

L'évaporation résultant de l'interception de la neige par différents types de couverts forestiers (*)

par F. PETIT

Laboratoire de Géographie physique
Université de Liège

MOTS-CLES. - *Evaporation directe, interception de la neige, température et densité de la neige, milieu forestier, climatologie locale, bilan hydrologique.*

RESUME. - *L'évaporation - et dans une certaine mesure la sublimation - résultant de l'interception de la neige par différents types de couverts forestiers, a été évaluée par différence entre les équivalents en eau contenus dans le tapis neigeux mesurés en site dégagé et sous couvert forestier, ceci à partir du moment où il n'y avait plus de neige sur les cimes. Différents moyens de contrôle ont été mis en oeuvre, notamment en ce qui concerne le regel dans le tapis neigeux de la lame d'eau qui s'égoutte des cimes (mesure de températures et de la densité de la neige sous couvert forestier).*

KEY-WORDS. - *Evaporation of interception, snow interception, temperature and density of snow cover, forested areas, local climatology, hydrologic cycle, water balance.*

ABSTRACT. - *Evaporation of snow intercepted by some forest covers is measured by difference between snow water equivalent in open areas and under forest stands, after snow accumulation has slid down the tree tops. As a result snow density is larger under forest stand than in open areas. It shows that the drops which fall from tree tops, freeze again in the snow pack. Indeed, snow temperature is much colder than the air temperature measured above the canopy.*

INTRODUCTION

Les lames d'eau stockées sous forme de neige représentent une composante non négligeable du bilan hydrologique des bassins hydrographiques ardennais. Par ailleurs, l'importance de ces réserves est conditionnée notamment par la présence d'un couvert forestier ainsi que par la densité et la nature de ce dernier. C'est ainsi, qu'afin d'élaborer un bilan hydrologique à échéance mensuelle de petits bassins forestiers échelonnés sur le versant septentrional des Hautes-Fagnes, nous avons évalué les réserves contenues

(*) Recherche effectuée dans le cadre des études intégrées des problèmes hydrologiques et forestiers sur le versant septentrional des Hautes-Fagnes. Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements au Professeur J. Alexandre qui a dirigé cette recherche.

dans les couvertures neigeuses situées sous les différents types de couverts forestiers qui recouvrent en proportion variable les bassins versants étudiés. La différence entre ces lames d'eau et celles qui ont été mesurées en site dégagé, nous ont permis d'estimer l'interception de la neige par le couvert forestier et, moyennant certaines précautions, d'évaluer l'évaporation résultant de la fonte de la neige interceptée. Ces observations ont été effectuées au cours de cinq campagnes réparties sur trois hivers (de novembre 1979 à mars 1982), chacune des campagnes correspondant à une période où les chutes de neige ont été suffisamment importantes et où la couverture neigeuse n'a pas fondu trop rapidement.

I. - METHODE D'ETUDES ET SITES EXPERIMENTAUX

A chaque point d'échantillonnage, nous avons effectué 25 mesures d'épaisseur de la neige. Une carotte de neige a été prélevée et son volume mesuré. L'échantillon est ensuite pesé; de la sorte, la densité de la neige est connue avec précision et le produit de l'épaisseur par la densité donne l'équivalence en eau contenue dans le tapis nival ⁽¹⁾. Nous aurions évidemment pu déduire directement l'équivalence en eau à partir de la pesée de la carotte de neige. Toutefois, nous avons observé fréquemment des écarts entre l'épaisseur de la neige à l'endroit des prélèvements et l'épaisseur moyenne obtenue à partir des 25 mesures d'épaisseur. De tels écarts, liés au microrelief de la surface de la neige et du sol lui-même, n'affectent pas le calcul de la densité mais bien l'équivalence en eau.

Des échantillons de neige ont été prélevés, généralement deux fois par semaine, dans 15 sites dégagés échelonnés du pied de l'Herzogenwald (280 m d'altitude) jusqu'au sommet du plateau des Hautes-Fagnes (Mont-Rigi, 675 m). Les prélèvements de neige sous couvert forestier ont été effectués dans trois parcelles expérimentales où des réseaux denses de pluviomètres avaient été implantés en vue de mesurer l'interception des pluies (F. Petit et Kalombo, 1984). Il s'agit d'une hêtraie âgée de plus de 150 ans et de deux pessières, l'une âgée de 90 ans, l'autre d'une trentaine d'années. En outre, des prélèvements complémentaires ont été effectués dans une pessière âgée d'une soixantaine d'années, pessière où avait été équipé un mât en vue de mesurer un ensemble de paramètres destinés notamment au calcul de l'évapotranspiration effective par la méthode du bilan global d'énergie (F. Petit et M. Erpicum, 1983). Les sites dégagés où ont été faites les mesures de référence se trouvent à proximité de ces parcelles expérimentales.

Il faut distinguer deux stades dans l'interception, selon qu'au moment des mesures il subsiste ou non de la neige sur les cimes des arbres. En effet, une couche de neige parfois importante peut se maintenir sur les cimes pendant quelque temps mais la plus grande part de cette neige glisse ensuite sous le couvert forestier, ne représentant ainsi qu'un égouttement solide postposé. Lorsque cette neige glisse des cimes, il se produit un mouillage de celles-ci;

(1) Pour contrôle, l'échantillon de neige a également été jaugé dans un verre à pied, après fonte totale.

de telle façon, la situation est analogue à celle obtenue lorsque ce sont des pluies qui sont interceptées et cette lame d'eau peut alors être évaporée. Ainsi la différence de contenu en eau du tapis nival mesuré en site dégagé et sous couvert forestier une fois la neige tombée des cimes, permet d'estimer l'évaporation et probablement la sublimation à partir de la neige interceptée. Une partie de la neige fondue qui s'est trouvée sur les cimes peut cependant elle-même s'égoutter et risque de ne pas être mesurée. Toutefois, en suivant l'évolution de la densité de la neige d'une part, et en mesurant la température au sein même du tapis neigeux d'autre part, nous avons pu constater que la plus grande part de cette eau de fonte, regèle une fois introduite dans le tapis neigeux.

II. - RESULTATS

Tout d'abord, il s'est confirmé que l'évolution de l'épaisseur de la couverture neigeuse sur le versant septentrional des Hautes-Fagnes est étroitement liée à l'altitude. En revanche, la densité de la neige fraîche varie peu avec l'altitude et dépend bien plus de la nature de la neige au moment de sa chute. Toutefois, lorsque la couverture neigeuse subsiste depuis plusieurs jours, il arrive qu'il y ait des variations sensibles de la densité de la neige avec l'altitude. C'est ainsi qu'au pied de l'Hertogenwald, la densité augmente lorsqu'il se présente des conditions climatiques favorables à l'alternance entre dégel diurne et regel nocturne. Ce phénomène affecte moins souvent le plateau des Hautes-Fagnes, car l'occurrence de ces alternances est moins fréquente du fait que les températures diurnes y sont plus basses. Par contre, la densité de la neige tend à augmenter sur le plateau des Hautes-Fagnes, du fait d'un tassement plus important en relation avec une plus grande épaisseur.

Les pourcentages de l'évaporation de l'eau de la fonte de la neige interceptée par différents couverts forestiers sont repris au tableau I. Cette évaporation représente en moyenne 37 %, 34 % et 30 % des précipitations neigeuses totales, respectivement pour des jeunes épicéas, des épicéas de 60 et de 90 ans. Pour les hêtres, les valeurs sont nettement moins importantes mais le nombre limité d'observations ne nous permet pas d'avancer une valeur précise (de l'ordre de 25 %).

L'évaporation observée en janvier 1982 est nettement plus importante que celle mise en évidence lors des autres périodes. Ceci résulte de conditions climatiques favorables, liées à la présence d'un puissant anticyclone (1045 mb) centré sur l'Europe centrale. Sur les sondages aérologiques de l'Institut Royal Météorologique (*Observations synoptiques, Bulletin quotidien*), une forte inversion de température apparaît à une altitude de 400 à 500 m, si bien que les Hautes-Fagnes se trouvent au-dessus de l'inversion. C'est ainsi que le 15 janvier 1982 p. ex. la température minimale est de $-8,4^{\circ}\text{C}$ à Mont-Rigi, contre $-23,5^{\circ}\text{C}$ dans certaines stations de la Moyenne-Belgique. Par ailleurs, le ciel est particulièrement dégagé sur les Hautes-Fagnes, l'insolation relative est en effet supérieure à 90 % entre le 12 et le 18 janvier, et l'air très sec. L'humidité relative moyenne journalière est proche de 50 % et, dans certains cas, descend jusqu'à 20 % la journée. De telles conditions expli-

TABLEAU I. - Interception de la neige par différents types de couverts forestiers. Mesure par différence d'équivalent eau dans les couvertures neigeuses. Exprimée en %.

	Densité de la neige en site dégagé	Jeunes épicéas < 10 m de haut	Epicéas âgés de 50-60 ans	Vieux épicéas 90 ans	Hêtre + de 150 ans
21.01.1980	0,28	-	-	29,0	-
24.01.1980	0,28	-	-	(44,1)	(28,6)
28.01.1980	0,32	42,5	32,1	28,2	-
01.12.1980	0,13	-	-	27,3	-
12.12.1980	0,29	38,7	34,1	26,6	-
07.01.1981	0,12	(48,2)	(36,9)	(42,3)	(9,2)
12.01.1981	0,20	35,5	-	38,8	7,5
19.01.1981	0,28	32,2	-	-	-
23.02.1981	0,26	39,5	-	-	-
07.12.1981	0,14	(70,4)	-	(51,8)	(19,3)
14.12.1981	0,29	33,5	36,2	-	-
18.01.1982	0,20	-	-	76,9	47,2

Les valeurs entre parenthèses représentent le pourcentage d'interception alors qu'il y avait encore de la neige sur les cimes.

quent la forte évaporation que nous avons observée (13 mm en six jours) bien qu'il se pose, comme nous le verrons par la suite, un problème de l'énergie nécessaire pour permettre cette évaporation.

Indépendamment des conditions climatiques exceptionnelles, telles que celles présentées ci-dessus, on constate que les pourcentages d'interception restent cependant variables pour un même type de peuplement forestier, du fait qu'ils sont obtenus à partir de périodes d'observations qui peuvent - ou non - intégrer plusieurs chutes de neige. L'humectation des cimes qui résulte du glissement de la neige interceptée - et donc l'évaporation qui lui succède - est en effet plus importante dans le cas de chutes de neige de moyenne importance se succédant à intervalle régulier, que pour une chute de neige fort importante mais isolée, du fait que dans ce dernier cas il n'y aura qu'une seule humectation de la cime ⁽²⁾. Il va de soi que la quantité de neige interceptée conditionne l'évaporation ultérieure, mais cette interception est elle-même fonction du type de neige. Ainsi, dans le cas de la hêtraie notamment, l'inter-

(2) Il n'est cependant pas exclu que le glissement de la neige interceptée puisse se faire par étapes successives (glissement des couches les unes sur les autres, provoquant plusieurs humectations des couches inférieures).

ception mesurée juste après les chutes de neige - quand cette dernière subsiste encore sur les cimes - représente moins de 10 % de la neige mesurée en site dégagé lorsque celle-ci est poudreuse (densité de 0,12) mais atteint près de 30 % lorsque la neige est mouillée (densité de 0,28).

D'autre part, les températures de la neige sous couvert forestier ont été comparées aux températures de l'air mesurées à différents niveaux, ceci au moyen de trois sondes de température ⁽³⁾. La première sonde installée sous pessière à 3 cm au-dessus du sol, permettait, lorsqu'elle était recouverte d'une faible épaisseur de neige, de mesurer la température de cette dernière dans sa partie superficielle, au voisinage de l'air. La seconde sonde permettait de mesurer la température de l'air à 1,5 m du sol sous pessière et la troisième, installée sur un mât à 22 m de hauteur, la température de l'air au-dessus des cimes.

TABLEAU II. - Evolution de la température de l'air et de la neige sous pessière et à la cime.

	Temp. de l'air au sommet des cimes (22,6 m)		Temp. de l'air à 1,5 m sous pessière		Temp. à 3 cm au-dessus du sol sous pessière	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
10.01.1982	- 12,4	- 5,2	< - 11,5	- 5,9	(< - 11,5	- 5,9)
11.01.1982	- 6,5	- 1,5	- 6,0		- 3,5	- 2,3
12.01.1982	- 9,0	- 2,8	- 9,4		- 4,7	- 2,7
13.01.1982	- 7,5	- 0,3	- 8,1		- 5,0	- 2,3
14.01.1982	- 6,2	+ 9,3	- 7,9	+ 1,2	- 6,5	- 0,9
15.01.1982	- 4,1	+ 10,7	- 4,0		- 3,2	+ 1,0
16.01.1982	+ 7,9	+ 11,2	+ 1,9		+ 1,2	

Il ressort du tableau II que les températures de la neige ne se mettent en équilibre avec les températures de l'air qu'avec un certain retard, ce qui traduit bien la pénétration progressive de l'onde de froid. L'amplitude thermique est nettement plus atténuée dans le tapis neigeux que dans l'air ambiant, si bien qu'il se crée des déséquilibres thermiques entre les deux : températures positives à la cime, températures négatives de la neige permettant le regel des gouttes.

Nous avons eu confirmation de ce phénomène en comparant la cime de la neige en site dégagé et sous couvert forestier. Ainsi, nous avons observé que, juste après des chutes de neige, alors que cette dernière subsiste encore sur les cimes, la neige a une densité con-

⁽³⁾ Il s'agit de sondes à fil de platine PT 100 Ω / 0°C reliées à un potentiomètre SCHENK multipiste qui assure un pointage des données à intervalles de 20 secondes.

parable en site dégagé et sous couvert forestier (écarts inférieurs à 5 %). Par contre, à partir du moment où la neige a glissé des cimes, elle est nettement plus dense sous couvert forestier qu'en site dégagé (p. ex. en janvier 1981, la densité était de 0,304 sous couvert forestier contre 0,263 en site dégagé). Il arrive que les écarts soient plus importants. Ainsi en janvier 1982, la densité de la neige en site dégagé était de 0,16 contre 0,29 sous pessière. En conclusion, la densité plus élevée de la neige sous couvert forestier indique qu'il y a un regel dans le tapis neigeux de la lame d'eau qui s'égoutte des cimes et, probablement, un léger tassement de la neige.

Nous avons également pu nous faire une opinion quant au *partage entre l'évaporation et l'égouttement de la neige interceptée, par une autre approche*. Afin de mesurer l'interception des pluies, trois réseaux pluviométriques avaient été installés sous couvert forestier. Il se pose certes un problème de précision des mesures lors des périodes où il y eu d'abondantes chutes de neige, étant donné que cette neige s'accumule dans les entonnoirs des pluviomètres, débordant de ceux-ci et qu'elle risque d'être soufflée par le vent. De ce fait, les mesures effectuées une fois la neige fondue perdent de leur précision. Toutefois, la comparaison des lames d'eau recueillies après la fonte totale de la neige dans les pluviomètres installés en site dégagé et sous couvert forestier donne un ordre de grandeur quant à cette évaporation (tableau III). Celle-ci représente plus de 40 % des précipitations pour les jeunes épicéas, près de 35 % pour les épicéas âgés et un peu moins de 30 % pour les hêtres. Les valeurs obtenues par cette méthode sont très proches des valeurs d'interception calculées par différence d'équivalent en eau contenue dans le tapis neigeux, du moins pour les épicéas. Les valeurs d'interception des hêtres sont élevées. Toutefois, rappelons que pour estimer l'évaporation de la neige interceptée, il faut, tout comme pour les pluies, retrancher la lame d'eau qui s'écoule le long des troncs. Elle est très faible pour les épicéas (moins de 2 %), mais atteint près de 10 % des précipitations dans le cas des hêtres, ce qui diminue d'autant les valeurs d'évaporation.

TABLEAU III. - Interception de la neige par différents types de couverts forestiers. Valeurs trouvées par différence entre les pluviomètres en site dégagé et sous couvert forestier après fonte totale de la neige. Valeurs exprimées en %.

	Jeunes épicéas 30 ans	Vieux épicéas	Hêtres
15.04.80-22.04.80	-	36,8	34,8
22.04.80-29.04.80	-	-	29,0
27.10.80-15.12.80	-	50,2	42,9
15.12.80-05.01.81	-	27,2	26,1
13.04.81-30.04.81	-	29,2	21,1
02.11.81-16.11.81	39,9	-	32,3
08.02.82-15.02.82	(40,9)	-	(31,9)
08.03.82-15.03.82	-	-	31,3
15.03.82-22.03.82	42,9	-	29,6

Les valeurs entre parenthèses représentent le pourcentage d'interception alors qu'il y avait encore de la neige sur les cimes.

Ainsi, tant pour les épicéas de différents âges que pour les hêtres, les valeurs d'évaporation résultant de l'interception de la neige sont du même ordre de grandeur que les valeurs d'évaporation des pluies interceptées en période hivernale par ces mêmes couverts forestiers (F. Petit et Kalombo, 1984).

D'autre part, il faut tenir compte d'une éventuelle fonte différentielle de la neige dans les sites dégagés et sous couvert forestier. Plusieurs études, dont celle de R. Charbonneau *et al.* (1979) au Canada, ont montré que la fonte de la neige est nettement plus rapide en site dégagé que sous couvert forestier; de la sorte, dans notre étude, l'évaporation, pourtant déjà importante, serait évaluée par défaut. Il semble cependant que les effets de cette fonte différentielle se marquent surtout lorsque la couverture neigeuse se maintient pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, ce qui est rarement le cas dans les Hautes-Fagnes.

Par ailleurs, A.P. Plamandon *et al.* (1984) ont comparé, au nord du Québec, dans le domaine climatique de la sapinière à bouleaux blancs, les équivalents en eau du manteau nival en site dégagé et sous couvert forestier. Les écarts mis en évidence par ces auteurs atteignent 22 % pour un peuplement âgé d'une cinquantaine d'années. Ces valeurs sont donc moins élevées que celles mises en évidence dans notre étude. Ceci peut résulter de différences quant à l'importance de l'écran forestier, mais aussi du fait que les milieux géographiques sont fort différents, ce qui peut influencer la nature même de la neige ainsi que la fréquence des alternances des chutes de neige et de leur fonte. De plus, les Hautes-Fagnes sont soumises à une influence océanique dominante, ce qui, en période hivernale, représente un apport non négligeable de calories par advection d'air chaud. En effet, si même la totalité de l'énergie fournie par rayonnement solaire est utilisée à seule fin de permettre l'évaporation de la neige interceptée, il arrive fréquemment qu'elle ne suffise pas à assurer cette évaporation (J. Alexandre et F. Petit, 1983). D'autres sources d'énergie interviennent alors, notamment un flux de chaleur sensible lors d'advection d'air océanique plus chaud, ce qui a déjà été observé dans d'autres situations climatiques, notamment pour l'évaporation en période automnale des pluies interceptées (F. Petit et Kalombo, 1984).

III. - CONCLUSION

Il est certain que les résultats présentés dans cette étude sont encore partiels et qu'ils seront affinés par les études actuellement en cours, études qui visent notamment à multiplier les campagnes de mesures et à apporter une plus grande précision de la mesure de certains processus. Toutefois, un certain nombre de faits semblent d'ores et déjà acquis.

Ainsi, les différences en équivalent eau mesuré en site dégagé et sous couvert forestier lorsqu'il n'y a plus de neige sur les cimes, permettent une évaluation fiable de l'évaporation et dans une certaine mesure de la sublimation, résultant de l'interception de la neige par le couvert forestier. En effet, la plus grande part de la lame d'eau qui s'égoutte des cimes, regèle dans la couverture neigeuse, du fait que cette dernière fonctionne comme un piège à l'aide de ses frigidités. La densité plus élevée de la neige sous cou-

vert forestier, du moins à partir du moment où la neige a glissé des cimes et qu'une lame d'eau a éventuellement pu s'égoutter, confirme le regel de cette dernière dans le tapis neigeux.

Les valeurs d'évaporation mises en évidence par cette première méthode ont été confirmées à partir des mesures faites, après fonte totale de la neige, dans les réseaux pluviométriques installés sous différents types de couvert forestier.

Ainsi l'évaporation résultant de l'interception de la neige représente en moyenne 37 % des précipitations neigeuses pour de jeunes épicéas, 34 % pour des épicéas âgés, de l'ordre de 20 % pour des hêtres. De telles valeurs sont fort élevées pour des périodes hivernales et, le plus souvent, dépassent même l'énergie disponible par rayonnement solaire. Il est fort probable qu'il y ait alors apport de calories par advection d'air chaud.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRE J. et PETIT F., 1983. - Les processus climatologiques intervenant dans le bilan hydrologique de petits bassins versants boisés, *Comptes-rendus du Colloque du Groupe wallon d'étude des écosystèmes forestiers*, Hanotiaux éd., Gembloux, pp. 49-56.
- BULTOT F. et DUPRIEZ G.L., 1976. - Conceptual hydrological for an average sized catchment area. Concepts and relationships, *Journ. of Hydrology*, pp. 251-272.
- CHARBONNEAU R., MORRIN G. et CORTIN J.P., 1979. - Effet du pourcentage de la distribution des surfaces boisées sur les crues de fonte de neige, *Journ. of Hydrology*, 41, pp. 93-103.
- GREGORY K.J. et WALLING D.E., 1973. - *Drainage basin, form and process*, Ed. Arnold, London, 458 p.
- GRIP H., 1982. - *Water chemistry and runoff in forest streams at Klotten*, Uppsala University, Department of Physical Geography, Uppsala Universitet Naturgeografiska Institutionen, Rapport n° 58, 144 p.
- LEE R., 1980. - *Forest hydrology*, Columbia University Press, New York, 349 p.
- PETIT F. et ERPICUM M., 1983. - Evaluation de l'évapotranspiration réelle d'une pessière. Comparaison avec l'évapotranspiration potentielle, *Bull. Soc. géogr. Liège*, 19, pp. 139-159.
- PETIT F. et KALOMBO KAMUTANDA, 1984. - L'interception des pluies par différents types de couverts forestiers, *Bull. Soc. géogr. Liège*, 20, pp. 99-127.
- PLAMONDON A.P., PREVOST M. et NAUD R.C., 1984. - Accumulation et fonte de la neige en milieux boisé et déboisé, *Géogr. Physique et Quaternaire*, XXXVIII, 1, pp. 27-35.
-