ?

19

Position des gestionnaires de l'eau
et réglementation issue de la loi sur l'eau

21

LA FORÊT PEUT-ELLE ÊTRE UN OUTIL DE GESTION DES EAUX ?

22

CONCLUSION

25

BIBLIOGRAPHIE

28

FICHES TECHNIQUES

31



En France, la disponibilité de la ressource en eau n'est pas à l'heure actuelle considérée comme préoccupante. En moyenne, les prélèvements pour l'ensemble des besoins annuels sont de l'ordre de 40 % de la ressource en eau raisonnablement exploitable. Malgré cela, le problème d'une gestion durable de la ressource en eau doit être posé, car ces chiffres globaux masquent de fortes disparités locales et saisonnières. Ainsi, en considérant globalement le problème à l'échelle nationale, la disponibilité totale lors du mois d'étiage de fréquence quinquennale ne couvre péniblement que les prélèvements. Pour une sécheresse somme toute modérée, telle qu'il en revient en moyenne tous les cinq ans, le besoin de prélèvement atteint la totalité de l'eau disponible, ce qui se traduit localement par des situations de pénurie, toujours difficiles à gérer. La sécurité et la continuité de l'approvisionnement pour l'ensemble des besoins ne sont pas toujours assurées.

La qualité des eaux de surface, qui est affectée par les rejets industriels, urbains et agricoles, est aussi assez préoccupante. C'est lors des étiages que la qualité des eaux de surface s'altère le plus fortement, mettant en péril, non seulement l'équilibre écologique des cours d'eau, mais rendant aussi les prélèvements pour la production d'eau potable problématiques. Les eaux souterraines, qui fournissent 60 % des volumes prélevés pour l'alimentation en eau, sont moins sensibles aux pollutions ponctuelles et accidentelles, mais voient leur qualité s'altérer sous l'effet des pollutions diffuses.

En marge de cette problématique "eau", l'occupation de l'espace est en pleine évolution, avec une propension marquée à l'artificialisation des sols (cf. figure 1, p. 8). Les routes, parkings, surfaces imperméabilisées ont un impact fort sur le cycle de l'eau, et impliquent des aménagements onéreux dès lors qu'il s'agit

* cf. fiches 1 et 2

d'en limiter les conséquences. Les surfaces forestières augmentent aussi et occupent aujourd'hui un peu plus du quart de l'espace métropolitain français. À court terme, on pense que les contraintes liées à l'exploitation agricole devraient conduire à la poursuite de l'abandon d'espaces agricoles au profit de la forêt.

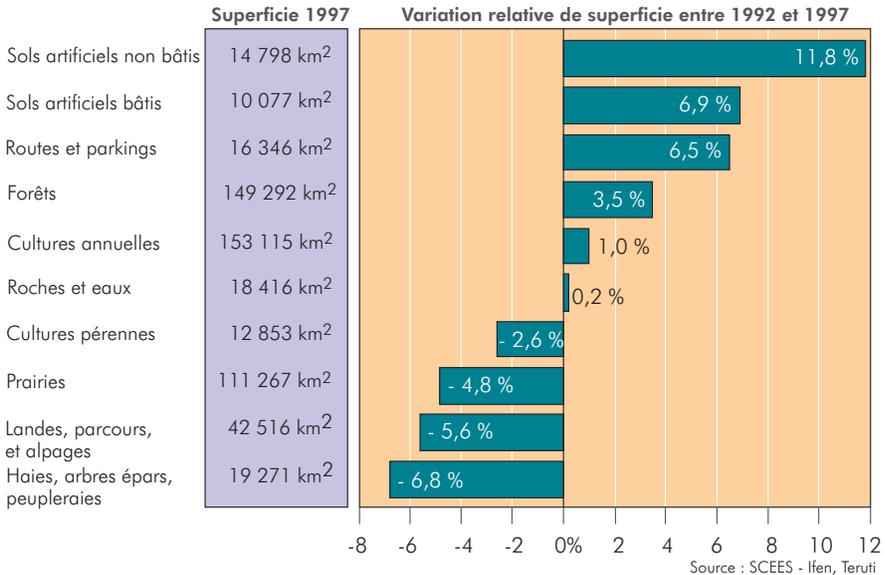


Fig. 1 – Occupation de l'espace et tendances d'évolution actuelle

Quelles mesures devons-nous prendre pour une gestion durable des eaux ? Est-il possible d'améliorer la disponibilité de la ressource ? Est-il possible d'améliorer la qualité de nos cours d'eau et des nappes souterraines ? Quel type de mesures curatives et/ou de mesures préventives faut-il mettre en œuvre ?

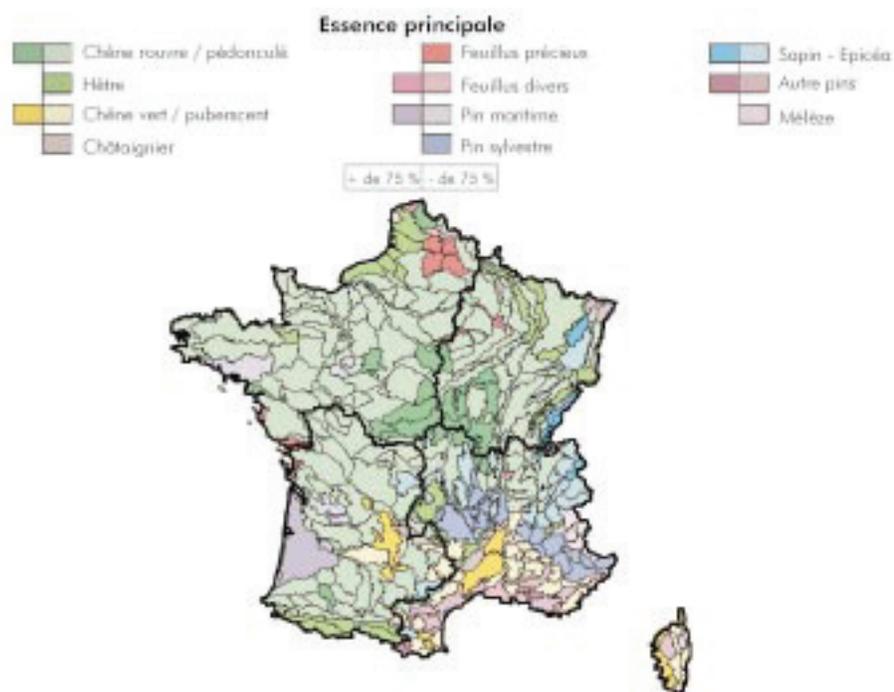
Dans le domaine des mesures curatives, on pourrait envisager de créer de nouveaux aménagements hydrauliques pour faire face aux étiages et sécuriser ainsi notre approvisionnement. La capacité actuelle de stockage est en France de l'ordre de 11 milliards de m³, ce qui représente tout juste la disponibilité naturelle moyenne d'un mois. Ces réserves, en partie gérées pour la production énergétique, sécurisent l'alimentation en eau de certaines villes et jouent parfois un rôle de soutien d'étiage. Mais peut-on, doit-on poursuivre nos efforts d'aménagement dans ce sens, en négligeant les perturbations du cycle de l'eau et de l'écologie des cours d'eau qu'engendrent ces aménagements ?

L'amélioration de la qualité des eaux des cours d'eau passe aussi par une réduction des volumes rejetés et par une réduction des concentrations en éléments indésirables en relation avec les performances des installations d'épuration des effluents urbains et industriels. Mais des solutions doivent aussi être

recherchées à l'amont, en allant des économies d'eau pour diminuer les prélèvements en étiage jusqu'à une meilleure maîtrise des apports fertilisants et de l'utilisation des pesticides.

En ce qui concerne les mesures préventives, on se doit d'aborder la problématique de l'occupation de l'espace et du régime des eaux. Il faut pouvoir juger si l'évolution prévisible de l'occupation de l'espace aura des répercussions favorables ou défavorables sur la ressource en eau et sa qualité. Dans ce sens, la connaissance de l'impact de la forêt (qui occupe 15 millions d'hectares, soit 25 % du territoire) et de ses règles de gestion sur le cycle de l'eau, apparaît fondamentale. La question posée n'est pas simple, car les espaces forestiers ont des fonctions multiples, à la fois marchandes (production de bois et d'autres matières premières, ressources cynégétiques) et non marchandes (paysage, accueil du public, valeurs écologiques : préservation de la biodiversité, stockage de carbone, protection du sol et des eaux).

Cet ouvrage a pour objectif de faire le point sur ce que l'on sait sur l'impact de la forêt et de sa gestion sur les ressources en eau. En outre, il propose un cadre de réflexion à l'intention des gestionnaires de l'eau et de l'espace qui souhaitent pouvoir prendre en compte cet impact dans le cadre de travaux d'étude ou de planification.



La forêt française métropolitaine (source : www.ifn.fr)



DEMANDE EN EAU ET EFFETS DE LA FORÊT SUR LA RESSOURCE



UTILISATIONS DE L'EAU ET CONTRAINTES ASSOCIÉES

Même si des nuances sont à apporter selon les utilisations, on peut dire que la gestion des eaux poursuit deux objectifs indissociables : fournir une eau de bonne qualité, en quantité suffisante pour couvrir les différents besoins et préserver la biodiversité des hydrosystèmes.

Dans notre société, les utilisations de l'eau sont très variées : alimentation en eau potable, eaux de boisson, usages industriels, irrigation et autres usages agricoles, production d'énergie (production hydroélectrique, refroidissement de centrales), transport fluvial et autres activités comme la navigation de plaisance, pêche professionnelle et de loisir, etc.

Selon l'utilisation qui en est faite, les contraintes d'exploitation de l'eau varient considérablement. En ce qui concerne la ressource en eau, les critères à prendre en compte sont essentiellement la régularité et disponibilité de l'approvisionnement et le contrôle des extrêmes (crues et étiages). Pour la qualité de l'eau, les qualités recherchées sont les suivantes : eaux claires, non colorées, pH près de la neutralité, bonne oxygénation, absence de sédiments et d'algues, absence de germes pathogènes et de substances toxiques, faible amplitude de température.

Mais à présent quels peuvent être les effets des espaces forestiers sur ces paramètres ?

LES FORÊTS ET L'EAU : EFFETS POSITIFS ET EFFETS NÉGATIFS

Comparée aux autres modes d'occupation de l'espace : (milieux artificialisés, zones agricoles, pelouses et landes) la gestion des espaces forestiers n'implique que des interventions humaines à minima. Implicitement, on admet que ces espaces sont peu perturbateurs du cycle de l'eau. Ainsi l'opposition est forte entre les espaces artificialisés qui accélèrent les flux d'eau en assurant aucun stockage et les espaces boisés auxquels on attribue un pouvoir bénéfique de régulation du cycle de l'eau. Toutefois, le rôle joué par les espaces boisés mérite d'être explicité.

Les connaissances actuelles permettent d'identifier les interactions dominantes entre l'eau et la forêt en distinguant les différents usages de l'eau et les grands types d'espaces forestiers : les forêts de montagne, les forêts de plaine, les forêts alluviales y compris les zones humides et les ripisylves (ou forêts riveraines). Les forêts de plaine, dont on situera leur limite altitudinale à 700 mètres, occupent environ 70 % des surfaces boisées du territoire métropolitain. La ripisylve est la zone de transition entre le milieu aquatique et le milieu terrestre. La forêt alluviale occupe le lit majeur des cours d'eau, les plaines alluviales et les zones humides ; ces zones sont en étroite relation avec les nappes d'eau souterraine.

Le tableau suivant propose un classement entre les effets plutôt positifs et les effets plutôt négatifs. Toutefois, ces distinctions comportent toujours une part de subjectivité ; les rétroactions existent et sont fortement influencées par le contexte local : pluviosité, géologie, pédologie, géomorphologie... Ainsi, le problème de l'acidification des eaux ne concerne que les terrains cristallins ! La forêt ne consomme de l'eau que lorsqu'elle est disponible ! La consommation d'eau par les végétaux est liée à la disponibilité énergétique, et donc au climat !

	Disponibilité de la ressource en eaux	Soutien des étiages	Limitation des crues	Protection des sols	Réduction de la turbidité	Réduction des concentrations en éléments dissous	Acidification des eaux	Développement de la vie aquatique
Forêt de montagne		?						
Forêt de plaine		?						
Forêt alluviale								
Ripisylve								

: très positif
 : positif
 : neutre
 : négatif
 : très négatif

Synthèse qualitative de l'impact des différents types d'espaces forestiers sur les caractéristiques de la ressource en eau et des milieux aquatiques



En ce qui concerne la disponibilité de la ressource (fiches 4, 5)

Pour la disponibilité de la ressource, il semble bien que le fort développement foliaire des espèces arborées ait tendance à augmenter l'interception et l'évaporation des pluies et que leur fort développement racinaire soit susceptible

de mobiliser de fortes quantités d'eau du sol pour l'évapotranspiration. On peut alors raisonnablement penser que ces prélèvements réduisent d'autant les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement.

Ces prélèvements supplémentaires ne sont vraisemblablement pas compensés par une augmentation de la pluviométrie locale qu'induiraient les espaces forestiers ; mentionnons toutefois que des "précipitations occultes" sont observées dans des conditions particulières et peuvent être significatives dans des zones à brouillards fréquents.

La diminution du rendement en eau d'un bassin versant reste toutefois conditionnée par les conditions climatiques, la répartition de la pluie dans le temps, la disponibilité énergétique, les réserves hydriques potentielles du sol et du sous-sol... et les spécificités forestières : développement des peuplements, espèces, âge... Il s'ensuit une forte variabilité des impacts potentiels de la forêt sur la disponibilité de la ressource en eau d'un bassin versant.

Toutes choses restant égales par ailleurs, l'effet de réduction de la ressource totale dépendra essentiellement du taux d'occupation du bassin versant par les surfaces boisées, de telle sorte que c'est la forêt de plaine qui a l'impact le plus négatif sur la ressource en eau, la ripisylve n'ayant, à l'échelle annuelle et sous nos climats, qu'un effet négligeable. La forêt alluviale peut aussi avoir un impact négatif (mais faible) par prélèvement racinaire dans les nappes d'accompagnement des cours d'eau.



En ce qui concerne les étiages (fiches 5, 6)

Il a souvent été écrit que la forêt se comporte comme une "éponge", qui retient l'eau des pluies qu'elle restitue ensuite lentement. Cette affirmation résiste mal à une interprétation globale du fonctionnement hydrologique des bassins versants. Les étiages sont alimentés par la vidange des nappes et la vitesse de décroissance des débits dépend essentiellement des caractéristiques de la nappe (puissance, porosité, transmissivité, conditions hydro-dynamiques d'écoulement). On peut toutefois penser que les modifications des chemins de l'eau sur un bassin versant engendrées par les particularités hydrauliques des sols forestiers et par l'infiltration préférentielle le long du chevelu racinaire assurent un surplus de stockage souterrain. Ce surplus peut participer à un écoulement différé en saison sèche mais risque toutefois d'être mobilisé pour la transpiration si bien, qu'en fonction de spécificités locales (notamment les possibilités de stockage et de restitution des eaux souterraines), la forêt de versant peut avoir des effets bénéfiques ou non sur les débits d'étiage.

Par puisage direct dans les cours d'eau ou dans la nappe alluviale, les ripisylves et les forêts alluviales réduisent d'autant les écoulements. L'effet est relativement plus marqué sur les débits d'étiage, qui correspondent généralement en France, à la saison de forte transpiration des espèces arborées.

En ce qui concerne les crues (fiche 6.1)

Le rôle de la forêt comme modérateur des écoulements et réducteur des pointes de crues a été très largement affirmé et continue de l'être. Ce point de vue sur le rôle de la forêt, surtout en ce qui concerne les très fortes crues, est plus largement admis dans l'opinion publique que dans les milieux scientifiques. Si les études de terrain ont pu mettre en évidence un accroissement des débits de pointe des crues courantes suite à des déforestations brusques tels que les incendies, on a aussi démontré que ce sont souvent les aménagements associés à la gestion forestière (construction de routes, travaux d'exploitation) qui sont responsables des augmentations des débits de pointe de crues parfois constatées.

Le rôle de la forêt de versant comme protection contre les crues est indéniable et essentiel dans des conditions précises, et surtout, pour les crues de fréquence courante. Mais tous les spécialistes s'accordent sur le fait que, pour les événements pluviométriques importants (c'est-à-dire les plus rares et les plus dommageables), le couvert végétal n'a que peu d'influence.

Quant à la forêt alluviale, son impact est clairement positif, dans la mesure où elle constitue un champ d'expansion des crues qui ralentit le courant de façon importante et assure le stockage de volume qui contribue à un écrêtement des débits de pointe de crue.

Plus modestement, la ripisylve peut jouer un rôle réducteur des débits de crues en relation avec la formation d'embâcles. Mais il faut souligner les dangers réels que représentent les débâcles d'embâcles et les obstructions fréquentes des ouvrages d'art qu'ils provoquent.

En ce qui concerne les flux de sédiments et la turbidité de l'eau (fiche 6.2)

Le couvert forestier des versants est unanimement reconnu comme fournissant une bonne protection du sol. Il ne faut cependant pas exagérer ou idéaliser le rôle de protection contre l'érosion, car les études montrent qu'un couvert herbacé dense, en l'absence de surpâturage, peut avoir un rôle équivalent.

En ce qui concerne les forêts alluviales et ripisylves, elles constituent des obstacles au ruissellement de surface dans son cheminement vers le cours d'eau,

ainsi que des zones de sédimentation (le courant étant ralenti) lors des crues. Leur effet réducteur du transport solide est donc général.

Les perturbations du milieu, notamment lors des exploitations de bois, la création de pistes, le passage de gros engins... ne sont toutefois pas à négliger car ils sont souvent générateurs de fortes érosions mécaniques des sols.



En ce qui concerne la charge en éléments dissous (fiche 7)

Il est trivial d'écrire qu'en l'absence d'apports d'engrais, une forêt contribuera bien moins qu'une parcelle agricole à la charge des eaux en éléments dissous. Cependant, il faut noter qu'après une coupe, les relargages des zones forestières ne sont pas négligeables, tout en restant inférieurs à ceux des zones agricoles.

Forêts alluviales et ripisylves peuvent avoir un rôle actif de fixation des polluants agricoles, dans la mesure où ceux-ci transitent en écoulement souterrain. C'est aussi au niveau de ces zones humides que les processus de dénitrification peuvent avoir lieu.



En ce qui concerne l'acidification de l'eau (fiche 7)

Les études ont mis en évidence que, si les espaces forestiers produisent globalement des eaux de surface et souterraines de qualité, il existe un risque d'acidification des eaux issues des roches pauvres en calcium et magnésium dû en grande partie aux apports météoriques polluants mais aussi à l'appauvrissement des sols en relation avec leur exploitation forestière. La "rugosité" plus grande d'une forêt par rapport à un couvert herbacé fait également que les dépôts atmosphériques acides ont tendance à s'y concentrer. La minéralisation de la matière organique (chutes des feuilles) peut aussi concourir à l'acidification des sols et des eaux.

Il est évident que le problème de l'acidification des eaux ne concerne que les terrains cristallins, les zones calcaires disposant d'un potentiel de neutralisation de l'acidité incidente très important. La carte ci-jointe présente les régions françaises plus particulièrement menacées par l'acidification des eaux ; elles occupent une part non négligeable du territoire sans toutefois être les zones à forte densité de population.



En ce qui concerne la vie aquatique (fiches 7 et 9)

Même si des cours d'eau d'altitude, uniquement bordés de prairies, peuvent présenter une grande richesse piscicole, il apparaît que les peuplements piscicoles des cours d'eau de plaines soient fortement dépendants de la ripisylve. Le point central semble bien être que dans un milieu diversifié, tous les stades et les groupes trophiques peuvent trouver l'habitat et la nourriture appropriés à leur développement. Une ripisylve diversifiée, alternant zones d'ombre et zones de lumière, qui assure une bonne régulation de la température des eaux, a donc un fort impact positif, même si la réduction (dans des proportions inconnues) de l'écoulement en période sèche peut représenter un facteur négatif.

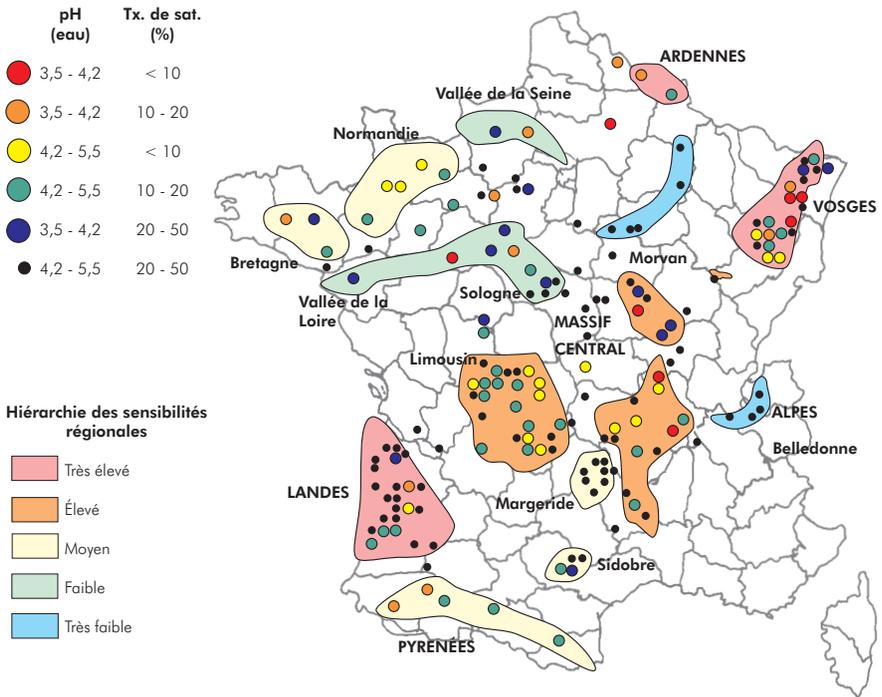
En revanche, la forêt de versant contribue, par opposition aux autres modes d'occupation de l'espace, à la production d'une eau de meilleure qualité.

L'acidification des eaux est toutefois un problème à ne pas négliger. De même, les plantations forestières au bord des cours d'eau d'espèces non appropriées peuvent avoir un effet particulièrement néfaste.

EN CONCLUSION

Les espaces forestiers interfèrent sur le cycle de l'eau. Des effets positifs sont identifiés, notamment sur le fonctionnement des hydrosystèmes, la qualité des eaux, la vie aquatique et sur une certaine forme de régulation des écoulements. Ces effets sont bénéfiques sur l'ensemble du territoire français et dans ce sens, l'extension des espaces forestiers est une bonne chose. A contrario, des effets négatifs sont à considérer, principalement en matière de disponibilité de la ressource en eau et d'acidification des eaux des régions cristallines.

Quelles mesures pratiques pouvons-nous instaurer, dans quel cadre administratif, pour une gestion des espaces forestiers soucieuse de ses répercussions sur la ressource en eau et sa qualité ?



Répartition des pH et des taux de saturation des sols (d'après Badeau, 1996) ; relations avec les régions sensibles aux charges critiques d'acidité en France (d'après Party et al., 1995). (source ADEME, "Les charges critiques en France", 1997)





QUELLES PRATIQUES ET QUEL CADRE RÉGLEMENTAIRE POUR UNE GESTION COMBINÉE DES FORÊTS ET DES RESSOURCES EN EAU ?



Si l'on souhaite bénéficier des effets positifs de la forêt sur le cycle de l'eau et réduire ses impacts négatifs, il faut à présent essayer de prendre en compte les cadres réglementaires dans lesquels s'inscrivent la gestion des eaux d'une part, et des forêts d'autre part, ainsi que les pratiques en cours dans chacune des familles de gestion. Avant tout, il faut poser la question de la faisabilité économique d'une gestion conjointe. Pour jeter les bases d'une telle étude, la section suivante présente quelques ordres de grandeurs qui, même s'ils ne sauraient constituer un examen économique exhaustif, font apparaître des possibilités pour une future gestion combinée des eaux et des forêts.

CADRE ÉCONOMIQUE ET FINANCIER

La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 stipule dans son article 1 : "L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général. L'usage de l'eau appartient à tous dans le cadre des lois et des règlements...".

Cependant, contrairement à certaines richesses naturelles telles que l'air et l'énergie solaire, l'eau est une valeur économique et son usage a un coût.

Ainsi, le prix moyen de l'eau distribuée aux collectivités s'élève à 15 F le m³, et, pour pratiquement 10% de la population, il excède 20 F le m³ (estimation de 1995). Ce prix unitaire est d'ailleurs en constante augmentation : il était de moins de 10 F en 1991.

En moyenne, ce montant se répartit comme suit : 45 % pour la production et la distribution de l'eau, 33 % pour l'épuration des eaux usées et 22 % pour les taxes (Fonds national d'adduction d'eau, agences de l'Eau, TVA). Une comparaison avec nos voisins européens est intéressante : si on attribue un indice 100 au coût de l'eau distribuée en Allemagne (pays pour lequel le coût de traitement des eaux est particulièrement élevé), l'indice coût pour la France est de 75. Cet indice reste supérieur à celui de nombreux autres pays euro-

péens : Finlande (56), Norvège (28), Royaume-Uni (50), pays aux ressources en eau plutôt abondantes, mais aussi à l'Espagne (28) et l'Italie (23), pour lesquels la disponibilité en eau est bien plus tendue.

On aboutit au total à un budget annuel de l'eau d'environ 90 milliards de francs, sur la base d'une facturation des 6 milliards de m³ distribués aux particuliers à un prix moyen de 15 F/m³ : soit, en moyenne, une dépense de 1500 F par an et par habitant.

Notons toutefois que le coût de l'eau varie énormément avec les usages. Ainsi, pour les utilisateurs non raccordés à un réseau des secteurs agricole, industriel et énergétique, l'eau brute est gratuite (l'eau n'a pas, pour ces usages, la qualité eau de boisson). La loi sur l'eau de 1992 impose toutefois une déclaration ou une autorisation pour le prélèvement et le rejet dans le milieu naturel.



Par ailleurs, si l'on examine l'économie de la filière bois, on observe que son chiffre d'affaires excède largement celui de la filière eau. Le chiffre d'affaires annuel de la filière – sylviculture, exploitation, première et deuxième transformation – s'élève à 230 milliards de francs et excède 400 milliards en incluant la distribution et la commercialisation des produits à base de bois.

En revanche, le produit financier de la production de bois rond de nos forêts n'était que de 10,5 milliards de francs en 1992, et atteint actuellement 12,5 milliards de francs en incluant la valeur de l'autoconsommation.



Ainsi le produit financier de la production annuelle de bois reste très largement inférieur au chiffre de la distribution des eaux. Ce chiffre d'affaires est pratiquement atteint par celui des seules eaux minérales en France (11 milliards de francs en 1992) !

Cette remarque doit nous faire réfléchir. Un bien gratuit, l'eau, produit pour une bonne partie par les zones forestières (qui occupent 25 % du territoire national principalement à pluviométrie élevée), voit son budget national (certes après distribution, traitement et prise de bénéfices) nettement supérieur à la seule valeur de la production de bois qui reste encore le critère dominant de la gestion des forêts françaises.

Il faut bien sûr reconnaître que ces évaluations financières sont globales et quelque peu contestables. On oppose en effet le budget global de l'eau à la seule valeur marchande du bois, et non pas au revenu de l'ensemble de la

filière bois. Les chiffres que nous venons d'avancer montrent toutefois qu'abaisser la consommation en eau de nos forêts par des reboisements adaptés, par l'entretien des forêts, pour leur faire jouer un rôle essentiellement épurateur, conservateur et producteur d'eaux de qualité est financièrement concevable. Les éventuels effets négatifs sur la production de la filière bois pourraient aisément être compensés par un flux financier en provenance de la filière eau : un franc par m³ distribué, soit une augmentation de 6 % du prix payé par les abonnés, représenterait 6 milliards de francs par an, soit la moitié du produit de la vente des bois ; vingt centimes par m³ prélevé représenteraient huit milliards de francs par an. Au total, on atteindrait largement le montant des ventes de bois.

Cependant, s'il apparaît tout à fait imaginable de remplacer une partie de la matière première bois produite par les forêts françaises par des bois d'importation, l'importation d'eau est moins aisément envisageable.

Malgré la rapidité et la trop grande simplicité du calcul que nous venons d'effectuer (l'eau n'est pas seulement produite par les espaces forestiers, etc.) ces chiffres démontrent qu'une reconnaissance financière de la production d'eau de qualité par les espaces forestiers est réellement envisageable. On peut donc à présent poser la question de la faisabilité technique d'une gestion combinée.

COMMENT AMÉLIORER LA PRISE EN COMPTE DE L'EAU DANS LA GESTION FORESTIÈRE ?

Les questions touchant à la gestion de l'eau ne sont pas étrangères à la gestion forestière. Déjà en 1800, dans un "Projet d'organisation forestière", Rougier de la Bergerie proposait des dispositions spécifiques à certains bassins versants. Plus tard, à la fin du 19^e siècle, les résultats spectaculaires des travaux de restauration des terrains en montagne (qui avaient pour objectif principal la lutte contre l'érosion torrentielle) ont profondément marqué les esprits. De façon plus modeste mais néanmoins ancrée dans la culture technique des gestionnaires forestiers, la gestion de l'eau est l'une des fonctions attendues de la forêt, qui doit être prise en compte dans les plans de gestion des forêts.

Lorsqu'elle est prise en compte, elle souffre néanmoins de trois handicaps :



Vis-à-vis de la ressource en eau, on considère la forêt pour son rôle de protection et non pas de production. Les mesures techniques à prendre ne sont ainsi étudiées que dans des cas particuliers déjà identifiés : périmètres de protection des sources et périmètres de protection contre l'érosion. Le forestier n'est pas conduit, dans ces conditions, à analyser quelle part prend la forêt qu'il gère dans la production d'eau potable du bassin versant, ni quelles sont les conséquences de ses choix d'aménagement sur cette production.

 Les unités géographiques de gestion sont inadaptées : la région administrative pour les "Orientations régionales forestières" et la propriété individuelle pour les plans de gestion ne sont pas des entités géographiques pertinentes par rapport à la gestion de l'eau.

 Les lieux de négociation et de contractualisation de la fonction de production d'eau des forêts sont inexistantes (en fait les "Schémas d'aménagement et de gestion des eaux" devraient en être). Or, cette fonction peut entrer en compétition avec les autres fonctions attendues de la forêt : production de bois, maintien de la biodiversité, accueil du public, paysage, etc. Des arbitrages sont nécessaires, dans lesquels devront intervenir les conditions de la rémunération de la fonction de production d'eau. Ceux-ci ne peuvent se faire que par la négociation entre les propriétaires forestiers et les demandeurs de la production d'eau.

Au-delà des connaissances scientifiques et des développements techniques qui sont nécessaires pour améliorer la prise en compte de l'eau dans la gestion forestière, il faudrait promouvoir un cadre pour le rapprochement technico-économique de la gestion de l'eau et de la gestion des forêts. Le débat international sur la gestion durable des forêts et ses échos au niveau national vont dans ce sens : le nouveau type de planification forestière qui pourrait voir le jour devrait redéfinir des entités de gestion pertinentes, valoriser et concilier l'ensemble des fonctions marchandes et non marchandes de la forêt, et enfin asseoir les phases de décision et de suivi de la gestion forestière sur des bases participatives. Le rapport de Jean-Louis Bianco sur la forêt en 1998 préconise ainsi l'établissement de contrats de territoire pour mettre en œuvre des projets élaborés en concertation entre les différents acteurs.

Néanmoins, sans attendre l'émergence d'une nouvelle forme de planification de la gestion forestière, on peut recommander une meilleure prise en compte des questions relatives au rôle de la forêt par rapport à la gestion de l'eau dans deux types de documents qui existent déjà : les "Orientations régionales forestières" et les "Schémas d'aménagement et de gestion des eaux".



POSITION DES GESTIONNAIRES DE L'EAU ET RÉGLEMENTATION ISSUE DE LA LOI SUR L'EAU

Si les forestiers semblent avoir du mal à dépasser l'échelle de la parcelle forestière et à penser la forêt en termes d'élément intégré à un bassin versant, les gestionnaires de l'eau en France semblent souvent limiter leur domaine d'intérêt au lit majeur du cours d'eau. Le concept de **gestion intégrée des bassins versants**, introduit par la loi sur l'eau de 1992, est lent à progresser dans les esprits.

Aujourd'hui, aucun des six "Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux" (SDAGE), prévus par la loi pour servir de cadre aux efforts de planification de l'aménagement des eaux (ainsi qu'à la rédaction de leurs déclinaisons locales, les SAGE) ne semble considérer la forêt comme un outil de gestion de l'eau. On y invoque des efforts de dépollution, de restauration des débits d'étiage, de protection des milieux aquatiques, de délimitation des zones inondables ... avec une vision essentiellement « aquatique ». La forêt, lorsqu'elle est citée, se résume à la ripisylve, parfois à la forêt alluviale ; la protection des périmètres de captage par des boisements appropriés est parfois abordée.

Il semble bien que les analyses faites dans les travaux préparatoires à la rédaction des SDAGE se soient arrêtées au niveau du réseau hydrographique, sans aller jusqu'à intégrer le fonctionnement de l'ensemble du bassin versant. Ce manque de vision globale et de prospective est tout de même inquiétant, pour des documents d'orientation et de planification. Ainsi l'impact d'un grand massif forestier comme la forêt landaise sur la ressource en eau et sa qualité n'est pas expressément abordé ; de même, les éventuels impacts de l'extension des zones forestières sur l'ensemble du territoire, d'une évolution climatique... ne semblent pas susciter beaucoup de réflexions.

Les SAGE, outils locaux pour la mise en œuvre des SDAGE, restent avant tout des outils de planification dans le domaine de l'eau. Sur la trentaine de SAGE en phase d'évaluation avancée à la fin de l'année 1997 (six ans tout de même après la parution de la loi sur l'Eau), une faible proportion (trois exactement) considère également le SAGE comme un outil d'aménagement du territoire : ce sont essentiellement des considérations en matière d'urbanisme et d'accroissement de la vulnérabilité. Les impacts de l'occupation de l'espace sur le cycle de l'eau ne sont pas abordés.



LA FORÊT PEUT-ELLE ÊTRE UN OUTIL DE GESTION DES EAUX ?



Bien qu'en France la disponibilité d'une ressource en eau de qualité en quantité suffisante ne soit pas aussi préoccupante que dans certains pays voisins, la gestion de la ressource présente de nombreux manquements et sa réforme devrait être sérieusement considérée. Malgré des efforts d'économie de l'eau et des prédictions qui n'envisagent qu'une légère augmentation de la consommation, l'avenir verra l'instauration de normes de potabilité de plus en plus drastiques. On sera également confronté aux conséquences des flux de pollution dus à la progression de l'artificialisation des surfaces, à la nécessité de gérer le passif des pollutions diffuses actuelles et cela, dans un avenir incertain quant à l'impact de l'augmentation de l'effet de serre sur le régime pluviométrique et les pertes par évapotranspiration.

À cause d'une prise en compte tardive de la problématique eau, nous sommes aujourd'hui engagés dans une politique centrée sur l'utilisation de techniques curatives. Ainsi, des masses financières conséquentes sont consacrées au traitement et à l'épuration des eaux. Ces coûts sont essentiellement supportés par les consommateurs, soit directement par les abonnés à un point de distribution d'eau, soit indirectement par un surcoût des produits finis qui traduit les efforts de dépollution des industriels. Les agriculteurs sont montrés du doigt. Le concept de pollueur-payeur tend à se généraliser. Quoiqu'il en soit, cela aura toujours une traduction financière qui se répercutera d'un bout à l'autre de la chaîne de production et qui aura le désavantage d'augmenter le coût des produits finis. On ne peut que redouter d'être engagés dans une spirale inflationniste qui conduira, à l'avenir, à des augmentations sensibles du prix de l'eau.

Existe-t-il, au travers de mesures préventives, des possibilités d'augmenter la disponibilité de la ressource en eau au niveau national, tout en préservant et si possible en améliorant sa qualité ? Certains exemples, tels que la gestion de l'espace pour la production d'une eau de qualité par la ville de Munich, nous

incitent à penser que oui. Grâce à une maîtrise partielle du foncier essentiellement couvert de forêts, à une sylviculture appropriée, à une exploitation raisonnée pour la production de bois, à une maîtrise des apports en fertilisants et phytosanitaires sur les espaces agricoles, à des aides financières incitatives pour développer une agriculture biologique... la ville de Munich alimente en eau une population de 1,3 million d'habitants sans aucun traitement préalable (une seule chloration préventive ces quinze dernières années ; le taux de nitrates, qui est de 12 mg/l est en baisse après une pointe à 15 mg/l lors de la précédente décennie). Le coût de ces mesures préventives est de l'ordre de 30 centimes par m³ ; soit bien moins que le coût de dénitrification d'un m³ ! Ce programme de prévention a toutefois été initié dès 1880.

Il serait restrictif de n'envisager la problématique eau qu'en termes d'occupation et d'aménagement de l'espace. La disponibilité de la ressource est avant tout conditionnée par la pluviométrie et les marges de manœuvre sur ce terme du bilan hydrologique sont plutôt limitées. Ainsi, l'alimentation en eau de nombreuses zones de plaine est obligatoirement dépendante des ressources des hauts bassins et des stockages des retenues. Cependant, la qualité des eaux de l'ensemble des petits cours d'eau, leur équilibre hydro-écologique sont des problèmes locaux dont la résolution implique la recherche de solutions locales.

Différentes solutions existent pour améliorer la qualité des eaux. On doit améliorer les performances des stations d'épuration des eaux. Mais des solutions préventives doivent aussi être recherchées. Des économies d'eau sont possibles, notamment en agriculture. Une meilleure maîtrise de l'utilisation des fertilisants et des pesticides, une diminution de l'utilisation des phosphates par les ménages... contribueront à améliorer la qualité des cours d'eau et des eaux souterraines.

Les espaces forestiers occupent plus du quart du territoire ; leur impact sur le cycle de l'eau doit être considéré avec une attention privilégiée. Les différentes fiches techniques de ce document montrent que les espaces forestiers ont des effets plutôt positifs sur la qualité des eaux en raison de leur fonctionnement propre mais aussi en tant que partie de l'espace où les effets anthropiques sont réduits en relation avec de faibles fréquences d'intervention et des modalités de gestion plutôt moins traumatisantes (tout du moins par comparaison à l'urbanisation et à certaines pratiques agricoles). En revanche, il semble acquis que les espaces forestiers altèrent sensiblement les disponibilités de la ressource en eau.

Est-il possible, est-il nécessaire d'aller au-delà des seuls principes d'affichage des utilités de la forêt en terme de gestion des eaux et inscrire un critère de conservation de la ressource en eau, de garantie de sa qualité, voire de son amélioration au même rang que les critères de conservation de la ressource forestière, de la conservation des écosystèmes forestiers, de la conservation de la biodiversité... dans le processus de gestion durable des forêts ?

Gérer la forêt pour mieux gérer l'eau n'implique pas nécessairement de grands bouleversements des usages et pratiques actuelles. Les efforts dans ce sens peuvent prendre différentes modalités dans le temps et dans l'espace :



- l'amélioration de la conduite des travaux d'exploitation forestière, afin de réduire au minimum leurs impacts négatifs sur le cycle de l'eau,
- une gestion concertée des espaces forestiers alluviaux pour respecter leur rôle fondamental pour l'équilibre des hydrosystèmes,
- la restauration, voire l'extension de zones tampon forestières entre la rivière et les milieux perturbés générateurs de pollutions diverses,
- la préservation et la restauration des haies, des alignements pour leur rôle régulateur du cycle de l'eau en milieu anthropisé,
- un choix des espèces et une sylviculture de la forêt de versant, avec un but affiché de préservation de la qualité de la ressource en eau et d'économie par limitation de l'évapotranspiration potentielle,
- une répartition géographique équilibrée des espaces forestiers en veillant à une préservation des hydrosystèmes de tête de bassins versants et avec pour objectif de disposer sur tout le territoire d'une eau de qualité boisson produite à des distances raisonnables des forts points de consommation (au sens des réseaux d'acheminement et de distribution).

La démarche pourrait être poussée jusqu'à un classement en forêt de protection pour la production d'eau de qualité.





CONCLUSION



À partir des éléments rassemblés dans cette synthèse, il apparaît nécessaire que le gestionnaire de l'eau prenne en compte et utilise de façon programmée l'impact des espaces forestiers sur le cycle de l'eau.

De même, il semble bien pour le gestionnaire forestier, qu'il soit possible d'inscrire un critère de conservation et de production de la ressource en eau, de garantie de sa qualité, voire de son amélioration au même rang que les critères de conservation et de production de la ressource forestière, de la conservation des écosystèmes forestiers, de la conservation de la biodiversité dans l'approche de gestion durable des forêts.

Cependant, il semble malgré les connaissances aujourd'hui acquises concernant l'impact de la forêt sur le cycle hydrologique, que nous n'avons pas encore les moyens de quantifier précisément cet impact et de fournir aux gestionnaires de l'eau et des forêts des modèles qui constituent de véritables outils de prise de décision. Nous manquons également d'un lieu de négociation et de contractualisation de la fonction de production d'eau des forêts. Toutefois, des recommandations peuvent être formulées avec pour objectif de proposer à l'avenir des solutions de gestion intégrées pour la forêt et l'eau.



Sur le plan de l'aménagement du territoire

Il faudrait pouvoir :

- développer la prise en compte du couvert forestier, de sa gestion, de son extension dans l'espace dans les SAGE ;
- aborder de façon explicite la fonction de production d'eau de la forêt dans les "Orientations régionales forestières" ;
- mettre en place des mécanismes de contractualisation sur des territoires pertinents au regard de la gestion des eaux et de la gestion forestière.

Ces prescriptions sont parfaitement intégrables dans la loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire qui aborde la gestion à long terme des ressources naturelles, leur préservation, la prévention des changements climatiques... et met en place différentes structures de dialogue à plusieurs niveaux (schéma des services collectifs des espaces naturels et ruraux, schémas régionaux et inter-régionaux d'aménagement et de développement du territoire) et des instruments économiques tels que les contrats territoriaux d'exploitation, prévus par la loi d'orientation agricole.



Sur le plan technique

Il serait souhaitable

- d'agir au niveau de la formation de base et de la formation continue des ingénieurs forestiers et de des techniciens forestiers en intégrant des bases d'hydrologie forestière et d'écologie des cours d'eau ;
- d'assurer une bonne diffusion des connaissances aux gestionnaires des eaux, aux gestionnaires des forêts, aux multiples décideurs...
- de synthétiser les connaissances actuelles et les traduire en grilles d'analyse de la sensibilité des bassins versants à la couverture forestière et à sa gestion.



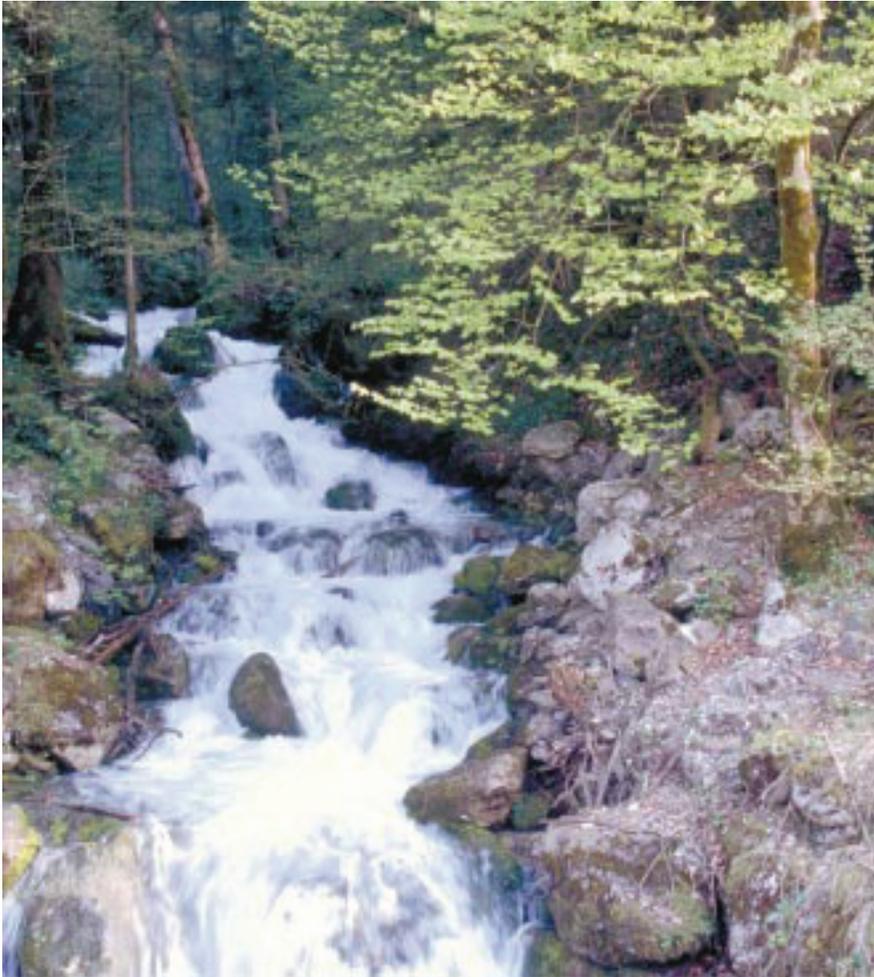
Sur le plan scientifique

Il faut poursuivre des recherches ciblées pour pouvoir :

- concevoir et améliorer des modèles opérationnels qui permettent de traiter des bassins versants de taille « opérationnelle », de quelques dizaines à quelques centaines de km², en y intégrant de façon effective l'impact du couvert forestier ;
- définir les limites de l'effet régulateur réel de la forêt sur le cycle hydrologique et notamment sur ses extrêmes, crues et étiages ;
- proposer des espèces et un type de sylviculture pour une forêt qui soit aussi peu consommatrice en eau que possible et qui n'altère pas la qualité de la ressource, tout en conservant sa fonctionnalité première de production de bois. Le challenge est tout à fait comparable à celui posé à l'agriculture : une agriculture la plus productive mais la moins polluante et économe en eau ;
- proposer, de la même façon pour la forêt alluviale et la ripisylve, des espèces, des critères de dimensionnement et de gestion de ces zones afin qu'elles puissent jouer le rôle épurateur qu'on leur prête, tout en consommant le moins d'eau possible en étiage ;

– enfin, il serait nécessaire, malgré toutes les incertitudes qui existent à ce sujet, de pouvoir travailler sur l'impact des changements climatiques et leur traduction sur le bilan hydrique de la forêt. L'étude des interactions : changement climatique / ressource en eau / espèces forestières pourrait déboucher sur des recommandations techniques et socio-économiques afin de préserver les capacités de production de la forêt, tout en évitant les conflits d'usage de l'eau.

Pour se situer dans une dynamique de développement durable, ces recherches sont évidemment multi- et trans-disciplinaires : climatologues, hydrologues, écologues, forestiers, spécialistes du sol, physiciens de l'atmosphère ... et aussi économistes, sociologues sont concernés. Les progrès attendus doivent être opérationnels, pour pouvoir être utilisés dans une politique générale d'aménagement de l'espace.



BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Une bibliographie plus détaillée est jointe aux fiches techniques. La synthèse bibliographique qui est la base de ce travail fait l'objet d'une édition particulière.

SITES WEB

- Inventaire forestier national : www.ifn.fr
- Institut français de l'Environnement : www.ifen.fr
- Office national des forêts : www.onf.fr

BESOINS EN EAU

COLLECTIF (1995), *Problèmes d'environnement, dires d'expert*, Lavoisier, Paris.

MARGAT J. et TIERCELIN J.- R. (1998), *L'eau en questions. Enjeu du XXI^e siècle*, Édition Romillat, 301 p.

NOWAK F. (1995), *Le prix de l'eau*, Édition Economica, 111 p.

REDAUD J.- L. (1999), *Planète eau : repères pour demain*, Éditions Johanet, 331 p.

SIBIEUDE C. et SIBIEUDE T., *Les rouages économiques de l'environnement*, Éditions de l'atelier, 149 p.

EAU ET FORÊTS

ADEME (1997), *Les charges critiques en France. Données et références*, Éditions ADEME, 59 p.

AGENCE DE L'EAU Seine-Normandie (1979), *Influence de la forêt et du déboisement sur le débit des cours d'eau*, Agence financière de Bassin Seine-Normandie.

AGENCE DE L'EAU Loire-Bretagne (1999), *Le boisement pour protéger l'eau* (09/99), 4 p.

BADEAU V. (1996), *Caractérisation écologique des placettes françaises du réseau européen. Premiers résultats*, ministère de l'Agriculture, INRA, 14 p. + annexes.

COSANDEY C. et ROBINSON M. (2000), *Hydrologie continentale*. Éditions Armand Colin, 360 p.

FORT C. (1999), "Synthèse bibliographique sur le thème de l'eau et de la forêt", *Bulletin technique de l'ONF*, n° 37, 240 p.

HUMBERT J. et NAJJAR G. (1992), *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone*, CEREG et université Louis Pasteur (Strasbourg I), 85 p.

JOURNAL OF HYDROLOGY (1993), "Water issues in forest today", Elsevier Science Publishers, vol. 150, p. 189-788.

MOLCHANOV A. A. (1960), *The hydrological role of forests*. Moscou, Israel program for scientific translations, Jerusalem, 1963.

ONF (1999), *Bulletin technique de l'ONF*, n° 37, "L'eau et la forêt", Synthèse bibliographique réalisée par Christine FORT, Édition ONF, 240 p.

PARTY J.-P., PROBST A. (1995), *Calcul et cartographie des charges critiques en France*, Rapport ADEME d'avancement des travaux et prospective, période 1992-1994, 16 p.

ROUGIER DE LA BERGERIE, F. (1800), *Mémoire et observations sur les abus de défrichements et la destruction des bois et forêts*, Librairie François Fournier, Auxerre, 76 p.

GESTION DES FORÊTS

ARMEF (1993), *Manuel d'exploitation forestière*, Tome I, ARMEF-CTBA, Fontainebleau, 442 p.

ARMEF (1994), *Manuel d'exploitation forestière*, Tome II, ARMEF-CTBA, Fontainebleau, 415 p.

BIANCO J.L. (1998), *La forêt : une chance pour la France*, 57 p.

DUBOURDIEU J. (1997), *Manuel d'aménagement forestier*, ONF-Tec et Doc-Lavoisier, Paris. 244 p.

MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT (1997), *Boiser avec la nature. Un enjeu pour notre territoire et notre environnement*, 32 p.

REVUE FORESTIÈRE FRANÇAISE (1996), "La gestion durable des forêts tempérées", *Revue forestière française*, n° spécial, 1996, 252 p.

FICHES TECHNIQUES

SOMMAIRE

1	Les eaux continentales de France	p. 33
2	Évolution de l'occupation de l'espace et des surfaces forestières en France	p. 41
3	Forêt et climat	p. 47
4	Cycle de l'eau en forêt	p. 53
5	Forêt et ressources en eau	p. 63
6	Forêt et risques naturels liés à l'eau	p. 73
7	Forêt et qualité de l'eau	p. 85
8	Les ripisylves	p. 93
9	Forêt et ressources piscicoles	p. 103
10	Gestion de l'espace et protection des eaux : quelques cas concrets	p. 109



FICHE 1



LES EAUX CONTINENTALES DE FRANCE



Le cycle de l'eau en France : quelques chiffres

Globalement la situation actuelle de l'eau en France n'est pas jugée préoccupante. L'apport moyen météorique annuel est évalué à $480 \cdot 10^9 \text{m}^3$. La ressource mobilisable annuelle moyenne (eaux de surface et souterraine) est estimée à $170 \cdot 10^9 \text{m}^3$. Les prélèvements pour l'activité économique (industrie, agriculture, collectivités locales) s'élèvent à $41 \cdot 10^9 \text{m}^3$, soit un peu moins de 25 % de la disponibilité. Toutefois, si on se limite à la fraction raisonnablement exploitable qui est estimée à $100 \cdot 10^9 \text{m}^3$, la proportion des prélèvements s'élève à 41 % de la disponibilité.

La répartition des prélèvements entre les eaux souterraines et les eaux de surface est variable selon les utilisations :

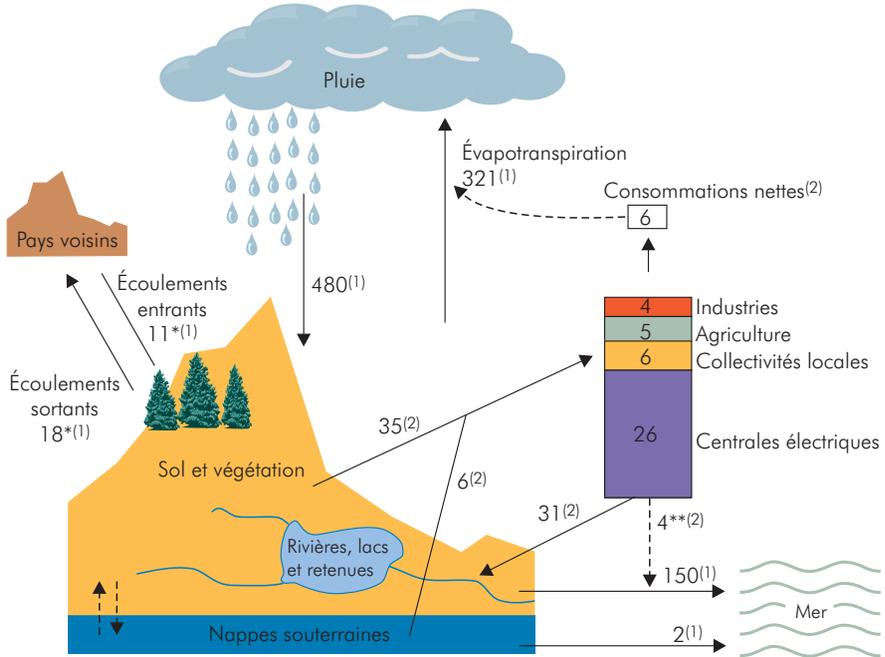
- les eaux souterraines représentent pratiquement 60 % des prélèvements pour l'alimentation en eau potable, et 38 % des prélèvements industriels (hors centrales électriques) ;

– les eaux de surface constituent 80 % des prélèvements de l'agriculture et pratiquement 100 % des eaux de refroidissement des centrales électriques.

Seulement 15 % de ces prélèvements ($6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$) sont effectivement consommés. L'agriculture est le plus gros pôle de consommation : environ 50 %, soit $3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

La ressource et les prélèvements par nature

Flux en milliards de m^3 par an



(1) Moyenne annuelle à long terme. *Rhin non compté.

(2) Estimation 1994. **Non compris le projet hydroélectrique de la basse Durance dans l'étang de Berre.

(France métropolitaine) Source : Ifen - BRGM - ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (DE)

Fig. 1.1 – Le cycle de l'eau en France

À moyen terme, les prélèvements ne devraient pas évoluer de manière significative. La tendance actuelle des prélèvements marque une légère baisse pour le secteur industriel et pour l'alimentation en eau potable et une progression des besoins pour l'agriculture (de l'ordre de 14 % de 1981 à 1994).

Doit-on pour autant déduire de ces estimations globales qu'il n'existe pas de problème de la disponibilité de l'eau en France ? Certainement pas, ces chiffres globaux masquent en réalité des situations bien différentes.



Les apports pluviométriques sont fortement variables dans le temps

Ayons toujours en mémoire les sécheresses de 1976, 1989, 1990, ... qui ont affecté de nombreuses régions françaises. Un déficit pluviométrique marqué se traduit inmanquablement par une baisse significative de la ressource en eaux de surface et souterraines. De plus, cet état s'accompagne d'une sécheresse atmosphérique et d'une sécheresse des sols qui se traduisent par une augmentation de la consommation.

Pour ces années sèches, malgré une hétérogénéité géographique marquée, la ressource globale disponible chute d'environ 40 %, réduisant ainsi la disponibilité totale à environ $100 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$. On estime par exemple qu'en 1990, 11 000 km de cours d'eau étaient asséchés.

Cette variabilité interannuelle, se double d'une variabilité saisonnière. Excepté pour les régimes hydrologiques glaciaires et montagnards, la majorité des cours d'eau français présentent un étiage d'été, qui coïncide avec une augmentation significative des demandes. Ainsi, pour nos grands cours d'eau, les débits mensuels de fréquence quinquennale (débits non dépassés en moyenne une année sur cinq) ne représentent qu'une proportion faible des écoulements moyens annuels ; les volumes écoulés pendant le mois d'étiage sont de l'ordre de un à trois pourcents des volumes moyens annuels (cf. tableau 1. 1) .

	Surface (km ²)	Module (m ³ /s)	Débit mensuel minimum de fréquence quin- quennale (m ³ /s)	Propor- tion en débit (%)	Propor- tion en volume (%)
La Seine à Poses	65 000	410	110	27	2,2
La Loire à Montjean	115 000	870	140	16	1,3
Le Rhône à Beaucaire	96 500	1 700	660	39	3,2
La Garonne à Mas d'Agenais	52 000	630	110	17	1,4

Tableau 1. 1 – Caractéristiques des débits des grands cours d'eau français.



Pour l'ensemble de la France, le prélèvement moyen mensuel estimé comme le 1/12 du prélèvement annuel s'élève à $3,4 \cdot 10^9 \text{m}^3$. La disponibilité totale du mois d'étiage de fréquence quinquennale peut être approchée par la somme des débits d'étiage ramenée à la superficie totale du territoire ; elle serait de l'ordre $4,5 \cdot 10^9 \text{m}^3$. En étiage sévère, la totalité des eaux de surface couvre péniblement la totalité des prélèvements. Bien que ces calculs soient très globaux et ne prennent pas en compte que les mêmes volumes d'eau puissent être prélevés plusieurs fois, ils montrent toutefois que la pénurie en eau est une situation latente et que, seule l'inertie de la réserve souterraine et les aménagements masquent quelque peu l'acuité du problème.



Les apports pluviométriques sont fortement variables dans l'espace

Des forts déséquilibres géographiques existent, avec le constat que les zones à forte disponibilité de la ressource sont généralement les zones montagneuses pour lesquelles les prélèvements sont faibles, en raison de leur faible densité de population. Les zones de plaine et urbanisées sont généralement fortement tributaires des zones amont (la zone méditerranéenne est dans ce sens exemplaire : la majorité de la ressource est assurée par l'arrière pays, notamment les Alpes pour la zone provençale). Le bassin Rhône-Méditerranée peut aussi compter sur un débit d'étiage soutenu du Rhône, mais on remarque au tableau 1.1, que les étiages de la Garonne et de la Loire sont particulièrement marqués, ce qui entraîne des conflits d'eau dans ces régions.



Quelle sera l'évolution de la disponibilité de la ressource sous la contrainte de l'augmentation de l'effet de serre ?

Les connaissances actuelles sur le sujet sont encore assez floues. Légère augmentation de la pluviométrie de la zone climatique atlantique ? Accroissement des tensions de la gestion des eaux en zone méditerranéenne, en relation avec une baisse de la pluviométrie ? Quelle sera l'évolution des bilans hydrologiques des bassins versants, confrontés à une augmentation rapide de la biomasse en relation avec l'augmentation du taux de dioxyde de carbone de l'air ? En outre, ces connaissances ne sont que fragmentaires, alors que nous risquons d'être confrontés très rapidement à ce problème.



La qualité des eaux en France

La qualité des eaux est définie selon les critères fixés par la législation française et européenne. La qualité des eaux s'apprécie en fonction de l'usage

considéré : consommation humaine, baignade, milieu vivant... Les normes de potabilité fixent des valeurs seuils pour 62 critères : paramètres organoleptiques, paramètres physico-chimiques naturels, substances indésirables (nitrates, phosphore...), substances toxiques, pesticides et paramètres microbiologiques.

Bien que les eaux puissent naturellement excéder les seuils de potabilité (c'est le cas de certaines eaux minérales), l'altération de la qualité des eaux est en grande partie due aux émissions polluantes. On distingue :

- les rejets ponctuels des activités industrielles et des usages domestiques,
- les pollutions diffuses en grande partie imputables aux activités agricoles (fertilisation et produits phytosanitaires),
- les pollutions accidentelles : activités de transport, déversement non contrôlés, réseaux pluviaux ...

Qu'en est-il de la qualité des eaux des fleuves et rivières ? Selon l'Institut français pour l'environnement (IFEN), la qualité des eaux des cours d'eau s'améliore globalement pour ce qui concerne le phosphore et les matières organiques, mais se dégrade pour les nitrates. À partir de plus de 500 sites sélectionnés pour l'ensemble des cours d'eau français, la qualité de l'eau est cependant jugée mauvaise ou médiocre pour 11 % des points en ce qui concerne le phosphore, 8 % pour les matières organiques et 2 % pour les nitrates (cf. figure 1. 2).

En ce qui concerne la qualité des eaux distribuées (réputées potables même si la consommation directe n'en représente qu'une faible proportion), on note selon l'IFEN que le non-respect des normes est somme toute assez fréquent. Ainsi, 55 % de la population a reçu, au moins une fois au cours de l'année 1995, une eau qui ne respectait pas une des normes de potabilité. Et pour 13% de la population, le non-respect de l'une des normes excédait 30 jours par an (cf. tableau 1. 2).

La qualité des eaux en France est quelque peu préoccupante. Il est urgent d'améliorer la situation que ce soit pour les pollutions diffuses (nitrates, phosphates, produits phytosanitaires...) qui menacent la qualité des eaux souterraines ou pour l'épuration des effluents des agglomérations, rejetés dans le milieu naturel, et pour lesquels seulement 44 % de la pollution brute en matières organiques et oxydables est actuellement éliminée.



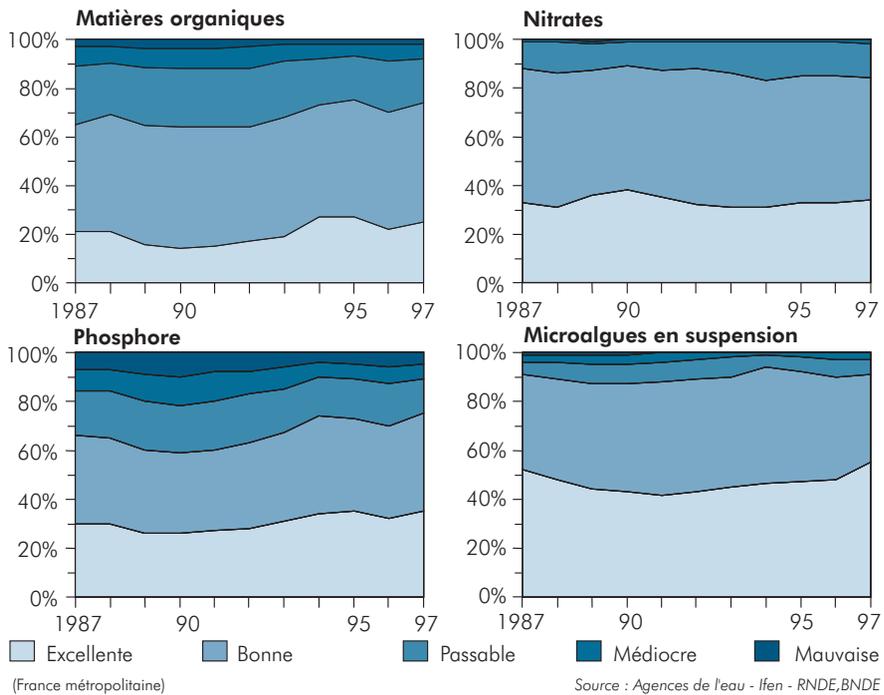


Figure 1. 2 – Qualité des fleuves et rivières
Évolution de la répartition de 548 sites de mesure par classe d'altération de 1987 à 1997

Groupe de paramètres :	Population desservie par de l'eau strictement conforme aux normes	Population ayant reçu de l'eau non conforme aux normes	
		accidentellement	plus de 30 jours/an
Bactériologie	26,303	16,696	0,996
Turbidité	35,472	8,037	0,487
Pesticides	38,627	2,788	2,581
Fer	41,525	2,030	0,440
Nitrates	42,563	0,727	0,706
Aluminium	42,619	1,086	0,291
Fluorures	43,623	0,040	0,332
Autres	39,116	3,634	1,244
Tous paramètres	19,815	18,627	5,553

Millions d'habitants

Ces données concernent les unités de distribution desservant plus de 5 000 habitants permanents en France métropolitaine et dans les DOM. Toute la population d'une unité de distribution est considérée comme desservie par une eau non conforme dès qu'une analyse, en un point quelconque du réseau de distribution, révèle un dépassement des normes sanitaire.

Source : ministère de l'Emploi et de la Solidarité (DGS-DDASS) - Ifen

Tableau 1. 2 – La qualité de l'eau de consommation en 1995

En conclusion

Le climat tempéré et les zones d'altitude à pluviométrie relativement élevée assurent à la France métropolitaine des ressources conséquentes en eau. Malgré cela, des conflits d'usage apparaissent notamment en période d'étiage. Lors de ces périodes, la qualité des eaux de surface s'altère particulièrement. Il ne faut pas perdre de vue que, malgré la dichotomie classique de la présentation, quantité et qualité sont deux objectifs indissociables d'une gestion globale de l'eau. Par ailleurs, les eaux souterraines et les eaux de surface ont une origine commune (la pluie) mais aussi des sources de pollution communes au niveau de l'interface sol – atmosphère ; la plus grande inertie des eaux souterraines doit nous inciter à la plus grande vigilance pour garantir leur pérennité et leur qualité.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.ifen.fr

DE MARSILY G. (1995), "Les pollutions des eaux continentales", In : *Problèmes d'environnement, dires d'expert*, Lavoisier, Paris.

IFEN (1999), *Chiffes-clés de l'environnement*, Édition 1999, 21 p.

MARGAT J. et TIERCELIN J.R. (1998), *L'eau en questions. Enjeu du XXI^e siècle*, Édition Romillat, 301 p.

PAOLI D. & RIEU T. (1992), "La situation de l'eau en France", *Économie et statistique*, n° 258-259, p. 95-104.

REDAUD J.L. (1999), *Planète eau : repères pour demain*, Éditions Johanet, 331 p.

RNDE (1994), "Débits des cours d'eau. 10 ans d'observations 1984-1993", *Synthèse sur 200 stations de mesures en France*, 186 p.





FICHE 2

ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DE L'ESPACE
ET DES SURFACES FORESTIÈRES EN FRANCE

2

**Les grandes modifications de l'occupation de l'espace
en France au 20^e siècle**

Malgré la difficulté à rassembler des données statistiques fiables sur les surfaces forestières passées, Cinotti (1996) a montré que le taux minimum de boisement en France avait sans doute été atteint au début du XIX^e siècle. Ce plancher correspond à 9,2 (+/- 0,3) millions d'hectares (Corse, Savoie et Comté de Nice compris), soit près de 17 % du territoire national actuel.

Depuis cette date, les surfaces forestières n'ont cessé de s'étendre, en raison de la diminution progressive de la pression de la population rurale et de ses troupeaux, de la substitution graduelle des combustibles fossiles au bois, et de la reconstitution de l'Administration forestière. La figure 2.1 résume l'évolution des surfaces forestières aux XIX^e et XX^e siècles.

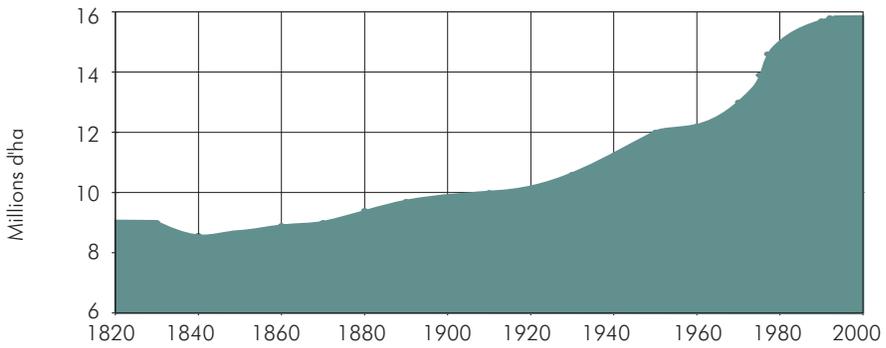
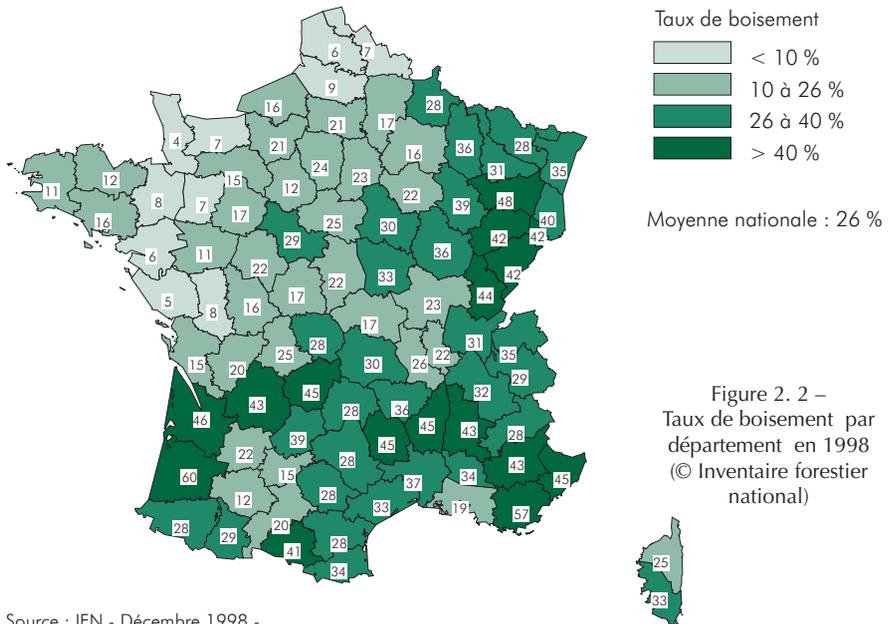


Figure 2. 1 – Évolution de la surface des bois et forêts en France depuis 1820
(source : Cinotti, 1996)

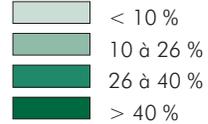


Les surfaces forestières aujourd'hui

Avec un taux moyen de boisement qui dépasse les 26 % et une surface boisée estimée à 14,75 millions d'hectares en 1995, la France présente une répartition forestière contrastée (figure 2. 2) : les départements les plus forestiers sont essentiellement situés dans les moitiés sud et est du pays. Le taux de boisement suit ainsi de près la répartition des massifs montagneux, avec une exception notable, pour le massif forestier landais. C'est d'ailleurs le département des Landes qui est le plus densément boisé de France, à 60 %.



Taux de boisement



Moyenne nationale : 26 %

Figure 2. 2 –
Taux de boisement par
département en 1998
(© Inventaire forestier
national)

Source : IFN - Décembre 1998 -



Une surface forestière qui évolue

Alors que les résultats concernant l'évolution "historique" de la forêt en France sont rares, on dispose, suite à la mise en place de l'Inventaire forestier national en 1958, d'une base de données très riche, concernant à la fois les surfaces forestières, mais aussi les essences ainsi que les principales caractéristiques des peuplements (volume de bois, accroissement annuel, etc.). Le tableau 2. 1 présente l'évolution de l'occupation des sols à l'échelle nationale pour cinq classes. À l'échelle nationale, les formations boisées ont augmenté de 10 % en 20 ans, soit un peu plus d'un millions d'hectares, au détriment des landes et, dans une moindre mesure, des terrains agricoles.



	Formations boisées (millions d'ha)	Landes (millions d'ha)	Terrains agricoles (millions d'ha)	Terrains improductifs (millions d'ha)	Eaux (millions d'ha)
1975	13,5	3,6	32,5	4,7	0,5
1980	13,8	3,4	32,1	5,1	0,6
1985	14,1	3,1	31,6	5,5	0,6
1990	14,5	2,8	31,2	5,8	0,6
1995	14,8	2,6	30,8	6,2	0,7

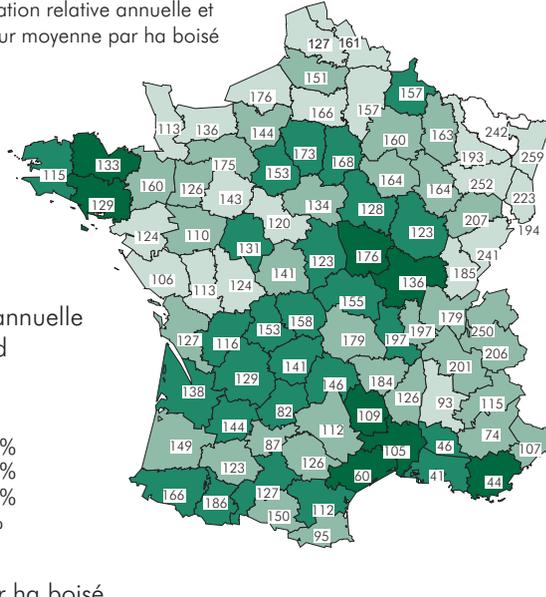
Tableau 2. 1 – Évolution des cinq principaux types d'occupation du territoire entre 1975 et 1995 (© Inventaire forestier national)



Des forêts qui se densifient

Une vue nationale de l'évolution des surfaces forestières cache bien entendu des disparités régionales importantes. De plus, l'évolution des caractéristiques des peuplements (densité du couvert, essences, biomasse végétale) peut être parfois plus importante que la simple évolution surfacique. La figure 2. 3 en est une bonne illustration.

Volume sur pied : variation relative annuelle et valeur moyenne par ha boisé



Volume moyen par ha boisé
moyenne nationale : 147 m³/ha

Source : IFN - Décembre 1998 -

Figure 2. 3 – Évolution de la densité et de l'étendue des peuplements, vue sous l'angle du volume sur pied (© Inventaire forestier national)

Il ressort de cette cartographie que l'évolution de la biomasse forestière est importante à très importante pour de nombreux départements, notamment dans la moitié sud. Cette évolution est souvent d'autant plus forte que le volume sur pied actuel est faible (c'est notamment le cas des départements de la bordure méditerranéenne).



L'avenir. Les évolutions prévisibles

Il n'existe pas de données prospectives à l'échelle nationale. Cependant, il est clair que dans les conditions économiques dans lesquelles l'agriculture française évolue, les terres agricoles les moins productives devraient continuer à être abandonnées. Dans ces conditions, il est probable que l'accroissement des surfaces forestières se poursuive, en particulier dans les zones où le relief est le plus important. De 1984 à 1994 la forêt de montagne a progressé de 4,4 %, la forêt méditerranéenne de 2,8 %.



Quelques chiffres clés (source : Inventaire forestier national)

– Une forte proportion de la forêt française métropolitaine est privée : 73,7%. La forêt domaniale ne représente que 10,1% ; le pourcentage restant est constitué par la forêt communale. Seul, un peu plus du quart de la forêt est géré par les services de l'Etat. La part relative de la forêt publique évolue d'ailleurs à la baisse : elle était de 32% au début du siècle.

– 67% de la forêt française est située à moins de 500 m d'altitude, et donc *a priori* sur une partie du territoire où la pluviométrie est peu élevée. La proportion de forêt de montagne (située à une altitude supérieure à 1000 m) est de 10%.

– L'évolution de la structure des peuplements n'est pas homogène. Depuis le début du siècle, la surface en futaies a presque doublé. L'évolution se poursuit : entre 1984 et 1994, l'augmentation de la part de la futaie régulière a été de 5,5%, celle des peupleraies de 9,2%, et la futaie irrégulière a augmenté de 20,5 %. Entre ces 2 dates, le mélange futaie résineuse et taillis est passé de 510 000 à 740 000 hectares, soit une augmentation de 45%.

– Les pratiques d'exploitation évoluent aussi : les surfaces exploitées par coupes rases ont augmenté de 70% entre 1984 et 1994, pour atteindre 137 000 hectares par an.

– En 1994 la part des forêts de feuillus atteignait 63%, celle de la forêt de résineux 37%, en progression de 6,6% depuis 1984.

– Les forêts de montagne se caractérisent par un plus fort volume à l'hectare, en raison de leur vieillissement et des difficultés d'exploitation.

– Les statistiques établies sur 59 départements français couvrant plus de 75% de la superficie forestière nationale font apparaître un grand fractionnement des espaces forestiers : ils ont, à 88%, une superficie inférieure à 100 hectares. Cependant, ces 88% ne représentent que 6% des surfaces boisées, ce qui traduit l'existence d'un très grand nombre de toutes petites parcelles forestières. La plus forte proportion (66%) de la surface boisée est constituée par 16 ensembles forestiers d'une superficie supérieure à 50 000 hectares.



– Le stock de carbone de la biomasse aérienne, de la biomasse souterraine et des sols forestiers excède 10^9 tonnes. Il équivaut à 10 années d'émission française de carbone sous forme de dioxyde de carbone. L'accroissement annuel de ce stock qui atteint 15.10^6 tonnes, contribue ainsi à stocker 15 % des émissions nationales de dioxyde de carbone.

2

En conclusion

Depuis le milieu du siècle dernier, la superficie des espaces forestiers marque une tendance à l'augmentation. Une accélération nette de cette progression est notable depuis 1960. Ainsi la forêt qui occupe actuellement un peu plus de quart du territoire national, doit être considérée comme un acteur fort de notre environnement, contribuant à la production de bois mais aussi d'eau et d'autres services.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.ifn.fr ; www.onf.fr.

BIANCO J.L. (1998), *La forêt : une chance pour la France*, 57 p.

CINOTTI B., (1996), "Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX e siècle", *Revue forestière française*, vol. XLVIII, n° 6, p. 547-562.

Revue forestière française (1996). "La gestion durable des forêts tempérées", *Revue forestière française*, n° spécial 1996, 252 p.



FICHE 3

FORÊT ET CLIMAT



De façon indéniable, le climat influence la forêt. Aux différents climats de la France : méditerranéen, océanique, à tendance continentale, montagnard... sont associés des ensembles de végétation bien identifiés. Différents facteurs contrôlent ces zones climatiques : la pluviosité (quantité, répartition saisonnière, sécheresse), les températures (notamment hivernales), l'évapotranspiration potentielle, le quotient pluviosité-évapotranspiration potentielle... À l'inverse, la forêt a un effet sur le climat, qui est bien établi au niveau local (microclimat), mais qui reste controversé à l'échelle régionale. Dans la perspective d'une évolution climatique, les interactions forêt et climat pourraient prendre une importance particulière, notamment du point de vue du cycle de l'eau.



Le microclimat des forêts

La forêt est le mode d'occupation de l'espace par la végétation le plus élevé et le plus couvrant à la surface de la terre. Cette couverture végétale et son activité biologique ont un impact marqué sur les microclimats, mais variable selon les espèces forestières et les caractéristiques stationnelles.

La pluviométrie

Les houppiers et la structure des arbres réduisent les quantités de précipitation qui arrivent au sol. Le point est abordé en détail fiche 4.

Dans les régions à brouillards fréquents, le rôle de condensation du brouillard par la forêt n'est pas négligeable. Les pluies occultes dues à la condensation sont significativement plus élevées sous forêt qu'en terrain découvert : de l'ordre de 30 %, lors de certaines expérimentations. Ces précipitations occultes contribueraient alors de manière significative au bilan hydrologique. Elles pourraient être responsables, entre autres, des anomalies constatées sur les bilans hydrologiques des bassins de montagne, pour lesquels les mesures attestent des sorties supérieures à la pluviométrie.

Le bilan énergétique de la forêt

La forêt capte plus d'énergie que les autres modes d'occupation du sol. L'énergie solaire reçue en un point de la surface du globe est fonction de sa position géographique. Cependant, le rayonnement net, qui fait intervenir la fraction d'énergie réfléchie vers l'atmosphère, est dépendant de l'état de la surface. Ainsi, l'albédo (rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement global) est généralement plus faible pour les forêts par rapport à d'autres occupations du sol. Alors que l'albédo est de 25 % environ pour une pelouse, de 35 % pour un sol nu, pour les formations végétales forestières il se situe dans une fourchette de 5 à 20 %, selon les espèces, le type de temps, les saisons... L'albédo des forêts de conifères se situe entre 5 et 15 % ; il est plus élevé pour les feuillus : de 15 à 20 %.

La transpiration des forêts

Le surplus d'énergie captée est utilisé pour le fonctionnement biologique de la forêt et notamment sa transpiration. La disponibilité en énergie et autres para-

mètres climatiques (température et humidité de l'air, vitesse du vent...) fixent le taux de transpiration potentielle. Toutefois, à l'échelle de l'arbre la transpiration reste fortement dépendante de l'importance de la surface foliaire. Les estimations varient ainsi de quelques dizaines de litres par jour à plus de 200 litres par jour pour un individu, en fonction de son développement. Lorsque les disponibilités hydriques du sol sont limitantes, la transpiration est réduite par régulation stomatique au niveau du feuillage. Les modalités de cette régulation dépendent néanmoins de beaucoup de facteurs, parmi lesquels :

- la composition du peuplement forestier : en milieu tempéré, la transpiration d'un peuplement varie de quelques m³ par hectare jusqu'à une cinquantaine de m³ ;

- l'âge du peuplement : la transpiration d'un peuplement forestier croît jusqu'à un maximum que l'on situe à 60 ans pour l'épicéa et le chêne, 40 ans pour le Pin sylvestre. Le maximum est de 20 % supérieur à la consommation moyenne en eau de l'arbre durant la totalité de sa phase végétative ;

- la structure verticale de la végétation : à l'exception de milieux très fermés, tels que par exemple les pessières artificielles, différents types de végétation cohabitent sur le même espace (un ou deux étages d'arbres, sous-bois arbustif, strate herbacée et sol). Ces différentes strates sont en concurrence pour l'utilisation de la réserve hydrique. Des mesures de transpiration par la végétation du sous-bois ont été effectuées. Le ratio entre la transpiration de la strate arborée et la transpiration de la strate inférieure avoisine 30 à 40 % ; il pourrait atteindre des valeurs de 200 à 300 % sous certaines conditions de sécheresse.

Les interventions sylvicoles, en modifiant rapidement la composition du peuplement, ont une influence directe sur l'évapotranspiration. En particulier, les éclaircies sont généralement suivies d'une baisse de l'évapotranspiration. Cette baisse est attribuée à une diminution de l'interception et à la perturbation de l'exploitation racinaire de l'eau du sol. Cette influence positive sur le bilan hydrique est limitée dans le temps (quelques années).

Globalement, le ratio entre l'évapotranspiration potentielle d'une prairie et celle d'une forêt varie entre 0,8 et 1 dans le cas d'une bonne alimentation hydrique ; avec un déficit hydrique important, le ratio est de l'ordre de 0,6 à 0,7.





La forêt et le climat régional

Les climats régionaux sont avant tout conditionnés par les mouvements des grandes masses d'air et les courants océaniques qui assurent l'essentiel des échanges thermiques entre les zones chaudes, les zones froides et l'atmosphère. En zone tempérée, les espaces forestiers peuvent-ils influencer le climat régional ? La rugosité de la forêt réduit la vitesse du vent. Mais son impact est local et pratiquement nul sur le climat régional. De même, à moyenne échelle, la température de l'air est faiblement influencée par la forêt. Le refroidissement que l'on constate au niveau du microclimat reste circonscrit au périmètre boisé. En ce qui concerne l'influence des espaces boisés sur la pluviosité régionale, il semblerait que les affirmations du début du siècle en faveur d'un effet positif n'aient pas été confirmées par les recherches effectuées depuis. Les variations spatiales « naturelles » de la pluie, y compris les problèmes météorologiques, font qu'il est difficile d'individualiser l'impact des boisements sur la pluviométrie. L'augmentation de la pluviométrie annuelle n'excéderait pas quelques pourcents. Cependant des études récentes (HAPEX/MOBILI) aboutissent à des résultats sensiblement différents : sous certaines conditions météorologiques bien précises, des modélisations estiment que la forêt des Landes, par comparaison à un sol nu, pourrait provoquer ponctuellement un surplus de précipitations de l'ordre de 30 % . Ces résultats de simulation ne concernent que des pluviométries très faibles, de l'ordre de quelques millimètres, et ne sauraient bien sûr être étendus à l'ensemble des conditions météorologiques qui conditionnent la pluviométrie annuelle.



Changement climatique et forêt

L'accélération des développements industriels, de la croissance démographique, de la croissance économique ... du 20^e siècle a profondément transformé notre environnement. L'élévation des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère contribue à la modification des échanges d'énergie entre la terre et son atmosphère et le reste de l'univers. Différentes modélisations, des plus simples aux plus complexes telles que celles mises en œuvre dans les "Modèles de circulation générale de l'atmosphère" (MCGA) à trois dimensions, ont pour objectif de prévoir les modifications climatiques attendues sur la température, la pluviosité... Malgré des incertitudes assez fortes, il apparaît qu'en zone tempérée, la température moyenne annuelle pourrait augmenter de deux degrés, avec un réchauffement plus sensible des mois d'hiver (résultats obtenus par

simulation avec un doublement du taux de gaz carbonique). La pluviosité, notamment des mois d'hiver, pourrait aussi augmenter entre 50 et 70° de latitude ; l'augmentation des pluies annuelles serait comprise dans une fourchette de 3 à 15 %.

L'impact sur les écosystèmes forestiers ne sera pas négligeable. Quel rôle joueront, en retour, les espaces forestiers dans les échanges d'énergie : rétroactions positives, rétroactions négatives ? Si on admet qu'une forêt « naturelle » présente un équilibre carboné pratiquement nul (en négligeant les très faibles exportations des acides organiques solubles vers les océans par le réseau hydrographique), en revanche, il apparaît que la forêt exploitée puisse jouer un rôle de puits de carbone, à condition que le retour du carbone vers l'atmosphère soit maîtrisé. Dans le même sens, l'extension du boisement, par reboisement ou par des accrues naturels, pourrait se révéler comme un facteur qui limite, par stockage de carbone, l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Plus particulièrement, en ce qui concerne le bilan hydrique de la forêt, l'impact global de l'effet de serre est difficile à apprécier. Il semble acquis que l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère favorise la production de biomasse, et donc une évapotranspiration plus forte des peuplements. Mais elle améliorerait aussi l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les végétaux, effet qui tempérerait l'accroissement de la consommation en eau. Cette augmentation de l'évapotranspiration sous l'effet combiné de l'accroissement de la surface foliaire et de l'énergie disponible sera-t-il compensé par une augmentation de la pluviosité ? Si ce n'est pas le cas, la disponibilité en eau jouera son rôle de facteur limitant du développement de la végétation et on peut même redouter des situations de stress hydrique qui fragilisent la végétation en place. Par ailleurs, un accroissement de la production de biomasse pourrait conduire à une baisse de la fertilité des sols.

En conclusion

Par rapport aux autres types de végétation, la forêt a un impact significatif sur le climat local (albédo plus faible, évapotranspiration plus forte). Cet impact dépend néanmoins largement de l'essence, de l'âge du peuplement et de la structure de la végétation. Dans le cas particulier de régions à brouillards fréquents, la forêt peut condenser des quantités d'eau importante. À l'échelle régionale, malgré quelques résultats de recherche dans le sens d'un effet positif sur la pluviosité, il est néanmoins difficile de conclure à un effet quelconque de la couverture forestière.



Dans la perspective de changements climatiques, nos connaissances sont encore trop incomplètes pour faire la part des choses entre des effets positifs (augmentation de la production de bois, stockage de carbone, meilleure efficacité de l'eau) et des effets négatifs (plus grande consommation d'eau, situation de stress hydrique, diminution de la fertilité des sols).

POUR EN SAVOIR PLUS

AUSSENAC J. et PARDE J. (1969), "Forêts et climats". *BTI*, n° 237, p. 93-103.

AVILA A., C. NEAL, et J. TERRADAS (1996), "Climate change implications for streamflow and streamwater chemistry in a Mediterranean catchment", *Journal of Hydrology*, vol.177, p. 99-116.

BOUVAREL P. (1989), "Biologie et forêt. Le gaz carbonique dans l'atmosphère. Le rôle des forêts", *Revue forestière française*, vol. XLI, n° 4, p. 301-307.

BOUVAREL P. (1991), "Production forestière et cycle du carbone", In : *Actes du 10^e Congrès forestier mondial*, Paris, n° hors série de la Revue forestière française, vol. 1, p. 79-86.

BRUENIG E.F. et SCHNEIDER T.W. (1991), "Forêt et microclimat : vieilles négligences et nouveaux défis", In : *Actes du 10^e Congrès forestier mondial*, Paris, n° hors série de la Revue forestière française, vol. 1, p. 31-37.

BRUENIG E.F. (1991), "Forêt et climat : nouvelles dimensions et perspectives", In : *Actes du 10^e Congrès forestier mondial*, Paris, n° hors série de la Revue forestière française, vol. 1, p 16-22.

LUNA LUGO A. (1991), "Forêt et climat : impact du boisement et du déboisement sur le climat"; In : *Actes du 10^e Congrès forestier mondial*, Paris, n° hors série de la Revue forestière française, vol. 1, p 39-48.

ROYER J.F. et MAHFOUF J.F. (1992), "L'augmentation de l'effet de serre et ses conséquences", *La météorologie*, n° 42, p. 21-27.

FICHE 4

LE CYCLE DE L'EAU EN FORÊT

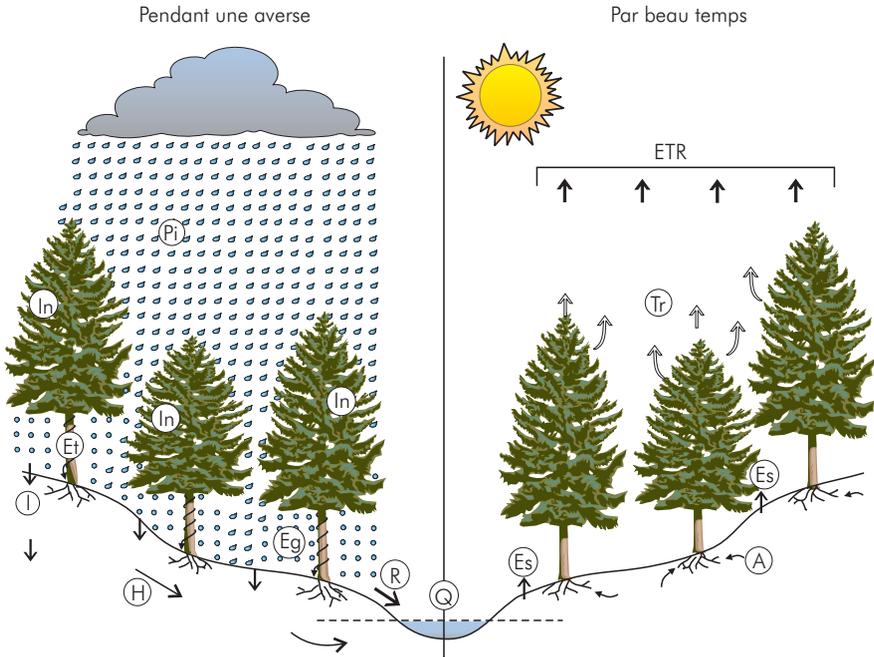


Le cycle terrestre de l'eau est complexe. C'est une juxtaposition de phénomènes à différentes échelles de temps, depuis le devenir immédiat d'une goutte de pluie jusqu'à l'évolution du chevelu hydrographique d'un bassin versant. De par ses spécificités : fort développement végétatif, forte production de matière organique, pédogénèse active... la forêt a un impact particulier sur le cycle de l'eau. À court terme, lors des périodes pluvieuses et/ou de brouillard, les processus se situent au niveau des feuillages, des troncs et des sols forestiers. L'analyse est ici limitée au bilan quantitatif de ces processus. Les modifications de la composition chimique des eaux de pluie lors du contact de la végétation seront abordées fiche 7.

Lors d'une pluie, différents phénomènes interviennent sur le bilan quantitatif :

- l'interception des pluies qui cumule le stockage de l'eau de pluie sur la canopée et la structure de l'arbre, l'évaporation et la transpiration des végétaux pendant la pluie et immédiatement après. Les phénomènes d'éva-potranspiration lors des périodes sèches sont abordés fiche 5, relative aux ressources en eau ;

- l'écoulement le long des troncs ;
- la migration et le stockage des eaux de pluie dans les sols forestiers.



Pi : précipitations incidentes
 Eg : précipitations parvenant plus ou moins directement au sol
 Et : écoulement le long des troncs
 In : interceptée

I : infiltration
 R : ruissellement superficiel
 H : écoulement hypodermique
 Q : écoulement fluvial

Tr : transpiration
 Es : évaporation du sol
 A : absorption racinaire
 ETR : évapotranspiration réelle
 = Tr+Es (+In après une averse)

Figure 4.1 - Le bilan hydrique de la partie aérienne. (Source : Humbert J. et Najjar G., 1992)



Le bilan hydrique de la partie aérienne

Le bilan hydrique des phénomènes aériens s'écrit :

$Pi = In + Et + Eg$ où :

Pi = pluie incidente

In = fraction de la pluie interceptée (stockage, évaporation, transpiration)

Et = écoulement le long des troncs

Eg = égouttement. C'est la fraction de la pluie qui atteint le sol à travers la canopée.

Diverses expérimentations permettent de préciser les termes de bilan hydrique aérien.

La majorité des observations porte sur les cumuls de quelques jours. Pratiquement, très peu d'observations sont disponibles au niveau des averses. Remarquons aussi que l'on ne mesure pas tous les termes du bilan : l'interception I_n est déduite de l'équation du bilan, $I_n = P_i - E_t - E_g$

La pluie incidente

La pluie incidente est a priori le terme du bilan le plus facile à mesurer. Sa connaissance est pourtant entachée d'incertitudes liées notamment à la représentativité stationnelle. L'ordre de grandeur se situe autour de plus ou moins 5 %.

L'égouttement

La pluviosité sous le couvert forestier est conditionnée par le peuplement et la climatologie. L'influence du peuplement forestier dépend de nombreux facteurs :

- l'essence forestière et la capacité de saturation de son feuillage : la surface foliaire et la persistance du feuillage conditionnent fortement l'interception ;
- l'âge des peuplements. On observe une croissance de l'interception avec l'âge, soutenue par la croissance de la surface foliaire ;
- la densité des peuplements. En règle générale, l'interception des pluies augmente avec la densité du peuplement.



La climatologie influence aussi l'égouttement ; notamment au niveau des quantités d'eau évaporée. Ainsi l'égouttement sera, en valeur relative, plus important pour les pluies peu intenses et de longue durée que pour les averses intenses. L'évaporation de l'eau est conditionnée par les conditions énergétiques et les facteurs advectifs, tels que la vitesse du vent. Ainsi selon les saisons et selon la situation géographique, les conditions évaporatoires, et par-là même l'égouttement, varient de manière significative.



L'écoulement le long des troncs

Ce terme du bilan varie avec la structure de l'arbre (une architecture avec des branches dirigées vers le haut favorise l'écoulement le long des troncs) et la rugosité de l'écorce (l'écoulement le long des troncs décroît avec l'irrégularité de l'écorce).

Les phénomènes exposés ci-dessus conditionnent une forte réduction de la pluviosité sous couvert forestier. Cette réduction peut, dans des conditions bien particulières, être quelque peu tempérée par une augmentation de la pluviosité sous couvert par condensation des brouillards.

Estimation de l'égouttement et de l'écoulement le long des troncs

Les estimations, publiées par différents auteurs, de l'écoulement le long des troncs varient entre 0 et 10 % de la pluie incidente. Ces estimations sont faites sur des cumuls de pluie sur de longues périodes de temps (une ou plusieurs années). L'écoulement le long des troncs peut excéder 10 % lorsque les phénomènes de condensation des brouillards sont importants.

Toujours sur la base des cumuls annuels ou pluriannuels, l'égouttement est estimé entre 50 et 80 % de la pluie incidente. La valeur la plus fréquemment observée se situe autour de 70 %.

De nombreux auteurs établissent une relation linéaire entre l'égouttement et la pluie incidente, soit $E_g = a \times P_i$. En négligeant l'écoulement le long des troncs, le bilan s'écrit $I_n = (1-a) P_i$, avec $a < 1$. L'interception croît linéairement avec la pluie incidente. Ceci est en désaccord avec la notion de rétention maximale par la canopée, évaluée par de nombreux auteurs à quelques millimètres (entre 2 et 8 mm). Cette discordance provient en fait :

- de la fréquence des mesures qui cumulent plusieurs averses, donc plusieurs rétentions consécutivement aux séchages successifs des houppiers ;
- des pertes par évaporation et par transpiration, qui semblent ne pas être négligeables pendant les périodes pluvieuses.

Le bilan hydrologique de la partie aérienne des arbres

En terme de bilan hydrologique, les pertes occasionnées par la strate arborée sont importantes : en retenant une valeur moyenne de 70 % pour l'égouttement et de 5 % pour l'écoulement le long des troncs, le bilan hydrologique



serait amputé de 25 % de la pluie incidente. **Ce qui est énorme.** Ces propos sont à nuancer pour les épisodes pluvieux générateurs de crues durant lesquels les pertes relatives sont nettement plus faibles, sans toutefois être négligeables hormis lors des épisodes pluvieux exceptionnels.

Plus que toutes autres espèces, en raison de leur développement foliaire important (entre 3 et 10 m² par m² de sol), les arbres modifient fortement le signal pluie avant son arrivée au sol.

Outre les pertes déjà évoquées, la couverture arborée modifie la répartition des pluies au sol, avec une partie non négligeable écoulee le long des troncs qui s'infiltré rapidement le long des racines.



Infiltration et stockage d'eau dans le sol

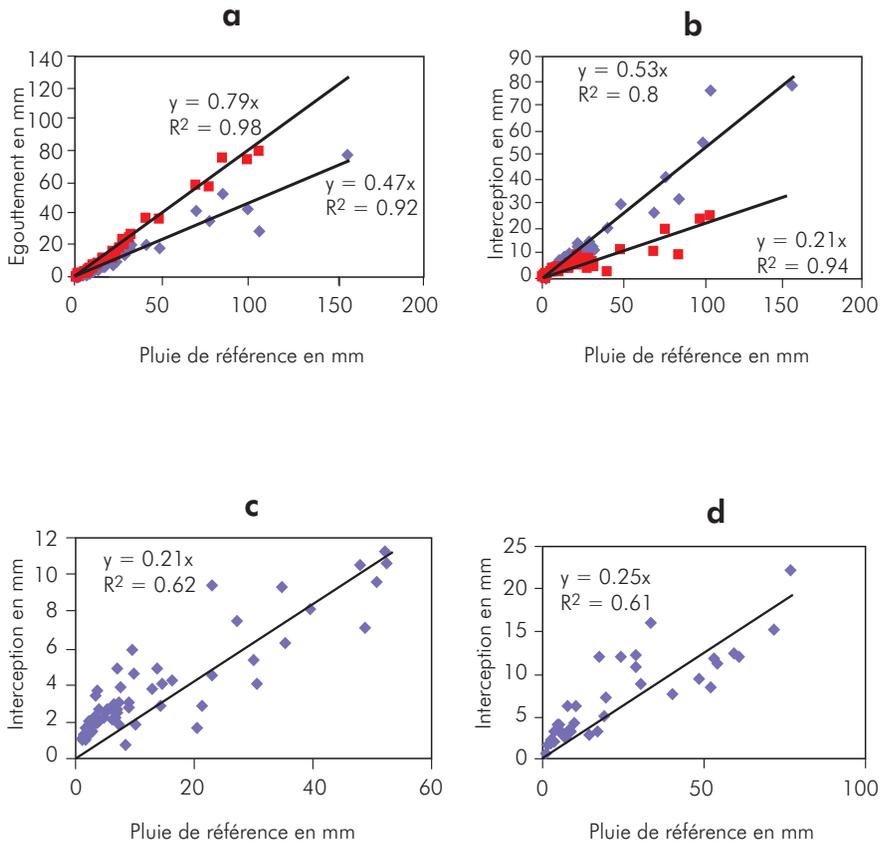
Le sol est un milieu extrêmement complexe où cohabitent une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. La composition et l'organisation de la phase solide (texture et structure du sol) conditionnent les relations avec la phase liquide. Deux caractéristiques sont généralement considérées :

- la capacité de rétention du sol, qui est une caractéristique statique du sol. Elle est mesurée par sa teneur volumique ou pondérale en eau. La teneur volumique en eau à saturation est égale à la porosité du sol et varie entre 35 et 65 %.
- une caractéristique dynamique du sol qui traduit sa disposition à infiltrer l'eau. Cette caractéristique est appréciée au travers de la conductivité hydraulique à saturation, K_s . Pour les sols très perméables comme les graviers K_s est de l'ordre de 10^{-2} m/s ; K_s n'est que de 10^{-10} m/s pour les argiles compactes fortement imperméables.

L'influence de la végétation sur l'infiltration et la rétention d'eau des sols est essentiellement liée au taux de matière organique sur/et dans le sol et au développement racinaire. Suite à sa forte production organique, à une intense activité biologique au niveau du sol et à une colonisation racinaire importante, la forêt est *a priori* l'espèce végétale qui modifie le plus intensément les caractéristiques hydrauliques des sols.

La partie supérieure des sols forestiers est essentiellement formée de résidus organiques peu décomposés, peu structurés, très filtrants et à capacité de rétention importante. La dégradation de la matière organique produit des humus qui ont aussi généralement de fortes capacités de rétention. Les racines vivantes





a et b : bassin de Recherche du Réal Collobrier (France). Le dispositif est constitué de douze gouttières disposées sous arbusiers, chênes lièges, bruyère arborescente, châtaignier et chêne pubescent. Les relevés sont hebdomadaires. La période d'observation s'est étendue de mars 1989 à avril 1990. Le total de pluie de référence de cette période est de 1080 mm.

a) égouttement moyen recueilli sur les douze gouttières et égouttement recueilli sur la gouttière la moins captante en fonction de la pluie incidente.

b) interception calculée comme la différence entre la pluie incidente et l'égouttement.

c et d : bassin de recherche de Vallcèbre (Pyrénées espagnoles). Le dispositif est constitué de gouttières disposées sous des pins. Période d'observation à cheval sur 1990 et 1991. Le total de pluie de référence est de 845 mm.

c) interception calculée pour chacun des épisodes pluvieux.

d) interception calculée sur les totaux de pluie hebdomadaires. On note que dans ce cas, l'interception est plus importante que dans le cas c.

Figure 4. 2 – Résultats expérimentaux en zone méditerranéenne (projet de recherche européen DM2E)

constituent un chevelu hydraulique privilégié, notamment pour la fraction des eaux écoulées le long du tronc. Les cavités, qui demeurent après le pourrissement des racines, génèrent une forte porosité en grand et forment souvent un réseau hydraulique souterrain qui accroît fortement la conductivité hydraulique horizontale.

Il semble que la forêt puisse interférer sur le cycle de l'eau par accroissement du stockage et par une modification des chemins de l'eau qui sont préférentiellement sub-surfaciques dans les sols forestiers. Ceci est d'ailleurs confirmé par de nombreuses expérimentations de suivi du marquage isotopique des eaux ; elles mettent en évidence que les crues en milieu forestier sont en grande partie constituées d'eau pré-existante sur le bassin versant avant l'événement pluvieux. Ces eaux seraient rapidement mobilisées par mélange entre les eaux de pluie nouvelles et les eaux anciennes stockées dans le sol, ce qui attesterait de la priorité des transferts souterrains.

Il faut toutefois remarquer que les modifications induites par les sols forestiers prennent toute leur importance sur des sols initialement peu filtrants et de faible profondeur. Par contre, des sols perméables et profonds auront un comportement semblable à celui de sols forestiers même en l'absence de toute végétation.



Impact à long terme sur le chevelu hydrographique

À conditions climatiques et morphologiques comparables, la densité des talwegs est plus faible en forêt que sous une autre formation végétale ou, encore plus, qu'en l'absence de formation végétale. Par exemple, en milieu semi-aride et dans des conditions semi-naturelles, la densité du réseau hydrographique est beaucoup plus forte dans les steppes que dans les forêts. À l'inverse, la mise en culture y provoque une augmentation de la densité du réseau, par l'apparition de nombreux rigoles, ravineaux et ravins.

Dans le même sens, sous le climat subméditerranéen des Préalpes françaises du sud, la forte pression anthropique jusqu'à la fin du siècle dernier avait déclenché une forte crise érosive et la formation de multiples ravins. Si le reboisement des bassins n'a pas fait disparaître les ravins car ils étaient fortement entaillés, on observe toutefois une diminution de la densité des drains fonctionnels en relation avec la recolonisation forestière ; la diminution des écoulements de surface entraîne l'inactivité des drains secondaires.

L'érosion des sols et le transport solide assuré par les cours d'eau sont les acteurs forts de l'évolution du modelé hydrographique et de l'évolution mor-



phologique des bassins versants. Il apparaît que la forêt intervient à plusieurs niveaux pour limiter ces processus : interception des pluies, effet de dissipation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, infiltration des eaux, développement de sol, gommage des micro reliefs par colonisation des parties basses... autant d'effets pour limiter les flux d'eau et leur charge érosive et réduire de ce fait les zones amont des réseaux de drainage. En revanche, dans les cas de recolonisation forestière précédemment évoqués, comme, de façon plus générale, dans les forêts développées en France grâce à la déprise rurale, la diminution du nombre des drains fonctionnels est un des facteurs qui favorise l'entaille linéaire des cours d'eau de plaine, déjà perceptible sur certaines rivières.



En conclusion

Les interventions de la forêt sur le cycle de l'eau sont discernables à différentes échelles de temps. A très court terme, avec le développement des canopées, les arbres interceptent un pourcentage élevé des pluies. La forêt produit, à moyen terme, des sols forestiers qui ont des capacités hydrauliques particulières, notamment un pouvoir de rétention élevé et une très bonne perméabilité. Les chemins de l'eau sur le bassin versant se trouvent ainsi modifiés, avec une réduction des écoulements rapides de surface. Et à très long terme, la diminution des flux d'eau et de sédiment entraîne une réduction du réseau de drainage de tête des bassins versants.

POUR EN SAVOIR PLUS

ADEME (1997), *Les charges critiques en France. Données et références*, Éditions ADEME, 59 p.

AUSSENAC G., GRANIER A. et BREDA N. (1995), "Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance", *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 1, 1995, p. 54-61.

AUSSENAC G. (1968), "Interception des précipitations par le couvert forestier". *Annales des Sciences forestières*, vol. 25, n° 3, p. 135-156.

AUSSENAC G. (1970), "Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations", *Annales des Sciences forestières*, vol. 27, n° 4, p. 383-399.

AUSSENAC G. (1981), "L'interception des précipitations par les peuplements forestiers", *La Houille blanche*, n° 7-8, p. 531-536.

AUSSENAC G. et BOULANGEAT C. (1980), "Interception des précipitations et évapo-transpiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb), France)", *Annales des Sciences Forestières*, vol 37, n° 2, p. 91-107.

BIRON P. (1994), "Le cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne : flux de sève et bilans hydriques stationnels (bassin versant du Strengbach à Aubure-Hautes, Vosges)", *Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur*, UFR de géographie, 244 p.

DUNNET *et al.* (1991), "Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff", *Water Resources Research*, vol. 27, n° 9, p. 2271-2285.

EL HADJ MOUSSA F. (1989), "Circulation de l'eau dans un écosystème de pin maritime en Landes de Gascogne", *Thèse de doctorat de l'université de Pau*, INRA de Bordeaux.

FORGEARD F., GLOAGUEN J., et TOUFFET, J. (1980), "Interception des précipitations et apport au sol d'éléments minéraux par les eaux de pluie et les pluviollessivats dans une hêtraie atlantique et dans quelques peuplements résineux en Bretagne", *Annales des sciences forestières*.

FYODOROV S., (1990), "Experimental investigations of evapotranspiration and transpiration from forests", *Hydrological research basins and the environment*, Wageningen, Pays-Bas.

GRANIER A., AUSSENAC G., et BREDA N. (1995), "Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers", *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial, p. 59-67.

HUMBERT J. et NAJJAR G. (1992), "Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone". CEREG et université Louis Pasteur (Strasbourg I), 85 p.

JOURNAL OF HYDROLOGY (1993), "Water issues in forest today", Elsevier Science Publishers, vol. 150, p. 189-788.

KELLIHER F. (1992), "Rainfall interception by trees and slash in a young *Pinus radiata*, *D.Don* stand". *Journal of Hydrology*, vol. 131, p. 187-204.

LIU S. (1998), "Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida". *Journal of Hydrology*, vol. 207, p. 32-41.



LOUSTAU D., BERBIGIER P., GRANIER A. et EL HADJ MOUSSA F. (1992), "Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand : I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy" *Journal of Hydrology*, 138, p. 449-467.

LOUSTAU, D., BERBIGIER P. et GRANIER A. (1992), "Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand : II. An application of Gash's analytical model of interception", *Journal of Hydrology*, 138, p. 449-467.

MEINZER F.C., ANDRADE J.L., GOLDSTEIN G., HOLBROOK N.M., CAVELIER J. et JACKSON, P., (1997), "Control of transpiration from the upper canopy of a tropical forest: the role of stomatal, boundary layer and hydraulic architecture components." *Plant Cell and Environment*, vol. 20, n° 10, p. 1242-1252.

NEBOIT R. (1983), *L'homme et l'érosion*, université de Clermont-Ferrand, Faculté des Lettres et Sciences humaines, Fascicule n° 17, 183 p.

PONCET A. (1968), "Influences de la forêt sur les crues d'origine pluviale et possibilités offertes par le reboisement et par la gestion forestière pour le contrôle des crues", SHF, X^e journées de l'hydraulique (la prévision des crues et la protection contre les inondations), question VI, rapport 1, 9 p.

REVUE FORESTIERE FRANÇAISE (1999), "Fonctionnement des arbres et écosystèmes forestiers. Avancées récentes et conséquences sylvicoles", *Revue forestière française*, n° 2, 1999, 372 p.

ULRICH E. (1995), "Interception des pluies en forêt : facteurs déterminants. Interprétation des mesures réalisées dans le sous-réseau CATAENAT de RENECOFOR." *Bulletin technique de l'ONF*, n° 30, p. 33-44.

VIVILLE D, BIRON P., GRANIER A., DAMBRINE E. et PROBST A., (1992), "L'interception dans une plantation montagnarde de sapinettes en déclin sur le bassin versant de Strengbach dans les Vosges en France." *Journal of Hydrology*, vol. 144, p. 273-282.



FICHE 5

FORÊT ET RESSOURCES EN EAU



Les ressources en eau sont abordées par le bilan des écoulements des bassins versants sur de grands pas de temps (le mois, l'année). On ne se situe donc pas au niveau des processus, mais à une échelle de temps intégratrice des différents phénomènes, qui régissent le cycle de l'eau sur les bassins versants.



Le bilan hydrologique d'un bassin versant

Le bilan hydrologique d'un bassin versant s'écrit :

$$P_i = E + Q_s + Q_b \pm \Delta S \pm \Delta G, \text{ où}$$

P_i : pluie incidente.

E : pertes par interception, évaporation et transpiration par les végétaux.

Q_s : écoulement rapide, généré en surface et sub-surface.

Q_b : écoulement retardé, d'origine souterraine. On néglige généralement les écoulements souterrains profonds, qui échappent à l'écoulement de surface.

Q_s+Q_b représentent les écoulements du bassin versant.

ΔS : variation du stock d'eau dans le sol.

ΔG : variation du stock d'eau souterrain.

Les différents termes du bilan sont exprimés dans les mêmes unités.

À l'échelle annuelle, ce bilan est généralement simplifié en écrivant $\Delta S = \Delta G = 0$. C'est quelque peu abusif, notamment pour le terme ΔG , car on occulte alors la régulation interannuelle des bassins versants. L'hydrologue assimile alors toutes les pertes du bassin versant au terme évapotranspiratif, y compris l'interception et les pertes par évaporation et évapotranspiration lors des averses (cf. fiche 4).

Intéressons-nous aux différents termes du bilan.

– Pluie et neige constituent la seule entrée du système. Pluies occultes et rosée sont généralement négligées. Seule la pluviométrie fait l'objet d'une mesure directe. Les variations de stock participent aux écoulements sans toutefois représenter un poste d'entrée. À titre d'exemple, la figure 5.1 représente la variation des valeurs moyennes des écoulements annuels en fonction des pluies annuelles, d'une centaine de bassins versants de la région Languedoc Roussillon. On notera, malgré une certaine proportionnalité entre ces deux termes du bilan, une dispersion marquée du nuage de points qui témoigne de l'extrême complexité du cycle terrestre de l'eau.

– Sol et sous-sol jouent un rôle de stockage et par là même de régulation des écoulements au cours des saisons. Profondeur, porosité des sols, agencement des zones aquifères et du réseau de drainage, nature du sous-sol, présence de nappe alluviale, caractéristiques hydrauliques des nappes... sont autant de déterminants du cycle de l'eau.

– Les pertes atmosphériques dépendent de l'énergie disponible. Bilan radiatif, température, humidité de l'air, vitesse du vent... mais aussi la plus ou moins bonne disponibilité d'un stock d'eau dans le sol et le sous-sol conditionnent les pertes par évaporation et transpiration. À la figure 5.2, la distribution saisonnière des écoulements de ce bassin versant apparaît fortement influencée par la disponibilité en énergie de la saison chaude. Les écoulements de la saison estivale sont nettement inférieurs à leurs homologues hivernaux alors que les pluies sont distribuées de façon assez homogène tout au cours de l'année.



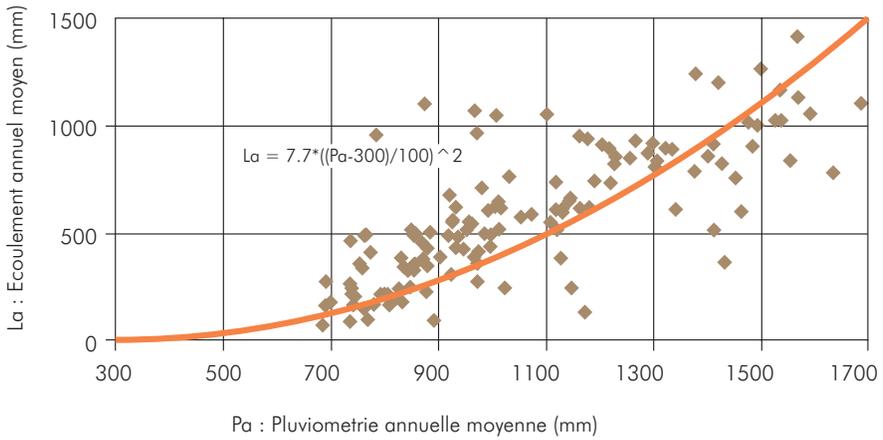


Figure 5. 1 – Région Languedoc-Roussillon. Liaison entre les écoulements et la pluviométrie (moyennes interannuelles) .

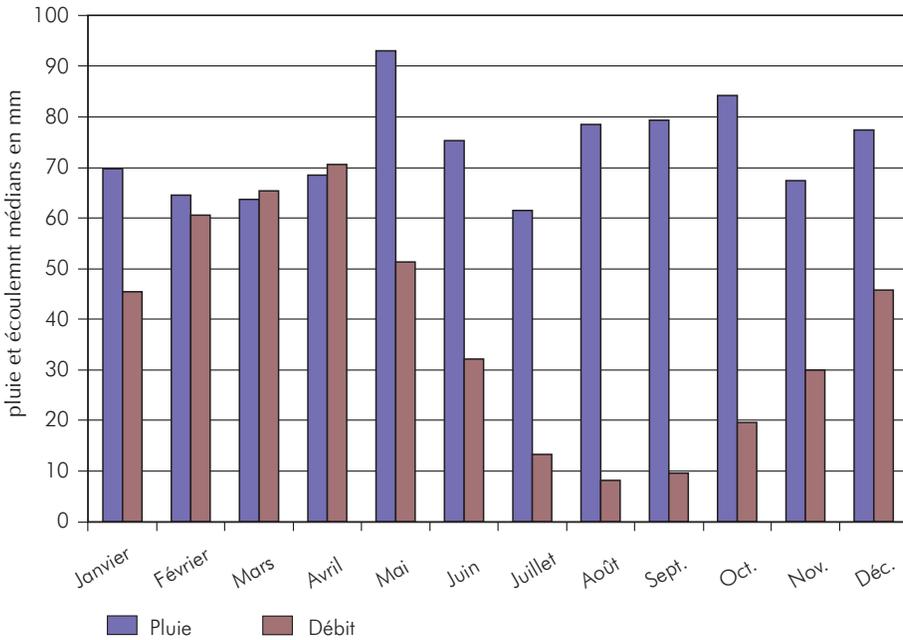


Figure 5. 2 – Bassin versant du Grandrieu (Lozère). Pluviométrie et écoulement mensuels

À l'échelle de la France les termes du bilan hydrologique varient fortement : la pluviométrie annuelle moyenne entre 500 et plus de 2000 mm, l'évapotranspiration potentielle entre 600 et 1200 mm. Les faciès géologique et pédologique sont aussi extrêmement diversifiés. Il en résulte une très forte variabilité des écoulements annuels moyens qui varient de quelques dizaines de mm à 1500 mm, voire plus pour certains bassins d'altitude. L'impact de la forêt doit être recherché parmi l'ensemble des termes du bilan hydrologique ; ces termes étant fortement variables dans l'espace et, de plus, pas nécessairement bien connus.

Ainsi, à notre connaissance aucune étude de synthèse basée sur les observations du réseau français, pourtant relativement développé, ne dégage de conclusions claires sur l'impact de la forêt sur la disponibilité de la ressource en eau.



Hydrologie forestière : les connaissances à partir des bilans hydrologiques des bassins versants

La comparaison des écoulements des bassins versants n'est pas facile. Doit-on examiner : les grands bassins versants ? Les bassins versants de quelques hectares ? Les bassins versants appariés ? Les bassins versants suivis avant et après une reforestation ou une déforestation ?

Pour les grands bassins versants, il n'est guère possible de mettre en évidence dans le temps l'impact de l'occupation de l'espace en raison notamment de la générale modestie des proportions de surface affectées par un changement d'occupation. Dans le monde industrialisé, se superpose encore la non-stationnarité des aménagements, des prélèvements et des rejets. Les perturbations que ces derniers engendrent sur les débits sont souvent d'un ordre de grandeur supérieur.

La comparaison de petits bassins versants appariés est aussi extrêmement délicate. Les possibilités d'interprétation hasardeuses sont réelles car il n'est pas rare que des bassins versants de quelques dizaines d'hectares, a priori dans les mêmes conditions climatiques, lithologiques, d'occupation de l'espace... présentent des écoulements très sensiblement différents, pour des raisons qui échappent quelque peu aux analyses scientifiques.

La plupart de nos connaissances repose sur des expérimentations menées sur des petits bassins versants : impact d'un incendie de forêt, impact d'une coupe forestière (totale ou partielle), impact d'une reforestation. Quelques résultats sont disponibles sur les rares bassins de recherche français ; l'essentiel des informations provient d'observations faites en Amérique du nord et en Australie.

Un consensus semble se dégager :

- on n'a jamais observé une augmentation des écoulements après une reforestation,
- inversement, la déforestation d'un bassin versant entraîne généralement un surplus d'écoulement.

Ceci est en accord avec le bilan hydrique des systèmes arborés tel qu'il a été évoqué à la fiche précédente : les espaces forestiers sont de forts consommateurs d'eau.

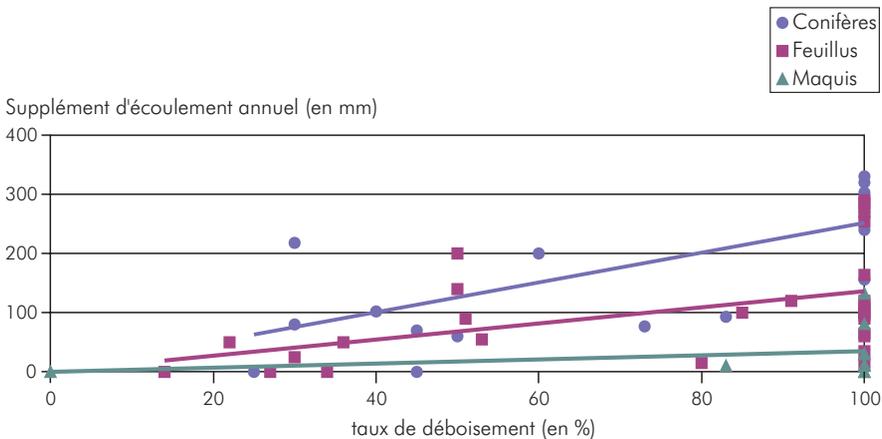


Figure 5. 3 – Effets du déboisement. Variation des suppléments d'écoulement annuel moyen durant les cinq années après la coupe, en fonction du taux de déboisement. (Source : Bosch et Hewlett, 1982).

La figure 5. 3, construite d'après les données recueillies par Bosch et Hewlett (1982) à partir des données de 94 petits bassins versants, montre que globalement le déboisement d'un bassin versant s'accompagne d'une augmentation des écoulements annuels ; ce supplément d'écoulement est de plus proportionnel au taux de déboisement. Le nuage de points reste toutefois très dispersé, avec des accroissements d'écoulement moyen sur 5 ans après la coupe, compris entre 600 mm et quelques mm, pour un taux de déboisement de 100%.

En fait, il apparaît que les suppléments d'écoulement croissent avec la pluviosité du site. Une expression en fonction de la pluviométrie moyenne annuelle met en évidence des ratios d'augmentation des écoulements compris entre 20 et quelques % de la pluviométrie.

Des différences entre espèces sont d'ailleurs observables. Les suppléments d'écoulement seraient plus importants sur les bassins versants initialement boisés de résineux, entre 10 et 20 % de la pluviométrie moyenne. Le ratio d'accroissement serait en moyenne de 10% de la pluviométrie pour les feuillus (dans une fourchette de 0 à 20 %) et en moyenne de 5 % après la disparition du maquis. Pour ces derniers, ceci ne représente au mieux que quelques dizaines de mm, la pluviométrie de ces bassins versants étant relativement faible (de l'ordre de 500 mm en moyenne par an). En outre, les modifications des écoulements ne sont plus significatives dès que le seuil de déboisement n'excède pas 20 % de la superficie du bassin versant.

Tout en restant dans une gamme d'incertitudes plutôt plus élevée, il semblerait que la reforestation engendre des modifications d'un ordre de grandeur équivalent mais inversées.

Les limites des effets réducteurs des écoulements par la forêt

La forêt présente un fort développement aérien et racinaire variable selon les espèces. Plus que toute autre espèce végétale, un peuplement forestier est susceptible d'intercepter les pluies et de mobiliser les stocks hydriques du sol et du sous-sol, et par conséquent de soustraire au bilan hydrologique des fortes quantités d'eau par évaporation et transpiration.

	Pertes par interception et évapotranspiration élevées	Pertes par interception et évapotranspiration modérées
Climat	Nombre de jours de pluie élevé Vents fréquents et forts Disponibilité en énergie	Pluies intenses Climat rigoureux
Sol	Profonds, à perméabilité élevée, à capacité de rétention élevée	Sols à faibles possibilités de stockage hydrique
Sous-sol	Présence d'une nappe pérenne	Absence de nappe
Espèce	Fort développement foliaire Espèce pérenne	Faible développement foliaire Espèce caduque

Tableau 5. 1 – Essai de hiérarchisation des pertes en eau par les espaces forestiers

En conclusion

Les peuplements forestiers limitent les écoulements, mais dans des proportions extrêmement variables, que l'on peut situer entre quelques pour cent et vingt pour cent de la pluviométrie incidente. Il n'apparaît pas que l'on retrouve dans les bilans hydrologiques, même des bassins versants élémentaires, un déficit d'écoulement égal à une simple sommation des effets de l'interception et de l'évapotranspiration des individus considérés séparément. Le fonctionnement hydrique d'un peuplement forestier est différent de celui des arbres considérés individuellement. Un bassin versant forestier, même de faible superficie, est rarement "pur" ; le taux de boisement n'atteint jamais cent pour cent, et des aménagements tels que les pistes forestières ont un rôle hydrologique qui peut être déterminant.

Enfin, on est confronté à un effet d'échelle pour transférer les observations des bassins versants élémentaires aux grands bassins versants. Par conséquent, il est quelque peu difficile de dégager un bilan de l'impact de l'accroissement des surfaces boisées sur les grands cours d'eau français.

POUR EN SAVOIR PLUS

ANDERSON P. (1994), "Valuating the water resource and demands on supply in Scotland". In : *Forests and water*, Institute of Chartered Foresters, Edinburgh.

AUSSENAC G. (1980), "Le cycle hydrologique en forêt", In : PESSON, *Actualités d'écologie forestière*, p. 283-307.

BACON P.E., STONE C., BINNS D.L, LESLIE D.J. et EDWARDS D.W. (1993), "Relationships between water availability and *Eucalyptus camaldulensis* growth in a riparian forest", *Journal of Hydrology*, vol. 150, p. 541-561.

BERNARD-ALLEE P. et COSANDEY C. (1991), "Conséquences d'une coupe forestière sur les bilans hydrologique et sédimentaire : le bassin-versant de la Latte, Mont-Lozère", *Physio-Géographie*, vol. 21, p. 79-94.

BLACKIE J. R. (1994), "The effects of conifer plantations on catchment stream-flow in the Uplands". In : *Forests and water*, Institute of Chartered Foresters, Edinburgh.

BOSCH J M. et HEWLETT J.D. (1982), "A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapo-transpiration", *Journal of Hydrology*, vol. 55, p. 3-23.

BURT T.P. et SWANK W.T. (1992), "Flow frequency responses to hardwood-to-grass conversion and subsequent succession", *Hydrological Processes*, vol.6, p. 179-188.



CALDER I.R. (1990), *Evaporation in the Uplands*, Chichester, John Wiley and sons.

CORNISH P.M. (1993), "The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia", *Journal of Hydrology*, vol. 150, p. 301-322.

COSANDEY C. et ROBINSON M. (2000), *Hydrologie continentale*, Éditions Armand Colin, 360 p.

COSANDEY C. (1992), "Influence de la forêt sur le cycle de l'eau : conséquence d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel", *Hydrologie continentale*, vol. 7, n° 1, p. 13-22.

COSANDEY C. (1995), "La forêt réduit-elle l'écoulement annuel" ? *Annales de géographie*, n° 581-582, p. 3-21.

DEBUSSCHE M., RAMBAL S., et LEPART J. (1987), "Les changements de l'occupation des terres en région méditerranéenne humide : évaluation des conséquences hydrologiques", *Acta œcologica, Cœcol. Applic.*, vol. 8, n° 4, p. 317-332.

DIDON-LESCOT J.-F. (1997), "De l'utilité des mesures hydrologiques et hydrochimiques sur le long terme. Exemple des BVRE du Mont Lozère", *Études de géographie physique*, p. 25-41.

DUBE S., PLAMONDON A.P., et ROTHWELL R.L. (1995), "Watering-up after clear-cutting on forested wetlands of the St. Lawrence lowland", *Water Resources Research*, vol. 31, n° 7, p. 1741-1750.

DUBREUIL P. et HERBAUD J. (1970), "Contribution à la connaissance quantitative des modifications du régime hydrologique sous l'effet du taux de boisement à l'aide de deux exemples : le bassin alsacien du Rhin et le bassin du Jaguaribe (Brésil)", *XI^e journées de l'hydraulique*, Paris.

DUPRAZ C. (1982), "Influence des reboisements résineux sur la quantité de l'eau dans un petit bassin versant : incidences pédologiques", In : *rapport du groupe de travail de la FAO sur l'aménagement des bassins versants de montagne (treizième session, Palerme, Italie)*, ONF, Paris.

HANCHI A. et RAPP M. (1997), "Stemflow determination in forest stands." *Forest Ecology and Management*, vol. 97, n° 3, p. 231-235.

HORNBECK, J.W., ADAMS M.B., CORBETT E.S., VERRY E.S. et LYNCH J. A. (1993), "Long-term impacts of forest treatments on water yield : a summary for northeastern USA". *Journal of Hydrology*, vol. 150, n° 2-4, p. 323-344.

LE BLOAS J. (1994), *Étude de définitions de nouvelles stratégies pour l'occupation de l'espace dans une optique de valorisation des ressources en eau*, Datar Massif Central.

LE BLOAS J. (1997), *Étude des relations couverture végétale-débit d'étiage sur des bassins versants représentatifs du Massif Central*, DATAR Massif Central.

- LAVABRE J., SEMPERE-TORRES D. et CERNESSON F. (1993), "Hydrological consequences of fire: changes on the hydrological response of a little Mediterranean basin a year after the fire", *Journal of Hydrology*, vol. 142, p. 273-299.
- LAVABRE J. (1995), "Réflexions sur le processus de désertification de la façade méditerranéenne espagnole et française", *Rapport quadriennal 1991-1994 du CNFGG*, XXI^e Assemblée générale de l'Union géodésique et géophysique internationale, Boulder (Colorado), 2-14 juillet 1995, p. 247-253.
- LUCE C.H. et CUNDY T.W. (1994), "Parameter identification for a runoff model for forest roads", *Water Resources Research*, vol. 30, n° 4, p. 1057-1069.
- MCCULLOCH J. S.G. et M. ROBINSON (1993), "History of forest hydrology". *Journal of Hydrology*, vol. 150, p. 189-216.
- MCGUINNESS J.L. et HARROLD L. (1971), "Reforestation influences on small watershed streamflow", *Water Resources Research*, vol. 7, n° 4, p. 845-852.
- MOLCHANOV A.A. (1960), "*The hydrological role of forests*", Israel program for scientific translations, Jerusalem.
- NICHOLS W.D. (1993), "Estimating discharge of shallow groundwater by transpiration from greasewood in the northern great basin", *Water Resources Research*, vol. 29, n° 8, p. 2771-2778.
- NISBET T. R. (1994), "Forest and water guidelines : how do they tackle the water issues in Great-Britain" ? In : *Forests and water*, Institute of Chartered Foresters, Edinburgh.
- O'SHAUGHNESSY P.J. et JAYASURIYA M.D.A. (1991), *Water supply catchment hydrology research*, Melbourne Water, Melbourne.
- PLAMONDON A. P. (1981), "Écoulement et modification du couvert forestier", *Naturaliste canadien*, vol. 108, p. 289-298.
- RAMBAL S. (1987), "Évolution de l'occupation des terres et ressources en eau en région méditerranéenne karstique", *Journal of Hydrology*, vol. 93, p. 339-357.
- ROBERTS G. et S.B. CRANE (1997), "The effects of clear-felling established forestry on streamflow losses from the Hore sub-catchment", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 1, n°3, p. 477-482.
- SCOTT D.F. (1993), "The hydrological effects of fire in South African mountain catchments", *Journal of Hydrology*, vol. 150, p. 409-432.
- SCOTT D.F. et LESCH W. (1997), "Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa", *Journal of Hydrology*, vol. 199, p.360-377.
- SHACHORI A. Y. et MICHAELI A. (1965), "Water yields of forest, maquis and grass covers in semi-arid regions: a literature review", In: F.E. Eckardt (Éditeur), *Methodology of plant eco-physiology*, UNESCO, Montpellier, France, p. 467-477.





FICHE 6

FORÊT ET RISQUES NATURELS LIÉS À L'EAU



FORÊT ET CRUES

L'impact de la forêt sur les crues est un thème très médiatisé. À de nombreuses reprises, les médias ont eu recours aux mêmes formules lapidaires, simplistes et souvent excessives : *"on a trop déboisé"*, *"la recrudescence au cours de ces dernières années est étonnante"*, ou encore *"on ne peut que s'interroger sur les conséquences de la déforestation face aux crues catastrophiques qui n'avaient jamais atteint une telle ampleur"*. Cette dernière phrase a d'ailleurs été écrite suite à la crue catastrophique de Vaison-la-Romaine en 1992... alors que sur le bassin amont, le couvert forestier était en constante augmentation.

Avant tout, il convient de rappeler que les crues sont générées par les pluies, la fonte des neiges ou par une conjonction des deux. Avant d'aborder les processus de génération des crues, il faut noter que, à l'échelle de temps de l'averse, la transformation de la pluie en débit fait intervenir :

- une réduction en volume de la pluie (au passage des mm de pluie aux m³ écoulés, une part importante du volume d'eau est retenue par le bassin versant) ;



– un transfert des volumes à l'exutoire du bassin versant, où le débit s'exprime alors en m^3/s avec introduction de la dimension temps.

Le rôle de la forêt sur les crues doit donc à la fois s'apprécier en termes de volume de crue mais aussi et surtout, en termes de débit maximum atteint par la crue.

	Temps de transfert	Capacité de stockage
Sols artificialisés	↑ rapide	↓ faible
Sols agricoles		
Prairies		
Forêt	↓ lent	↑ forte

Tableau 6.1. Schématisation de l'impact de l'occupation de l'espace sur la génération des crues



Les processus en jeu lors de la génération des crues

La communauté hydrologique s'accorde pour affirmer qu'une crue résulte de la superposition de plusieurs processus. Deux grands types de processus sont distingués :

- les écoulements rapides de surface par refus d'infiltration. Le processus, qualifié de Hortonien (c'est Horton, hydrologue américain de la première moitié du 20^e siècle qui a décrit le premier ce type d'écoulement), s'active lorsque l'intensité de la pluie excède la capacité d'infiltration des sols ;
- les écoulements souterrains subsurfaciques, à travers les macropores du sol et les vides du sol. Ces écoulements obéissent à la loi des écoulements hydrauliques turbulents et non à la loi de Darcy des écoulements en milieu poreux.

On admet actuellement que ce processus génère l'essentiel des volumes de crues. Outre les volumes transmis directement au réseau hydrographique, l'écoulement souterrain peut induire :

- des écoulements par exfiltration suite à un blocage consécutif à un changement de transmissivité hydraulique ;
- des écoulements par excès de saturation sur les zones saturées.

On entrevoit donc différents facteurs conditionnels des écoulements de crue : la pluviométrie (et le climat : évapotranspiration, fonte des neiges), le sol (caractéristiques hydrauliques, épaisseur ...), la topographie, le réseau de drainage. L'incidence de la forêt doit être recherchée parmi l'ensemble de ces facteurs conditionnels, sans oublier le rôle, parfois déterminant des routes, des pistes forestières, des modifications hydrauliques du sol consécutives aux passages des engins forestiers.

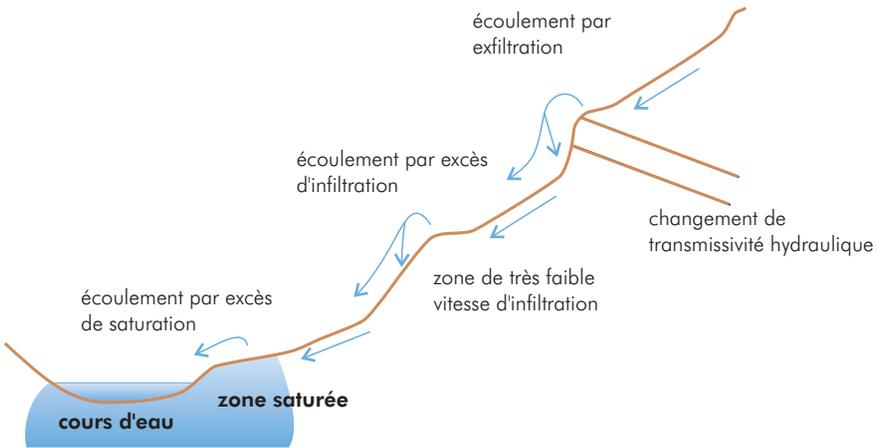


Figure 6.1 – Schématisation des différents types d'écoulement générateurs des crues



L'intervention de la forêt pendant les pluies

Par rapport à d'autres modes d'occupation de l'espace, la forêt se distingue par :

- son fort développement aérien, avec une possibilité de stockage des pluies durant l'averse. Ces pertes sont estimées à quelques millimètres et n'excèdent pas 10 à 15 mm si on ajoute les pertes par évaporation durant la pluie. L'impact de ces pertes sur les volumes est important pour les faibles pluies. Proportionnellement, cet impact décroît pour les fortes hauteurs de pluie. Cette fonctionnalité de la forêt aurait donc un caractère réducteur des volumes de crue lors des épisodes pluvieux peu intenses, mais deviendrait négligeable lors des forts épisodes pluvieux ;



– son important réseau racinaire, qui constitue un mini-chevelu hydraulique qui véhicule les eaux écoulées le long des troncs et les eaux infiltrées à travers le sol. L'existence de ce réseau racinaire conditionne des écoulements de nature subsurfacique. Il faut souligner que ce réseau perdure après une coupe forestière et que la disparition des racines laisse en place un véritable labyrinthe hydraulique qui reste actif pendant plusieurs années ;

– sa forte potentialité à générer des sols poreux et filtrants susceptibles de stocker des volumes d'eau importants et offrant de très bonnes possibilités d'infiltration.

L'intervention de la forêt se schématise alors à travers un rôle réducteur des volumes et une propension à générer des écoulements subsurfaciques, plus lents que les écoulements de surface.



Forêts et crues : les enseignements des bassins de recherche français

Nom	Géologie	Sols	Comparaison
Draix	Sédimentaire marnes noires	Extrêmement dégradés	Bassins appariés : boisé (pins noirs) et dénudé (100 ha)
Réal Collobrier	Cristallin Gneiss	Type ranker Faible épaisseur	Bassin incendié (150 ha)
Mont Lozère	Cristallin Granite	Type ranker Faible épaisseur	Bassins appariés et déforestation (20 ha)

Nom	Pluviométrie annuelle moyenne	Pluviométrie journalière décennale	Résultats observés sur les crues
Draix	800 mm	80 mm	Le bassin dénudé présente des débits de crues entre 5 et 10 fois plus élevés et des volumes de crues atteignant le double de ceux du bassin boisé
Réal Collobrier	1100 mm	140 mm	Plusieurs fortes réponses de crues, dont deux crues décennales (estimation sur les chroniques avant incendie) durant les années qui ont suivi l'incendie
Mont Lozère	2000 mm	320 mm	Réponses de crues plus fréquentes après déboisement mais pas d'influence sur les grosses crues

Tableau 6. 2 – Caractéristiques des principaux bassins de recherche forestiers en France

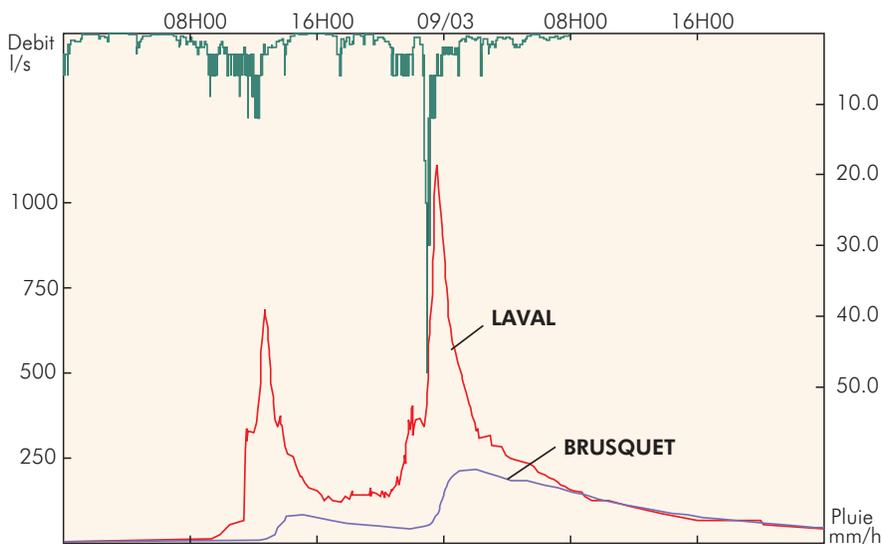


Figure 6. 2 – Bassin versant de Draix. Crue des 8 et 9 mars 1991 sur les bassins du Laval et du Brusquet.

La lithologie des deux bassins est comparable ; par contre leur taux de boisement diffère : Laval (86 ha) dénudé à 78 % ; Brusquet (108 ha), 87 % reboisé en pins noirs à la fin du siècle. (Source : Cemagref, Grenoble).

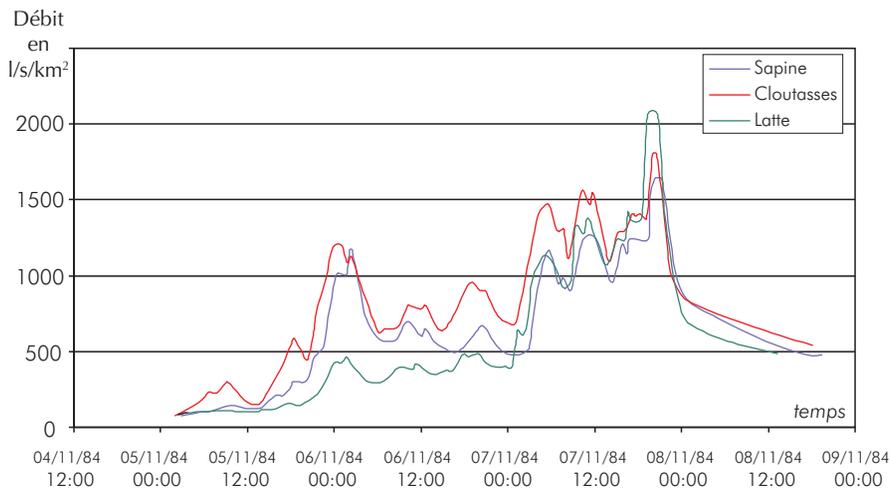


Figure 6. 3 – Bassin versant du Mont Lozère. Crue du 4 au 9 novembre 1984 sur les bassins versants de Sapine, Cloutasses et Latte. La géologie de ces trois bassins est comparable.

Sapine (54 ha) : hêtraie sub-climacique ; Cloutasses (81 ha) : pelouse et landes à genêts
Latte (19,5 ha) : 80 % de résineux jusqu'en 1987 ; coupe totale en 1989.

Source : CNRS, UMR 5651, Nice

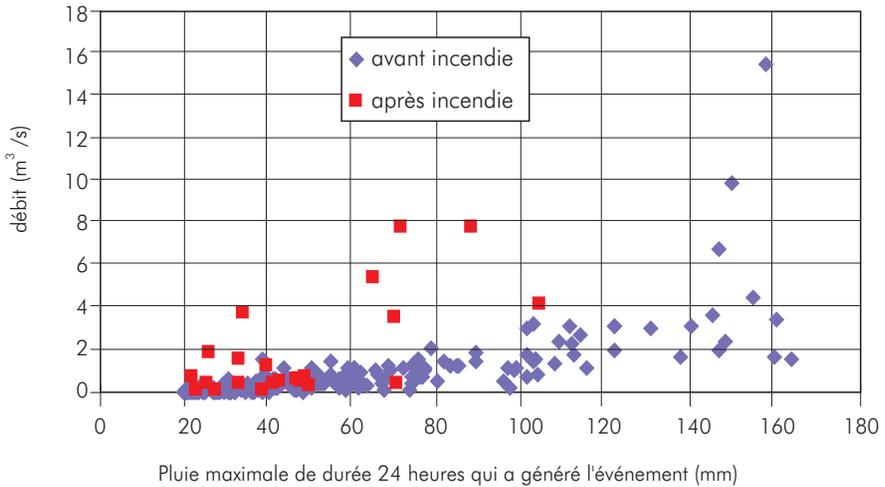


Figure 6. 4 – Bassin versant du Rimbaud (BVRE du Réal Collobrier). Débits de crue avant et après l'incendie de forêt qui a affecté le bassin en 1990.

Les résultats obtenus sur les bassins de Draix (figure 6. 2) sont clairs. La reforestation du siècle dernier diminue considérablement les débits de crues. La diminution est dans un rapport de un à cinq, voire de un à dix sur les débits de crue de fréquence courante et de un à trois en ce qui concerne les volumes écoulés en crues. L'incendie d'un bassin versant du Réal Collobrier (figure 6.4)



a été suivi par des crues extrêmement rapides et de forts débits (à trois reprises le débit a excédé 5 m³/s durant les 2 ans après incendie ; alors qu'on n'avait observé que trois crues supérieures à 5 m³/s pendant les 23 années avant incendie). En revanche, l'examen du comportement du bassin de la Latte, bassin de recherche

du Mont Lozère, avant et après la coupe ne met pas en évidence une augmentation sensible des débits de crues. Il est vrai (figure 6. 3) qu'avant la coupe, les crues de ce bassin étaient comparables à celle des autres bassins témoins.

Les différences de comportement observées démontrent clairement qu'il n'y a pas une réponse unique du rôle de la forêt sur les débits de crues. Climatologie, lithologie, géomorphologie sont les facteurs prépondérants de la genèse des crues. Les écoulements de crues sont de nature hortonienne sur les terrains nus et imperméables du bassin de Draix. Le reboisement de ces terrains a entraîné un changement radical en privilégiant les écoulements subsurfaciques et en

assurant aussi un stockage dans les sols forestiers. Ceci n'est pas observé sur les bassins du Mont Lozère où la pluviométrie excessive, les sols sableux et grossiers extrêmement filtrants font que l'impact de la couverture arborée sur les écoulements de crues est pratiquement négligeable.

On retrouve dans la littérature des conclusions analogues, avec toutefois des écarts sensiblement moins importants. Pour des petits bassins versants, de quelques hectares à quelques km², les débits de crues augmentent après une coupe forestière. On ne fait qu'évoquer, sans en apprécier l'impact réel, les conséquences des travaux forestiers, du compactage du sol par les engins et de l'ouverture de pistes.

Pour les bassins d'altitude pour lesquels les crues sont générées par la fonte des neiges, on note aussi une augmentation des débits de pointe et une apparition avancée dans la saison. Ceci est attribué à un réchauffement plus rapide, en l'absence d'ombrage.

L'effet d'un reboisement sur les crues n'est pratiquement jamais abordé sur un même bassin versant. Les résultats sur des bassins versants appariés sont rares et toujours confrontés à la représentativité des bassins comparés.

Faute de dispositif expérimental, les grands bassins ne sont pas analysés. Il n'est guère envisageable de déboiser entièrement quelques centaines de km² d'un même bassin versant. La variabilité spatiotemporelle des pluies, la propagation des crues dans le réseau hydrographique inhibe toute velléité d'analyse de l'impact d'une déforestation partielle sur les crues d'un grand bassin versant. L'impact d'une reforestation se heurte aussi à ce problème d'échelle spatiale auquel se superposent les problèmes de stationnarité temporelle des autres facteurs de l'occupation de l'espace.

En conclusion

Les forêts, par comparaison à d'autres modes d'occupation de l'espace, ont potentiellement un rôle réducteur des volumes et des débits de crues. Ce rôle est à mettre en relation avec les pertes par interception durant les épisodes pluvieux et avec les fortes possibilités de rétention des sols forestiers. De même, le ralentissement des flux, en accord avec des écoulements préférentiellement souterrains, provoque un étalement des volumes d'eau et donc une réduction des débits de pointe de crues.

Cet effet réducteur des crues est particulièrement marqué pour les bassins versants qui présentent des sols peu profonds et peu perméables, laissés dénudés



de toute végétation. Par contre, même en l'absence de végétation, des sols profonds et très filtrants comme les arènes granitiques ont un comportement tout à fait comparable aux sols forestiers. Il apparaît aussi, que l'impact réducteur est marqué pour les événements de fréquence courante mais devient marginal en cas de très fortes pluies.

FORÊTS ET AUTRES RISQUES NATURELS



Les statuts de la forêt de protection

En France, on distingue les forêts de protection dans le cadre des périmètres RTM (Restauration des terrains en montagne) et les forêts classées dans le cadre d'application de la loi Chauveau.

La loi du 4 avril 1882 a mis en place les services RTM, avec pour principale mission de restaurer les terrains en montagne par correction des torrents, boisement des versants érodés et par réglementation du pâturage. Pour mener à bien cette politique, l'État a acheté les terrains. Les surfaces actuellement acquises représentent 380 000 hectares en région de montagne ; une partie de ces terrains (260 000 hectares) a été boisée.

Le statut de forêt de protection est introduit par la loi Chauveau du 28 avril 1922. L'objectif est de maîtriser les défrichements et les coupes abusives et d'accroître les possibilités de contrôle de la gestion forestière en dehors des périmètres RTM domaniaux.

Actuellement, 80 000 hectares de terrains boisés sont déclarés forêts de protection. Si l'essentiel de ces surfaces (63 %) est consacré à la lutte contre l'érosion, le classement concerne aussi les forêts littorales (16 %), les forêts périurbaines (13 %) et les forêts alluviales (8 %).



Rôle de la forêt dans la protection contre les avalanches

Les précipitations neigeuses accumulées sur les versants peuvent, en montagne, donner naissance à des phénomènes d'avalanches dès lors que la pente devient importante (au delà de 55-60 %), et selon l'état de surface du manteau neigeux.

La forêt est réputée avoir un rôle de protection contre les avalanches. Ce rôle de protection s'explique par la capacité de la forêt à «fixer» le manteau neigeux par de multiples points d'ancrage (les troncs des arbres). Cette capacité de fixation est très liée à la nature des essences, ainsi qu'à la structure des peuplements.

Ainsi, une forêt d'arbres à feuillage persistant permet de retenir dans le houppier une partie de la neige incidente. Ce phénomène a pour conséquence d'accélérer la métamorphose de la neige accumulée sur les branches, et donc celle du paquet neigeux situé sous la forêt (la neige tombant en masse des branches contribue à tasser le paquet neigeux).

Le micro-climat d'une forêt dense a également pour conséquence de prévenir la formation de couches de givre de surface, qui, lorsqu'elles sont recouvertes par des chutes de neige peuvent créer des zones de discontinuité et de fragilité du manteau neigeux. Cependant, ce rôle de protection diminue dans le cas d'une forêt clairsemée, ou d'espèces à feuilles caduques (le mélèze par exemple).

En hauteur, on considère qu'un boisement ne devient pleinement efficace que lorsqu'il atteint deux fois le niveau maximal de la neige. En ce qui concerne la végétation basse (arbustes), elle a deux actions contradictoires : elle contribue d'une part à augmenter la rugosité du terrain, et donc à retenir le manteau neigeux. D'autre part, elle peut faciliter l'aération du manteau, qui en diminue la cohésion et favorise donc le déclenchement des avalanches. L'impact des formations buissonnantes n'est donc pas tranché.

Lors des opérations d'exploitation, il faut recommander de pratiquer des ouvertures de petite taille (quelques ares), en maintenant sur place des souches hautes (coupe à un mètre du sol), afin de pérenniser les ancrages de la neige et de servir d'abri aux jeunes plants.

Cependant, si la forêt a un impact positif sur la limitation des départs d'avalanche, son effet protecteur devient très faible dès lors que l'avalanche s'est constituée. Ainsi, il n'est pas rare que les avalanches rasant des forêts ou s'écoulent à travers elles. C'est le cas par exemple pour les avalanches de 1978 et 1981 à Saint-Etienne-de-Cuines (Savoie), qui ont entaillé une forêt plusieurs fois centenaire. Une trouée de chablis s'était produite en 1961 en haut de versant sans qu'on y prête attention. Des avalanches localisées ont contribué à agrandir progressivement cette zone, jusqu'à l'avalanche de 1978 qui ouvrit trois couloirs, empruntés à nouveau en 1981 par une avalanche qui tua deux personnes, obli-



geant ensuite à la mise en place de dispositifs coûteux de protection dans le haut du versant.



Rôle de la forêt dans la protection contre les coulées boueuses et les glissements de terrain

Le rôle de la forêt dans la prévention des coulées boueuses a été très médiatisé en France, suite au succès rencontré par l'action des services de restauration des terrains en montagne. L'expérience accumulée par ces services, ainsi que les mesures réalisées sur le site du bassin versant de recherche de Draix, montrent que les peuplements forestiers ont un impact majeur sur les coulées boueuses.

À titre d'exemple, sur les marnes noires de Draix, où on observe un petit bassin versant entièrement dénudé en parallèle à un petit bassin versant reboisé par les services RTM il y a cent ans, on considère que le boisement par des pins noirs a réduit de près de 70 fois l'ablation moyenne en sédiments, de 5 à 10 fois la pointe de "cruée" et de 3 à 5 fois la lame écoulée.



Les processus en cause

En matière d'érosion superficielle, la forêt a un impact évident, en offrant une couverture qui réduit l'énergie incidente des gouttes de pluie, mais aussi par la litière qu'elle crée et qui offre d'excellentes possibilités d'infiltration, tout en éliminant la possibilité de formation de croûtes superficielles.

En matière de glissement de terrain, le rôle de la forêt est plus délicat à évaluer. La question peut être examinée sous deux angles : le contrôle de l'eau et de sa charge en matières en suspension et l'effet mécanique (ancrage, surcharge, balancement).

Le contrôle de l'eau

Le contrôle des excès d'eau est un facteur essentiel de prévention des glissements de terrain. La forêt, par prélèvement par transpiration, par les pertes par interception, par amélioration du drainage du sol par le système racinaire, contribue à ce titre à assainir les sols et prévenir les excès d'eau. Ceci n'empêche cependant pas la saturation des sols après des événements plus importants que les autres, notamment à la sortie de l'hiver, et ne peut que retarder à l'automne.



Les effets mécaniques

Sur le plan mécanique, l'appareil racinaire assure un rôle d'ancrage. Mais il s'agit plus d'une augmentation de la cohésion des couches superficielles que d'un véritable ancrage profond, même pour les espèces réputées à racines pivotantes, qui voient leur développement racinaire limité dès qu'un horizon compact est atteint. Quant au poids des arbres, considéré souvent à tort comme un facteur aggravant, il faut relativiser son impact en le comparant à l'épaisseur d'une couche de sol de poids équivalent. Bien souvent, le poids des arbres ne représente pas plus de 5 cm de couche de sol. Mais l'effet de levier dû à la prise au vent élevée peut entraîner des arrachages.

En conclusion

Il existe bien sûr des limites à la protection contre les coulées de boues et les glissements de terrain que peut offrir un peuplement forestier. C'est la pente qui est le facteur essentiel de stabilité. La nature du sol, du sous-sol et les circulations souterraines d'eau jouent ensuite un rôle important, les peuplements forestiers ne pouvant apporter de solution à tous les problèmes.

POUR EN SAVOIR PLUS

ANCEY C. (1996), *Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*, Edisud, Aix-en-Provence, 317 p.

AUZET A.V. et LILIN C. (1989), "Rapport français au PNUE sur l'état des connaissances actuelles en matière de protection des sols contre l'érosion en région méditerranéenne", *Forêt méditerranéenne*, n° 11, p. 158-166.

BURTON T.A. (1997), "Effects of basin-scale timber harvest on water yield and peak streamflow", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 33, n° 6, p. 1187-1196.

CHARBONNEAU R., MORIN G. et FORTIN J.P. (1979), "Effet du pourcentage et de la distribution des surfaces boisées sur les crues de fonte de neige", *Journal of Hydrology*, vol. 41, p. 93-103.

COMBES F. (1989), "Restauration des terrains en montagne : du rêve à la réalité", *Revue Forestière Française*, vol. 41, n° 2, p. 91-106.

COMBES F., HURAND A., et MEUNIER, M. (1995), "La forêt de montagne : un remède aux crues", *Études du Cemagref, série Équipements pour l'eau et l'environnement*, n° 21, Cemagref, p. 113-121.



- COSANDEY C. (1990), "L'origine des crues dans les bassins versants élémentaires : du ruissellement sur les versants à l'écoulement de crue", *Annales de géographie*, Nov-Déc, p. 641-659.
- COSANDEY C. (1993), "La crue du 22 septembre 1992 sur le Mont Lozère", *Revue de géomorphologie dynamique*, vol. XLII, p. 49-54.
- HEWLETT J. (1982), "Forests and floods in the light of recent investigation", *Symposium de Frédéricton*, New-Brunswick, Canada.
- HURAND A. 1994, *Gestion forestière et risques naturels*, ONF, Toulouse, 63 p.
- IRITZ L., JOHANSSON B. et LUDIN L. (1994), "Impacts of forest drainage on floods", *Hydrological Sciences Journal*, vol. 39, n° 6, p. 637-661.
- JONES J. A. et GRANT G. E. (1996), "Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, Western Cascades, Oregon", *Water Resources Research*, vol. 32, n° 4, p. 959-974.
- LAVABRE J., ARNAUD P., FOLTON N., MICHEL Cl. (1996), "Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt", In *Ingénieries - Eau-Agriculture-Territoire*, n° 7, p. 21 à 30.
- LAVABRE J., MARTIN Cl. (1997), "Impact d'un incendie de forêt sur l'hydrologie et l'érosion hydrique d'un petit bassin versant méditerranéen", Symposium "Human Impact on Erosion and Sedimentation" (*Proceedings of Rabat Symposium S6*), avril 1997, AISH Publications n° 245, 1997, RABBAT (Maroc), p. 39-47.
- MATHYS, N. (ed.) 1999, *Les bassins versants expérimentaux de Draix, Laboratoire d'étude de l'érosion en montagne*, Cemagref Éditions, 323 p.
- MEUNIER, M. (1996), "Couvert forestier et crues sur les petits bassins versants de montagne". *Unasylva*, n° 47, p. 185.
- MARTIN Cl., LAVABRE J. (1997), "Estimation de la part du ruissellement sur les versants dans les crues du ruisseau du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) après l'incendie de forêt d'août 1990", In *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 42, n° 6, décembre 97, p. 893-907.
- NASSERI, I. (1988), "Frequency of floods from a burned chaparral watershed", *Proceedings of the symposium on fire and watershed management, Sacramento, California*, Pacific Southwest and range experiment station.

FICHE 7

FORÊT ET QUALITÉ DE L'EAU



L'effet épurateur des ripisylves n'est pas abordé dans cette fiche, principalement consacrée à la qualité des eaux produites par les bassins versants boisés en opposition à d'autres modes d'occupation de l'espace (terrains agricoles et terrains artificialisés). Des questions rémanentes sont abordées : les eaux en provenance des bassins boisés sont-elles plus pures ou sont-elles plus acides ?



Les eaux forestières et les eaux agricoles

Il est inutile de s'appesantir sur les eaux de drainage des milieux artificialisés qui génèrent des brusques flux de pollution dans le milieu naturel lors des pluies et, à un degré moindre lors des lavages des voies. Ces eaux sont très chargées en résidus de combustion et en métaux lourds.



Moins d'intrants

La forêt se distingue du mode agricole d'occupation de l'espace par la stabilité du végétal, le très faible niveau de matière apportée, et par conséquent, par le faible niveau de matière exportée. La forêt n'est généralement ni fertilisée ni amendée. Si elle l'est, les doses sont faibles et les produits utilisés (PO_4 , CaCO_3) sont peu mobiles, de sorte qu'ils ne donnent pas lieu à des exportations élevées. Les concentrations en produits chimiques issus de produits apportés sont donc plus faibles qu'en milieu agricole.

Les sols forestiers

En dehors des différences induites par le mode actuel de valorisation de l'espace, les caractéristiques chimiques des eaux de sources dépendent essentiellement de la composition et du volume des précipitations, et des propriétés des sols et roches à travers lesquelles elles s'infiltrent.

En moyenne à l'échelle de la France, les forêts sont plus abondantes en montagne, c'est-à-dire dans des zones à plus forte pluviométrie qu'en plaines environnantes. Bien qu'à climat égal l'évapotranspiration de la forêt soit plus élevée que celle des cultures, les zones forestières de par leur positionnement géographique fournissent plus d'eau et donc des eaux plus diluées, dans des conditions géologiques identiques.

Au plan des propriétés chimiques, les sols forestiers se distinguent peu des sols agricoles, si ce n'est par leur teneur en matière organique plus élevée et leur pH plus bas. Forêt et agriculture couvrent indifféremment tous types de roches. Ceci a deux conséquences : la matière organique augmente les propriétés de rétention de l'eau et d'éléments potentiellement polluants, tels les pesticides. En revanche, l'acidité des sols peut se transmettre aux eaux si le trajet de l'eau dans la roche altérée est bref et si le potentiel de neutralisation de l'acidité par altération de la roche est limité. L'acidité accroît la mobilité de certains métaux lourds, qu'ils proviennent de l'altération des roches (aluminium) ou de dépôts atmosphériques (plomb).

Au plan biologique, les différences de populations entre sols forestiers et sols agricoles sont certainement importantes, mais les fonctions assurées diffèrent peu. On sait néanmoins que le recyclage, en particulier d'azote, est très important en sol forestier, probablement en relation avec l'abondance de la flore mycorhizienne. On sait aussi que la nitrification est en moyenne plus forte en



milieu agricole, et que cette propriété persiste dans le temps dans le cas de l'installation d'une forêt sur d'anciennes terres agricoles.

Au plan mécanique, la couverture forestière continue freine l'impact des gouttes de pluie et réduit les précipitations, les humus absorbent une part de l'eau météorique, les racines profondes conduisent l'eau plus profondément dans les sols, la végétation forestière stabilise les berges. Tous ces processus limitent considérablement le ruissellement de l'eau en forêt, les pertes par érosion des sols et donc la charge particulaire des eaux.

La gestion forestière

La gestion forestière diffère profondément de la gestion agricole des sols par la faible intensité des interventions. Cependant, les interventions sylvicoles provoquent momentanément des perturbations. En futaie régulière, lors des coupes à blanc, la gestion forestière conduit périodiquement à de brefs cataclysmes, qui peuvent engendrer des drainages d'éléments, tout particulièrement d'azote par minéralisation.

Enfin, il faut rappeler que toute comparaison doit prendre en compte l'histoire des parcelles car une eau actuellement forestière est très fréquemment une ancienne eau agricole. Du fait de la déprise rurale, environ 7 millions d'hectares de forêts se développent sur d'anciennes terres agricoles. En raison de l'inertie des sols, de très nombreuses sources actuellement forestières peuvent avoir une composition de type agricole.



L'acidité des eaux forestières

Des sols acides et des pluies acides

Les eaux de source et de ruisseaux alimentées par de fortes précipitations et issues de sols et roches acides, c'est-à-dire pauvres en calcium et magnésium, sont naturellement très douces, c'est à dire diluées et faiblement alcalines. Leur faible pH est pour l'essentiel lié à la présence d'acide carbonique, résultant de la dissolution du gaz carbonique produit par les racines et les micro-organismes des sols, mais les précipitations acides peuvent encore le réduire. Le massif des Vosges, en grande partie formé de grès et de granites



acides, produit ce type d'eau comme de larges portions du Massif Central, de la Bretagne ou de l'Ardenne.

Au cours des années 80, le dépérissement forestier dans le massif Vosgien a suscité d'importantes recherches sur le rôle possible des dépôts acides. Dans un certain nombre de sites, des études approfondies ont montré que les dépôts acides et la sylviculture avaient directement contribué à une acidification des sols et des eaux de surface. Les mécanismes ont été pour l'essentiel élucidés et des modèles spatiaux et temporels permettent de prévoir les évolutions. Sous le couvert des peuplements résineux du massif vosgien, le pH des précipitations est voisin de 4,2. Cette acidité est liée au dépôt d'acide sulfurique et, dans une moindre mesure d'acide nitrique dilués. Sulfate (provenant de l'acide sulfurique déposé), nitrate (provenant en partie de l'acide nitrique déposé et de celui formé dans les sols), calcium et magnésium (déplacés par les protons apportés et produits dans la sol) sont drainés ensemble et ce processus aboutit à un appauvrissement progressif des sols en calcium et magnésium échangeable.

L'appauvrissement des sols

Parallèlement, l'exploitation forestière appauvrit aussi les sols en calcium et magnésium échangeable. L'appauvrissement est d'autant plus probable que les minéraux des sols et des roches sont pauvres en calcium et magnésium (l'altération minérale ne compense pas les pertes), que les dépôts sont acides, et que l'exploitation forestière est intense. Au fur et à mesure que les sols s'appauvrissent, leur pH diminue ainsi que celui des eaux drainées. Ce phénomène a été observé dans les Vosges et les Ardennes sur les roches les plus acides, grès, granites et schistes pauvres en cations alcalino-terreux. Ce phénomène n'est pas sensible sur des roches similaires dans la Massif Central ou les Alpes ou le niveau de pollution atmosphérique est plus bas. Cette acidité, non traitée et conduite à travers des canalisations en plomb, a pu occasionner une recrudescence du saturnisme hydrique dans les Vosges et les Ardennes.

Eaux souterraines et eaux de surface

En général, l'acidité des sources est plus forte que celle des ruisseaux, du fait d'une réduction de la pression partielle de CO_2 et d'une baisse de la teneur en nitrates. Lorsque l'acidité atteint les ruisseaux, elle se conjugue à une élévation des teneurs en aluminium des eaux et occasionne une forte réduction de la diversité biologique.





Les nitrates

À la base des racines

La teneur moyenne en nitrate des eaux drainées à la base des racines de différentes cultures agricoles dans la plaine de Lorraine varie entre 20-30 mg/l pour différents types de prairies, 20 à 60 mg/l pour des cultures pluriannuelles ou des céréales d'hiver, et plus de 100 mg/l pour du maïs fourrage ou du colza. Pour un ensemble de forêts montagnardes des Vosges et du Beaujolais, recevant des dépôts atmosphériques variant de 8 à 20 kg d'azote/ha/an, les teneurs en nitrate à la base des racines varient entre moins de 1mg /l pour sept forêts résineuses ou feuillues immémoriales en bonne santé, 3 à 13 mg /l pour quatre peuplements dépérissants et 13 à 32 mg /l pour 4 plantations résineuses de première génération sur d'anciennes terres agricoles. Dans les Ardennes, les teneurs en nitrate drainé sous des peuplements feuillus et résineux recevant des dépôts azotés de 20 et 50 kg d'azote/ha/an respectivement sont de 5 et 31 mg/l de nitrate.

À la sortie des bassins versants

Pour des forêts feuillues de la plaine Lorraine situées dans des conditions analogues à celles des parcelles de culture mentionnées plus haut, les teneurs en nitrates dans les sources issues de ces bassins sont faibles. Une enquête historique à partir des données des directions départementales des affaires sanitaires et sociales de la région Lorraine donne sur un échantillon de 31 bassins entièrement forestiers une valeur moyenne de 4,2 mg de nitrate/l. Cependant, sur quelques bassins de l'échantillon, la teneur en nitrate atteint 15 mg /l. Un inventaire systématique de ruisseaux et des sources des Vosges conduit à des conclusions identiques. La comparaison des teneurs mesurées dans les eaux drainées à la base des racines avec celles mesurées dans les sources en aval des parcelles forestières étudiées confirme une réduction systématique des teneurs dont les causes paraissent être l'accumulation d'azote dans les bas fond et la dénitrification. Lors des coupes rases, les teneurs en nitrate drainé augmentent pendant une courte période, mais le retour à la situation antérieure se fait en moins d'une dizaine d'années.



En conclusion

Les espaces forestiers, par opposition aux autres modes d'occupation de l'espace, produisent des eaux de surface et souterraines de qualité. Cela résulte principalement de la plus faible anthropisation du milieu et du pouvoir de dénitrification du milieu en relation avec l'activité biologique des sols forestiers. Toutefois, malgré la diminution constatée actuellement des apports météoriques acides, les eaux issues des roches pauvres en calcium et magnésium, présentent des pH très faibles et cet état pourrait potentiellement s'aggraver en relation avec l'appauvrissement des sols soumis à une trop forte pression de production forestière.

POUR EN SAVOIR PLUS

CASPARY H. J. (1990), "An ecohydrological framework for water yield changes of forested catchments due to forest decline and soil acidification". *Water Resources Research*, vol. 26, n°6, p. 1121-1131.

GRAYSON R.B., HAYDON S.R., JAYASURIYA M.D.A. et FINLAYSON B.L. (1993), "Water quality in mountain ash forests separating the impacts of roads from those of logging operations", *Journal of Hydrology*, vol. 150, p. 459-480.

GUILLET B. (1997), "L'évaluation des charges critiques sur les bassins versants du Mont Lozère et extension à la région Sud-Cévenole". *Rapport de fin de contrat de recherche*, Université d'Orléans & CNRS, 75 p.

LANDMANN G. (1993), "Charges et niveaux critiques de polluants atmosphériques pour les écosystèmes terrestres et aquatiques. Émergence du concept scientifique. Domaines d'application et limites", *Pollution atmosphérique* (numéro spécial), p. 3-20.

MACKAY D. W. (1994), "Water quality and pollution control in Great Britain", *Forests and water*, Institute of Chartered Foresters, Edinburgh.

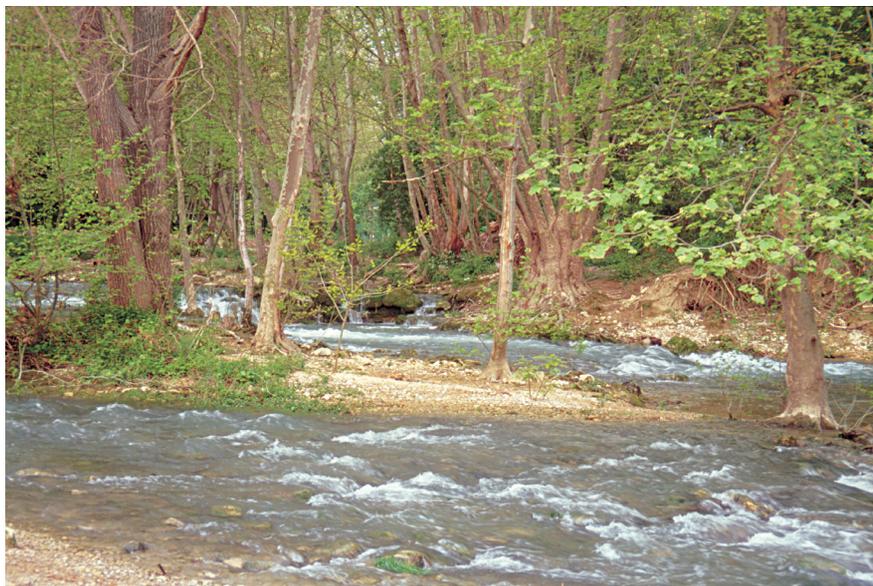
PINOL J. et AVILA A. (1992), "Streamwater pH, alkalinity, pCO₂ and discharge relationships in some forested Mediterranean catchments". *Journal of Hydrology*, vol. 131, p. 205-225.

PROBST A., VIVILLE D., FRITZ B., AMBROISE B. et DAMBRINE E. (1991), "Hydrochemical budgets of a small forested granitic catchment exposed to acid deposition: the Strengbach catchment case study" (Vosges Massif, France), *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 62, p. 337-347.

PROBST A., FRITZ B., et VIVILLE D. (1995), "Mid-term trends in acid precipitation, streamwater chemistry and element budgets in the Strengbach catchment (Vosges mountains, France)", *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 79, p. 39-59.



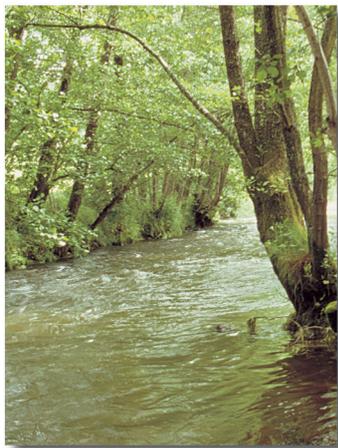
ULRICH E. et WILLIOT B. (1994), *Les dépôts atmosphériques en France de 1850 à 1990*, ONF & ADEME. 154 p.





FICHE 8

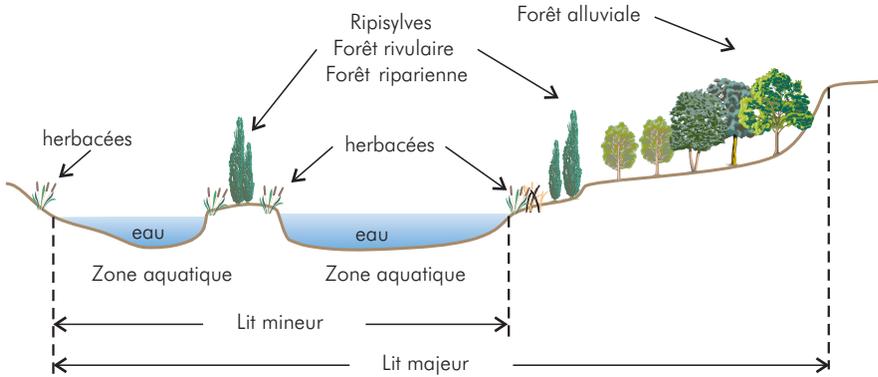
LES RIPISYLVES



Des nuances terminologiques

La ripisylve est une formation herbacée et ligneuse qui se situe à la transition du milieu aquatique et du milieu terrestre. Elle se développe au bord des eaux, sur les rives, dans le lit majeur (épisodiquement inondé) et peut coloniser tout ou partie du champ d'inondation au sens géomorphologique (la plaine alluviale au sens large). Tous ses étages ne sont pas obligatoirement présents. La ripisylve peut être naturellement absente pour les cours d'eau élémentaires de tête de bassin versant ou limitée à des rives très peu développées. C'est sur les plaines des bassins inférieurs, zones naturelles d'accumulation et de sédimentation, que tous les faciès de la ripisylve peuvent s'installer.





Bien qu'il semble accepté que le terme de ripisylve englobe l'ensemble des formations ligneuses, des nuances sont parfois introduites en fonction de l'éloignement du cours d'eau.

On parle alors de forêt rivulaire ou de forêt riparienne pour les abords immédiats du cours d'eau et pour les formations de forêt alluviale, de corridor forestier, de forêt d'inondation qui occupent les lits majeurs.

Le tableau 8.1 présente les différents groupements forestiers qui se développent en fonction de l'altitude par rapport au plan d'eau (ou de son éloignement) et des facteurs édaphiques.

Qu'il soit installé à la proximité immédiate du cours d'eau (saules, aulnes, frênes...) ou dans le lit majeur (chênes, peupliers...), cet espace forestier est en étroite relation avec le cours d'eau, soit directement, soit par l'intermédiaire de sa nappe d'accompagnement. Cet espace où les interactions entre l'eau et le végétal sont bien marquées apparaît comme un lieu privilégié pour apprécier les impacts des espaces forestiers sur le cycle de l'eau.

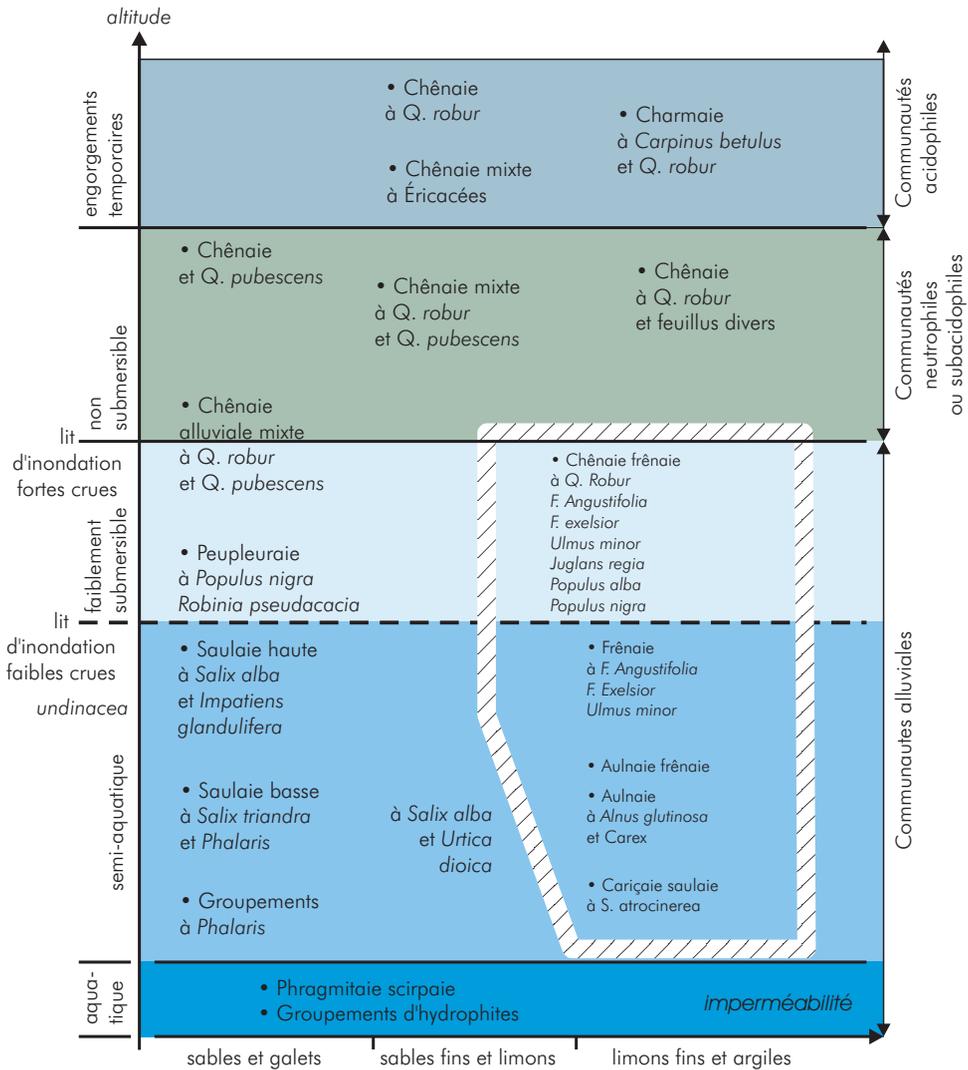


Tableau 8. 1 – Répartition des différents groupements forestiers en fonction du niveau altitudinal par rapport au lit d'été et de la granulométrie du substrat (Source : CERR, 1987)



Un rôle de protection des berges



La végétation des bords de cours d'eau stabilise naturellement les berges. Les herbacées rivulaires ont un fort pouvoir d'enracinement qui leur assure un parfait ancrage, assurant ainsi une bonne stabilisation des berges. De même, la partie aérienne des herbacées, assure une protection du lit du cours d'eau lors des crues, par plaquage au sol. Le développement de ces plantes aquatiques est lié à la nature des espèces ligneuses auxquelles elles sont associées.

Un parfait équilibre écologique existe avec les espèces feuillues endogènes des bords de cours d'eau : saules, aulnes, frênes... Ces espèces, parfaitement enracinées, jouent aussi un rôle stabilisateur important.

À l'opposé, certaines plantations (peupliers, épicéa, ...) sont à proscrire en bordure immédiate des cours d'eau, en raison de leur enracinement superficiel. Le manque de stabilité de ces espèces est plutôt un facteur déstabilisant des berges. Dans le même ordre d'idées, l'enrésinement des bords de cours d'eau qui empêche le développement des herbacées aquatiques, accroît l'érodabilité des berges.



Un rôle régulateur des crues

La forêt des bords de cours d'eau participe à la réduction du risque d'inondation à l'aval. Deux niveaux peuvent être distingués :

- la réduction de la vitesse de l'eau. L'encombrement du lit du cours d'eau joue un rôle de frein hydraulique. Ce rôle se traduit par une diminution (parfois dans un rapport de 1 à 2) du coefficient de Strickler K (la vitesse de l'eau V est estimée par la pente de la ligne d'eau i et le rayon hydraulique R_h selon



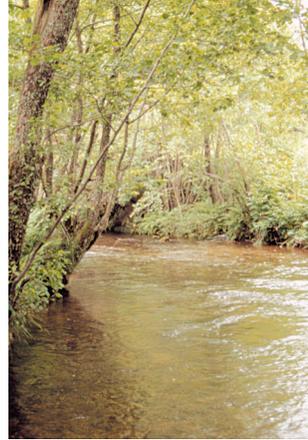
l'équation $V = K R_n^{2/3} i^{1/2}$).

– le ralentissement des écoulements entraîne une diminution de la débitance du cours d'eau.

Ceci se manifeste par une inondation et un stockage des eaux dans le lit majeur.

Ce rôle écrêteur des crues, comme le jouerait un ouvrage hydraulique, peut être jugé bénéfique si la vulnérabilité de la zone inondée est faible. Ce n'est pas nécessairement vrai à la traversée d'une zone urbaine, où l'on recherche généralement une débitance maximum pour éviter les problèmes de débordement.

L'impact régulateur des crues reste tout de même limité aux petits cours d'eau et peut être considéré comme négligeable dès que la largeur du cours d'eau excède quelques mètres.



Ripisylves et forêts alluviales sont une richesse biologique

L'espace forestier est extrêmement diversifié et présente généralement une grande originalité floristique, structurale et écologique. Plusieurs centaines d'espèces végétales cohabitent dans un haut niveau d'organisation malgré son hétérogénéité apparente en l'absence d'exploitation. Cette "réserve botanique" est aussi un moteur écologique des écosystèmes aquatiques et terrestres, lié à la décomposition rapide de la matière organique et au rôle de filtre des éléments nutritifs

Cet espace joue un rôle zooécologique fondamental. C'est un élément structurant des habitats piscicoles, un élément majeur de la chaîne trophique, et un élément de contrôle des facteurs physiques, tels que l'éclairement et la température de l'eau (cf. fiche 9).

La forêt alluviale par son rôle d'abri, par la diversité du milieu, et par ses potentialités de nourriture présente aussi un grand intérêt pour l'avifaune. Les recensements effectués mettent en évidence la richesse faunistique de cette zone ; il n'est pas rare que le nombre d'espèces nicheuses de la forêt alluviale soit le double de celui de la forêt climacique.



Le rôle épurateur des eaux de l'espace forestier des bords de cours d'eau

Le système racinaire des formations végétales des bords de cours d'eau joue un rôle de filtre en piégeant les éléments nutritifs. En plus des nitrates, ce rôle de filtre est efficace pour l'ensemble des nutriments : potassium, phosphates... et même de certains éléments toxiques.

L'absorption racinaire directe est aussi extrêmement active, notamment en période végétative.

Ainsi, les eaux des nappes se trouvent naturellement épurées à l'interface avec la ripisylve. Dans la moyenne vallée de la Garonne, on a pu mesurer des concentrations en nitrates vingt fois inférieures dans la nappe alluviale à celles des zones agricoles à proximité.

En conditions anaérobies, les micro-organismes de cet espace assurent aussi la réduction des formes oxydées de l'azote pour produire de l'azote gazeux libéré dans l'atmosphère. Cet effet est mesurable sur la zone aquatique, sur les zones temporairement submergées et sur les eaux des nappes d'accompagnement des cours d'eau.

Ces capacités d'auto-épuration, qui peuvent dans certains cas dépasser 90% pour les nitrates, 80% pour le phosphore sont à l'évidence extrêmement précieuses et d'un intérêt écologique et économique évident (on estime à près de deux francs la dénitrification "artificielle" d'un m³ d'eau).

L'espace forestier fluvial a aussi un rôle socio-économique important

L'espace forestier fluvial est un élément structurant du paysage, de stabilisation des lits mineurs, de protection contre les crues, d'auto-épuration par consommation des éléments nutritifs, avec potentialités sylviculturales.

Les potentialités sylviculturales de l'espace forestier du cours d'eau sont réelles. Toutefois, on se heurte à la difficulté de concilier exploitation et gestion respectueuse de ses multiples fonctions et à un morcellement extrême, particulièrement inadapté à une exploitation rationnelle. Ce problème de morcellement est une conséquence de la loi qui considère, pour les cours d'eau non doma-



niaux, que les riverains sont propriétaires des rives et du lit du cours d'eau. Faut-il réfléchir à des mesures compensatoires, qui permettraient à un gestionnaire unique, d'avoir la maîtrise de cet espace ? La question mérite d'être posée. Les retombées économiques directes d'une exploitation concertée des bois ne seraient pas négligeables (on estime à 17 t/ha/an la production de matière sèche de certaines ripisylves et certaines de ces forêts alluviales possèdent des essences commercialement intéressantes). La maîtrise de cet espace aurait aussi un intérêt social pour la maîtrise des crues, sans oublier le contrôle de l'urbanisation.

En site urbain, en zone agricole et même en zone forestière, la forêt des bords de cours d'eau est un élément structurant du paysage : visualisation du chevelu hydrologique, contraste de couleurs. Cet espace contribue à la qualité du paysage et présente des potentialités récréatives intéressantes orientées vers le tourisme local.



La ripisylve consomme aussi de l'eau

La ripisylve consomme pendant la saison sèche une partie de l'eau du cours d'eau. Ce phénomène se traduit parfois par des oscillations régulières avec des alternances jour-nuit du débit des cours d'eau possédant une ripisylve développée. Cette consommation peut être particulièrement néfaste lors des périodes de faibles débits.



Un produit dérivé : les embâcles de bois en rivière

La forêt rivulaire est un réservoir potentiel d'embâcle. Les accumulations de bois mort, jouent un rôle sur le fonctionnement hydraulique, morphologique et biologique du cours d'eau. Le fonctionnement hydraulique d'un embâcle peut être jugé positif : l'embâcle constitue un frein hydraulique qui réduit le débit à l'aval, à l'instar d'un ouvrage hydraulique.

Mais ce rôle de frein se traduit par une remontée du niveau de l'eau à l'amont de l'embâcle et donc une augmentation du risque d'inondation. Ceci est d'autant plus néfaste lorsque les embâcles obstruent des ouvrages hydrauliques (ponts, déversoirs de crue des barrages). Le risque hydrologique peut aussi être singulièrement aggravé en cas de rupture de l'embâcle ; il se traduit alors par une brusque accélération du débit.

L'influence des embâcles sur la morphologie du cours d'eau est tout aussi ambiguë. La réduction de la vitesse de l'eau à l'amont d'un embâcle provoque une sédimentation des matières en suspension. Les embâcles situés sur les



rives jouent un rôle protecteur efficace. Mais la concentration du flux dans un chenal réduit peut à l'inverse générer une érosion de la berge opposée.

L'embâcle en rivière a aussi une fonction écologique d'habitat pour la faune aquatique, en qualité de support de vie pour les invertébrés benthiques et en qualité d'abris pour les poissons.

Comme souvent en milieu naturel, la réponse unique et formelle à une sollicitation n'existe pas. Les incidences positives des embâcles ne doivent pas masquer les risques qu'ils représentent. Et inversement, la problématique doit être posée et analysée pour un cours d'eau donné, à des endroits précis de ce cours d'eau en fonction des objectifs de protection depuis la sécurité des personnes jusqu'à la protection des invertébrés.

En conclusion

La ripisylve est un espace privilégié de transition entre le milieu terrestre et le milieu aquatique. Les interactions entre les deux milieux y sont fortes. On attribue aux ripisylves un rôle positif de stabilisation des berges, de ralentissement des crues des bassins versants de tête, d'auto-épuration des eaux par piégeage des nitrates et des phosphates. Mais les ripisylves mal entretenues provoquent des embâcles préjudiciables au bon fonctionnement des ouvrages hydrauliques, réduisent les débits d'étiage. Pour optimiser leur rôle, il semble acquis que ces zones doivent faire l'objet d'un entretien régulier dans le cadre des programmes d'aménagement des cours d'eau.

POUR EN SAVOIR PLUS

AGENCE DE L'EAU RMC, (1998), *La gestion des boisements de rivières*, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon.

BREN M. L. J. (1993), "Riparian zone, stream and floodplain issues : a review". *Journal of Hydrology*, vol. 150, p. 277-299.

CALLEDE J., HALLAIRE M. et DAUDET F.A.(1978), "Oscillations journalières de la profondeur des nappes en l'absence de précipitations", *Annales agronomiques*, vol. 39 n° 2, p. 111-122.

CARBIENER R. (1995), "Relations forêt alluviale-prairie alluviale-nappe phréatique. Le cas de l'Ill en Alsace".

HILL A. R. (1996), "Nitrate removal in stream riparian zones", *Journal of Environmental Quality*, vol. 25, n° 4, p. 743-755.

HUBBARD P. K. et LOWRANCE R. R. (1996), "Solute transport and filtering through a riparian forest", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 39, n° 2, p. 477-488.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT (1988), *Gestion des bordures de cours d'eau*, ministère de l'Environnement, Paris.

ORMEROD S. J. (1994), "Managing the effects of afforestation on aquatic and riparian wildlife in upland Britain", In : *Forests and water*, Edinburgh, Institute of Chartered Foresters, p. 149-157.

PETERSEN J. F. et M. R. HUGHES (1994), "Restauration of floodplain forests", In : *Forests and water*, Institute of chartered foresters, Edinburgh, p. 194-203.

PETERSEN J. F. et HUGHES F. M. R. (1994), "Restauration of floodplain forests in Great - Britain", In : *Forests and water*, Institute of chartered foresters, Edinburgh.

PIEGAY H. et SALVADOR P. G. (1997), "Contemporary floodplain forest evolution along the middle Ubaye river, southern Alps, France", *Global Ecology and Biogeography Letters*, vol.6, n° 5, p. 397-406.

PINAY G. et DECAMPS H. (1988), "The role of riparian woods in regulating nitrogen fluxes between the alluvial aquifer and surface water : a conceptual model", *Regulated rivers : research and management*, n° 2, p. 507-516.

SANCHEZ-PEREZ J. M., TRÉMOLIÈRES M. et CARBIENER R. (1991), "Une station d'épuration naturelle des phosphates et nitrates apportés par les eaux de débordement de Rhin : la forêt alluviale à frêne et orme", *C.R. Acad. Sci. Paris, Écologie générale/General Ecology*, 312 p.

SANCHEZ-PEREZ J. et TRÉMOLIÈRES M. (1997), "Variation in nutrient levels of the groundwater in the Upper Rhine alluvial forests as a consequence of hydrological regime and soil texture", *Global Ecology and biogeography letters*, n° 6, p. 211-217.

SANCHEZ-PEREZ, J.M., TRÉMOLIÈRES M. , SCHNITZLER A. et CARBIENER R. (1991), "Évolution de la qualité physico-chimique des eaux de la frange superficielle de la nappe phréatique en fonction du cycle saisonnier et des stades de succession des forêts alluviales rhénanes (*Quercu-ulmetum minoris* Issl.24)", *Acta oecologica*, vol. 12, n° 5, p. 581-601.

SNYDER N. J., S. MOSTAGHIMI, D.F. BERRY, R.B. RENEAU, S. HONG, P.W. MCCLELLAN, et E.P. SMITH (1998), "Impact of riparian forest buffers on agricultural nonpoint source pollution", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 34, n° 2, p. 385-395.

TREMOLIERES M., CARBIENER R., EGLIN I., ROBACH F. , ROECK U. , et SANCHEZ-PEREZ J.-M., SCHNITZLER A., WEISS D. (1991), "Zones inondables, végétation et qualité de l'eau en milieu alluvial rhénan : l'île de Rhinau, un site de recherches intégrées", *Bull. Ecol.*, vol. 22, n°3-4, p. 317-336.

TREMOLIERES M., CARBIENER R., EGLIN I., ROBACH F. , ROECK U. , et SANCHEZ-PEREZ J.-M. (1996), "Surface water/groundwater/forest alluvial ecosystems : functioning of interfaces. The case of the Rhine Floodplain in Alsace (France)". In : "*Groundwater/Surface Water Ecotones : Biological and Hydrological Interactions and Management Options*", Cambridge University Press, Cambridge, p. 91-101.





8

FICHE 9

FORÊT ET RESSOURCES PISCICOLES



La notion d'hydrosystème

Des changements importants sont intervenus dans notre perception des rivières qui ne sont plus uniquement considérées pour leur fonction de drainage des eaux. La notion d'hydrosystème s'est peu à peu imposée. L'eau est un milieu vivant où cohabitent différentes unités fonctionnelles, avec des niveaux d'organisation parfaitement hiérarchisés. Un cours d'eau doit être considéré comme un écosystème complexe sujet à des interactions permanentes entre l'environnement physique du cours d'eau (le biotope) et la biocénose que constitue le monde vivant du cours d'eau.

L'environnement physique comprend de nombreux facteurs physico-chimiques : la climatologie, l'hydrologie, l'hydraulique, l'hydrogéomorphologie, les caractéristiques des sols, la topographie... et dépend des modes de gestion de l'espace : la qualité chimique des eaux, leur turbidité, les débits d'étiage, la fréquence des crues, leur intensité...



La biocénose, pour laquelle on distingue :

- les végétaux qui assurent une fonction productrice de matière organique par la photosynthèse,
 - la faune aquatique consommatrice de matière organique,
 - les micro-organismes qui assurent une fonction de transformation / dégradation de la matière organique,
- est fortement tributaire des conditions d'accueil du biotope.

La faune piscicole se situe aux niveaux supérieurs dans le réseau trophique. Elle est donc fortement tributaire des possibilités d'accueil du cours d'eau et de son activité biologique, tant et si bien que les poissons sont considérés comme de bons descripteurs du fonctionnement du milieu aquatique.



Les exigences pour le maintien des peuplements piscicoles diversifiés

- un pH entre 6 et 9,
- une bonne oxygénation,
- l'absence de produits toxiques,
- des zones de reproduction,
- des zones d'abri et de repos,
- de la nourriture.



Le lien avec la forêt

Plusieurs niveaux d'interaction de la forêt sur les ressources piscicoles d'un cours d'eau sont identifiés :

- la forêt de versant par ses interventions sur le cycle de l'eau et la production d'eau de qualité,
- la ripisylve et sa fonction d'accueil, les conditions hydrodynamiques, la régulation de la température de l'eau, les alternances ombre et soleil...
- la ripisylve et sa fonction alimentaire de production de matière organique,
- la ripisylve et sa fonction épuratoire des eaux.

Ces différentes fonctions de la ripisylve sont d'autant mieux assurées et décelables que le cours d'eau est de faible largeur. Toutes proportions gardées, la faune piscicole des grands cours d'eau est avant tout tributaire des eaux produites par le bassin versant.



La couverture forestière, prise dans son ensemble, peut donc à la fois agir sur la qualité et la quantité de l'eau en rivière, sur sa répartition dans l'année et sur sa température. Elle est donc susceptible d'avoir une influence notable sur les potentialités piscicoles d'un cours d'eau.



La morphologie de la rivière

L'équilibre des communautés biologiques des hydrosystèmes est fortement dépendant des conditions physiques de l'écoulement. Dans ce sens, les formations arborées de bord de cours d'eau et les débris ligneux grossiers ont un rôle majeur de contrôle des écoulements hydrauliques le long des berges et même du cours d'eau pour des amas ligneux volumineux. Alors que des conditions homogènes d'écoulement entraînent une homogénéité et une pauvreté des communautés biologiques, la diversification locale des champs de vitesses, la succession de mouilles et de sections rapides, les modifications de la géométrie du cours d'eau... sont nécessaires à l'installation de communautés biologiques diverses qui déterminent la richesse du cours d'eau et ses potentialités piscicoles.



La forêt riveraine, élément structurant pour les habitats piscicoles

Il est admis que la diversification des habitats a une traduction directe positive sur la diversité et la productivité piscicole d'un cours d'eau, en réduisant notamment la compétition intra- et inter-spécifique. Le bois mort est un agent de diversification et de stabilisation des habitats, comme la végétation riveraine :

- à l'échelle du lit majeur, la ripisylve favorise suivant les cas l'érosion des berges ou la stabilisation, et contribue au maintien d'aires à chenaux multiples, de méandres, et donc d'un habitat diversifié.
- à l'échelle de la berge la ripisylve favorise les couverts, ce qui est important pour certaines espèces : soit directement, soit en étant la source de débris ligneux. De plus, les racines sont non seulement des caches, mais aussi des supports de ponte pour de nombreuses espèces de poissons.





Le contrôle de la chaîne trophique

Les formations arborées riveraines contrôlent la chaîne trophique : apport de matière organique, filtre des nutriments, régulation de la température des eaux... L'ombre et la lumière contrôlent et hiérarchisent la production de la flore et de la faune des invertébrés. Les échanges thermiques sont proportionnels à la surface du cours d'eau exposée à l'ensoleillement. On estime que sur des petits cours d'eau de plaine, l'enlèvement de la ripisylve peut élever les températures estivales de 3 à 5 °C, et diminuer les températures hivernales de 1 à 2 °C. Or, le régime des températures est un élément important pour la vie (éventuellement la survie) et la reproduction des peuplements piscicoles. Ainsi, on estime que 23 °C est une température critique pour un grand nombre de salmonidés. Une température élevée peut provoquer une augmentation des affections virales ou bactériennes. L'oxygénation de l'eau est aussi conditionnée par sa température (la solubilité de l'oxygène dans l'eau est de 14mg/l à 0 °, 9mg/l à 20 ° C à 760 hP). Les formations arborées des bords de cours d'eau sont des sources directes de matière organique. La qualité de ces apports organiques dépend des espèces arborées, notamment leur dégradabilité (les résineux, suite à la mauvaise dégradation des aiguilles, sont à proscrire à proximité immédiate du cours d'eau).



La forêt riveraine et la qualité des eaux

Le rôle positif de la ripisylve sur la qualité des eaux est évoqué fiche 8. Rappelons simplement les effets bénéfiques de la réduction des taux de nitrates, phosphates, pesticides... sur les peuplements piscicoles.



Les effets attendus de la forêt de versant

La forêt garante de la qualité des eaux, d'eaux à faible teneur en matières en suspension, la forêt et son rôle régulateur du cycle hydrologique sont autant d'arguments favorables à une bonne qualité piscicole des cours d'eau.

Toutefois quelques constats négatifs peuvent être identifiés :

- l'acidification des eaux et la mise en solution de l'aluminium que l'on observe fréquemment en milieu cristallin,

– l'impact de certains travaux forestiers qui peuvent perturber l'équilibre du milieu, telles que les coupes rases et les modifications brutales qu'elles peuvent engendrer sur le comportement hydrologique du bassin versant et la réactivation des processus d'érosion des sols...

En conclusion

Les peuplements piscicoles sont fortement dépendants de la forêt riparienne. Il semblerait que dans un milieu diversifié, tous les stades et les groupes trophiques puissent trouver l'habitat et la nourriture appropriés à leur développement. La forêt riparienne, a donc un fort impact positif, même si, la réduction (dans des proportions inconnues) de l'écoulement en période sèche puisse être un facteur négatif.

Pour ce qui est de la forêt de versant, elle contribue, en opposition aux autres modes d'occupation de l'espace, à la production d'une eau de meilleure qualité. L'acidification des eaux est toutefois un problème à ne pas négliger. Quant à une diminution des débits d'étiage, nous avons vu qu'il est difficile de dégager une tendance générale.

Forêt de versant et ripsylves présentent un intérêt écologique fondamental pour les peuplements piscicoles des cours d'eau. L'intérêt écologique est par ailleurs doublé d'un intérêt social et économique que constitue la fonction récréative de la pêche. N'oublions pas les revenus de la pisciculture qui ne sont pas négligeables pour la population rurale de montagne.

POUR EN SAVOIR PLUS

ABBET.B. et MONTGOMERY D.R. (1996), "Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers", *Regulated rivers : research and management*, vol. 12, p. 201-221.

BERG N., CARLSON A. et AZUMA D. (1998), "Function and dynamics of woody debris in stream reaches in the central Sierra Nevada, California". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 55, p. 1807-1820.

GREGORY K. J. *et al.* (1994), "The role of dead wood in aquatic habitats in forests. In : *Forests and water*. Institute of Chartered Foresters, Edinburgh, p. 158-193.

HARVEY C. (1998), "Influence of large woody debris on retention immigration, and growth of coastal cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki clarki*) in stream pools", *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* vol. 55, p. 1902-1908.

HUGGENBERGER P., HOEHN E., BECHTA R., WOESSNER W. (1998), "Abiotic aspects of channels and floodplains in riparian ecology", *Freshwater Biology*, vol. 40, p. 407-425.



MORET L. D. (1993), "Impact des plantations d'épicéa commun en bordure de cours d'eau sur l'écosystème aquatique", Direction départementale de l'agriculture et de la forêt, 29 p.

PIEGAY H. et L. MARIDET. (1994), "Formations végétales arborées riveraines des cours d'eau et potentialités piscicoles", *Bull. français. Pêche Piscic*, vol. 333, p. 125-147.

RIEMAN B. et CLAYTON J. "Wildfire and native fish : issues of forest of sensitive species", *Fisheries*, vol. 22, n° 11.

WETZEL R.G. (1995). "Death, detritus, and energy flow in aquatic ecosystems", *Freshwater Biology*, vol. 33, p. 83-89.



FICHE 10

GESTION DE L'ESPACE ET PROTECTION DES EAUX. QUELQUES CAS CONCRETS



L'EXPÉRIENCE DE LA VILLE DE MUNICH

La ville de Munich est approvisionnée en eau sans aucun traitement préalable. Au cours des dix dernières années, une seule chloration préventive a été effectuée. Ceci est le résultat d'une politique de gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin versant.



La maîtrise partielle du bassin versant

Suite à des problèmes d'alimentation en eau dans les années 1870, la ville de Munich a décidé d'exploiter l'aquifère de la rivière Mangfall. Ce cours d'eau draine un bassin versant de 150 km². La principale zone aquifère exploitée est située à 40 km au sud-est de Munich, à une cote qui permet une alimentation gravitaire de la ville.

Un tiers du bassin versant est boisé ; la ville est propriétaire de 1500 ha, à proximité immédiate des points de captage. Ces 1500 ha sont entièrement boisés : boisement naturel et reboisement de terres agricoles à la fin du siècle dernier (épicéa et mélèzes). Depuis 1950, les reboisements sont préférentiellement effectués en feuillus.

En outre, la ville contrôle les pratiques culturales sur une zone agricole de 2250 ha. Depuis le début des années 1990, une partie de ces exploitations agricoles se sont reconverties dans l'agriculture biologique.



La politique forestière

La ville possède son propre service forestier, pour assurer la gestion, l'entretien et l'exploitation de son domaine forestier. Le principe directeur de la politique forestière de ce service est la production d'eau (voire l'accroissement des volumes d'eau) et la conservation (voire l'amélioration) de la qualité des eaux.

Quelques informations sur les pratiques de ce service :

- sylviculture et exploitation forestière ne doivent en aucun cas perturber la continuité de la protection de la ressource en eau ; par conséquent : pas de coupe à blanc, des éclaircies exploitées en rotation décennale, et un mélange d'espèces avec une priorité pour les feuillus (les aulnes sont proscrits en raison de leur potentialité à fixer l'azote atmosphérique qui provoque une augmentation en azote des sols) ;
- conduite des travaux en hiver, lorsque les sols sont gelés pour éviter au maximum les perturbations du sol dues au passage des engins ;
- le parc des engins forestiers appartient au service pour garantir un fonctionnement le moins polluant possible (en cas de fuites d'huile sur le sol, la zone est balisée et un autre service intervient pour l'enlèvement complet de la zone souillée jusqu'à 1 m de profondeur).

La production de ces forêts est de 7 m³/ha/an, à partir d'un volume sur pied de 430 m³/ha. Le prix de vente du bois est de l'ordre de 150 DM/m³. Le revenu net moyen de ces forêts est d'une vingtaine de DM par hectare et par an, ce qui est faible par rapport à une exploitation "strictement forestière" compara-

ble dont le revenu moyen annuel est cinq à six fois plus élevé. Ceci est dû aux charges salariales élevées, aux surcoûts de l'exploitation sélective et à la conduite des travaux forestiers garantis "non polluants".



Une agriculture biologique

Suite à une augmentation des concentrations en nitrates et en pesticides dans les années 1980, le service des eaux s'est investi dans une politique forte de concertation avec les agriculteurs, qui s'est concrétisée par un programme d'encouragement à l'agriculture biologique. Des partenariats se sont développés entre agriculteurs, le service des eaux et des associations pour une agriculture biologique (Bioland, Naturland, Demeter). Ces pratiques concernent 2250 ha.

Les pratiques agricoles sont consignées dans un cahier des charges : limitation du nombre de têtes à l'hectare (2 vaches), utilisation exclusive des engrais organiques de la ferme, interdiction de tout traitement phytosanitaire. Le suivi de la réglementation est contrôlé régulièrement par des organismes indépendants.

Le taux de subvention annuelle versée par le service des eaux est de 550 DM/ha/an pendant les six premières années. Actuellement, les prolongations contractuelles s'étalent sur 12 ans supplémentaires, avec une aide réduite à 450 DM/ha/an. Au total, le montant des subventions payées par le service des eaux s'élève à 1 million de DM/an.



La production d'eau

Les eaux, d'origine souterraine, sont issues de la nappe d'accompagnement du cours d'eau et de captages de sources.

La production annuelle moyenne atteint 80 millions de m³ d'eau; soit environ 80 % de la consommation annuelle de la ville de Munich, qui compte 1,3 million d'habitants. La consommation en eau de la ville est significativement à la baisse ; la baisse a atteint 22 % ces dix dernières années.

Deux réservoirs de 60 000 m³ assurent le stockage sur le lieu de production.

L'eau est distribuée sans aucun traitement préalable : ni filtration, ni chloration (une seule chloration préventive a été effectuée en 10 ans). Cette situation n'est pas rare en Bavière : 60 % des volumes distribués ne font l'objet d'aucun traitement.

Après une brusque détérioration de la qualité des eaux par élévation de la concentration en nitrates, avec une teneur maximale de 15 mg/l à la fin des années 80, la situation évolue favorablement avec une teneur moyenne actuelle de 12 mg/l de nitrates et un objectif à court terme fixé à 10 mg/l.

Le coût de l'eau à Munich est de 2 DM/m³ pour la fourniture d'eau et 3 DM/m³ pour l'assainissement. Le coût de la prévention estimé à 0,1 DM/m³, reste très faible par rapport au prix de vente.

ET EN FRANCE

L'article 2 de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 liste les dispositions à prendre pour une gestion équilibrée de la ressource en eau, la protection contre toute pollution, la restauration de sa qualité, le développement et la protection de cette ressource ainsi que sa valorisation économique.

Sa mise en application s'est traduite par la mise en place de différents programmes de sensibilisation aux pollutions, notamment d'origine agricole : nitrates, phosphates et produits phytosanitaires. C'est dans ce contexte qu'ont été mis en place les programmes de rationalisation de la gestion des engrais et de l'eau d'irrigation (Fermitieux, Irrimieux). Par ailleurs, on consacre des efforts importants aux périmètres de protection rapprochée des captages d'eau, tout en se posant beaucoup de questions sur le boisement de ces zones.

Bien qu'il n'y ait pas chez nous à notre connaissance d'exemple comparable à celui de la ville de Munich, il faut rapporter qu'une réflexion analogue a eu lieu à la fin du siècle dernier pour l'alimentation de Paris qui s'est assurée la maîtrise foncière autour des sources de la Vanne, dans l'Yonne. Les volumes produits sont toutefois faibles par rapport à la demande actuelle.

Il semble que ce soit pour la protection des sources minérales que les réflexions et les programmes de protection soient les plus avancés.



L'exemple de Perrier et de Vittel

Ces deux sources sont exploitées par le groupe Perrier-Vittel. Les problématiques liées à l'exploitation de ces deux sources sont différentes, en raison de leurs particularités géologiques, climatiques et d'occupation de l'espace. Mais globalement les solutions recherchées visent :

- une maîtrise partielle du foncier, notamment à proximité des captages,
- une politique de partenariat avec les agriculteurs,
- une réduction des impacts de l'urbanisation.

À Perrier, le groupe s'est assuré la maîtrise foncière de 950 hectares pour la protection rapprochée, et mène des actions spécifiques sur une zone d'environ 3 500 hectares fortement anthropisée (urbanisation et agriculture).

La reconversion agricole au label biologique est en cours. Un cahier des charges a été écrit pour la culture de la vigne, des céréales et pour le maraîchage. Un suivi du sol et de la nappe est effectué pour apprécier l'impact des mesures prises.

Dès 1912, la ville de Vittel a réalisé la collecte de ses eaux usées et mis en place une station d'épuration. Ceci témoigne d'une prise en compte précoce des problèmes de pollution des eaux par les effluents urbains, qui se poursuit par une politique de gestion de l'ensemble des déchets urbains et des matières dangereuses.

Ici aussi le groupe s'est assuré une maîtrise partielle du foncier, 1 400 ha sur les 3 400 ha des terres cultivées du bassin versant dont la superficie avoisine 12 000 ha.

Le partenariat avec les agriculteurs a conduit à substituer la luzerne au maïs pour limiter les risques de lessivage des nitrates et des produits phytosanitaires, à adopter un traitement spécial des effluents d'élevage avant épandage, à limiter la charge animale (un animal par ha) ...

Les espaces boisés et les haies sont l'objet d'une attention particulière. Une collaboration est en cours avec l'Office national des forêts pour améliorer la gestion des espaces boisés qui occupent environ 30 % du bassin versant.



En conclusion

Ces exemples témoignent qu'une prise de conscience existe pour rapprocher la gestion des eaux et la gestion de l'espace. Les efforts portent en priorité sur l'urbanisation et les pratiques agricoles qui sont les pôles principaux de pollution. Il semble aussi que les réflexions avancent sur le rôle bénéfique que peuvent jouer les espaces boisés pour la production d'eau de qualité. Il reste à souhaiter que les réflexions se poursuivent et aboutissent rapidement à des mesures concrètes de protection à l'échelle du territoire.

POUR EN SAVOIR PLUS

LA HOUILLE BLANCHE (1995), "Eaux minérales et thermales", n° 2/3-1995, 156 p.

POINTEREAU P. (1999), "L'approvisionnement en eau potable de la ville de Munich", Compte rendu de visite.

RÉALITES INDUSTRIELLES (1998), "Les eaux minérales naturelles. L'inventaire complet des sources en France (mai 1998)", Éditions ESKA.

Crédit photographique



- p. 1 à 5 – © Cemagref/Nogent-sur-Vernisson.
- p. 6 – © Cemagref (Nov. 1994), C.Nouals. Montagne de Lure.
- p. 10 – © Cemagref (Juil. 1994), C. Rodriguez. Ripisylve plus ou moins préservée à proximité du Bon-Nant en Haute-Savoie.
- p. 10 et p. 41 – © Cemagref (oct. 1990). D. Gauthier. Sous-bois.
- p. 16 – © Cemagref (Juin 1991). J. Lavabre. Étiage de l'Hérault dans sa partie amont.
- p. 18 – © Cemagref (Juil. 1991). D. Gauthier. Stockage de grumes de chêne en bord de route forestière.
- p. 24 – © Cemagref. P. Noury. Pollution aquatique.
- p. 27 – © Goodshoot. Cascade en forêt.
- p. 30 – © Cemagref (Janv. 1999). V. Andréassian. Ruisseau forestier
- p. 32 – © Cemagref (1997). V. Andréassian. Cascade.
- p. 33 – © Cemagref. J.M. Le Bars. Texture d'eau.
- p. 40 – © Cemagref (1997). V. Andréassian.
- p. 46 – © Cemagref (Juin 1991). J. Lavabre. Terres agricoles abandonnées. (Pyrénées espagnoles).
- p. 47 – © Goodshoot. Feuillage d'automne.
- p. 53 – © Goodshoot. Cascade en forêt dans les Alpes.
- p. 55 – © Cemagref (Juin 1993). J. Lavabre. Projet DM2E. Mesure de l'égouttement.
- p. 63 – © Cemagref (Oct. 1998). V. Andréassian. Seuil hydrométrique sur le BVRE du Réal Collobrier.
- p. 60 – © Cemagref (Juin 1991). J. Lavabre. Ravine d'érosion dans les Pyrénées espagnoles (vallée de l'Èbre).
- p. 72 – © Cemagref (Mai 1997). V. Andréassian. Reboisement en résineux dans la vallée du Tarn.
- p. 73 – © Cemagref (Oct. 1992). Le lit du Groseau après une crue.
- p. 78 – © Cemagref (Sept. 1990). Cours d'eau.
- p. 85 – © Cemagref (Mai 1998). La rivière l'Anglin à Angles-sur-l'Anglin.

- p. 91 – © Cemagref (Avr. 1998). L. Guyonneau. La rivière le Lez dans les environs de Montpellier.
- p. 92 – © Cemagref. (Juil. 1997). V. Andréassian. Forêt riveraine.
- p. 93 – © Cemagref. (Janv. 1997). V. Andréassian. Station de jaugeage : la Dordogne à Saint-Sauves.
- p. 96 – © Cemagref. (Janv. 1997). V. Andréassian. La Sumène à Cheyranges.
- p. 97 – © Cemagref. (Juil. 1997). V. Andréassian. Forêt riveraine.
- p. 98 – © Cemagref. (Sept. 1995). C. Prudhomme. Ripisylve protégeant les berges de la Dragne.
- p. 102 – © Cemagref. (Oct. 1993). O. Gilard. Le marais du Vernay : zone potentielle d'écrêtement des crues utilisée par la Bourbre en cas de crues fortes.
- p. 103 – © Cemagref. (Mai 1998). J.M. Le Bars. Le marais poitevin dans les environs de Coulon.
- p. 108 – © Cemagref. (Mai 1993). A. Dutartre. Vue de la ripisylve du fleuve la Charente en amont de la ville de Nersac.
- p. 109 – © Goodshoot. Torrent dans les Alpes.





et ouvrage fait le point sur les connaissances actuelles en termes d'impact de la forêt et de sa gestion sur les ressources en eau.

La première partie est plus particulièrement consacrée à la demande en eau et aux effets de la forêt sur la ressource ainsi qu'aux pratiques et au cadre réglementaire qui permettraient une gestion combinée des forêts et des ressources en eau.

En réponse à la problématique soulevée "La forêt peut-elle être un outil de gestion des eaux" ?, la deuxième partie propose, sous la forme de dix fiches techniques, une information plus détaillée sur des thèmes particuliers (par exemple "Les eaux continentales de France", "Forêt et risques naturels liés à l'eau", "Forêt et qualité de l'eau" etc...).

L'ouvrage que vous allez découvrir est destiné aussi bien aux gestionnaires de l'eau qu'aux gestionnaires forestiers. Il intéressera également les hydrologues, climatologues, et tous les décideurs chargés d'aménagement et d'environnement.

LES AUTEURS

Jacques Lavabre, ingénieur de recherche au Cemagref d'Aix-en-Provence, spécialisé en hydrologie rurale et forestière.

Vasken Andréassian, ingénieur du génie rural des eaux et des forêts, spécialisé dans l'impact de l'évolution du couvert forestier dans le Massif Central.

avec la collaboration de **Olivier Laroussinie**, ingénieur du génie rural des eaux et des forêts et directeur du GIP ECOFOR.

Cemagref
CIRAD
CNRS
ENGREF
INRA
IRD
ONF



ISBN 2-85362-548-6

Prix : 210 F (32,01 €)