

CONSÉQUENCE DE LA FORÊT SUR LE BILAN D'ÉCOULEMENT ANNUEL

Claude COSANDEY

Résumé

Les écoulements résultent de la différence entre les précipitations et l'évaporation. La connaissance du rôle hydrologique de la forêt passe alors par celui de ses effets sur ces deux phases du cycle de l'eau. Les conséquences de la forêt sur l'abondance des précipitations dépendent de l'échelle à laquelle on se situe. S'il est quasi certain que la disparition de la forêt diminue les écoulements à l'échelle de très grandes surfaces comme l'Amazonie, cette disparition n'a probablement que très peu de conséquences à l'échelle d'aménagements locaux, qu'il s'agisse de coupes ou de nouvelles plantations

En contrepartie, la forêt a tendance à augmenter l'évaporation, du fait de son enracinement plus profond et surtout d'une meilleure utilisation de l'énergie advective qui permet une forte évaporation de l'eau interceptée par la canopée. Différents facteurs d'ordre pédologique et climatique se combinent dans le temps et dans l'espace pour permettre la plus forte évaporation, donc le moindre écoulement, des bassins forestiers. Ce moindre écoulement est pourtant très variable et cette variabilité s'explique par la multiplicité des combinaisons de processus qui en sont à l'origine.

Mots-clés

forêts, précipitations, écoulement annuel, évapotranspiration, interception, énergie advective

Abstract

Runoff results from the difference between rain and evaporation. Then, knowledge of hydrological consequences of forest needs knowledge of forest influence on both rainfall and evaporation. Forest influences upon rainfall mainly depend on scale consideration. It appears as evident that clearcutting of large tropical forests will result in reduction of rainfall amount. Nevertheless forest influence on rainfall seems to be quite negligible at local scale, both in plantation and clearcuts situations.

In the other hand, forest enhances evaporation for two main reasons. First, deeper rooting and better use of soil moisture. Second, better use of advection energy that allows evaporation of canopy intercepted water.

Different factors, mainly pedologic and climatic, are combined in space and time for allowing higher evaporation - then smaller runoff - from forest than from any other type of vegetation. Nevertheless, values are very scattered, in relation with the multiplicity of factor combinations driving to this runoff reduction.

Key Words

forest, rain, annual runoff, evapotranspiration, interception, advection energy

INTRODUCTION

De toutes les activités humaines qui peuvent avoir des conséquences indirectes sur le fonctionnement hydrologique d'un milieu, la modification de type de végétation et notamment les actions de reforestation/déforestation sont probablement celles qui interviennent le plus largement à l'échelle mondiale, que ce soit dans les temps historiques ou dans la période actuelle.

Alors que, dans certaines régions, surtout en zone inter-

problèmes spécifiques, en Europe de l'Ouest la tendance est très nettement à l'augmentation des surfaces forestières. Or la connaissance du rôle hydrologique de cette forêt est encore bien imparfaite, qu'il s'agisse des écoulements annuels - qui seuls seront abordés ici -, des crues ou des étiages. D'autant plus que la forêt présente indubitablement une dimension mythique - on pourrait presque écrire : mystique - qui n'aide pas au dégagement d'idées claires (Bruijnzeel, 1990; Calder, 1998). Bruijnzeel parle d'ailleurs des quatre « M's » (« Misinformation, misinterpretation, misunderstanding and myth ») qui compliquent les études d'hydrologie forestière. L'affiche de

présentation d'un ouvrage proposé par des éditions destinées au grand public (Life) en donne un bon exemple (Fig. 1). Le message est on ne peut plus clair. Le tout est de savoir s'il est juste...

Les écoulements résultent de la différence entre les pluies et l'évaporation. Le rôle potentiel d'abord, réel ensuite, de la forêt sur ces composantes du cycle de l'eau va être envisagé.

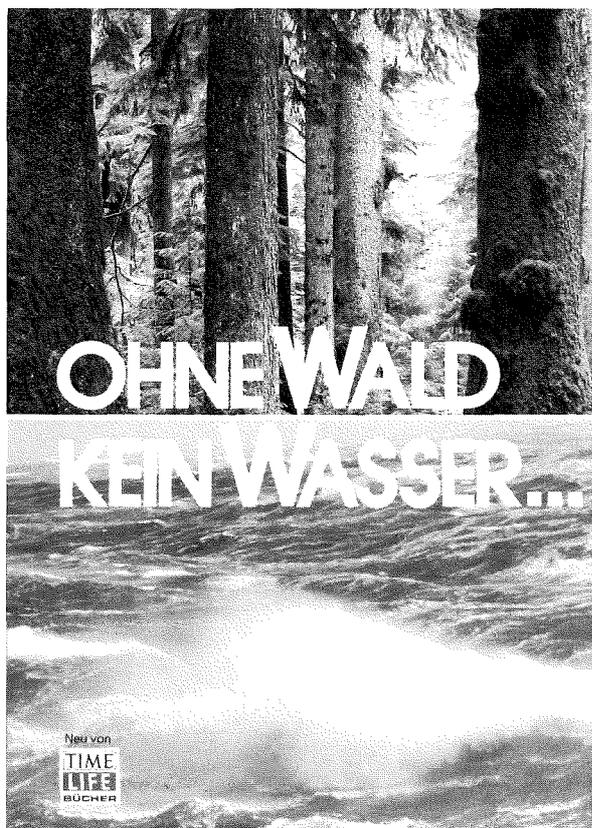


Figure 1. Sans forêt, pas d'eau...

I. LA FORÊT INTERVIEN-ELLE SUR LES PLUIES ?

L'idée selon laquelle la forêt augmenterait les pluies n'est pas nouvelle. Si on en croit son fils Ferdinand, Christophe Colomb savait « par expérience » que la disparition de la forêt qui recouvrait à l'origine les Canaries, Madère et les Açores avait réduit les brouillards et les pluies. De même, il pensait que les pluies de l'après-midi qui se produisent en Jamaïque et dans les Antilles étaient la conséquence de la luxuriante forêt des îles (Thompson, 1980). C'est dire que l'idée selon laquelle la végétation peut conditionner le climat n'est pas nouvelle et que beaucoup de croyances actuelles prennent leurs racines très loin dans l'histoire. Cette position n'est pas sans rejoindre celle concernant tous les rôles « bénéfiques » de la forêt, évoquée en introduction.

Mais, si le rôle de la forêt sur le climat n'est pas aussi simple - ni d'ailleurs bénéfique - qu'on a pu le croire, il n'en demeure pas moins que l'augmentation d'évaporation qu'elle induit se résorbe quelque part en précipitations. Tout le problème est de savoir quelle peut être l'ampleur de ces processus et si les conséquences à ce niveau peuvent être locales ou non. On peut être tenté de penser que c'est improbable, étant donné l'échelle des transferts de vapeur d'eau à la surface du globe, avec souvent des distances considérables entre l'endroit où se produit l'évaporation et celui où tombent les pluies qui en résultent.

La question se pose avec plus d'acuité dans les climats tropicaux humides que dans les climats tempérés pour des raisons évidentes liées aux aspects extrêmes à la fois de la végétation et des pluies. De nombreux travaux menés dans ces conditions climatiques ont généralement conduit à la conclusion que la forêt n'a pas de conséquence sur la pluviométrie locale et les résultats contraires qui ont pu être avancés pèchent presque tous par la faiblesse des données sur lesquelles ils reposent (Bruijnzeel, 1990).

A. A l'échelle des forêts tropicales

Mais ce qui est vrai à l'échelle locale peut ne pas l'être à celle de surfaces beaucoup plus grandes. Des travaux menés en 1979 par Salati et al. ont conduit à conclure que le très faible gradient dans les teneurs en H_2O des précipitations de la forêt amazonienne témoignait de la forte participation des précipitations re-évaporées dans les pluies incidentes, ce qui a été confirmé par des travaux ultérieurs (Shuttleworth, 1988; Shuttleworth et al., 1991).

Bien que la théorie du recyclage de l'eau ait de plus en plus d'adeptes, elle ne fait toujours pas l'unanimité, en raison notamment de la faiblesse des données sûres dont on dispose (Bruijnzeel, 1990). Des approches par modélisation, qui comme toute approche de ce type ne sont pas non plus sans poser d'autres questions, viennent conforter cette hypothèse, en dépit de la dispersion des résultats qui en découlent :

- Henderson-Selers (1987, 1988) compare les résultats de quatre modèles : la modification des précipitations qui résulteraient de la déforestation de l'Amazonie varierait d'une augmentation de 75 mm (Lettau et al., 1979) à une réduction de 200 à 230 mm (Henderson-Selers et Gornitz, 1984) ou de 100 à 800 mm, selon les endroits (Wilson, 1984, cité par Henderson-Selers, 1987);
- Lean et Warrilow (1989) proposent les valeurs suivantes : (i) la pluie diminuerait de 20,3 %, (ii) les débits diminueraient de 11,9 %, (iii) l'E_t (évapotranspiration réelle) diminuerait de 27,2 %;
- Dickison et al. (1986) trouvent aussi une réduction de l'évaporation (jusque 50 %) et des précipitations

(20 %). Un modèle proposé par Shukla et al. (1990) aboutit à des estimations voisines.

Les chiffres qui viennent d'être cités (pour l'essentiel synthétisés dans l'ouvrage de Gash et al., 1996) concernent l'échelle globale de la forêt amazonienne. A l'échelle locale (250 km²), les travaux d'Elfatih et al. (1994) estiment la réduction des pluies annuelles à 10 %. Mais, par ailleurs, Calder (1998) cite des travaux menés en Inde du Sud par Meher-Homji (1980) qui montre que les totaux pluviométriques annuels n'ont pas diminué depuis 100 ans, en dépit de la mise en culture des terres occupées par la forêt sèche, même si le nombre de jours de pluie semble avoir un peu diminué.

B. En climats tempérés

La question se pose différemment dans les climats tempérés, qui n'ont ni les mêmes forêts, ni les mêmes pluviosités. Pourtant, même dans des conditions climatiques plus modérées - au moins du point de vue de la pluviométrie et de l'évaporation -, il est possible que l'échelle à laquelle on se situe conditionne la réponse. Ainsi, les auteurs russes ont longtemps écrit que la forêt augmentait le volume des écoulements, en raison de pluies plus abondantes, au moins en ce qui concerne les immenses forêts d'Europe et d'Asie centrale (Bochkov, 1959, 1970; Krestovsky et Fedorov, 1970; Ved, 1978); ces résultats ont été repris en France par Poncet (1981) et surtout par Garczinsky (1980) et au Canada par Morton (1984).

La question se pose probablement très différemment à l'échelle locale, qui est celle des aménagements forestiers en climats tempérés. A cette échelle, si certains auteurs considèrent que la forêt peut augmenter les précipitations, c'est toujours faiblement. Aussenac (1970) propose 1 ou 2 %. Lambert (1996) avance les valeurs de 5 à 6 % en climat tempéré océanique (par effet topographique en pays plat, par effet thermique et par captation des brouillards). Des travaux récents portant sur la modélisation d'événements pluvieux dans la forêt des Landes (sud-ouest de la France) montrent, sur un exemple, que la plus forte évaporation liée à l'interception d'une forêt de 10 à 15 km de large a pour conséquence une pluie supérieure de 3 % (3,6 mm au lieu de 2,9 mm) en un point découvert immédiatement sous le vent (Blyth et al., 1994). Selon ces auteurs, l'augmentation serait due pour moitié au recyclage de l'interception évaporée et pour moitié aux conséquences physiques et dynamiques de la hauteur de rugosité, qui provoque une ascendance au-dessus de la lisière.

En conclusion, il semble bien que l'on puisse écrire que les conséquences de la forêt sur les précipitations dépendent largement de l'échelle prise en compte. A celle des grands massifs forestiers intertropicaux, notamment l'Amazonie, il est plus que probable que la disparition de la forêt modifierait l'équilibre climatique actuel, bien

qu'il soit bien difficile de prévoir avec certitude la situation qui en découlerait. En contrepartie, à l'échelle locale, au moins en climat tempéré, les éventuels effets de la forêt sur les précipitations seraient faibles. Il n'en n'est pas de même, on va le voir, en ce qui concerne l'évaporation.

II. COMMENT LA FORÊT INTERVIENT SUR L'ÉVAPORATION

L'évaporation d'un milieu donné résulte de la combinaison de l'énergie et de l'eau disponible. Le type de couvert végétal intervient inégalement à ces deux niveaux.

A. La forêt intervient sur l'eau disponible

La végétation forestière, comparée avec une végétation basse et a fortiori un sol nu, présente généralement une potentialité d'utilisation des réserves en eau du sol plus élevée, dans la mesure où la tranche de sol colonisée par les racines peut être plus épaisse. Cette potentialité devient effective sous trois conditions d'ordre pédologique et climatique :

- *condition pédologique* : les formations superficielles doivent être suffisamment profondes pour que la forêt puisse coloniser une épaisseur de sol plus grande que ne le ferait un autre type de végétation. Un sol trop mince, de type ranker par exemple, n'offrirait guère de réserves plus abondantes à une végétation forestière qu'à une prairie dont les racines seraient susceptibles de coloniser toute l'épaisseur;
- *première condition climatique* : le climat doit présenter des périodes de déficit hydrique. En effet, si le régime des pluies est tel qu'il permet de satisfaire la demande d'évaporation, alors peu importe l'ampleur de la réserve hydrique pour le bilan d'écoulement : l'évapotranspiration réelle est sous la dépendance directe du seul bilan énergétique;
- *deuxième condition climatique* : il faut que le climat présente des périodes de surplus hydrologique (pendant lesquelles les pluies l'emportent sur l'évaporation) suffisamment importantes pour permettre à ces réserves de se reconstituer. En effet, si les précipitations sont trop peu abondantes, le sol n'est réhumecté que sur une faible profondeur et la reprise par l'évaporation est rapide, quel que soit le type de végétation; lorsque c'est le cas, c'est essentiellement la hauteur des précipitations qui détermine l'évapotranspiration et le bilan d'écoulement annuel est très faible, quel que soit le type de couvert végétal.

Du strict point de vue de l'utilisation optimale des réserves en eau du sol, ce n'est que lorsque ces trois conditions sont remplies que la forêt peut jouer un rôle majeur dans le bilan d'évaporation et que ses conséquences sur le volume de l'écoulement annuel sont sensibles, voire déterminantes. C'est le cas des régions qui

connaissent des alternances de saisons sèches et humides et plus encore lorsque la saison sèche est aussi la saison chaude (climats méditerranéens). Les processus sont les suivants.

Pendant la saison sèche (soit «l'été hydrologique», défini par $P < E_{tp}$), la forêt, disposant de réserves hydriques plus importantes (si elles ont été reconstituées pendant la saison humide, soit «l'hiver hydrologique», défini par $E_{tp} < P$), évapore davantage et plus longtemps qu'un couvert végétal disposant de réserves moindres parce que moins profondément enraciné. Ainsi, au début de la saison humide, la reprise de l'écoulement sera plus tardive, à cause de la plus grande quantité d'eau prélevée sur les pluies incidentes pour la recharge de la réserve hydrique. Par exemple, dans un petit bassin forestier, en Bretagne, on a pu montrer que la reprise d'écoulement est décalée d'environ deux mois par rapport à celle de bassins voisins, non boisés (Fig. 2). Aux deux mois de décalage correspond une différence de lame écoulée de l'ordre de 120 mm, qui s'explique essentiellement par une réserve hydrique plus grande en forêt que dans les milieux bocagers où coulent l'Isolé et l'Ellée.

Le rôle de l'enracinement forestier sur le bilan d'écoulement annuel est d'autant plus important que les contrastes pluviométriques saisonniers sont plus marqués, les conditions climatiques favorables et les sols plus profonds.

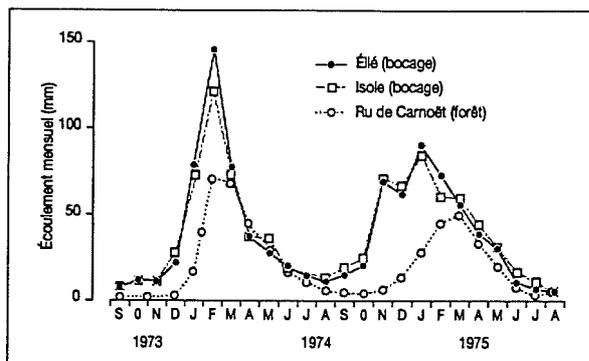


Figure 2. Les écoulements annuels dans les bassins de Carnoët (boisé), de l'Isolé et de l'Ellée (bocagers) de septembre 1973 à août 1975

B. La végétation intervient sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère

Le pouvoir évaporant de l'atmosphère dépend de l'énergie disponible. Celle-ci est la somme, d'une part, de l'énergie radiative, qui dépend entre autres de la radiation solaire, de la nébulosité et de la quantité d'énergie réfléchie par le sol (ou albédo) et, d'autre part, de l'énergie advective.

Ce pouvoir évaporant de l'atmosphère est souvent es-

timé à l'aide de formules d'évapotranspiration potentielle (E_{tp}), plus ou moins sophistiquées selon qu'elles prennent en compte l'ensemble ou seulement certains des composants du bilan d'énergie; la faiblesse de ces formules pour estimer l'évaporation maximum d'un couvert forestier vient de ce qu'elles ne tiennent pas ou peu compte de l'énergie advective, dont le rôle peut pourtant être essentiel.

Cette E_{tp} est généralement plus élevée pour la forêt que pour tout autre type de couvert végétal (Aussenac, 1970). La couleur habituellement plus foncée d'un couvert forestier (notamment de résineux) et l'irrégularité de la surface réceptrice qui augmente d'autant le captage de la radiation incidente, ont pour conséquence un albédo plus faible (Baldochi et al., 1985; Kotoda, 1989; Wallace et Olivier, 1990; Schuttleworth et al., 1991; Berger, 1992); une forêt sombre de résineux peut avoir un albédo de 0,05, alors qu'on admet généralement des valeurs de 0,25 pour une prairie. Les travaux menés en Amazonie ont conduit à la conclusion que la forêt absorbait en moyenne 11 % de radiation de plus que les pâturages et les valeurs d'albedo mesurées dans cette région ont été de 0,134 pour la forêt et de 0,18 pour les pâturages. A titre d'exemple, on peut signaler que le fait de passer d'un albédo de 0,05 à un albédo de 0,30 augmenterait de 35 mm (soit $\pm 20\%$) la valeur de l' E_{tp} (calculée selon la formule de Penman) pour un mois de juillet à Paris. Braque (1982) estime que l' E_{tp} des milieux forestiers du sud du Bassin Parisien est ainsi de 1/7 supérieure à celle des prairies.

Par ailleurs, la plus forte rugosité d'une végétation forestière augmente la turbulence de l'air et assure une meilleure utilisation de l'énergie advective, mal prise en compte dans les formules d' E_{tp} . Or il s'agit là probablement d'un point essentiel, comme on va le voir.

L'interception et l'utilisation de l'énergie advective : lorsque la pluie tombe sur un sol recouvert de végétation, une partie de la pluie incidente est retenue par cette végétation et directement évaporée : il s'agit alors de pertes au niveau du bilan hydrologique (si toutefois on ne prend pas en compte l'énergie nécessaire pour réintroduire cette eau dans l'atmosphère). L'autre partie parvient jusqu'au sol soit directement lorsque le couvert est assez clair, soit indirectement par égouttage de la végétation ou ruissellement le long des troncs : il s'agit alors de précipitation différée, mais pas de pertes du point de vue hydrologique. Le terme d'interception ne désigne pourtant que la « fraction de la précipitation qui, lors de sa chute, est retenue, principalement par la végétation, mais aussi par différentes surfaces plus ou moins perméables, par les constructions, les routes ou même les roches à nu » (travaux de la commission de Terminologie de la section française de l'AISH), ce qui peut s'écrire ainsi :

$$I = P_i - (P_s + P_t)$$

avec : I = interception (pluie n'atteignant jamais le sol)
 Pi = pluie incidente
 Ps = pluie atteignant le sol, soit directement, soit par égouttage de la végétation
 Pt = pluie atteignant le sol par écoulement le long des troncs.

Dans les faits, il arrive assez fréquemment que l'eau qui circule le long des troncs soit négligée. Or celle-ci peut atteindre jusque 10 % de la pluie incidente (Petit et Kalombo, 1984) et même plus (Hudson et al., 1999), ce qui conduit à une surestimation fréquente des valeurs de I.

Les pertes qui résultent de l'évaporation de l'eau interceptée par la végétation paraissent à l'origine d'une augmentation notable de l'évapotranspiration globale du milieu considéré. Ce point est largement admis par la communauté des hydrologues depuis un certain temps déjà (Veen et Dolman, 1989). Cela n'a pourtant pas toujours été; longtemps, on a considéré que les pertes dues à l'interception se substituaient à d'autres pertes au lieu de s'y ajouter, dans une logique de bilan d'énergie (Morton, 1984); on peut considérer pourtant que cette idée est maintenant totalement abandonnée et la discussion entre Morton et Calder (1985) a permis à Morton de conclure qu'il n'existait plus de divergence d'opinion au sujet du fait que l'évaporation d'une canopée mouillée pouvait dépasser l'évaporation équivalente à la radiation nette. Cette idée était également exprimée par Morand dès 1982 : « Aujourd'hui je sais que l'évaporation physique est en hiver de l'ordre de dix à vingt fois celle que l'on calcule par certaines formules ».

L'ampleur des pertes liées à l'interception dépend à la fois des caractéristiques de la végétation et des conditions climatiques. La majeure partie des résultats expérimentaux tend à montrer une différence sensible entre l'interception des feuillus et des résineux, comme à prouver que c'est pour ces derniers que les pertes sont les plus fortes

Les premiers résultats sont très anciens. Faisant le point sur un grand nombre de travaux russes, américains et européens, Rakhmanov (1966) suggérait dès 1962 que les forêts de conifères intercepteraient 25 à 35 % de la pluie annuelle contre seulement 15 à 25 % pour les forêts à feuilles caduques.

Les études se sont multipliées ensuite; les mesures sont très nombreuses, sous toutes sortes de climats comme de types de couverts, et donnent des résultats forts dispersés. Pour les seules forêts tropicales de montagne, Veneklaas et Van Ek (1990) citent des valeurs allant de 2,4 % aux Philippines (P = 2.200 mm) à 24 % en Colombie (P = 1.700 mm) et ceci sans tenir compte des Nebelwald, où l'interception peut atteindre les valeurs négatives de 20 % (soit — 1.080 mm pour P = 5.400 à

Porto Rico). De nombreux travaux menés sous différents climats, mais tous plutôt pluvieux, font état, notamment pendant l'hiver, de valeurs d'interception très importantes, qui peuvent même être supérieures à celles de l'Etp (Petit et Kalombo, 1984; Cheng et al., 1987; Calder, 1990; Robinson et al., 1991). Et ce serait là le facteur essentiel qui expliquerait dans la plupart des cas les moindres écoulements des bassins forestiers (Pearce et al., 1987; Halldin et Lindroth, 1989; Reynolds et al., 1989; Mbuyu et Petit, 1990).

De tels résultats ne sont pas sans poser problème et la littérature est loin d'être unanime sur de telles valeurs de l'interception (Poncet, 1981; Harding, 1992; Humbert et Najjar, 1992); en tout état de cause, la dispersion des résultats est, là encore, considérable. Ainsi, pour la seule Angleterre, les valeurs proposées varient dans une fourchette très large : moins de 100 mm dans les basses terres pour une forêt à feuilles caduques (soit 12 à 15 % de la pluie incidente et qui se déduit au moins partiellement de l'évapotranspiration, Harding, 1992); plus de 680 mm dans les hautes terres pour une forêt de résineux, plus favorables à l'interception, soit 39 % de la pluie incidente selon les travaux de Calder (1990). Or les travaux de Johnson (1991), employant les mêmes méthodes que Calder, cette fois-ci dans les Hautes Terres d'Ecosse, conduisent à des résultats inverses et au moindre écoulement des bassins non forestiers. Il est vrai que cette contradiction est levée par Calder (1993), qui montre que les différences observées résultent d'inégales répartitions de la forêt dans les deux bassins.

Humbert et Najjar (1992) ont rassemblé un certain nombre de valeurs expérimentales pour divers peuplements de feuillus à partir des travaux francophones. Les valeurs annuelles sont comprises entre 14 % et 32 %. Il est notable que les valeurs extrêmes se rapportent à des forêts de mêmes caractéristiques, ce qui montre la difficulté qu'il peut y avoir à mettre en évidence des relations fines entre la valeur de l'interception et l'âge du peuplement, la saison de mesure, les conditions climatiques...

Ces mêmes auteurs ont également rassemblé des données pour quatre espèces de résineux, des sapins, des épicéas, des pins et enfin des douglas. La fourchette des résultats est un peu plus large que dans le cas précédent, variant de 18 à 43 %; on peut noter que, dans les conditions des Iles Britanniques, Law (1956) avait proposé 35 à 48 %. Mais ce qu'il importe surtout de remarquer, c'est que les valeurs sont sensiblement supérieures à celles mesurées pour les feuillus.

Humbert et Najjar (1992) concluent que l'interception moyenne d'une hêtraie varie de 14 à 33 %, alors que, pour l'épicéa et le douglas, elle fluctue entre 20 et plus de 50 %; il existe, par ailleurs, des différences notables selon la saison :

- pour le hêtre, l'interception est de l'ordre de 6 % en hiver et de 21 % en été (Aussenac et Boulangeat, 1980);
- pour le chêne, elle serait respectivement de 22 et 34 % (Nizinski et Saugier, 1988).

Des chiffres établis à partir de plusieurs centaines de points de mesures pour un mois de mars en région parisienne (Morand, 1982) aboutissent à des valeurs plutôt plus fortes : sur les 35 mm de pluie incidente (mesurés dans une prairie contiguë), seulement 24,5 mm (30 %) sont recueillis sous une hêtraie encore dépourvue de feuilles, dont 3 % par le ruissellement le long des troncs.

Les auteurs anglais (Calder, 1990; Hall et al., 1992) proposent 30 à 35 % pour les conifères sur les Hautes Terres, 15 à 25 % pour les feuillus et 5 à 15 % pour les eucalyptus. Des travaux récents en Ontario mesurent 20 % d'interception dont 4 % sont restitués le long des troncs, pour la saison de pousse dans une forêt de feuillus. Des études fines montrent que cette interception résulte d'environ 30 % de pertes pendant les pluies et de 60 % à partir de la canopée mouillée, une fois que la pluie a cessé (Carlyle-Moses et Price, 1999).

Si on s'attache maintenant aux variations saisonnières de l'interception, il apparaît, comme on pouvait s'y attendre, que les différences sont plus importantes pour les feuillus que pour les conifères. Cette tendance peut pourtant être contrebalancée par des conditions particulières : ainsi Gash (com. pers.) attire l'attention sur le fait que, en climat de type méditerranéen caractérisé par la violence des pluies d'été et d'automne, alors que les pluies d'hiver présentent généralement de plus faibles intensités, les pertes liées à l'interception peuvent être relativement plus faibles en été et en automne qu'en hiver, même pour une végétation à feuilles caduques.

Enfin, un autre aspect important de l'interception sous couvert forestier est qu'elle se produit souvent à deux ou même plusieurs niveaux de la végétation. Les précipitations incidentes sont d'abord interceptées par la canopée; une partie de l'eau qui la traverse peut ensuite être de nouveau interceptée par les niveaux inférieurs de végétaux et enfin par la litière. On sait en fait peu de chose sur cette interception « secondaire », si ce n'est qu'elle a tendance à augmenter avec la hauteur de pluie, dans la mesure où durant les faibles averses pas ou peu d'eau traverse la canopée, alors que, lorsque l'épisode pluvieux est plus long, la quantité d'eau qui traverse la canopée peut complètement saturer les différents niveaux de stockage possible.

L'approche la plus efficace pour permettre d'estimer le rôle, au moins relatif, de la forêt sur l'interception est probablement celle qui consiste à suivre le bilan hydrologique pendant la croissance d'une forêt plantée, éventuellement après une période de stabilisation du milieu,

lorsque celui-ci à été très perturbé par les travaux de foresterie. Si les résultats sont assez hétérogènes, une tendance très nette se dégage dans le sens d'une augmentation des pertes par interception, au fur et à mesure de la croissance des arbres (Zollner, 1998). Les valeurs maximales peuvent être atteintes après une longue période de repousse : 15 à 20 ans dans le bassin de Coalburn, dans le nord de l'Angleterre (Robinson et al., 1998) et 5 à 7 ans seulement pour celui de Llanbrynmair, dans le pays de Galles.

C. Le difficile problème des conséquences de l'interception sur l'écoulement.

Il apparaît donc bien que les conséquences de la forêt sur l'évaporation ne se limitent pas à une meilleure utilisation de la réserve hydrique, mais que l'évaporation directe d'une partie des précipitations interceptées par la canopée est un élément important, sinon essentiel du bilan hydrologique des milieux forestiers. Il n'en demeure pas moins que l'estimation du rôle de cette interception sur le bilan d'écoulement reste une question très ouverte.

Ce n'est pourtant pas faute d'études sur l'interception, comme on vient de le voir. Mais, si les études concernant la valeur de l'interception sont nombreuses, celles qui estiment la réduction d'écoulement annuel résultant de cette interception le sont beaucoup moins. En effet, il est généralement admis que, du fait de l'interception, la transpiration des forêts est inférieure à celle des prairies (Forest Commission, 1993) : une partie au moins de l'énergie utilisée pour évaporer l'eau interceptée se déduit de celle disponible pour la transpiration végétale (Morton, 1984; Harding, 1992). Le tout est de savoir dans quelles proportions.

La question est difficile. Si on admet la notion d'Etp en tant que valeur maximum de l'évaporation, alors il faut admettre que cette interception ne doit pas changer les termes du bilan, puisque l'énergie utilisée pour son évaporation directe est déduite de l'énergie disponible pour le reste de l'évapotranspiration (Agence financière de Bassin, 1979; Braque, 1982; Cosandey, 1985; Frischen et Simpson, 1985; Chassagneux et Choissnel, 1987). Mais, si ce point de vue a pu s'exprimer, il n'a pas résisté aux évidences expérimentales : il ressort bien de la littérature que l'interception joue un rôle essentiel sur la surévaporation et le déficit d'écoulement des milieux forestiers, notamment pendant l'hiver en climat océanique, alors qu'il n'y a pas en théorie de déficit d'évaporation. C'est ce qui explique les moindres écoulements des bassins forestiers, même lorsque le déficit hydrique (soit Etp - P) est très faible durant l'été, et que, par conséquent, le rôle des réserves en eau du sol demeure secondaire. Un exemple est proposé par Hudson et al. (1999), pour un bassin des Hautes Terres de l'Ouest anglais (Fig. 3).

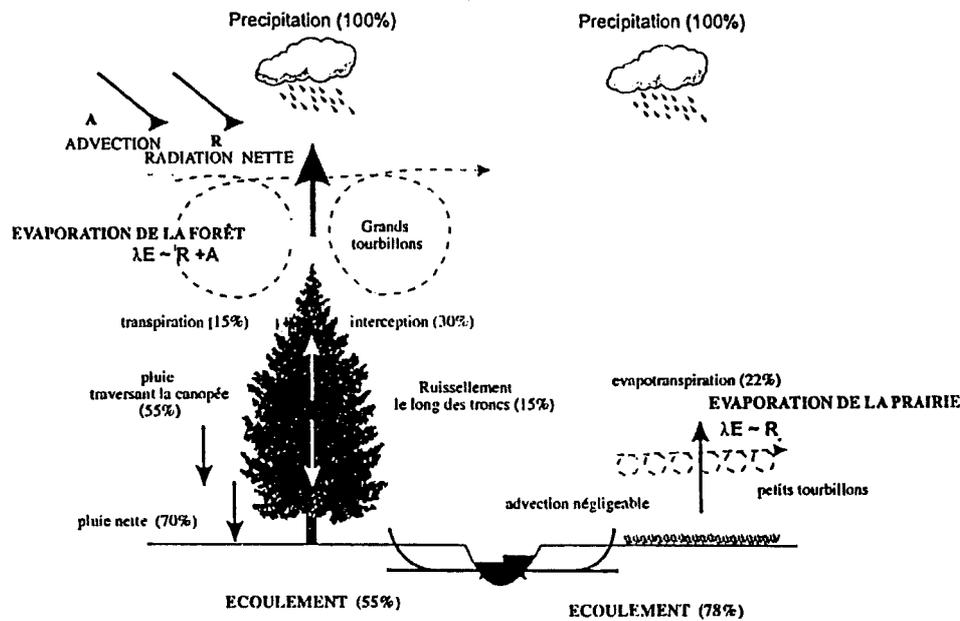


Figure 3. Bilan d'énergie et d'eau pour une prairie et une forêt mature à Plynilimon

L'interception évaporée représente 30 % de la pluie incidente; l'énergie nécessaire à l'évaporation de cette interception réduit la transpiration végétale, qui n'est que de 15 % alors qu'elle est de 22 % pour une prairie voisine. Mais, en résultante, l'évaporation totale de la forêt est de 45 % de la pluie incidente; elle n'est que de 22 % pour la prairie

Ces pertes résultant de l'interception et d'une meilleure utilisation de l'énergie advective s'ajoutent bien, au moins partiellement, à une meilleure utilisation de la réserve hydrique pour expliquer la plus forte évaporation des milieux forestiers.

III. LA FORÊT REDUIT L'ÉCOULEMENT ANNUEL : VALEURS PROPOSÉES PAR LA LITTÉRATURE

Etp plus élevée, interception importante, plus grande quantité d'eau disponible dans le sol : tous les facteurs paraissent jouer dans le sens d'une plus forte évapotranspiration des milieux forestiers et le moindre écoulement des milieux forestiers apparaît comme une évidence, tout au moins à l'échelle où cette question est traitée ici (Calder 1990, 1998; Humbert et Najjar, 1992; Oberlin, 1996). En contrepartie, la disparité des valeurs proposées demeure très grande et les résultats récents ne clarifient pas tellement les résultats anciens.

Dès 1982, Bosch et Hewlett avaient entrepris de synthétiser les résultats des expérimentations tendant à estimer les conséquences de la forêt sur les écoulements

annuels, menées pour l'essentiel sur bassins versants. Leurs conclusions ont été les suivantes, souvent rappelées dans la littérature, notamment par Schulze et George (1987a) et par Bruijnzeel (1990) :

- la grande diversité des résultats témoigne de la complexité des effets des aménagements forestiers sur les ressources en eau. La corrélation est très médiocre entre le taux de boisement et la réduction de l'écoulement lorsqu'on considère l'ensemble des résultats. En contrepartie, ces relations sont parfois bonnes localement;
- on observe des différences entre les types de végétation. Le rôle des broussailles est moindre, celui des conifères plus grand;
- généralement, la réduction de débit est d'autant plus sensible que le climat est plus pluvieux;
- lors des reforestations, la diminution de débit est proportionnelle à la croissance des arbres.

Les auteurs proposent une représentation graphique des résultats (Fig. 4). De cette figure, il ressort bien que l'accroissement de l'écoulement suit le taux de déboisement, avec des valeurs différentes suivant les formations végétales. Pourtant, la grande dispersion des points, soulignée par de nombreux auteurs (Agence de Bassin, 1979; Schulze et George, 1987b; Veen et Dolman, 1989), est remarquable, même au sein d'un même type de couvert (les conifères notamment). Ainsi, pour un taux de déboisement de 100 %, la réduction d'écoulement observée varie de quelques mm à plus de 700 mm.

Les résultats de cette étude sont probablement partiellement biaisés par le fait que les valeurs utilisées sont ac-

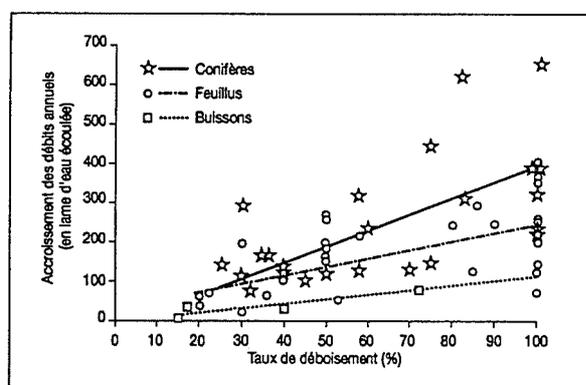


Figure 4. Relation entre l'accroissement des débits annuels et le taux de déboisement (d'après Bosch et Hewlett, 1982)

quises pour l'essentiel dans des régions où se pose le problème de la concurrence des usages de l'eau (Afrique du Sud, notamment) et que ces régions sont celles où, justement, le rôle de la forêt sur le cycle de l'eau est particulièrement marqué. Enfin, ces conclusions découlent principalement d'expérimentations sur bassins versants, dont les résultats ne sont pas sans poser des problèmes d'interprétation (Cosandey, 1985, 1992; Dickison et al., 1986; Veen et Dolman, 1989; Johnson, 1992), ce qui en limite la portée.

Depuis les travaux de Bosch et Hewlett, les études se sont multipliées, sans pourtant que la dispersion apparaisse comme moindre : Griollet et Haller (1985), en Champagne, estiment que la coupe à blanc d'une forêt diminue l'évaporation de 12 %, soit 65 mm. Verry (1987) dans le Minnesota mesure, durant les trois années qui suivent une coupe forestière, une augmentation des débits d'environ 100 mm en dépit du maintien sur le site de déchets de coupe dont le rôle sur l'interception n'est probablement pas négligeable. Pour en revenir à la comparaison du bilan d'écoulement de la forêt et d'un autre type de végétation, Cosandey (1978) propose, dans le sud de la Bretagne, une valeur moyenne de l'ordre de 100 mm pour l'écart d'écoulement entre un petit bassin forestier et les bassins bocagers voisins. Enfin des valeurs un peu plus fortes sont proposées par Helbig (cité par Robinson, 1997), dans la région de Magdebourg (Allemagne) : une plantation de pins sylvestres âgés de 8 à 14 ans évapore en moyenne 160 mm de plus qu'une prairie. Nisbet (1998) conclut que 90 % de forêt réduit l'écoulement annuel de 50 mm dans le bassin de Coalburn (Nord de l'Angleterre), avec une pluviosité de 1.280 mm.

L'augmentation de l'écoulement qui résulte du déboisement de 80 % de la surface d'un petit bassin versant situé dans le sud des Cévennes est estimé à 140 mm (Didon-Lescot, 1996). Si ces valeurs peuvent sembler faibles au regard des pluies (± 1.900 mm), c'est probablement parce que celles-ci présentent de fortes intensités peu favorables à l'interception. En effet, lorsque

les pluies sont plus abondantes, mais de faibles intensités, l'interception devient plus importante. Ainsi, même en climat humide à faible déficit hydrique, Reynolds et al. (1989) trouvent de 250 à plus de 300 mm d'écart entre les écoulements d'un bassin occupé à 77 % par une forêt et ceux d'un bassin en pelouse, avec une pluviosité de 2.400 mm, dans les Mid-Wales anglaises. C'est également à l'interception que Pearce et al. (1987) attribuent un déficit d'écoulement plus grand de 170 mm (pour une pluviosité annuelle de 1.350 mm) à 400 mm (pour 2.500 mm annuels), soit 25 à 30 % de l'écoulement, en Nouvelle-Zélande. Mais les valeurs de loin les plus importantes demeurent celles proposées par Calder (1990) : 27 à 41 % de la pluie incidente, pour des précipitations de 1.000 à 3.000 mm dans les forêts du Royaume-Uni. Plus du double de l'Etp Penman...

A partir de la comparaison du taux de couverture forestière et des débits annuels dans le Pays de Galles, Mad'ud (1987) a pu établir une relation très claire entre le coefficient d'écoulement et le pourcentage de forêt (Fig. 5).

Par ailleurs, lorsque le déficit hydrique devient plus grand (lorsque la saison sèche, selon sa définition hydrologique $P < E_{tp}$, est plus prononcée), le rôle de la forêt devient aussi très sensible, même avec des pluies relativement faibles, pour peu que les réserves en eau du sol soient potentiellement importantes. C'est ce qui explique les valeurs très fortes mesurées dans le nord de la Tunisie pour une plantation d'eucalyptus (Delhumeau, communication orale). C'est ce qui explique également les résultats obtenus en Afrique du Sud. Or ce sont les modèles établis d'après ces expérimentations qui aboutissent aux valeurs de 400 mm proposées par Bosch et Hewlett et repris très largement dans la littérature. Et, si Lavabre et al. (1991) proposent des valeurs relativement faibles (150 mm) la première année qui suit l'incendie du bassin du Rimbaud, dans le Massif des Maures, et qui de plus ne paraissent pas se maintenir au-delà de 3

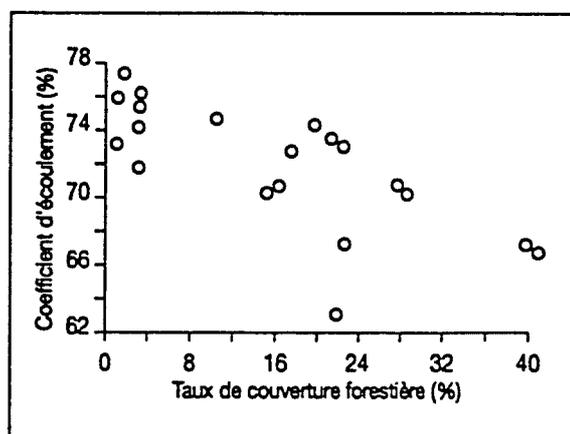


Figure 5. Relation entre le coefficient d'écoulement et le taux de couvert forestier dans le Pays de Galles (d'après Mad'ud, dans Newson, 1992) 1-346.

ans, c'est probablement à cause de la faible épaisseur des sols qui ne permet pas à la forêt de disposer de réserves hydriques importantes.

Enfin, il faut mentionner le cas de figure extrême où les arbres peuvent s'alimenter directement dans la nappe et l'évaporation dépasser de beaucoup non seulement celle des prairies voisines, mais aussi la hauteur de la pluie incidente. Ainsi, Greenwood et al. (1985) opposent les 2.300 à 2.700 mm d'évapotranspiration d'une plantation d'eucalyptus en Australie aux 390 mm d'une prairie voisine.

Il ne faut pas perdre de vue que ces résultats n'ont de signification que locale; de plus, ils ne représentent pas des valeurs rigoureuses, compte tenu des difficultés d'expérimentation. Ils n'en donnent pas moins un ordre de grandeur plausible des conséquences de la végétation forestière sur le bilan d'écoulement annuel.

CONCLUSION

Il apparaît bien comme une certitude que la forêt réduit l'écoulement annuel, au moins à l'échelle où peuvent intervenir des aménagements humains. Toutefois, les valeurs proposées pour cette réduction varient dans une fourchette très large.

La raison en est probablement que l'évapotranspiration d'un couvert forestier dépend d'un très grand nombre de paramètres et que c'est essentiellement de la façon dont se combinent ces paramètres que résulte l'écoulement annuel, ce qui rend très difficile, voire impossible sans études complémentaires, la transposition des résultats. Il est pourtant possible de dégager des tendances générales. Il apparaît ainsi que *plus le déficit hydrique est grand, les réserves en eau du sol abondantes, mais aussi les précipitations fines et fréquentes et plus la végétation forestière aura tendance à réduire l'écoulement annuel.*

La forêt n'a pas tous les effets bénéfiques que lui prête l'opinion publique. Ses conséquences sur les ressources en eau peuvent apparaître comme négatives dans les régions où les ressources en eau sont limitées et où il y a alors concurrence entre différents usages.

BIBLIOGRAPHIE

- AGENCE FINANCIERE DE BASSIN SEINE NORMAN-
DIE, 1979. *Influence de la forêt et du déboisement sur le débit des cours d'eau*, ADEBEM, Paris, 56 p.
- AUSSENAC G., 1970. Aperçu du rôle de la forêt sur l'économie de l'eau. *La revue forestière française*, 22(6), 603-618.
- AUSSENAC G. & BOULANGEAT C., 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus et de résineux. *Ann. Sci. Forest.*, 37(2), 91-107.
- BALDOCCHI D.D., MATT D.R., Mc MILLEN R.T. & HUTCHINSON B.A., 1985. Evaporation from an Oak-Hickory forest. *Advances in Evaporation*, Proc. of the nat. conf. of Chicago, 414-440.
- BERGER A., 1992. *Le climat de la Terre*, de Boeck Université, Bruxelles, 499 p.
- BLYTH E.M., DOLMAN A.J. & NOILHAN J., 1994. The effect of Forest on Mesoscale Rainfall : an Example from HAPEIX-MOBILHY. *J. of Applied Meteo.*, 33, 445-454.
- BOCHKOV A.P., 1959. The elements of water balance in the forest and on the field. *The forest and the river runoff*, Assemblée générale de Hannoversch-Münden, 1, AIHS, n° 48, 174-181.
- BOCHKOV A.P., 1970. Influence des forêts sur le débit des cours d'eau. *Nature et Ressources*, 6 (1), 11-13.
- BOSCH J.M. & HEWLETT J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55, 3-23.
- BRAQUE R., 1982. *La forêt et ses problèmes dans le sud du Bassin Parisien*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris VIII, 3 T., 1774 p.
- BRUIJNZEEL L.A., 1990. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion : a state of knowledge review*, UNESCO, IHPA, Publication of the Humid Tropics Programme, 224 p.
- CALDER I.R., 1990. *Evaporation in the Uplands*, John Wiley, Chichester, 148 p.
- CALDER I.R., 1993. The Balquhider catchment water balance and process experiments results in context - what do they reveal? *J. Hydrol.*, 145, 467-477.
- CALDER I.R., 1998. Water-Resource and Land-Use issues. *SWIM Paper 3- System-Wide Initiative on Water Management*, 1-24.
- CARLYLE-MOSES D.E. & PRICE A.G., 1999. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *J. Hydrol.*, 214 (1-4), 103-110.
- CHASSAGNEUX P. & CHOISNEL E., 1987. Modélisation de l'évaporation d'un couvert forestier. (I) : Principes physiques et description du modèle. *Ann. Sci. forest.*, 43, 505-520. (II) : Calibrage et résultats du modèle. *Ann. Sci. forest.*, 44, 171-188.
- CHENG J.D., HSIA J.S., LU H.S., LIU U.C. & KOH C.C., 1987. Streamflow characteristics of two small steep and forested watersheds in high elevation areas of Central Taiwan. *Forest Hydrology and Watershed Management*, AIHS, n° 167, 499-508.
- COSANDEY C., 1978. Recherches sur le bilan hydrologique d'un bassin versant forestier. *La forêt dans le monde*, Coll. Intern, CENECA, Paris, 5 p.
- COSANDEY C., 1985. *Recherches sur les bilans de l'eau dans l'ouest du Massif Armoricaïn*, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris-Sorbonne, 511 p.
- COSANDEY C., 1992. Influence de la forêt sur le cycle de l'eau. Conséquences d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel. *Hydrologie continentale*, 7(1), 13-22.
- DICKINSON R.B.B., PALMER D.C. & DAUGHARTY D.A., 1986. Assessment of harvesting treatment effect on the water balance of forested basins - Precipitation network design considerations. *Integrated Design of Hydrological Networks*, AIHS, n° 158, 97-103.

- DIDON LESCOT J.F., 1996. *Forêt et développement durable au Mont Lozère*, Thèse, Université d'Orléans, 161 p.
- ELFATIH A, ELFATIH B. & BRAS R.L., 1994. Sensitivity of regional climate to deforestation in the Amazon basin. *Advances in Water Res.*, 17, 101-115.
- FOREST COMMISSION, 1993. *Forests and water guide-UNes*, 3th edition, London, The Stationery Office, 32 p.
- FRITSCHEN L.J. & SIMPSON R.J., 1985. Evaporation from forest ; measurement and modeling. *Proc. of the nat. conf of Chicago*, dec. 16-17, 393-404.
- GARCZINSKY F., 1980. Influence du taux de boisement sur le régime hydrologique dans trois régions des USA. *The influence of man on the hydrological regime. Congrès d'Elelsinki*, UNESCO, IAHS., Exemplaire dactylographié, 14 p.
- GASH J.H.C., NOBRE C.A., ROBERTS J.M. & VICTORIA R. L. (Eds), 1996. *Amazonian Deforestation and Climate*, John Wiley, Chichester, 611 p.
- GREENWOOD E.A.N, KLEIN L., BERESFORD J.D. and WATSON G.D., 1985. Differences in annual evapotranspiration between grazed pasture and eucalyptus species in plantation on the saline farm catchment. *J. Hydrol.*, 78, 261-278.
- GRIOLLET C. & HALLER M. 1985 Recherche de l'influence d'une coupe à blanc étoc sur l'écoulement et la qualité des eaux. *Hydrogéol.*, 4, 243-250.
- HALL R.L., CALDER I.R., ROSIER P.T.W., SWAMINATH M.H. & MUMTAZ J., 1992. Measurement and modelling of interception loss from a Eucalyptus plantation in southern India. Chap. 22. *Growth and water use in plantations* (Calder I.R., Hall R.L. and Adlard P.G. Eds.), J. Wiley, Chichester, 270-289.
- HALLDIN S. & LINDROTH A., 1989. Water use by Willow in Southern Sweden. *Estimation of areal evapotranspiration*, AIHS, n° 177, 257-262.
- HARDING R.J., 1992. *Water use studies of deciduous woodland in southern England* (comm. orale au Colloque d'Edinburg de l'EGS, section HS5).
- HENDERSON-SELMERS A., 1987. Effects of changes in land use on climate in the humid tropics. *The Geophisology of Amazoni* (Dickinson, Ed.), Wiley, Chichester, 463-493.
- HENDERSON-SELMERS A., 1988. Modelling tropical deforestation : a study of GCM land-surface parametrizations. *Quat. J. of the Roy. Soc.*, 114, 439-462.
- HENDERSON-SELMERS A. & GORNITZ V., 1984. Possible climatic impact of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. *Climatic changes*, 6, 231-257.
- HUDSON J.A., GILMAN K., ROBINSON M. and al., 1999. *Land use and water issues in the Uplands : the Plynlimon stud*, Institute of Hydrology, Wallingford, non paginé.
- HUMBERT J. & NAJJAR G., 1992. *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone*, CEREG, ULP, Strasbourg, 85 p.
- JOHNSON R.C., 1991. *Effects of upland afforestation on water resources : the Balquhiddy experiment* 1981-1992, Report n° 116, Institute of Hydrology, Wallingford, 73 p.
- JOHNSON R.C., 1992. *Detecting the impact of changes on catchment water balance* (Comm. orale au Colloque d'Edinburg de l'EGS, section HS5).
- KOTODA K., 1989. Estimation of river basin evapotranspiration from consideration of topography and land use conditions. *Estimation of the areal evapotranspiration*, AIHS, n° 177, 271-281.
- KRESTOVSKY O.I. & FEDOROV S.F., 1970. Study of water balance element of forest and field watersheds. *Proc. of the Reading symp. on World Water Balance* (cité par « Agence de Bassin »).
- LAMBERT R., 1996. *Géographie du cycle de l'eau*, Presses universitaires du Mirail, Toulouse, 439 p.
- LAVABRE J., SEMPERE TORRES D. & CERNESSO F., 1991. Etude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie. Premières analyses. *Hydrol. continent.*, 6(2), 121-132.
- LAW F., 1956. The effects of afforestation upon the yield of water catchment areas. *Jour of British Waterworks Association*, 38, 489-494.
- LEAN J. & WARRIBOW D.A., 1989. Simulation of the regional climatic impact of Amazonian deforestation. *Nature*, 342, 411-413.
- LETTAU H., LETTAU K. & MOLION L.C.B., 1979. Amazonia's hydrologie cycle and the role of atmospheric recycling in assessing deforestation effects. *Monthly Weather Review*, 107, 227-238.
- MAD'UD A.F., 1987. *Land use and physical hydrology of selected mesoscale catschments in Wales*. Ph D Thesis, University College North Wales, Bangor, Thèse non publiée, citée par M. Newson 1992.
- MBUYU N. & PETTIT F., 1990. Comportement hydrologique de deux bassins versants se différenciant par leur couvert végétal et leur épaisseur de tourbe. *Bull. Soc. Belge d'Et. Géogr.*, 59(2), 261-274.
- MEHER HOMJI V.M., 1980. Repercussions of deforestation on precipitation in Western Karnataka, India. *Aech. Met. Geoph. Biokl., Series B* 28, 385-400 (cité par Calder, 1998).
- MORAND F., 1982. Présentation du Centre de Recherches et d'enseignement de Cessières (Aisne), 27 p.
- MORTON F. I., 1984. What are the limits of forest evaporation ? *J. Hydrol.*, 74, 373-398.
- MORTON F. I. & CALDER I.R., 1985. What are the limits of forest evaporation ? - Reply. *J. Hydrol.*, 82, 184-192.
- NEWSON M., 1992. *Land, Water and development*, Routledge, London and New York, 350 p.
- NISBET T., 1998. *The impact of forests and silvicultural practices upon the extreme flows of river («Forex»*), Contribution n° 5 au second rapport annuel du projet FAIR/CT95-0235 de la CEE, Wallingford, Rapport provisoire, non paginé.
- NIZINSKI J. & SAUGIER B., 1988. Mesure et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta oecologia, Oecol. Plant.*, 9(3), 311-329.
- OBERLIN G., 1996. Essais de synthèse en vue de l'action : l'influence humaine à travers les pratiques actuelles et futures de gestion des eaux dans leurs versants et dans leurs réseaux. *Coll. Hydrosystème*, 18-19 nov., Paris, 67-104.
- PEARCE A.J., O'LOUGHLIN C.L., JACKSON R.J. & ZHANG X.B., 1987. Reforestation : on-site effect on hydrology and erosion, eastern Raukumara Range, New-Zealand. *Forest hydrology and watershed management*, AIHS, n°167, Wallingford, 489-498.
- PETTIT F. & KALOMBO K., 1984. L'interception des pluies par différents types de couverts forestiers. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 20, 99-127.
- PONCET A., 1981. Interactions forêt et climats. *Mélanges*

- offerts à Ch. P Peguy, Gap, 445-462.*
- RAKHMANOV V.V., 1966. *Role of forest in water conservation*. Goslesbumizdat, Moscow, 1962 (Traduit et édité par A. Gourevitch et L. M. Hughes, *Israel program for Scientific Translations Ltd, Jérusalem*).
- REYNOLDS B., HORNING M. & HUGUES S., 1989. Chemistry of streams draining grassland and forest catchments at Plynlimon, Mid-Wales. *J. Sci. Hydrol.*, 34(6), 667-686.
- ROBINSON M., 1997. Synthèse du premier rapport annuel du projet Fairl-CT95-0235 de la CEE. *The impact of forests and silvicultural practices upon the extreme flows of river («Forex»*), Wallingford, non paginé.
- ROBINSON M., MOORE R.E., NISBET T.R. & BLACKIE J.R., 1998. *From Moorland to forest : the Coalburn catchment experiment IH*, Report n° 133, Wallingford, 64 p.
- ROBINSON M., SCHUCH M. & GANNON B., 1991 A comparison of the hydrology of moorlands under natural conditions, agricultural use and forestry. *J. Sci. Hydrol.*, 36(6), 565-577.
- SALATI E., DAALL 'OLIO A., MATSUI E. & GAT J.R., 1979. Recycling of water in the Amazon Basin : an isotopic study. *Wat. Res. Res.*, 15, 1250-1258
- SCHULZE R.E. & GEORGE W.J., 1987a. Dynamic, process-based user-oriented model of forest effect on water yield. *Hydrol. Proc.*, 1, 293-307.
- SCHULZE R.E. & GOERGE W.J., 1987b. Simulation of effect of forest growth on water yield with a dynamic process-based user model. " *Forest hydrology and watershed management* ", AIHS, n° 167, 575-584.
- SHUKLA J., NOBRE C. & SELLERS P.J., 1990. Amazon deforestation and climatic change. *Science* 247, 1322-1325.
- SHUTTLEWORTH W.J., 1988. Evaporation from Amazonian rain forest. *Philosophical Trans. of the Royal Soc.*, London, Ser. B, 233, 321-346.
- SHUTTLEWORTH W.J., GASH H.C., ROBERTS J.M., NOBRE C.A., MOLION L.C.B., DE NAZARE GOES RIBEIRO M., 1991. Post deforestation Amazonian climate : anglo-brazilian research to improve prediction. *J. Hydrol.*, 129, 71-85.
- THOMPSON K., 1980. Forest *Climate Change* in America : some Early Views. *Climatic Changes*, vol 3, n° 1, 47 — 64.
- VED I.P., 1978. Sols et écologie des régions forestières de l'URSS (Traduc. du Lab. « Intergéo »). *Tzvsestiga Zkademii Nauk SSSR, serija geographiceskaja*, 2, 79-84.
- VENN A.W.L. & DOLMAN A.J., 1989. Water dynamic of forest : one-dimensional modelling. *Progress in Physical Geog.*, 13(4), 472-506.
- VENNEKLAS E.J. & VAN EK R., 1990. Rainfall interception in two tropical mountain rain forests, Colombia. *Hydrol. Proc.*, 4, 311-326.
- VERRY E.S., 1987. The effect of Aspen harvest and growth on water yield in Minesota. *Forest hydrology and watershed management*, AIHS, n° 167, 553-562.
- WALLACE J.S. & OLIVER H.R., 1990. Vegetation and hydroclimate. *Process studies in hillslope hydrology* (M. G. Anderson & T.P. Burt Eds), John Wiley, Chichester,
- ZOLLNER A., 1998. Contribution au second rapport annuel du projet Fairl-CT95-0235 de la CEE. *The impact of forests and silvicultural practices upon the extreme flows of river (« Forex »*). Wallingford, non paginé.

Adresse de l'auteur :

Claude COSANDEY

Directeur de recherche CNRS

Université de Paris I (UMR 8591)

place Aristide Bruant 1

F 92195 Meudon CEDEX