

**REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR
LES EFFETS DES COUPES FORESTIÈRES SUR L'ÉCOULEMENT DES
BASSINS VERSANTS SELON LE POURCENTAGE DE COUPE**

Réalisé par

Brent Stanley et Paul A. Arp

Centre de recherche sur les bassins forestiers Nexfor/Bowater

Faculté de foresterie et de gestion environnementale

UNB, Fredericton (N.-B.)

Mai 2002

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, on utilise les bassins versants comme limites géographiques aux fins d'aménagement forestier. Par exemple, en 1867, on a aménagé deux bassins expérimentaux en Tchécoslovaquie pour étudier l'importance des forêts dans l'atténuation des écoulements de surface. Pour débattre de l'importance des forêts par rapport aux inondations et aux volumes de débit de pointe, des bassins semblables ont été mis à l'étude en Suisse en 1902. Au fur et à mesure que grandissait l'inquiétude à propos de la diminution de l'approvisionnement en bois et de l'érosion du sol, des forêts nationales naissaient aux États-Unis, tandis que le projet Wagon Wheel Gap prenait son envol en 1909 (Swank et Johnson, 1994). Il s'agit du premier d'une série d'efforts subséquents visant à quantifier l'écoulement des cours d'eau avant et après une coupe. Il a fallu attendre la pire inondation de l'histoire du delta du Mississippi en 1927 pour que s'accroissent les pressions auprès du gouvernement quant à l'importance d'étudier les impacts de l'aménagement forestier sur les ressources hydrographiques. Cet événement est à l'origine d'une vague d'intérêt envers la recherche sur les bassins hydrographiques aux États-Unis et ailleurs dans le monde, dont les études menées par le Coweeta Hydrologic Laboratory, la Hubbard Brook Experimental Forest, le Jonkershoek Research Station, en Afrique du Sud, et le Nashwaak Experimental Watershed, au Nouveau-Brunswick (Canada), sont des exemples notoires. La majorité de ces travaux de recherche ont abouti au même résultat : l'écoulement d'un cours d'eau s'accroît généralement après une coupe. Clarke (1994) a donc étudié le rôle des modèles mathématiques dans l'élaboration des meilleurs scénarios de coupe pour améliorer l'écoulement. De son côté,

Anderson voulait comprendre comment il était possible de capter la neige – et donc l’apport d’eau – grâce à l’utilisation de différentes pratiques d’aménagement forestier (Anderson, 1956; 1960; 1962; 1963; 1967; Anderson et Gleason, 1960; Anderson et Hobba 1959).

Sans tenir compte de l’objet de la recherche sur les bassins forestiers, on fait référence à des projets connexes pour caractériser efficacement les différentes propriétés hydrologiques des bassins, différentes selon les régions, le substratum géologique, la topographie, le climat, le couvert forestier et les réactions aux différentes coupes (forestières) superficielles. Par ailleurs, puisque la plupart des projets d’étude sur les bassins concernent essentiellement un site particulier, leur processus ne permet pas d’extrapoler les résultats à d’autres bassins (Clayton et Kennedy, 1985). Bien que les impacts d’un type particulier d’aménagement de bassins sur l’apport d’eau et sa qualité soient généralement bien documentés, les traitements adaptés à un type particulier de bassin n’ont pas été conçus pour tester des hypothèses épurées. En conséquence, le transfert de concepts d’un processus à l’autre est plutôt inadéquat.

Il existe déjà plusieurs revues d’études sur les bassins (Bosch et Hewlett, 1982; Hewlett et coll., 1970; Hibbert, 1967; Hornbeck et coll., 1993; MacGregor, 1994; Bell et coll., 1974). Certaines d’entre elles abordent essentiellement des questions comme l’apport et la qualité de l’eau par rapport à la proportion ou au pourcentage de coupe dans un bassin, ce qui constitue le propos de ce rapport. En revanche, peu d’entre elles abordent

l'importance de l'aménagement spatial des coupes, de leur proportion et de leur orientation dans un bassin.

Le contexte actuel pose un nouveau défi en matière d'aménagement forestier qui, il y a quelques décennies, n'existait pas encore dans plusieurs régions du Canada, soit la fragmentation grandissante des forêts en mosaïque de peuplements forestiers en régénérescence, coupés et vierges, plantés et naturels. Par ailleurs, le grand public a multiplié les pressions pour restreindre les dimensions des ouvertures et préserver au maximum les forêts anciennes, les habitats fauniques, les types de forêts rares et les cours d'eau forestiers. C'est ainsi que renaît aujourd'hui l'intérêt pour l'épuration de l'hydrologie forestière à une échelle qui tient compte des coupes de petite envergure par rapport à la topographie et à l'orientation dans un bassin. Les objectifs de ce chapitre sont de :

1. revoir l'actuelle documentation sur les effets des coupes sur l'écoulement;
2. étudier les effets des coupes (complètes, partielles, d'éclaircie) sur l'équilibre gain/perte d'eau dans un bassin aux fins de modélisation;
3. étudier un certain nombre de processus qui perturbent l'équilibre gain/perte d'eau, notamment l'évapotranspiration et le captage de neige.

REVUE DE LA DOCUMENTATION

Hibbert (1967) a analysé 39 expériences de captage, dont il tire trois principales conclusions :

1. La réduction du couvert forestier augmente l'apport d'eau.

2. L'aménagement d'un couvert forestier sur un terrain peu végétalisé diminue l'apport d'eau.
3. La réaction au traitement varie énormément et, la plupart du temps, est imprévisible.

De leur côté, après l'analyse de 55 nouvelles expériences, Bosch et Hewlett (1982) appuient les deux premières conclusions de Hibbert, nuancent toutefois la troisième en affirmant que les différentes classes de végétaux présentent des écarts observables dans leurs réactions aux coupes. Au moyen d'analyses de régression, on a observé que les forêts de conifères et d'eucalyptus augmentaient l'apport d'eau annuel d'environ 40 mm pour chaque réduction de 10 % du couvert (Figure 3.1). Chez les feuillus, l'augmentation était d'environ 25 mm, tandis que pour le couvert arbustif, elle était d'environ 10 mm. Bosch et Hewlett reconnaissent que le niveau de confiance de ces chiffres était faible, mais il n'en demeure pas moins qu'Evans et Patric (1983) avancent des chiffres du même ordre.

Les réactions de ces types de forêts et leurs bassins respectifs variaient beaucoup, avec un déboisement de 100 % des forêts de feuillus correspondant à une augmentation de l'apport d'eau de 31 mm (Ursic, 1970) et une augmentation de l'écoulement de 414 mm (Swank et Miner, 1968) dans l'année suivant les coupes. Quant au déboisement de 100 % de l'étage supérieur de résineux, il augmentait l'apport d'eau de 226 mm (Rogerson, 1979) et l'écoulement de 840 mm (Pace et Fogel, 1968).

Dans une autre revue, Sahin et Hall (1996) ont utilisé une technique de régression linéaire peu connue pour analyser les résultats de 145 expériences de captage. Cette technique leur a permis de découvrir qu'une réduction de 10 % de l'étage supérieur des bassins conifériens augmentait généralement l'écoulement annuel de 20 à 25 mm. Quant aux bassins caducifoliés, l'augmentation de l'écoulement annuel atteignait de 17 à 19 mm.

La revue de MacGregor (1994) résume quelques projets semblables et aboutit aux mêmes conclusions et principes généraux, mais n'aborde pas la superficie de coupe ni ses effets sur l'écoulement. On a cependant constaté que les augmentations maximales de l'écoulement annuel moyen pour la première année suivant la coupe équivalaient à 4,5 mm pour chaque pourcentage de déboisement du couvert.

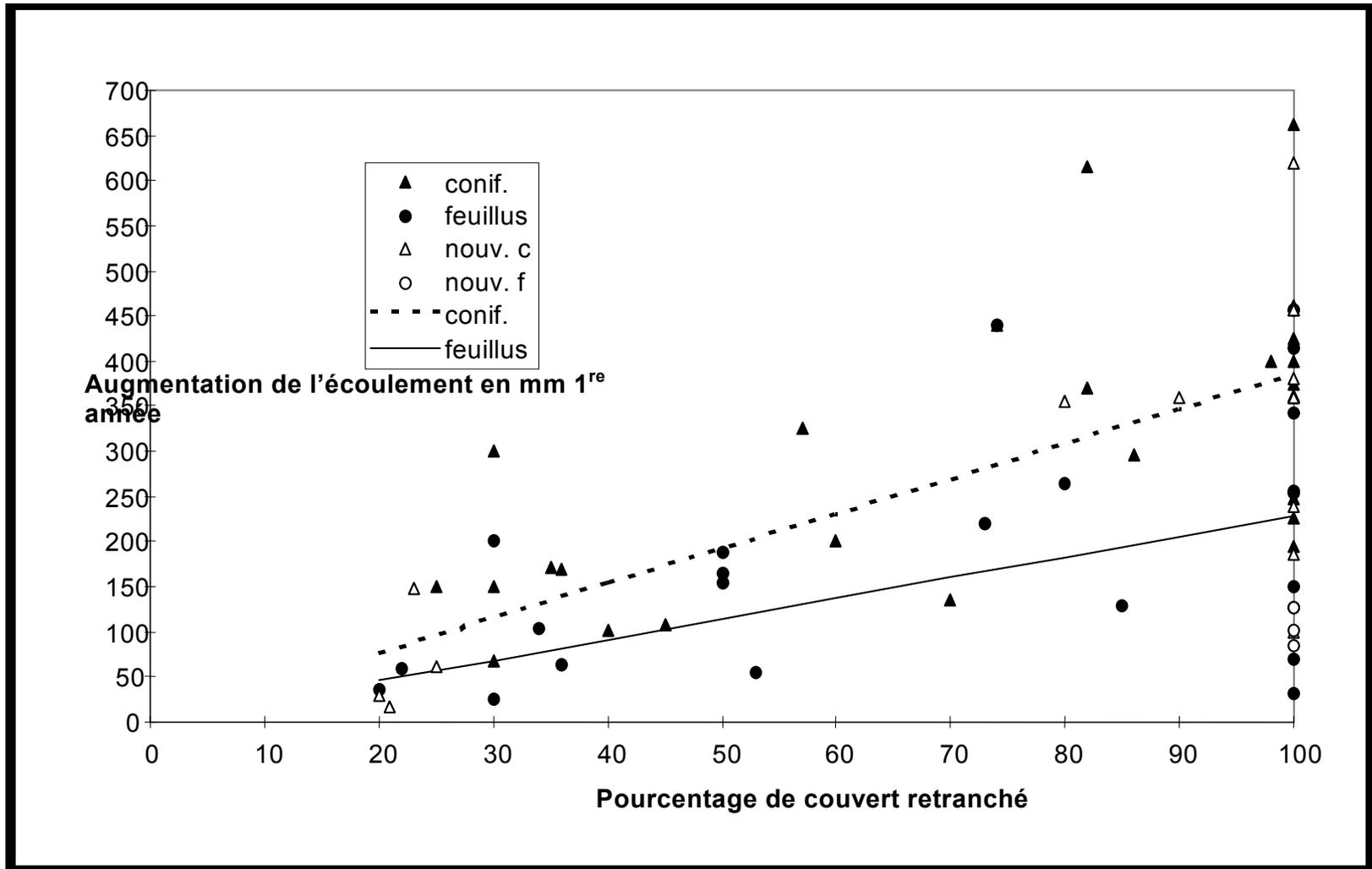


Figure 3.1 Augmentations de l'écoulement la 1^{re} année (mm) à la suite de coupe de superficie variable avec lignes de régression de Bosch et Hewlett (1982) et nouveaux points de données (symboles vides)

Bosch et Hewlett (1982) signalent qu'une réduction du couvert forestier inférieure à 20 % n'était pas détectable en mesurant l'écoulement. Schroder (1996), qui a examiné plusieurs de ces bassins, les a classés par régions climatiques et a découvert qu'un déboisement aussi faible que 15 % dans des régions montagneuses peut se traduire par une augmentation de l'écoulement. À l'inverse, un déboisement de 50 % était nécessaire pour observer une fluctuation observable de l'écoulement dans les plaines centrales des États-Unis. Voici d'autres observations :

1. Un déboisement du couvert résineux de 21 % dans le bassin de la crique Marmot a provoqué une augmentation de l'écoulement annuel de 17 mm (Swanson et coll., 1986).
2. Un déboisement de 50 % de deux bassins montagneux en Virginie occidentale a provoqué des augmentations annuelles de 282 et de 300 mm au total (Patric et Reinhart, 1971).
3. Megahan et coll. (1995) font état des résultats d'une étude de captage semblable menée en Idaho, dans laquelle 23 % d'un bassin a été coupé à blanc à l'aide d'opérations hélicoptérées et brûlé, sans aucune augmentation importante de l'écoulement.
4. Un plus grand bassin de pins de Murray dans lequel on a procédé à un pourcentage de coupe semblable a subi une augmentation annuelle de l'écoulement de 147 mm (Burton, 1997).
5. Après une coupe à blanc et une préparation mécanique d'un bassin de 28,6 ha dans la portion centrale des Appalaches, Koehenderfer et Helvey (1989) signalent des

- augmentations de l'écoulement de 99 mm, 71 mm et 31 mm pour les trois premières années suivant la coupe.
6. Croft et Monninger (1953) signalent une augmentation de l'écoulement de 102 mm après le déboisement d'un peuplement à prédominance de trembles sans le déboisement de l'étage inférieur et d'un autre 100 mm après le déboisement de l'étage inférieur.
 7. Après avoir utilisé un appareil de dispersion neutronique pour mesurer l'humidité du sol dans les 3 premiers pieds (9 pi) d'un peuplement de trembles, Johnston (1970) a découvert que la coupe à blanc augmentait l'humidité d'environ 152 mm par année.
 8. La conversion d'une forêt de chênes en prairie a provoqué une importante augmentation annuelle moyenne de l'écoulement de 114 mm sur six ans (Lewis, 1968).
 9. Dans l'étude de Carnation Creek, 90 % d'un bassin a été coupé à blanc, provoquant une augmentation de 360 mm; un autre bassin a subi une coupe régulière pendant 7 ans sur 40 % sans aucune augmentation importante (Hetherington, 1982).
 10. Une coupe de 80 % au bassin Jamieson Creek, aux pieds des Rocheuses, en Colombie-Britannique, a entraîné une augmentation de l'écoulement de 356 mm.
 11. Fahey (1994) signale une augmentation de l'écoulement de 60 à 80 % après la coupe à blanc de bassins de feuillus en Nouvelle-Zélande, un écoulement normal étant revenu après de six à huit ans; une augmentation de 30 à 50 % serait à prévoir après la conversion de prairies en plantations.

12. La reforestation de prairies en peuplements conifériens dans le centre de l'État de New York a permis de réduire les écoulements de pointe de novembre à avril de 40 %, tout en réduisant la totalité des écoulements annuels de 26 % (Ayer, 1968).
13. La coupe à blanc d'un bassin au Japon sur 50 % avec des lisières de 50 m a entraîné une augmentation de l'écoulement de 21 à 35 % en été.
14. La propagation d'insectes et le feu ont aussi des effets similaires sur le cycle hydrologique (Hillman, 1971). Par exemple, Love (1955) signale que l'écoulement annuel de la région boisée du bassin White River, au Colorado, a augmenté de 22 % après que des insectes eurent décimé la région.
15. Beaty (1994) signale une augmentation de l'écoulement de 60 % à la suite d'un feu ayant ravagé un bassin complet dans l'ouest de l'Ontario.
16. Dans la «Nashwaak Experimental Watershed Study» (étude expérimentale sur le bassin de Nashwaak), une coupe à blanc totale a provoqué une augmentation inférieure à 10 % sur 12 années consécutives (Jewett et coll., 1996).

Certains ont tenté d'expliquer la variabilité des réactions de l'écoulement aux coupes à blanc dans différentes classes de végétaux à l'aide de la variable «précipitation moyenne annuelle» (PMA). Sans égard à la classe de végétaux, les régions à fortes précipitations affichent généralement une régénération rapide, donc un rétablissement rapide de l'écoulement original, tandis que la thèse contraire s'applique aux régions à faibles précipitations. En règle générale, les effets durant les premières années suivant la coupe sont toutefois prononcés dans les régions à fortes précipitations. Par exemple, Rothacher (1970) signale une augmentation de l'écoulement de 457 mm après une coupe à blanc sur

237 acres d'un bassin situé dans une région de fortes précipitations des Cascades de l'Oregon.

Dans *Opportunities to increase water yield in the southwest by vegetation management*, Hibbert (1981) réfère à la méthode de Rich et Thompsons (1974) pour évaluer les augmentations de l'écoulement après une coupe par rapport à l'écoulement avant une coupe (Figure 3.2).

Évapotranspiration

L'évapotranspiration, un processus qui se définit comme l'évaporation provenant de l'eau, du sol, de la neige, de la glace, de la végétation et de toute autre surface combinée à la transpiration des plantes (Chow 1964), est généralement reconnue comme étant la cause directe la plus importante de la fluctuation du cycle hydrologique des bassins (Biswell, 1968; Croft et Hoover, 1951; Goodell, 1965; McGinnies et coll., 1963; Rich, 1952; Sinclair, 1960; Woods, 1966; Zor, 1912; DeByle et coll., 1969; Rosenzweig, 1969).

Figure 3.2

Increase in Runoff (inches) = Augmentation de l'écoulement (en pouces)

Percent of Watershed in Openings = Pourcentage d'ouverture des bassins

Expected runoff before treatment (inches) = Écoulement prévu avant coupe (po)

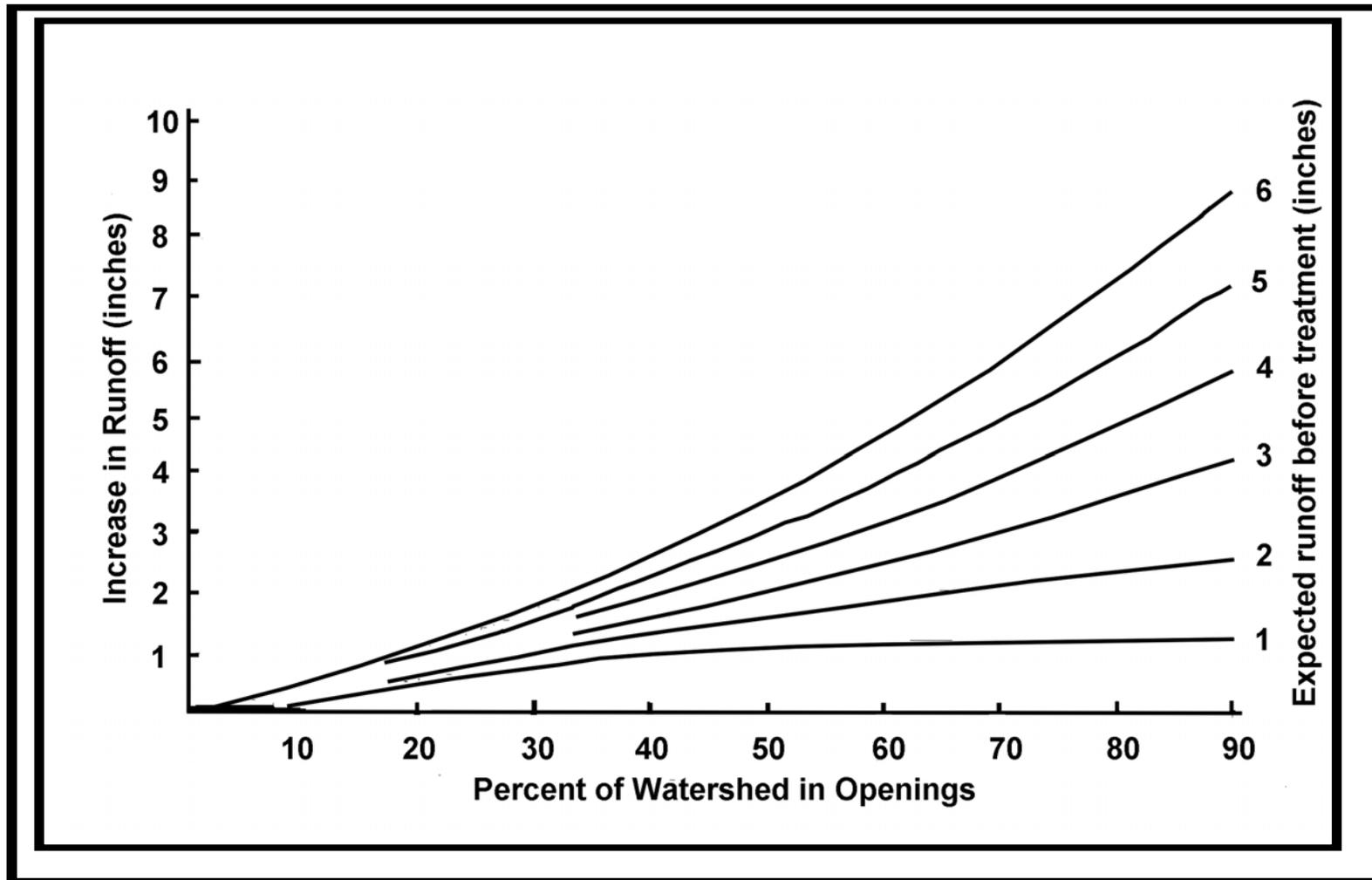


Figure 3.2 Augmentation prévue de l'écoulement avant coupe versus pourcentage d'ouverture des bassins

Par conséquent, Grelle et coll. (1997) ont évalué les trois principales composantes du processus d'évapotranspiration d'une forêt boréale :

1. L'évaporation du tapis forestier (56 mm)
2. L'évaporation d'interception (74 mm)
3. La transpiration (243 mm)

Baier (1967) estime que c'est l'évapotranspiration qui redistribue 70 % des précipitations annuelles à l'atmosphère et suggère qu'elle se caractérise surtout par la présence d'humidité au sol, des facteurs météorologiques et les caractéristiques physiologiques des végétaux. Grâce à la modélisation, Federer et Lash (1978) estiment, d'une part, qu'une fluctuation de quatre semaines dans le processus de croissance des feuilles occasionne une fluctuation de 10 à 60 mm de l'écoulement simulé et, d'autre part, qu'une variation de 20 % de la transpiration quotidienne provoque une fluctuation de 120 mm de l'écoulement simulé. Johnston (1969) compare l'utilisation de l'eau par différents types de végétation à différents âges. Par exemple, les pousses de tremble ont utilisé 114 mm d'eau de moins que les trembles matures et les pousses de châênes, 30 mm de moins que les chênes matures.

En général, la transpiration de la végétation de sous-bois ne se distingue pas de celle de la végétation de l'étage supérieur. Cependant, Roberts et Rosier (1994) estiment que la transpiration de la végétation de sous-bois d'un peuplement de hêtres à grandes feuilles et de frênes d'un site calcaire du sud de la Grande-Bretagne est responsable de 45 % de la transpiration annuelle du bassin. Johnson et Kovner (1956) signalent toutefois une

augmentation moyenne de l'écoulement annuel de 51 mm sur six ans, conséquence de la destruction de l'étage inférieur de canaletes et de rhododendrons d'un peuplement de feuillus dans le sud des Appalaches. Croft et Monninger (1953) signalent une augmentation de plus de 100 mm de l'écoulement après la coupe à blanc de la végétation de sous-bois d'un peuplement de trembles.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est souvent moindre que l'évapotranspiration potentielle (ETP), puisque les taux d'humidité du sol sont souvent faibles pendant une bonne partie de l'année. Cependant, on ne saisit pas encore très bien le lien entre l'évapotranspiration et l'humidité du sol. On sait que les taux d'évapotranspiration ne dépendent pas de l'humidité du sol jusqu'à ce que les taux d'humidité descendent sous le point de flétrissement permanent (PFP) (Veihmer, 1956; Van Bevel, 1960; Lowry, 1959). D'autres études révèlent que l'ETR demeure d'habitude à 90 % de l'ETP jusqu'à ce qu'environ 65 % de la quantité totale d'eau se soit évaporée. Une fois ce seuil atteint, l'ETR diminue de façon régulière (Pierce, 1958; Gardner, 1960; Shaw, 1968). La troisième hypothèse en importance concerne le lien linéaire entre l'ETR et l'humidité du sol, l'ETR diminuant proportionnellement à la diminution de l'humidité du sol jusqu'à ce que le PFP soit atteint (Thorntwaite et Mather, 1955).

Il est difficile de calculer l'évapotranspiration à partir de données climatiques, même si on a essayé de nombreuses méthodes (Stricker, 1982). Mihan (1986) mentionne sept méthodes pour y parvenir, très différentes quant aux exigences des données et ayant toutes subi de nombreuses modifications depuis leur formulation initiale. Yin et Brook

(1992) ont comparé une partie des calculs d'ETP basés sur la température dans un bassin marécageux où ils ont affirmé que l'ETR devait être égale à l'ETP en raison de l'abondance d'eau à l'année. Quand on a évalué l'ETR à l'aide d'un modèle d'équilibre d'un plan d'eau stable, on a découvert qu'elle correspondait davantage à l'ETP estimée à l'aide de l'équation de Thornthwaite ($r^2=0,817$), suivie de l'équation de Blaney-Criddle ($r^2=0,781$) et de la méthode utilisée par Holdridge ($r^2=0,768$). Une autre étude a permis de découvrir l'exactitude de l'équation de Penman, qui a été comparée à d'autres équations à l'aide d'analyses de régression pour fournir une moyenne pouvant corriger les autres équations (Mohan 1991).

Un autre rapport corrobore l'équation de Penman, celui de Essery et Wilcock (1990), dans lequel les estimations de l'ETP tirées de l'équation de Penman sont comparées aux pertes d'évaporation calculées à l'aide des données provenant de lysimètres installés dans des prairies irriguées, de données sur les pluies provenant de réservoirs en eaux libres, des écoulements et des eaux souterraines. Douze années d'accumulation de données révèlent que l'équation de Penman est la plus exacte. Il existe aussi d'autres comparaisons de calculs et d'estimations (Stricker, 1982). Abbaspour (1991) a comparé huit méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration quotidienne aux mesures d'ETR provenant de la région de Peace River, en Colombie-Britannique (Canada).

Il existe aussi quelques méthodes alternatives pour quantifier l'évapotranspiration. Par exemple, Claassen et Halm (1996) ont estimé l'évapotranspiration d'un bassin montagneux à partir des concentrations d'ions chlorure du débit de base. DeByle et coll.

(1969) affirment que les mesures d'appauvrissement de l'humidité du sol ajoutées aux précipitations estivales permettent d'estimer l'ETR et ont démontré comment elle variait de 130 mm pour une prairie à 613 mm pour un peuplement de trembles. Quant à Walker et Brunel (1990), ils ont étudié l'évapotranspiration à l'aide des variations quotidiennes de la composition isotopique du feuillage.

Des chercheurs ont essayé de quantifier les variations spatiales de l'évapotranspiration d'un bout à l'autre d'un bassin (Famiglietti et Wood, 1993; Flerchinger et coll., 1996; Sabur, 1991). Par exemple, Dunn et Mackay (1995) ont démontré comment les modifications à l'utilisation des sols peuvent avoir des effets importants sur l'hydrologie des zones de faible altitude, contrairement à celle des zones d'altitude élevée. Moelders et Raabe (1995) avancent que, à elle seule, une augmentation de la résolution temporelle du modèle hydrométéorologique ne suffit pas à fournir des évaluations hydrologiques précises à l'échelle du captage. En effet, les conditions météorologiques sont aussi perturbées sur le plan spatial, notamment par la topographie et les modèles d'accumulation des écoulements associés. De leur côté, Ambroise et Najjar (1982) ont découvert qu'on pouvait calculer avec exactitude l'évapotranspiration d'un bassin montagneux à l'aide de la formule de Brochet et Gerbier, inspirée de l'équation de Penman.

Brouillard

La majorité des études ne tiennent pas compte des effets potentiels du brouillard sur le régime hydrique des bassins. Non seulement le brouillard peut-il fournir de l'eau au

bassin sous forme de précipitations occultes provenant du feuillage, mais il peut aussi freiner les processus d'évapotranspiration. Yin et coll. (1994) ont estimé que l'eau sous forme de brouillard pouvait atteindre jusqu'à 106 mm dans un bassin côtier de la Nouvelle-Écosse. Quant à Ingraham et Matthews (1995), ils ont remarqué des données similaires pour l'eau sous forme de brouillard dans des bassins côtiers de la Californie.

Captage de neige

Le captage de neige dans un bassin forestier dépend d'un certain nombre de facteurs, les plus importants étant les conditions météorologiques (vent, densité et quantité de neige) ainsi que le type et l'état de la végétation. Schmidt et Gluns (1991) ont étudié trois espèces de conifères : le pin (*Pinus contorta* var. *latifolia*, Engelm.), le sapin baumier (*Abies lasiocarpa* [Hook], Nutt.) et l'épinette (*Picea engelmannii*, Parry) pour caractériser tous les écarts d'efficacité de captage de neige par type de feuillage. Ils ont découvert que les branches d'épinette interceptaient 43 % de l'équivalent total en précipitations neigeuses, le pin, 38 %, et le sapin baumier, 37 %. Quant à Satterlund et Haupt (1967), ils ont démontré que le captage de neige suivait une courbe sigmoïde correspondant à la formule

$$S = S_0 / [1 + e^{-k(P-P_0)}]$$

dans laquelle S_0 est la capacité d'interception/d'emmagasiner, P est la quantité totale de précipitations orageuses en pouces et P_0 est la quantité de neige accumulée au moment de l'accumulation la plus rapide.

Dans le cas du Douglas taxifolié et du pin argenté, environ 5 % de la neige interceptée se perd par évaporation, tandis que le reste tombe au sol sous forme liquide ou solide (Satterlund et Haupt, 1970). Guttenberger (1994) a mesuré l'évaporation de la neige interceptée et a découvert qu'elle composait 60 % du régime d'évapotranspiration pour un peuplement d'épinettes. Quant à Lundberg et Halldin (1994), ils ont découvert que la perte d'évaporation maximale de la neige équivalait à 3,3 mm/jour dans un peuplement d'épinettes de six mètres en Suède. Ils concluent également qu'il faut mesurer avec précision l'humidité relative, la résistance aérodynamique, la vitesse du vent et la masse totale de neige interceptée pour modéliser le taux d'évaporation de la neige interceptée avec exactitude.

Les écarts en matière de captage de neige entre les bassins exploités et les bassins non exploités sont une des premières causes de l'augmentation des débits de pointe printaniers. Même dans les bassins non exploités, les calculs des débits de pointe printanier démontrent qu'ils composent 68 % de l'écoulement annuel total pour un bassin de l'Utah (Glasser 1969) et 80 % pour un bassin du sud de la Colombie-Britannique (Shiau, 1975). Selon une étude menée dans un peuplement de pins de Murray du Wyoming (Berndt, 1965) où on a pratiqué trois superficies d'ouverture (5, 10 et 20 acres) sur quatre orientations (N, S, E, O), l'accumulation de neige était toujours supérieure (moyenne de 405 mm) dans les ouvertures que dans les zones intactes, sans aucun écart important entre les superficies d'ouverture. L'orientation avait un léger impact sur l'accumulation, l'est ayant reçu le plus de neige, suivi du sud, de l'ouest et du nord, avec

environ l'équivalent de 100 mm d'eau provenant de la fonte des neiges entre les accumulations de neige supérieures et inférieures. Toutefois, la neige restait 10 jours de plus dans les zones intactes que dans les ouvertures.

Dans une étude sur l'accumulation de neige menée dans des ouvertures circulaires de neuf superficies différentes variant de 0,25 à 6 hauteurs d'arbres en diamètre en Alberta (Golding et Swanson, 1978), ce sont les ouvertures de 2H et 3H qui avaient accumulé le plus de neige, suivies par celles de 1H et 0,75H. La vitesse d'ablation était inférieure dans les ouvertures de 0,75H et 1H et augmentait proportionnellement aux plus grandes ouvertures.

L'évaporation provenant de la neige accumulée est contrebalancée par un captage supérieur de neige dans les ouvertures (Meng et coll., 1995). Stegman (1996) affirme que l'emplacement géographique, la latitude, l'orientation par rapport aux vents dominants et l'orientation géographique sont les principaux facteurs ayant des effets sur l'évaporation de la neige accumulée, mais qu'une ouverture de 5H sur 1H maximise l'apport d'eau et minimise l'évaporation. Selon une étude menée dans le Wyoming sur le pin de Murray (Gary, 1974), une ouverture perpendiculaire de 1H de large et de 5H de long exposée au vent dominant n'entraînait aucune augmentation de neige accumulée dans le bassin. Toutefois, dans l'ouverture en soi, il s'accumulait plus de neige dans les périodes de pointe que dans les peuplements adjacents, la forêt adjacente sous le vent accumulant légèrement plus de neige que la forêt au vent.

Quand deux bassins du Colorado de même superficie (40 ha) ont été exploités à 40 %, le premier ayant subi des ouvertures circulaires de 12,5 ha et le second, une seule coupe à blanc linéaire, les résultats ont abouti dans les deux cas à une augmentation importante de l'écoulement (Troendle et King, 1987), une situation probablement attribuable aux grandes dimensions des ouvertures circulaires (près de 125 m de diamètre). Troendle et King (1985) ont aussi remarqué une augmentation de 9 % de l'eau provenant de la fonte des neiges dans le bassin quand on a pratiqué la coupe par bandes sur 50 % de sa superficie. En raison de l'évidente augmentation du taux de fonte des neiges, les écoulements de pointe ont augmenté de 20 %, sept jours à l'avance par rapport à la moyenne des années précédentes.

Lors d'une étude menée par Wilm et Dunford (1948) dans un peuplement de pins de Murray, vingt terrains de cinq acres ont été aménagés au hasard, dont 16 ont subi des coupes sélectives. La neige a fondu à peu près au même moment, mais les accumulations (262 mm dans les terrains non exploités versus 343 mm dans les terrains exploités) et les taux de fonte respectifs étaient plus élevés dans les terrains exploités. Des résultats semblables s'appliquent au pin ponderosa (Berndt et Swank, 1970), au pin rouge (Hansen, 1969), à l'épinette noire (Bay, 1958) et aux conifères mixtes (Anderson, 1967).

La présence de rémanents semble avoir une influence sur la fonte des neiges. Anderson et Gleason (1960) ont mesuré l'épaisseur de la neige le 4 mai 1959 et ont découvert que la quantité moyenne d'eau équivalait à 107 mm dans les zones où les rémanents avaient été brûlés, tandis qu'elle équivalait à 23 mm dans les zones où ils n'avaient pas été brûlés.

Apparemment, cet écart est attribuable au rayonnement intercepté par les rémanents exposés, qui aide à réchauffer et à faire fondre la neige en contact immédiat avec les rémanents exposés.

Remarque importante, la coupe à blanc n'est qu'un des moyens pour modifier l'efficacité de captage de neige des bassins. L'accumulation de neige après l'éclaircissement d'un peuplement de pins de Murray a augmenté de 30 % par rapport aux données avant la coupe d'éclaircissement (Gary et Watkins, 1985). Hansen (1969) rapporte les résultats d'une étude dans laquelle des portions d'un peuplement de pins rouges ont été éclaircies à 30, 60, 90, 120 et 150 pi² par acre. L'accumulation de neige après les chutes de neige avait augmenté d'environ 2 % pour chaque réduction de 10 pi² de la surface terrière dans une étendue de 180 à 60 pi². Lesch (1997) rapporte deux éclaircies distinctes dans un peuplement de pins de Monterey en Australie. Dans cet exemple, la destruction d'environ le tiers et les deux tiers des tiges a provoqué des augmentations respectives de l'écoulement annuel de 19 et 99 mm. Le reboisement de prairies au Malawi avec des pins a entraîné d'importantes fluctuations des débits minimaux mais pas des débits de pointe maximaux (Mwendera, 1994).

Environ les deux tiers de l'augmentation de 20 % de l'écoulement annuel d'un bassin de prairie dans le Wyoming traité aux herbicides provenaient de l'augmentation de l'eau de la fonte des neiges (Sturges 1994).

Modèles

On utilise souvent des modèles mathématiques pour simuler le comportement hydrologique des bassins forestiers avant et après les coupes et pour connaître leur lien avec d'autres facteurs (changement climatique, précipitations acides, apport d'eau prévu et prévision d'inondations). MacGregor (1994) fournit des citations et des résumés pour 17 modèles hydrologiques distincts, dont certains permettent de prédire l'écoulement à l'année (Bernath et coll., 1982; Bernier et Hewlett, 1982; Croley, 1982; Dickinson, 1982; Leaf et Alexander, 1975; Tsykin et coll., 1982), tandis que d'autres permettent de prédire d'autres composantes de l'hydrologie des bassins. Arp et Yin (1992, 1993) donnent en exemple 22 modèles qui permettent de calculer l'écoulement ou le flux d'énergie (chaleur) au moyen des sols ou des bassins forestiers. Ils ont ensuite formulé une nouvelle série de modèles d'hydrologie forestière axés sur :

1. l'intégration des flux de chaleur et d'eau basée sur l'équilibre de la masse et de l'énergie;
2. l'application directe et efficace aux bassins forestiers pour lesquels il existe uniquement des données restreintes pour l'initialisation de modèles;
3. la portabilité des calibrations de modèles entre les différents bassins, régions climatiques et types de couverts forestiers et pour des régimes de perturbation forestière particuliers (p. ex., la coupe);
4. l'importance de la vérification des modèles à l'année grâce à la vérification des données d'un modèle et des données sur les observations sur les flux d'eau et de chaleur (égouttement, sol forestier et lixiviats du sol, écoulement, flux de chaleur),

humidité du sol, surface de la nappe, épaisseur de l'accumulation de neige ou équivalents en quantité d'eau provenant de la fonte, pour des bassins donnés;

5. l'adoption de plates-formes de modélisation à la fine pointe comme STELLA et ModelMaker pour faciliter l'utilisation de modèles non seulement par les modélisateurs mais aussi par les spécialistes sur le terrain;
6. la disponibilité de liens dynamiques avec d'autres outils de modélisation, par exemple des tableurs et des programmes de mappage, pour accroître l'utilisation de modèles dans l'environnement Windows, entre autres;
7. l'évolution du processus de modélisation hydrologique de façon à ce qu'il englobe la distribution spatiale du sol forestier, la topographie et les sols dans le contexte des bassins afin d'obtenir des mises à jour quotidiennes sur les fluctuations de la distribution d'humidité des sols à l'aide de simulations sur les régimes d'humidité des sols.

On a appliqué certains modèles pour prévoir les variations spatiales de l'humidité du sol et, par conséquent, les propriétés des sols dans différentes situations (Keys et Arp, 1996a; 1996b; Meng et Arp, 1997; Meng et coll., 1997; 1996). On les a aussi utilisés comme sous-composantes essentielles dans des projets de plus grande envergure (Oja et coll., 1995; Yin et coll., 1994; Yanni et coll., 1994).

Mais il reste encore beaucoup à faire. Par exemple, de nombreux modèles ne tiennent pas compte, ou sinon de façon inadéquate, des pertes d'eau occasionnées par la pénétration profonde dans le substratum perméable ou les sols très profonds. Miller et coll. (1988)

n'ont noté aucun écart important entre l'apport d'eau avant et après coupe pour ce qui est de la coupe à blanc et de la coupe sélective de bassins au substratum perméables en Arkansas. Wallach (1997) a noté des erreurs dans les prédictions sur les écoulements de surface attribuables à des formules incorrectes pour le calcul des infiltrations et de l'écoulement latéral de subsurface. Fait encore plus important, les travaux ne font que commencer à nous permettre de prédire le comportement hydrologique des bassins individuels à l'aide de la physiographie de base des bassins, comme leurs dimensions, leur orientation, leur sol et leur substratum, leur type de végétation et l'étendue des perturbations par rapport au type de végétation.

CONCLUSION

Selon la documentation, la réduction du couvert forestier diminue les pertes de transpiration et d'interception, tandis qu'elle augmente l'humidité du sol et la quantité d'évapotranspiration disponible pour l'écoulement. L'ouverture du couvert forestier peut réduire ou augmenter l'efficacité du captage de neige, selon la superficie de l'ouverture, bien que la neige dans les ouvertures fonde généralement plus vite que la neige de sous-bois. Les ouvertures pratiquées sur deux ou trois hauteurs d'arbre entraînent généralement la plus forte accumulation de neige. Par ailleurs, des coupes allongées parallèles au vent dominant entraînent une plus forte accumulation de neige que les coupes perpendiculaires. Les coupes d'éclaircie augmentent aussi l'épaisseur de l'accumulation de neige sous le couvert restant.

Compte tenu de la plus forte diminution dans la surface foliaire et autres surfaces végétales, la réduction de la transpiration et de l'interception est plus importante chez les conifères que chez les feuillus. Puisque les feuillus occupent généralement des sites plus riches, la régénérescence après coupe est habituellement plus rapide, tandis que les impacts hydrologiques sont plus brefs dans les peuplements de feuillus.

La disposition spatiale des coupes revêt une importance, notamment dans les latitudes nord, dans les régions au relief de modéré à escarpé, où l'équilibre du rayonnement solaire peut être sérieusement compromis par l'angle d'incidence des rayons. Par ailleurs, la destruction de la végétation dans les zones humides d'un bassin peut perturber la nappe souterraine de façon plus importante que dans les zones où l'eau limite souvent la croissance.

Les modèles d'hydrologie forestière commencent à faire leurs preuves en tant qu'outils de gestion. Mais il faut rester vigilant pour s'assurer qu'ils ne sont pas appliqués sans compréhension des exigences des données et des résultats de modélisation en général. Leur objectif est de prédire les répercussions hydrologiques des différents scénarios de coupe, avant leur mise en oeuvre, de façon à ce qu'ils n'entrent pas en contradiction avec les autres objectifs de gestion, notamment de durabilité.

REMERCIEMENTS

Cette revue a été commandée par la Forêt modèle de Fundy. L'appui financier à ce projet provient de la FMF sous forme de contrat de recherche, du Centre de recherche sur les

bassins forestiers Nexfor/Bowater sous forme de soutien permanent au développement de pratiques d'aménagement exemplaires pour les bassins forestiers, du Programme de stages Horizons sciences d'Environnement Canada et de l'UNB.

DOCUMENTS CITÉS

Abbaspour, K.C. 1991. A comparison of different methods of estimating energy-limited evapotranspiration in the Peace River region of British Columbia. *Atmos.-Ocean*, 29: 686-698.

Ambroise, B. and Najjar, G. 1982. Mapping of daily evapotranspiration in a mountainous area – application to the Ringelbach catchment, Vosges France. *EOS Trans. AM. Geophys. Union*, 63: 1289.

Anderson, H. W. 1956. Forest cover effects on snowpack accumulation and melt, Central Sierra Snow Laboratory. *Tans. Amer. Geophysical Union*, 37: 307-312.

Anderson, H. W. 1960. Research in management of snowpack watersheds for water yield control. *J. For.*, 58(4): 282-284.

Anderson, H. W. 1962. A model for evaluating wildland management for flood prevention. US Dept Agric. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station Tech. Pap., 69.

Anderson, H. W. 1963. Managing California's snow zone lands for water. US Dept. Agric. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station Res. Pap. PSW-6.

Anderson, H. W. and Hobba, R. L. 1959. Forests and floods in the northwestern United States. *International Association of Scientific Hydrology*, 48: 30-39.

- Anderson, H. W. and Gleason, C. H. 1960. Effects of logging and brush removal on snow water runoff. *International Association of Scientific Hydrology*, 51: 478-489.
- Anderson, H W. 1967. Snow accumulation as related to meteorological, topographic, and forest variables in central Sierra Nevada, California. *International Association of Scientific Hydrology*, 78: 215-224.
- Arp, Paul A. and Yin, X. 1992. Predicting water fluxes through forests from monthly precipitation and mean monthly air temperature records *Can. J. For. Res.*, 22: 864-877.
- Arp, P. A. and Yin, X. 1993. Predicting forest soil temperatures from monthly mean air temperature and precipitation records. *Can. J. For. Res.*, 23: 2521-2536.
- Ayer, Gordon R. 1968. Reforestation with conifers - its effect on streamflow in central New York. *Wat. Res. Bull.*, 4: 13-24.
- Baier, W. 1967. Relationship between soil moisture, actual and potential evapotranspiration. In: *Soil Moisture. Proceedings of Hydrology Symposium # 6.* National Research Council of Canada. Subcommittee on Hydrology.
- Bay, R. R. 1958. Cutting methods affect snow accumulation and melt in black spruce stands. *US Forest Serv. Lake States Forest Exp. Sta. Tech. Note 523*, 2 pp.
- Beaty, K. G. 1994. Sediment transport in a small stream following two successive forest fires. *Can. J. Fish. Aquat Sci.*, 51: 2723-2733.
- Bell, M. A., Brown, J., and Hubbard, W. 1974. Impact of harvesting on forest environments and resources. *Forestry technical report #3 Canadian Forestry Service.*

- Bernath, S. C., Verry, E. S., Brooks, K. N., and Folliott, P. F. 1982. Modeling water yield response to forest cover changes in northern Minnesota. *In* Hydrological processes of forested areas. Proc. of Can. Hydrol. Symp., Fredericton, NB, June 14-15, 1982, pp. 385-400.
- Berndt, H. 1965. Snow accumulation and disappearance in lodgepole pine clearcut blocks in Wyoming. *J. For.*, 63: 88 - 91.
- Berndt, H. W. and Swank, G. W. 1970. Forest land use and streamflow in Central Oregon. US Forest Serv. Res. Pap. PNW-93, 15 pp.
- Bernier, P. Y. and Hewlett, J. D. 1982. Test of revised variable source area simulator (VSAS2) on a forested basin. *In* Hydrological processes of forested areas. Proc. of Can. Hydrol. Symp., Fredericton, NB, June 13-15, 1982, p. 401-418.
- Biswell, H. H. 1968. Water control by rangeland management. *In* Water for Peace: International Conference on Water for Peace - May 23-31, 1967. U.S. Govt. Print. Off., Washington, D.C., 2: 740-746.
- Bosch, J. M. and Hewlett, J. L. 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55: 3-23.
- Burton, T. A. 1997. Effects of basin-scale timber harvest on water yield and peak streamflow. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 33: 1187-1196.
- Chow. 1964. * Reference to be provided at a later date.
- Claassen, H. C. and Halm, D. R. 1996. Estimates of evapotranspiration or effective moisture in Rocky Mountain watersheds from chloride ion concentrations in stream baseflow. *Wat. Res. Res.*, 32: 363-372.

- Clarke, H. R. 1994. Frost rotation and stream flow benefits. *Aust. For.*, 57: 37-44.
- Clayton, J. L. and Kennedy, D. A. 1985 Nutrient losses from timber harvest in the Idaho Batholith. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 1041-1049.
- Croft, A.R. and Hoover, M.D. 1951. The relation of forests to our water supply. *J. For.*, 49: 245-249.
- Croft, A. R. and Monniger, L. V. 1953. Evapotranspiration and other water losses on some aspen forest types in relation to water available for stream flow. *Am. Geophys. Union Trans.*, 34: 563-574.
- Croley, T. E. II. 1982. A tank-cascade runoff model for large forested basins. *In Hydrological processes of forested areas. Proc. of Can. Hydrol. Symp.*, Fredericton, NB, June 14-15, 1982, pp. 419-440.
- DeByle, Norbert V., Johnston, Robert S., Tew, Ronald K., and Doty, Robert D. 1969. Soil moisture depletion and estimated evapotranspiration on Utah watersheds. *Int. Conf. on Arid Lands in a Changing World, Univ. of Ariz., Tucson Ariz.*, June 3-13, 1969, 14 p.
- Dickinson, W. T. 1982. Distributed watershed models for the Marmot Basin. *In Hydrological processes of forested areas. Proc. of Can. Hydrol. Symp.*, Fredericton, NB, June 14-15, 1982, pp. 441-462.
- Dunn, S. M. and Mackay, R. 1995. Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 17: 49-73.

- Essery, C. I. and Wilcock, D. N. 1990. Checks on the measurement of potential evapotranspiration using water balance data and independent measures of groundwater recharge. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 120: 51-64.
- Evans, J. and Patric, J. 1983. Harvest trees, reap water. *J. Soil Wat. Cons.*
- Fahey, B. 1994. The effect of plantation forestry on water yield in New Zealand, *N. Z. For.*, 39: 18-23.
- Famiglietti, J. S. and Wood, E. F. 1993. Evapotranspiration and runoff from large land areas: land surface hydrology for atmospheric general circulation models. Princeton Univ., NJ USA, Dept. of Civil Engineering, Report N94160298XSP, 28 pp.
- Federer, C. and Lash, D. 1978. Simulated streamflow response to possible differences in transpiration amount.
- Flerchinger, G. N., Hanson, C. L., and Wight, J. R. 1996. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed. *Wat. Res. Res.*, 32: 2539-2548
- Gardner, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.*, 89: 63-73.
- Gary, H. 1974. Snow accumulation and snowmelt as influenced by a small clearing in a lodgepole pine forest. *Wat. Res. Res.*, 10.
- Gary, H. and Watkins, R. 1985. USDA Forest Service. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Research note - RM 450.

- Glasser, Stephen P. 1969. Analysis of long-term streamflow patterns on two Davis County experimental watersheds in Utah. Unpublished MS thesis, Utah State Univ., 94 p.
- Golding, D. and Swanson, R. 1978. Snow accumulation and melt in small forest openings in Alberta. Canadian Can. J. For. Res., 8: 380-388.
- Goodell, B.C. 1965. Watershed treatment effects on evapotranspiration. *In* International Symposium on Forest Hydrology. Nat. Sci. Found. Adv. Sci. Sem. Proc., Penn. State Univ., University Park, Pa., Aug. 29 - Sept. 10, 1965. Pergamon Press, N.Y., p. 477-482.
- Grelle, A., Lundberg, A., Lindroth, A., Morten, A. S., and Cienciala, E. 1997. Evaporation components of a boreal forest: variations during the growing season. *J. Hydrol.*, 197: 70-87.
- Guttenberger, J. 1994. Energy conditions for snow evaporation in the forest and in the open. *Forstliche Forschungsberichte München*, 138.
- Hansen, E. 1969. Relation of snowpack accumulation to red pine stocking. USDA Forest Service. North Central Experiment Station. Research note NC - 85.
- Hetherington, E. D. 1982. A first look at logging effects on the hydrologic regime of Carnation Creek Experimental Watershed. Proc Carnation Creek Workshop, A 10-Year Review Feb 24-26, 1982, Malaspina College, Nanaimo BC, G. Hartman, Editor, pp 45-63.
- Hewlett, J. L. 1970. Review of the catchment experiment to determine water yield. Proceedings of the Joint U.N. Food and Agriculture Organization (F.A.O.) - USSR International Symposium on Forest Influences and Watershed Management, Moscow, pp. 145-155.

- Hibbert, A. R. 1967. Forest treatment effects on water yield. In Sopper, W.E. and Lull, H.W. (Editors), *Int. Symp. For. Hydrol.*, Pergamon Oxford, 813 pp.
- Hibbert, A. R. 1981. Opportunities to increase water yield in the southwest by vegetation management. *Proc Symposium Interior West Watershed Management*, April 8-10, 1980, Spokane, Washington. Baumgartner, D. M. (editor) Washington State Univ. Co-op Ext. Pullman Washington 99164.
- Hillman, G. R. 1971. Probable hydrological effects of clearcutting large blocks in Alberta. Northern Forest Research Centre, Edmonton, AL, Information Report NOR-X-6, Canadian Forestry Service, Department of the Environment, pp. 44-74.
- Hornbeck, J. W, Adams, M. B., Corbett, E. S., Verry, E. S., and Lynch J. A. 1993. Long term impacts of forest treatment on water yield: a summary of the Northeastern USA. *J. Hydrol.*, 150: 323-344.
- Ingraham, N. L. and Matthews, R. A. 1995. The importance of fog-drip water to vegetation: Point Reyes Peninsula, California. *J. Hydrol.*, 164: 269-285.
- Jewett, K., D. Daugharty, H..H. Krause and Arp, P.A. 1996. Watershed responses to clear cutting: effects on soil solutions and stream water discharge in Central New Brunswick. *Can. J. Soil Sci.*, 75: 475-490.
- Johnson, E. A., and Kovner, Jacob L. 1956. Effect on streamflow of cutting a forest understory. *For. Sci.*, 2: 82-91.
- Johnston, Robert S. 1970. Evapotranspiration from bare, herbaceous, and aspen plots: a check on a former study. *Wat. Res. Res.*, 6: 324-327.

- Johnston, Robert S. 1969. Aspen sprout production and water use. USDA For. Serv. Res. Note INT-89, 6 p.
- Keys, K. and Arp, P.1996a. Sample hydrology model output and soil trafficability assessments for an open and forested site at CFB Gagetown, NB, 9 pp.
- Keys, K. and Arp, P.1996b. ForHyM 2 model description and specifications with reference to the CFB Gagetown soil trafficability project, 69 pp.
- Koehenderfer, J. N., Helvey, J. D. 1989. Hydrologic impacts of mechanized site preparation in central Appalachians. General Industrial Report - North Central Forest Experiment Station, USDA Forest Service.
- Leaf, C. F. and Alexander, R. R. 1975. Simulating timber yields and hydrologic impacts resulting from timber harvest on subalpine watersheds. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service Research Paper RM-133. Ft. Collins, Colorado, 18 p. + appendices.
- Lesch, W. 1997. The response in water yield to the thinning of *Pinus radiata*, *Pinus patula*, *Eucalyptus grandis* plantations. For. Ecol. and Man., 99: 295 - 307.
- Lewis, David C. 1968. Annual hydrological response to watershed conversion from oak woodland to annual grassland. Wat. Res. Res., 4(1): 59-72.
- Love, L. D. 1955. The effect on stream flow of killing of spruce and pine by the Engelmann spruce beetle, Amer. Geophys. Union Trans., 36(1): 113-118.
- Lowry, P. 1959. The falling rate phase of evaporative soil moisture loss - A critical evaluation. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 40(12): 605-608.

- Lundberg, A. and Halldin, S. 1994. Evaporation of intercepted snow: Analysis of governing factors. *Wat. Res. Res.*, 30(9): 2587 - 2598.
- MacGregor, H. G. 1994. Literature on the effects of environment and forests on water quality and yield. R & D Report #10, Canadian Forest Service.
- McGinnies, W.G., McComb, Andrew L., and Fletcher, J. E. 1963. Role of watersheds and forests in the arid west. In *Aridity and Man. Amer. Ass. Advance. Sci. Pub.*, 74: 277-307.
- Megahan, W. F, King, J. G., and Seyedbagheri, K A. 1995. Hydrological and erosion responses of a granitic watershed to helicopter logging and broadcast burning. *For. Sci.*, 41: 777-795.
- Meng, F. and Arp, P. 1997. Assessing and mapping field trafficability for CFB Gagetown. Program and user's manual.
- Meng, F., Arp, P., Zelazny, V., Colpitts, T. Schivatcheva, and Fahmy, S.1997. Spatial and temporal variation of soil moisture. Progress report for Fundy Model Forest.
- Meng, F., Bourque, C. P.-A , Jewett K., Daugharty D. and Arp, P.A.. 1995. The Nashwaak Experimental Watershed Project: Analyzing effects of clearcutting on soil temperature, soil moisture, snowpack, snowmelt and stream flow. *Wat. Air Soil Poll.*, 82: 363-374.
- Meng, F., Schivatcheva, R. and Arp, P.1996. Predicting soil drainage classes from DEM data and soil texture map for the Experimental Farm in the Fredericton Region. Report for Agriculture Canada.
- Mihan, M. G. 1986. The evaluation and measurement of evaporation, transpiration, interception, and evapotranspiration.

- Miller, M.L., Beasley, R.S., and Lawson, E.R. 1988. Forest harvest and site preparation effects on stormflow and peakflow of ephemeral streams in the Ouachita Mountains. *J. Env. Qual.*, 17: 212 - 218.
- Moelders, N. and Raabe, A. 1995. On the influence of surface heterogeneity on the water cycle. Proceedings of the First Study Conference on BALTEX, Visby (Sweden), 28 Aug - 1 Sep, 1993. *In* Baltex Secretariat, Geesthacht (Germany), 1995, 3: 137-138.
- Mohan, S. 1991. Intercomparison of evapotranspiration estimates. *Hydrol. Sci. J.*, 36: 447-460.
- Mwendera, E. 1994. Effect on the water yields of the Luchelemu catchment in Malawi of replacing indigenous grasses with timber plantations, 65: 75-80.
- Oja, T., Yin, X. and P.A. Arp. 1995. The forest model series ForM-S: application to the Solling Spruce site in Germany. *Ecol. Model*, 83: 207-217.
- Pase, C. P. and Fogel, Martin M. 1968. Increasing water yields from timber, chaparral, and desert shrub in Arizona. *In* Water for Peace: International Conference on Water for Peace - May 23-31, 1967. US Govt. Print. Off. 2: 753-764.
- Patric, J. and Reinhart, K. 1971. Hydrologic effects of deforesting two mountain watersheds in West Virginia. *Wat. Res. Res.* 7: 1182-1188.
- Pierce, L. T. 1958. Estimating seasonal and short-term fluctuations in evapotranspiration from meadow crops. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 39: 73-78.
- Rich, L.R. 1952. Forest and range vegetation. *Amer. Soc. Civil Eng. Trans.* 117: 974-900.

- Rich, L.R. and Thompson, J. R. 1974. Watershed management in Arizona's mixed conifer forests: The status of our knowledge. USDA Forest Service research paper RM-130. 15 p.
- Roberts, J., Rosier, P. T. W. 1994. Comparative estimates of transpiration of oak and beech forest at a chalk site in southern Britain. *J. Hydrol.*, 162: 229-245.
- Rogerson, T. 1979. Per.com. *In* Bosch, J. M. and Hewlett, J. L. 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55: 3-23.
- Rosenzweig, G. 1969. Study of difference in effects of forest and other vegetative covers on water yield. Fourth Annual Report, March 1968-69, Soil Erosion Res. Sta., Rupp. Inst. Agr., Emek-Hefer, Israel, Rep. 8, 39 p.
- Rothacher, J. 1970. Increases in water yield following clear-cut logging in the Pacific Northwest. *Wat. Res. Res.*, 6: 653-658.
- Sabur, M. A. 1991. A distributed numerical model for watershed hydrology. Diss. Abst. *Int. Pt. B-Sci. & Eng.*, 51: 11.
- Sahin, V. and Hall, M. J. 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *J. Hydrol.*, 178: 293-309.
- Satterlund, D. and Haupt, H. F. 1967 Snow catch by conifer crowns. *Wat. Res. Res.*, 3: 1035-1039
- Satterlund, D. and Haupt, H. F. 1970 Snow catch by conifer crowns. *Wat. Res. Res.*, 6: 649-652.

- Schmidt, R. A and Gluns, David R. 1991. Snowfall interception on branches of three conifer species. *Can. J. For. Res.*, 21: 1262-1269.
- Schroder. 1996. * Reference to be provided at a later date.
- Shaw, R. H. 1968. Predictions of soil moisture under meadow. *Agron. J.*, 56: 320-324.
- Shiau, Shin-Young. 1975. Evaluation of watershed hydrological response by application of a generalized hydrologic model. Publication no 117 de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques Symposium de Tokyo, December, 1975.
- Sinclair, J.D. 1960. Watershed management research in southern California's brush covered mountains. *J. Forest*, 58: 266-268.
- Stegman, S. V. 1996. Snowpack changes resulting from harvest: interception, redistribution, and evaporation. *Wat Res. Bull.*, 32.
- Stricker, H. 1982. Comparison of some methods to calculate evapotranspiration. *EOX Trans. AM. Geophys. Union*, 63: 1290.
- Sturges, D. 1994. High-elevation watershed response to sagebrush control in south central Wyoming. USDA forest service. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station research paper RM-318, 1-18.
- Swanson, R. H., Golding, D. L., Rothwell, R. L., and Bernier, P. Y. 1986. Hydrologic effects of clear-cutting at Marmot Creek and Streeter watersheds, Alberta. Information Report NOR-X-278, Northern Forestry Centre, Canadian Forestry Service.

- Swank, W. T. and Johnson, C. E. 1994. Small catchment research in the evaluation and development of forest management practices. *In* Biogeochemistry of small catchments: A tool for environmental research. Moldan, B. and Cerny, J. (editors) John Wiley and Sons Ltd, pp. 382-408.
- Swank, W. T. and Miner, N. H. 1968. Conservation of hardwood-covered watersheds to white pine reduces water yield. *Wat. Res. Res.*, 4: 947 - 954.
- Thornthwaite, C. W. and Mather, J. R.. 1955. The water balance. *Climatology VII*. Drexel Inst. of Tech. New Jersey. 104 pp.
- Troendle, C. and King, R. 1987. The effect of partial and clearcutting on streamflow at Deadhorse Creek, Colorado. *J. Hydrol.*, 90: 145 - 157.
- Troendle, C. and King, R. 1985. The effect of timber harvest on the Fool Creek watershed, 30 years later. *Wat. Res. Res.*, 21: 1915 - 1922.
- Tsykin, E. N., Laurenson, E. M., Slessar, G. C., and Wu, A. K. 1982. Use of a conceptual non-linear regression model for evaluation of hydrologic effects of land use changes. *In* Hydrological processes of forested areas. Proceedings of the Canadian Hydrology Symposium '82, Fredericton, NB, June 14-15, 1982. National Research Council of Canada No. 20548, Ottawa, Canada, pp. 463-483.
- Ursic, S. J. 1970. Hydrologic effects of prescribed burning and deadening upland hardwoods in northern Mississippi. U.S. Department of Agriculture, Forest Service Research paper, 50 - 54.
- Van Bevel, C. H. M. 1960. Lysimetric measurements of evapotranspiration rates in the Eastern United States. *Soil Soc. Amer. Proc.*, 25: 138-141.

- Veihmer, D. 1956. Soil Moisture. In: Encyclopedia of Plant Physiology. Berlin, p. 64-123.
- Walker, C. D. and Brunel, J-P. 1990. Examining evapotranspiration in a semi-arid region using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 118: 55-75.
- Wallach, R. 1997. The errors in surface runoff predictions by neglecting the relationship between infiltration-rate and overland-flow depth. *J. Hydrol.*, 200: 243-259.
- Wilm, H. G. and Dunford, V. 1948. Effect of timber cutting on water available for streamflow from a lodgepole pine forest. US Forest Serv. Tech. Bull. No. 968, 43 pp.
- Woods, L.G. 1966. Increasing watershed yield through management. *J. Soil Wat. Conserv.* 21: 95-97.
- Yanni, S., Yin, X. and Arp, P. A. 1994. Water, heat and ion fluxes at the Kejimikujik National park: a summary to facilitate ion flux modeling. *In* Workshop on the Kejimikujik Watershed Studies Monitoring and Research: Five years after 'Kejimikujik '88' .' Kerekes, J. and Staicer, C. (editors) Kejimikujik National Park. Oct. 20-21, 1993. Monitoring and Res. Coord. Com. Oc. Rep. No.3. Env. Canada, Sackville, N.B. (in press)
- Yin, X., Foster, N.W., Morrison, I.K. and Arp, P. A. 1994. Tree ring analysis for a sugar maple stand: relations to local climate and dynamic soil variables . *Can. J. For. Res.*, 24: 1567-1574.
- Yin, Zhi-Yong and Brook G. A. 1992. Evapotranspiration in the Okefenokee Swamp watershed: A comparison of temperature-based and water balance methods. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 131: 293-312.

Zor, R. 1912. Forests and water in the light of scientific investigation. *In*. U.S. National Waterways Commission Final Report Append. 5, U.S. Congr. 62nd, 2d Sess. Senate Doc., 469: 205-302.