

Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco)

G. AUSSENAC et C. BOULANGEAT *

Station de Sylviculture et Production,
Centre national de Recherches forestières, INRA.,
Champenoux 54280 Seichamps

Résumé

L'interception des précipitations et l'évapotranspiration réelle ont été évaluées dans un peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) âgé de 11 ans (densité : 3 086 tiges/ha), trois peuplements de Douglas âgés de 23 ans (densité : 530, 1 030 et 2 229 tiges/ha) et dans un peuplement de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) âgé de 80 ans (densité : 743 tiges/ha).

En période hivernale, l'interception a représenté 6 p. 100 des précipitations incidentes dans la hêtraie contre 32 p. 100, 35 p. 100 et 36 p. 100 chez les Douglas âgés de 23 ans ; en période estivale, l'interception a augmenté dans la hêtraie (21 p. 100 des précipitations), alors qu'elle est restée stable chez les Douglas. La prise en compte de données bibliographiques a permis de montrer que dès l'âge de 15 ans, l'interception est élevée (35 p. 100) chez les Douglas et varie peu jusqu'à 50 ans. Chez le Hêtre, l'interception atteint en moyenne 15 p. 100 dès l'âge de 30 ans et augmente avec l'âge pour atteindre 20-25 p. 100 à 100 ans.

L'évapotranspiration réelle a été estimée de façon hebdomadaire par la relation classique :

$$ETR = P_i - D - \Delta S$$

avec

ETR : évapotranspiration réelle, P_i = précipitations incidentes,

D : écoulement profond et latéral,

ΔS : fluctuation de la réserve en eau du sol.

Les calculs ont été effectués pour des périodes où l'écoulement profond ou latéral était absent.

La fluctuation de la teneur en eau du sol a été étudiée à l'aide d'une sonde double neutron gamma. Les résultats obtenus montrent ainsi que l'on pouvait le penser *a priori* qu'au printemps, en l'absence de feuilles, le hêtre évapotranspire moins que les Douglas ; mais en été, l'évapotranspiration du hêtre est la même que celle du Douglas. En automne, on a noté au moment du jaunissement des feuilles une légère différence entre feuillus et résineux. Les résultats obtenus montrent aussi que le peuplement de Douglas de faible densité (530 tiges/ha) évapotranspire notablement moins (18 p. 100 à 27 p. 100) que les autres.

L'interception joue un rôle important dans l'évapotranspiration totale des peuplements. Le rapport ETR/ETP dépasse 1 lorsque l'interception est importante.

1. — Introduction

L'influence de la forêt sur le bilan hydrique a fait l'objet de nombreux travaux de recherches.

* Adresse actuelle : Office national des forêts, 21 Châtillon-sur-Seine.

L'interception des précipitations a été particulièrement étudiée dans les vingt dernières années. Cependant, si on connaît maintenant les ordres de grandeur de l'interception, on dispose encore de peu de données sur la variation de ce phénomène, avec l'âge des peuplements. On a de même peu d'informations sur le comportement d'essences exotiques telles que le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) qui devient maintenant très important dans la forêt française.

L'évapotranspiration des peuplements est aussi encore relativement mal connue d'une part à cause des difficultés rencontrées pour évaluer les effets de l'âge et de la structure et d'autre part en raison du rôle que joue l'eau interceptée dans le bilan hydrique global. La fréquence et l'importance des précipitations apparaissent ainsi comme déterminantes pour l'évapotranspiration réelle des peuplements (Rutter, 1975).

Les comparaisons de comportement entre feuillus et résineux sont difficiles à établir expérimentalement et les résultats obtenus par différents expérimentateurs sont souvent contradictoires.

L'objectif de cette étude était d'analyser, dans des conditions de milieu comparables, le bilan hydrique et les influences respectives d'un feuillu climacique (*Fagus sylvatica* L.) et d'un résineux exotique (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) souvent utilisé en reboisement.

2. — Matériel et méthode

Les peuplements étudiés sont situés sur un plateau à la même altitude (255 m) en forêt d'Amance, à 10 km à l'est de Nancy (Meurthe-et-Moselle). Ils sont suffisamment proches pour que les conditions climatiques y soient identiques. La forêt d'Amance repose sur un sol brun lessivé marmorisé, développé sur des marnes liasiques recouvertes de limons. La caractéristique principale de substrat est la présence à une profondeur moyenne de 65 à 80 cm d'un horizon très compact qui freine les écoulements profonds et provoque le développement de nappes perchées temporaires. Cette situation permet le contrôle des échanges d'eau verticaux dans le sol et le site a été pour cela qualifié de « lysimètre naturel » (Aussenac, 1972-1975).

Le tableau 1 donne les caractéristiques principales des peuplements étudiés.

TABLEAU 1
Caractéristiques générales des peuplements étudiés
Characteristics of the four stands

Essence	Age (ans)	Hauteur (m)	Densité (tiges/ha)	Surface terrière (m ² /ha)	Surface placette (ha)
<i>Fagus sylvatica</i> L. ⁽¹⁾	80	25,0	743	27,3	0,220
<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb I ⁽²⁾	23	16,0	535	22,4	0,099
<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb II ⁽²⁾	23	18,0	1 030	38,1	0,099
<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb III ⁽²⁾	23	17,0	2 229	45,4	0,099
<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb IV ⁽²⁾	11	10,0	3 086	38,0	0,086

⁽¹⁾ Parcelle 26 de la forêt domaniale d'Amance.

⁽²⁾ Plantation expérimentale en carré latin.

⁽³⁾ Plantation expérimentale de l'arboretum d'Amance.

Le peuplement feuillu est constitué d'une futaie régulière de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) à couvert fermé avec un sous-étage très réduit. On rencontre aussi en mélange quelques Chênes (*Quercus sessiliflora* Salisb.), Tilleuls (*Tilia cordata* Mill), Charmes (*Carpinus betulus* L.) et Frênes (*Fraxinus excelsior* L.). Le peuplement est issu d'une régénération naturelle.

Les peuplements de Douglas sont issus de plantations (Bartoli et Decourt, 1971).

L'interception des précipitations a été évaluée chaque jour à partir de la relation :

$$(1) \quad I_n = P_i - (P_s + P_t) \text{ (Aussenac, 1968)}$$

avec

I_n = interception nette

P_i = précipitations incidentes

P_s = précipitations arrivant au sol

P_t = précipitations s'écoulant le long des troncs.

Les précipitations incidentes ont été mesurées au poste climatologique du Centre National de Recherches Forestières à Champenoux situé à proximité immédiate (500 m) des peuplements étudiés. Les précipitations au sol ont été évaluées à l'aide de vingt-cinq pluviomètres * répartis au hasard dans le peuplement feuillu et de quinze pluviomètres dans chacun des trois peuplements de Douglas (I, II et III) (Boulangeat, 1978). Il n'y a pas eu de mesures nouvelles dans la parcelle IV de Douglas. Les calculs ont été effectués à partir de mesures qui avaient été faites en 1972 sur les mêmes peuplements (Aussenac, 1975).

L'écoulement le long des troncs a été mesuré à l'aide de colliers (Aussenac, 1968) ajustés en spirale autour des troncs ; cinq de ces colliers ont été utilisés dans chacun des peuplements de Douglas et onze dans le peuplement feuillu.

L'évapotranspiration réelle de ces peuplements a été calculée chaque semaine à l'aide de la relation classique suivante :

$$(2) \quad ETR = P_i - D - \Delta S$$

avec

ETR = évapotranspiration réelle

P_i = précipitations incidentes

D = écoulement profond et latéral

ΔS = fluctuation du stock d'eau contenu dans le sol.

Dans l'utilisation de cette équation nous avons supposé qu'il n'y avait pas de remontées capillaires depuis les horizons profonds (inférieurs à 1,5 m). Les calculs ont été effectués en l'absence d'écoulement (D). L'existence d'un écoulement a été déterminée à partir de la présence ou de l'absence de la nappe perchée temporaire. La présence de cette nappe perchée est l'indice d'un excès d'eau qui en l'absence d'horizon imperméable s'infiltrerait en profondeur.

La fluctuation des nappes a été suivie à l'aide de tubes piézométriques (six tubes dans le peuplement feuillu et trois dans chacun des peuplements de Douglas).

La variation du stock d'eau du sol a été mesurée à partir de profils hydriques réalisés à l'aide d'une sonde double neutron gamma : dans le peuplement feuillu

* Pluviomètre SPEIA (surface de réception 400 cm²).

vingt-trois tubes ont été installés (Aussenac et Granier, 1979) ; dans les Douglas six tubes ont été utilisés dans les peuplements I, II et III. Ils sont regroupés par trois le long d'une diagonale du carré formé par quatre arbres voisins. Dans le Douglas IV neuf tubes ont été installés : six regroupés par trois comme dans les peuplements précédents et trois installés au centre de carrés formés par quatre arbres voisins (Boulangeat, 1978).

Les tubes ont une longueur utile de 2,60 m dans les Douglas, dans la hêtraie la longueur utile est de 2,60 m pour 2 tubes, 1,90 m pour quatre tubes, 1,50 m pour dix-sept tubes.

3. — Résultats

3.1. — Interception des précipitations

Les mesures ont été réalisées d'octobre à novembre 1977 et d'avril à juillet 1978. Elles permettent de comparer les peuplements pendant une partie de la période hivernale débutant avec la chute des feuilles du Hêtre (2 novembre 1977) et pendant une partie de la saison de végétation commençant avec le débourrement des feuillus (7 mai 1978).

La figure 1 représente (en pourcentage) l'importance des différentes fractions (P_s , P_t , I_n) pour la période hivernale, la période estivale et pour la période allant du mois d'octobre 1977 à juillet 1978.

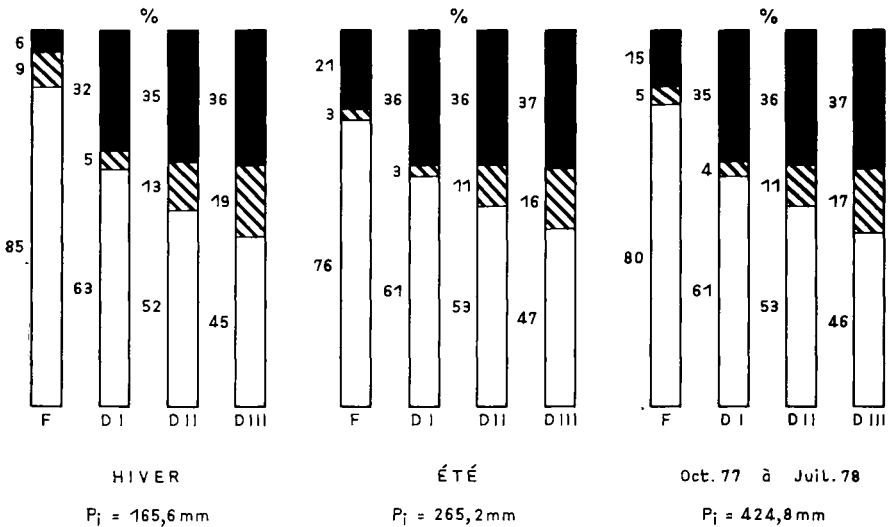


FIG. 1. — Influence des différents peuplements sur les précipitations : Interception (■), écoulement le long des troncs (▨), pluie arrivant directement au sol (□) en pourcentage des précipitations incidentes.

Influence of different stands on the rainfall : rainfall interception (■), stemflow (▨), throughfall (□) in percentage of rainfall.

D'une façon générale l'interception est plus faible dans le peuplement feuillu (6 p. 100 en hiver et 21 p. 100 en été) que dans les peuplements résineux (de 32 p. 100 à 37 p. 100 selon le peuplement et la saison).

L'interception est la plus importante en été, mais l'écart saisonnier est seulement de 1 à 4 p. 100 chez les Douglas alors qu'il est de 15 p. 100 dans le peuplement feuillu (Hêtre). Chez ce dernier en hiver, au-delà de 2 mm l'interception représente 10 p. 100 de P_i alors qu'en été elle correspond à 20 p. 100 de P_i quand les précipitations dépassent 4 mm.

Il y a peu de différences dues à la densité entre les trois peuplements de Douglas. Le pourcentage d'interception varie de 35 à 37 p. 100 quand la densité du peuplement passe de cinq cent trente-huit tiges/ha à deux mille deux cent vingt-neuf tiges/ha.

La densité a cependant une grande influence sur la répartition de l'eau au sol (fig. 2).

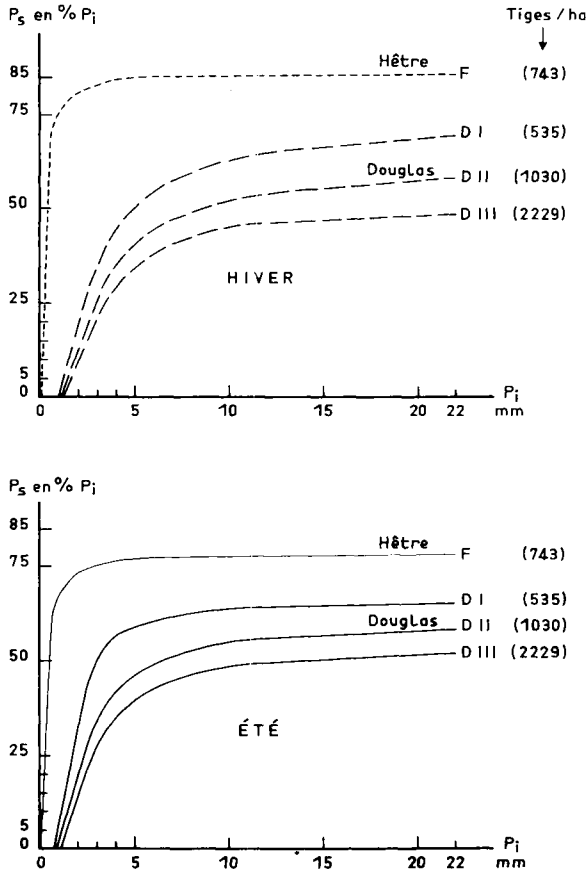


FIG. 2. — Précipitations arrivant directement au sol (P_s) en fonction de la pluie incidente (P_i) en hiver (---) et en été (—).

Relationship between throughfall (P_s) and rainfall (P_i) during winter and during summer.

La différence d'interception s'explique par des différences de capacité de saturation (S) des houppiers. Nous avons calculé les paramètres à partir des pluies nocturnes, continues et importantes (Aussenac, 1968). Les chiffres obtenus font apparaître des différences importantes entre les Douglas et la hêtre.

Douglas I	$s = 3,6 \text{ mm} \pm 0,7$	(densité 535 tiges/ha)
Douglas II	$s = 3,7 \text{ mm} \pm 0,8$	(densité 1 030 tiges/ha)
Douglas III	$s = 3,9 \text{ mm} \pm 0,8$	(densité 2 229 tiges/ha)
Feillus (Hêtre)	$s = 1,7 \text{ mm} \pm 0,5$	(densité 743 tiges/ha).

On constate que la capacité de saturation des houppiers est deux fois plus importante chez les Douglas que chez le Hêtre. Ces résultats montrent que dans des conditions climatiques identiques la quantité d'eau interceptée par un peuplement forestier dépend principalement de la capacité de saturation des houppiers. Cette dernière est caractéristique de l'essence car elle est fonction de la surface et de la morphologie des feuilles et des branches.

Lorsque la densité augmente on observe une diminution de P_s qui est compensée par une augmentation de l'écoulement le long des troncs P_t .

Dans les quatre peuplements étudiés l'écoulement le long des troncs représente une fraction non négligeable des précipitations arrivant au sol. En valeur relative (p. 100 de P_i), elle est plus importante en hiver qu'en été (fig. 3). La différence saisonnière est la plus élevée chez les feuillus.

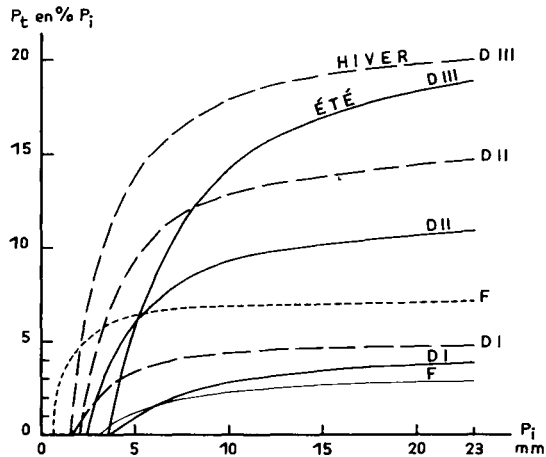


FIG. 3. — Ecoulement le long des troncs (P_t) en fonction de la pluie incidente (P_i) en hiver (---) et en été (—).

Relationship between stemflow (P_t) and rainfall (P_i) during winter and during summer.

Au niveau du peuplement la densité influence beaucoup l'écoulement le long des troncs. Chez le Douglas pour la totalité de la période d'étude il passe de 4 p. 100 de P_i pour la densité la plus faible à 17 p. 100 pour la densité la plus forte. Mais au niveau de l'écoulement moyen par arbre (tabl. 2a), on remarque que l'écoulement est le plus fort dans le peuplement de densité moyenne et le moins important dans celui de densité

la plus faible. En d'autres termes, l'écoulement n'augmente pas avec le diamètre de l'arbre moyen comme cela était le cas dans les mêmes peuplements âgés de 15 ans (tabl. 2b). A ce moment-là les peuplements étaient fermés et la morphologie des houppiers était identique. L'éclaircie qui a été effectuée en 1973 dans le peuplement de Douglas I (au départ avant éclaircie même densité que le peuplement de Douglas II : mille trente tiges/ha) a eu pour effet de modifier la structure des couronnes des arbres de cette parcelle, il en est résulté un écoulement moindre.

TABLEAU 2

a) *Influence de la densité sur l'écoulement moyen le long des troncs dans les peuplements de Douglas âgés de 23 ans pour une pluie incidente (P_i) de 424,8 mm*

a) *Mean stemflow as influenced by density in 23 years old Douglas fir stands for 424,8 mm rainfall*

	Densité (tiges/ha)		
	535	1 030	2 229
Diamètre moyen à 1,30 m (cm)	23,0	21,2	16,8
Épaisseur du houppier (m)	10,2	9,1	5,6
Écoulement moyen par arbre (litres)	267,7	513,2	348,2
Écoulement pour le peuplement (m ³ /ha)	143,2	528,6	776,1

b) *Influence de la densité sur l'écoulement moyen le long des troncs dans les mêmes peuplements de Douglas âgés de 15 ans pour une pluie incidente (P_i) de 460,4 mm (Aussenac, 1975)*

b) *Mean stemflow as influenced by density in the same 15 years old Douglas fir stands for 460,4 mm rainfall*

	Densité (tiges/ha)			
	1 118	1 484	2 310	4 265
Écoulement moyen par arbre (litres)	253,5	236,7	239,8	161,9
Écoulement du peuplement (m ³ /ha)	283,4	351,2	553,9	690,5

3.2. — Les fluctuations de nappes perchées

Dans les peuplements, les fluctuations des nappes perchées dépendent, toutes choses égales par ailleurs, de l'importance de l'évapotranspiration réelle. L'étude détaillée de l'évolution de la hauteur des nappes permet donc d'apprécier l'influence des peuplements sur le bilan hydrique particulièrement pendant l'hiver où les mesures d'évapotranspiration réelle sont difficiles.

Le niveau moyen de la nappe dans un peuplement a été évalué chaque jour en effectuant la moyenne des valeurs relevées dans chacun des tubes. Dans les peuplements I et III de Douglas il y a peu de différences entre les tubes, par contre dans les deux autres peuplements (Douglas II et Feuillus), le coefficient de variation atteint souvent 40 p. 100. Il est maximum au moment de l'apparition et de la disparition des nappes.

L'hétérogénéité dans le niveau moyen de la nappe peut être expliquée par le

fait que dans ce type de substrat il ne s'agit pas véritablement d'une nappe continue mais d'une série de poches liées à l'hétérogénéité de la macroporosité.

L'évolution des nappes est très voisine dans les différents peuplements.

Les différences de niveau de la nappe peuvent s'expliquer en partie par la profondeur plus ou moins importante du plancher du pseudogley. Il est en fait difficile de situer le plancher du pseudogley car il débute souvent progressivement. Nous avons calculé l'écart-type de la moyenne des humidités volumiques pour chaque profondeur (fig. 4).

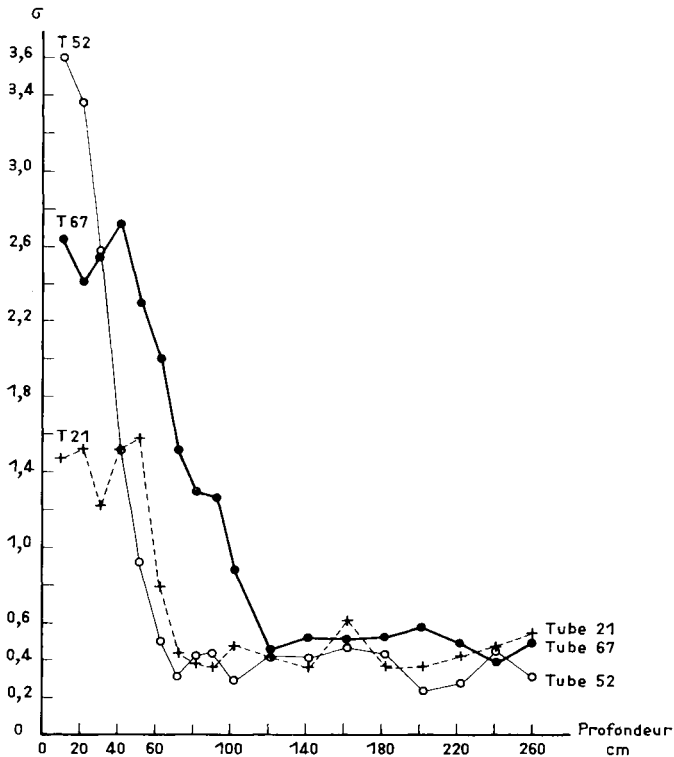


FIG. 4. — Variabilité de l'humidité volumique du sol (écart-type de la moyenne) avec la profondeur du sol pour quelques tubes.

Variability of volumetric soil humidity with the soil depth for different tubes.

On constate que, à un certain niveau, l'écart-type (σ) baisse nettement et reste ensuite sensiblement constant lorsque la profondeur augmente. On définit ainsi une zone de discontinuité où les fluctuations de teneur en eau sont limitées. On a alors évalué la profondeur d'apparition du pseudogley par le niveau où l'écart-type (σ) est $\leq 0,6$.

Les nappes ont apparu simultanément dans tous les peuplements entre le 6 et le 8 novembre 1977, ensuite les périodes de disparition ont été assez brèves en raison de l'abondance des précipitations.

Pendant l'hiver la nappe est plus haute sous les feuillus, l'écart s'atténue en mars et les nappes disparaissent ensemble au cours de la première semaine de juin. Ensuite la nappe réapparaît sous tous les peuplements entre le 20 juin et le 15 juillet, mais elle est plus haute sous les résineux. Elle réapparaît même uniquement sous les Douglas le 2 août.

Chez les Douglas on constate d'autre part une disparition temporaire de la nappe dans la deuxième quinzaine d'avril.

Ces différences entre résineux et feuillus déjà mises en évidence en forêt d'Amance par Levy (1969) s'expliquent par le « redémarrage » plus précoce de la transpiration chez les Douglas, alors que le Hêtre n'est pas encore feuillé. A partir du 10 mai les Hêtres sont feuillés : on note alors que la nappe baisse plus vite dans ce peuplement que dans les Douglas, si bien qu'il n'y a plus de différence dès le 1^{er} juin et par la suite la nappe reste plus basse sous la hêtraie. On peut interpréter cette évolution comme le résultat d'une transpiration plus importante du peuplement feuillu dès que les arbres sont feuillés.

A partir des mesures journalières hivernales de la hauteur des nappes, il a été possible d'établir pour chaque peuplement des équations liant la variation journalière de la nappe (Δn) le jour « j » à la profondeur de la nappe le jour « j - 1 » et aux précipitations au sol ($P_s + P_f$) le jour « j - 1 ». En hiver, on a supposé que la transpiration était négligeable, les fluctuations de la nappe n'étant dues qu'aux précipitations au sol et à l'écoulement profond et latéral. Le début de la transpiration peut être détecté à partir de la comparaison des tracés des hauteurs calculées et des hauteurs mesurées des nappes puisque les équations de prédiction ont été établies pendant des périodes à transpiration négligeable.

Pendant la période hivernale, les écarts sont faibles sauf en mars après une période de neige suivie de gel ; chez les Douglas des différences existent au mois d'avril ce qui révèle une augmentation de la transpiration, en mai les différences sont faibles, indice d'une baisse de la transpiration pendant cette période, en juin l'écart redevient important.

Chez le peuplement feuillu, des différences importantes entre hauteur calculée et hauteur mesurée de la nappe apparaissent fin mai, ce qui correspond à la feuillaison.

Ainsi les résultats confirment les conclusions obtenues à partir de l'étude directe de la fluctuation des nappes.

3.3. — L'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle a été évaluée à l'aide de l'équation (2) pour les périodes où il n'y avait pas d'écoulement.

Le tableau 3 rapporte les résultats obtenus pour la période du 13.7.78 au 24.10.78.

On constate que sur cette période c'est le peuplement de Douglas I, de densité (cinq cent trente-cinq tiges/ha) la plus faible qui a évapotranspiré le moins ; alors que le peuplement IV de densité élevée (trois mille quatre-vingt-six tiges/ha) a évapotranspiré le plus ; l'écart entre les deux étant de 44,5 mm, soit 25,7 p. 100 en plus. Les autres peuplements de Douglas (II, III) et le peuplement feuillu ont des évapotranspirations très proches, l'écart avec le Douglas IV est très faible.

TABLEAU 3

Bilan hydrique des peuplements étudiés pour la période du 13.7.78 au 24.10.78 (en mm)

Water balance (mm) in the studied stands from the 13.7.78 to the 24.10.78

	Précipitations incidentes P_i	Écoulement le long des troncs $(^2)$ P_t	Précipitations au sol $(^2)$ P_s	Inter- ception $(^2)$ I_n	Évapotrans- piration réelle ETR	Évapotrans- piration potentielle $(^1)$ ETP	ETR/ETP
<i>Douglas I</i> (535 tiges/ha)	147,5	2,8	88,9	58,6	173,3	229,9	0,75
<i>Douglas II</i> (1 030 tiges/ha)	147,5	9,8	80,9	66,6	210,7	229,9	0,92
<i>Douglas III</i> (2 229 tiges/ha)	147,5	13,7	75,5	72,0	211,1	229,9	0,92
<i>Douglas IV</i> (3 086 tiges/ha)	147,5	10,5	95,6	51,9	217,8	229,9	0,94
<i>Feuillus</i> (743 tiges/ha)	147,5	2,5	113,5	34,0	208,3	229,9	0,91

(¹) Calculé à partir de la formule Brochet-Gerbier (1972) $ETP = mRg + nEp$.

(²) Calculé pendant cette période à partir des données obtenues sur les périodes précédentes.

Sur la période 13.7.1978-13.11.1978, la figure 5 montre l'évolution de la réserve totale d'eau dans le sol (0-150 cm) des différents peuplements étudiés. On peut noter une évolution parallèle avec le temps. Dans le Douglas I, le prélèvement d'eau sur la réserve est beaucoup plus faible que dans les autres peuplements. A partir du 24.10.78 la réserve dans le peuplement feuillu augmente légèrement alors qu'elle continue à baisser dans les Douglas. C'est l'indice d'une baisse de l'évapotranspiration que l'on peut attribuer au jaunissement, puis au commencement de la chute des feuilles. Il faut cependant ajouter que la réduction d'évapotranspiration par rapport aux résineux n'est à ce moment-là pas du tout spectaculaire comme on aurait pu l'imaginer *a priori*.

4. — Discussion et conclusion

Au cours de la période d'étude, l'interception a été de 15 p. 100 dans le peuplement de Hêtre de 80 ans et de 35 à 37 p. 100 dans les peuplements de Douglas âgés de 23 ans. Cette différence s'explique par la capacité de saturation plus élevée des résineux. L'interception du peuplement feuillu est minimum en hiver (6 p. 100) lorsque la chute des feuilles a provoqué une diminution de la capacité de saturation des houppiers. C'est donc pendant cette période que la différence d'interception entre les résineux et les feuillus est la plus importante (de 26 à 30 p. 100 de P_i).

La densité joue un rôle important dans la redistribution de la pluie au sol ; dès que le couvert est refermé la valeur relative de l'interception varie peu.

Des mesures identiques avaient été faites (Aussenac, 1975) sur les mêmes peuplements âgés de 15 ans. Sur la figure 6 on peut remarquer que l'écoulement le long des troncs était moins important et que la hauteur d'eau arrivant directement au sol était

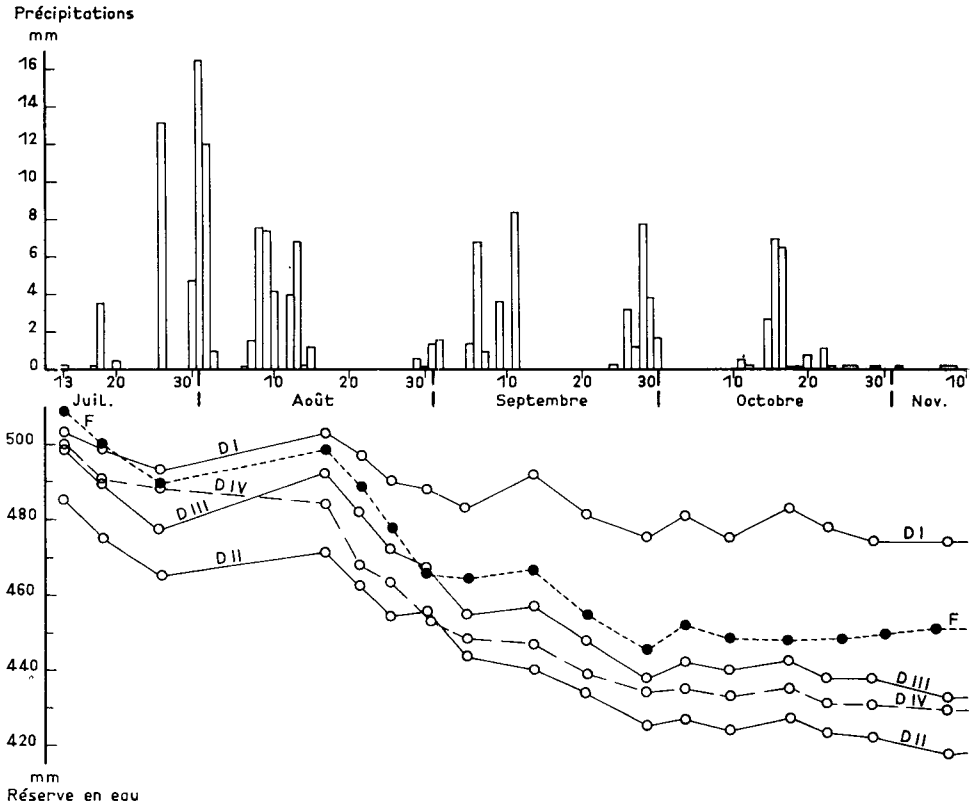


FIG. 5. — Variation de la réserve en eau du sol dans les peuplements étudiés au cours de la période du 13.7.78 au 10.11.78.

Variation of the soil water content in the stands from 13.7.78 to 10.11.78.

plus grande ; globalement la quantité d'eau interceptée était finalement très voisine, bien que légèrement inférieure à celle que nous avons évaluée ici. On voit que l'interception d'un peuplement fermé de Douglas varie peu avec l'âge et la densité à partir du moment où le couvert est fermé.

Les résultats obtenus par différents auteurs (McMinn 1960 ; Rothacher, 1963 ; Mitscherlich *et al.* 1970 ; Aussenac, 1975) et les nôtres permettent d'essayer de voir comment varie l'interception avec l'âge (fig. 9). On remarque que dès 15 ans la valeur relative de l'interception est très élevée. Ensuite elle varie de 30 à 40 p. 100 de la pluviosité incidente selon les densités et les régimes climatiques.

Les peuplements de Hêtre sont en général issus de génération naturelle, ils sont donc souvent plus hétérogènes, aussi l'interception varie beaucoup d'un peuplement à un autre. Dans l'ensemble nos résultats paraissent plus faibles, à âge égal, que ceux observés par d'autres auteurs (Hoppe, 1896 ; Cepel 1967 ; Bruhlart, 1969 ; Bretchel, 1969 ; Aussenac, 1968, Mitscherlich *et al.* 1970, Nihlgard 1970, Abagiu *et al.* 1974, Aussenac, 1975).

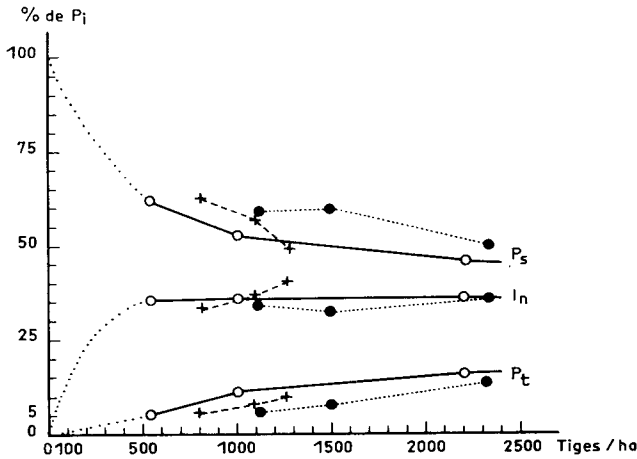


FIG. 6. — Influence de la densité sur l'interception (I_n), la pluie arrivant directement au sol (P_s) et l'écoulement le long des troncs (P_t) dans des plantations de Douglas. (0. nos résultats, + Mitscherlich et Moll 1970, ● Aussenac 1975).

Interception (I_n), throughfall (P_s) and stemflow (P_t) as influenced by density (0. our results, + Mitscherlich and Moll, 1970, ● Aussenac, 1975).

Sur la figure 7 on note que l'interception varie peu avec l'âge. En effet on remarque une interception élevée dès 30 ans, au-delà l'augmentation est faible. Il apparaît aussi que l'interception des hêtraies varie de 15 à 25 p. 100 selon l'âge.

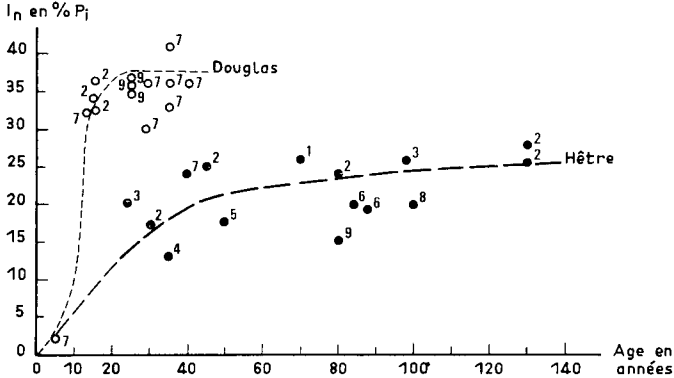


FIG. 7. — Influence de l'âge sur l'interception des précipitations chez le Douglas et le Hêtre. (1. Abagiu, 1974 ; 2. Aussenac, 1975 ; 3. Bretchel, 1969 ; 4. Brühlhart, 1969 ; 5. Cepel, 1967 ; 6. Hoppe, 1896 ; 7. Mitscherlich et Moll, 1970, 8. Nihlgard, 1970 ; 9. nos mesures).

Interception (I_n) as influenced by the age of the stands (Douglas and Beech).

L'écoulement le long des troncs est important chez les deux essences étudiées, cela tient probablement au fait que toutes deux ont une écorce lisse et un angle d'insertion des branches aigu. Alors que chez le Hêtre l'écoulement le long des troncs est important pendant toute la vie de l'arbre (Aussenac, 1975), il n'en est pas de même chez le Douglas, car chez cette dernière espèce se développe avec l'âge un rythidome important. Au-delà de 40 à 50 ans l'écoulement le long des troncs baisse. Pour le Hêtre

les valeurs que nous avons obtenues dans cette expérimentation sont plus faibles que celles relevées par plusieurs auteurs, en particulier Aussenac (1975) trouve dans des conditions identiques et pour un peuplement de même âge des écoulements plus importants (9,2 p. 100 sur l'année). Il est probable que ces différences peuvent s'expliquer dans notre cas par une mauvaise conformation des arbres souvent fourchus et inclinés, ce qui favorise les égouttements.

Une quantité très importante d'eau arrive donc au sol dans la proximité immédiate des troncs, ce phénomène est corrélé à la distribution des racines. Aussenac (1975), en effet a constaté que les espèces à fort écoulement avaient un enracinement ramifié et dense autour et sous le tronc, alors que les espèces à écoulement faible (Chêne par exemple) avaient un enracinement beaucoup moins dense à proximité immédiate du tronc.

L'évaluation de l'évapotranspiration réelle n'a pas été possible lorsqu'il y avait de l'écoulement latéral ou profond, mais l'étude de la profondeur des nappes perchées nous a permis de constater qu'au printemps l'évapotranspiration des résineux augmente beaucoup plus vite que celle des feuillus ainsi qu'il était possible de le prévoir *a priori*. Mais, après la feuillaison, les nappes disparaissent plus vite chez le Hêtre, à cause d'une évapotranspiration plus grande.

L'évapotranspiration est la plus faible (173,3 mm) dans le Douglas I caractérisé par une densité faible (cinq cent trente-cinq tiges/ha, surface terrière 22,3 m²/ha) et un couvert non complètement fermé. L'écart avec le peuplement II de même âge, mais de densité différente (mille trente tiges/ha, surface terrière 38,1 m²/ha) est de 37,4 mm, soit une diminution de 18 p. 100.

Les deux peuplements avaient au départ des densités voisines, mais en 1973 le Douglas I a été éclairci. La différence que nous notons en 1978, quatre ans après cette intervention sylvicole, doit être déjà atténuée. La diminution de l'évapotranspiration étant la plus importante l'année qui suit l'opération d'éclaircie (Anderson et al., 1975).

La comparaison des Douglas II, III et IV indique que dès 15 ans lorsque le couvert est fermé, l'évapotranspiration des Douglas est élevée. Il est probable qu'elle a atteint déjà un niveau proche du maximum.

Sur la période considérée l'évapotranspiration des feuillus est proche de celle des résineux (II, III et IV). L'albédo des feuillus étant globalement plus élevé que celui des résineux (17 p. 100 contre 12 p. 100, Ducrey, 1973), pour ces derniers il doit résulter dans le bilan d'énergie une plus forte proportion de chaleur sensible.

L'interception joue un rôle important dans l'évapotranspiration totale des peuplements (tabl. 3) ; elle représente en pourcentage de l'ETR sur la période 13.7.78-24.10.78, 33,8 p. 100 pour le Douglas I, 31,6 p. 100 pour le Douglas II, 34,2 p. 100 pour le Douglas III, 23,8 p. 100 pour le Douglas IV et 16,3 p. 100 pour les feuillus. Sur la figure 8, on voit que l'ETR est fonction de l'ETP, mais aussi de l'interception (I_n). Le rapport ETR/ETP peut dépasser 1 lorsque l'interception est importante (fig. 9). Aussi il apparaît ici que dans les climats très pluvieux ce rapport sera fréquemment supérieur à 1 à cause des pertes par interception. Ces résultats rejoignent ceux de Stewart (1977) qui montre, pour un peuplement de Pins, qu'en période pluvieuse l'évapotranspiration du couvert peut atteindre en termes de bilan d'énergie, un niveau supérieur au bilan radiatif net du peuplement.

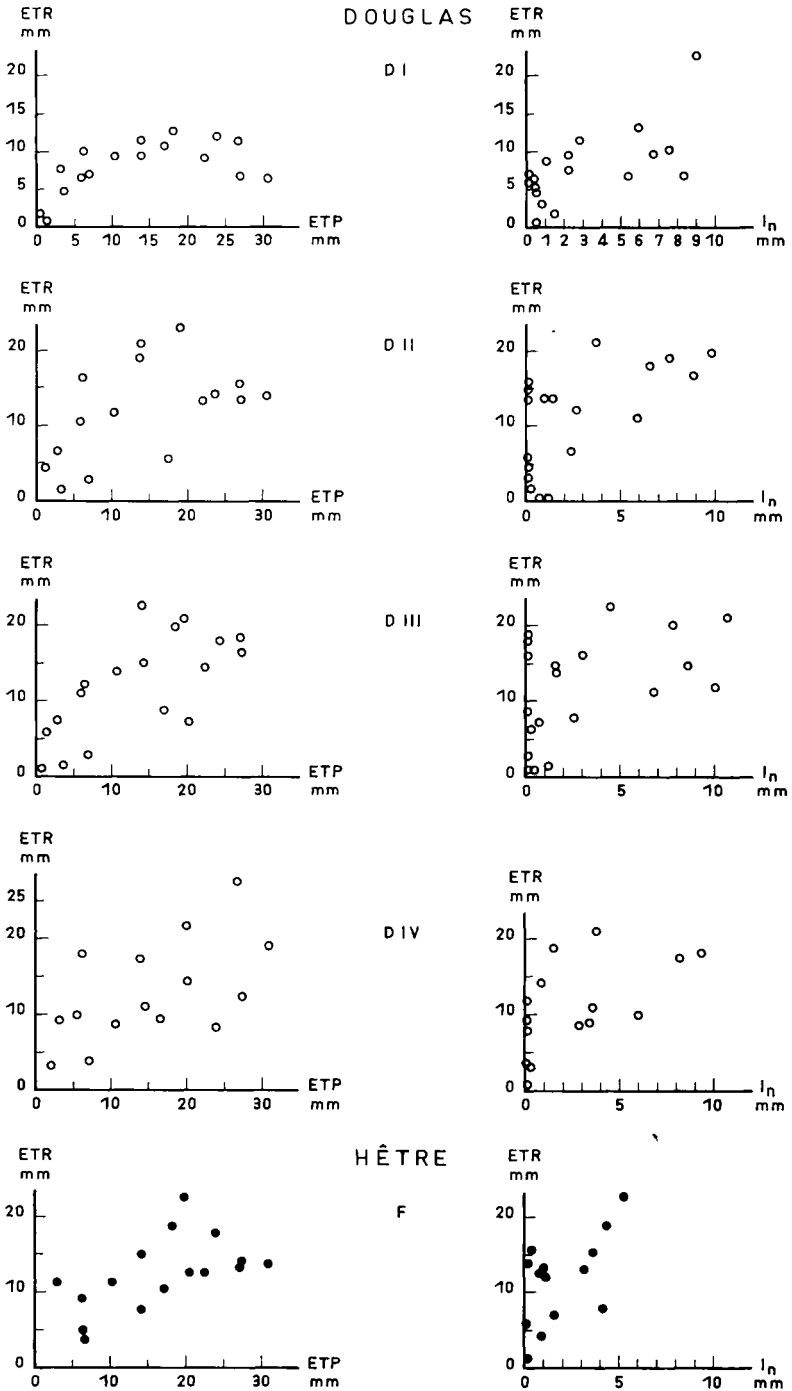


FIG. 8. — Relation entre l'évapotranspiration réelle (ETR) des peuplements et l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'interception (I_n) pendant la période du 18.7.78 au 24.10.78 (valeurs hebdomadaires).
 Relation between actual evapotranspiration (ETR) and potential evapotranspiration (ETP) and interception (I_n) (week datas) in the studied stands.

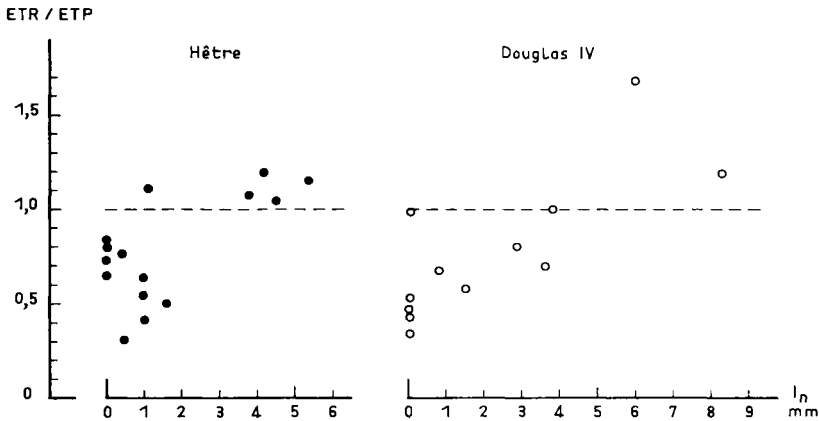


FIG. 9. — Relation entre le rapport ETR/ETP et l'interception (I_n) (valeurs hebdomadaires).
Relation between ETR/ETP ratio and interception (I_n) (week datas).

Il est difficile de comparer l'évapotranspiration des peuplements forestiers en raison de leur dynamique différente avec l'âge. Une façon d'opérer peut être de faire la comparaison de peuplements au moment où ils ont atteint leur potentialité maximum d'évapotranspiration. Or nous savons (Molchanov, 1963) que le moment où l'évapotranspiration des peuplements est la plus forte correspond à la période où l'accroissement courant est le plus élevé. Dans notre cas, l'étude des tables de production s'appliquant le mieux à nos peuplements (Decourt, 1967, 1973), nous montre que précisément ils sont à l'âge où leur accroissement courant est maximum. Ainsi nous constatons que dans cette période, pendant la saison de végétation, les consommations en eau d'un peuplement de Hêtre et d'un peuplement de Douglas sont très voisines bien que leurs âges soient différents. Mais, à âge égal, avant la période d'accroissement courant maximum, le Hêtre doit moins évapotranspirer que le Douglas, il en résulte des écoulements plus importants au niveau des bassins versants.

Reçu pour publication en août 1979.

Summary

Rainfall interception and actual evapotranspiration in broadleaved (*Fagus sylvatica* L) and coniferous stands (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco)

The rainfall interception and the evapotranspiration have been assessed in an 11 years old Douglas fir stand (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco, density : 3 086 stems/ha), three 23 years old Douglas fir stands (density : 530, 1 030 and 2 229 stems/ha) and an 80 years old Beech stand (density : 743 stems/ha).

In winter the interception amounted 6 p. 100 of the rainfall in the beech stand against 32 p. 100, 35 p. 100 and 36 in the three 23 years old Douglas fir stands.

In summer the interception increased in the beech stands (21 p. 100 of the rainfall), whereas it remained constant in the Douglas fir stands. The considerations of bibliographic datas showed that the interception in Douglas fir stands is already high at 15 years and increased only slightly till 50 years. In the Beech stand the interception averages 15 p. 100 of rainfall at 30 years and increase with age to reach 20-25 p. 100 at 100 years.

The actual evapotranspiration has been estimated weekly by using the relationship :

$$ETR = P_i - D - \Delta S .$$

ETR : actual evapotranspiration, P_i : rainfall.

D : lateral and vertical drainage

ΔS : fluctuation of soil water content.

The calculations have been done when no drainage occurred.

The fluctuations of the water soil content have been studied by utilization of a neutron probe. Results examinations show that in spring (leafless period) beech stand evapotranspiration is lower than that of the Douglas fir stands but in summer the evapotranspiration of the Beech stand is the same than that of the Douglas fir stands. In autumn with the leaves yellowing a slight differences has been noticed between Beech and Douglas fir stands.

The evapotranspiration of the lower density Douglas fir stand (530 stems/ha) was lower (18 p. 100-27 p. 100) than that the others.

The interception has a great importance in the evapotranspiration of the stands. The ETR/ETP ratio exceeds 1 when the interception is important.

Références bibliographiques

- ABAGIU P., MONTEANU S. A., GASPARD R., 1974. Cercetari asupra rolului hidrologic al padurii in bazinele hidrographice mici. *Studii si cercetari*, vol. XXIX, 353-391.
- ANDERSON H. W., HOOVER M. D., REINHART K. G., 1976. Forests and water : effects of forest management on floods, sedimentation and water supply. *USDA Forest Serv. gen. Tech. Rep.*, P.S.W. 18, 115 p.
- AUSSENAC G., 1968. Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. Forest.*, 25 (3), 135-156.
- AUSSENAC G., 1972. Etude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers dans l'est de la France. *Ann. Sci. Forest.*, 29 (3), 369-389.
- AUSSENAC G., 1975. Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions, conséquences écophysologiques chez quelques résineux. *Thèse d'Etat*, Nancy, 234 p.
- AUSSENAC G., GRANIER A., 1979. Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'est de la France. II. Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Ann. Sci. Forest.*, 36 (4) 265-280.
- BARTOLI M., DECOURT N., 1971. Densité de plantation. Etude bibliographique et premiers résultats d'une expérience sur Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Ann. Sci. Forest.*, 28 (1). 51-58.
- BOULANGEAT C., 1978. Influence de la forêt sur le cycle de l'eau. Etude comparative de l'interception et de l'évapotranspiration d'un peuplement feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de quatre peuplements de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb). *Mémoire E.N.I.T.E.F.*, 40 p.
- BROCHET P., GARNIER N., 1972. Une méthode pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 23 (1), 31-49.
- BRUHLART A., 1969. Jahreszeitliche Veränderungen der Wasserbindung und der Wasserbewegung in Waldböden des Schweizerischer Mittellandes. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.*, 45 (2), 127-232.
- CEPEL N., 1967. Interzeption in einem Buchen, einem Eichen und einem Kiefernbestand des Belgrader Waldes bei Istanbul. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 5, 301-314.
- DECOURT N., 1967. Le Douglas dans le Nord-Est du Massif Central. *Ann. Sci. Forest.*, 24 (1), 45-84.
- DECOURT N., 1973. Tables de production pour les forêts françaises, 49 p. *Centre National de Recherches Forestières*. Ed. Engref Nancy.
- DUCREY M., 1973. Appréciation du rayonnement solaire dans et sous le couvert forestier. *Communication présentée au Congrès « Le soleil au service de l'homme » UNESCO 1973*, 13 p. dactylographiées.
- HOPPE E., 1896. Regenmessung unter Baumkronen. *Mitt. aus dem Forstlichen Versuchswesen Osterreichs*, 21, 1-95.
- LEVY G., 1969. Premiers résultats d'étude comparée de la nappe temporaire des pseudogleys sous résineux et sous feuillus. *Ann. Sci. Forest.*, 26 (1), 65-79.
- McMINN R. G., 1960. Water relation and forest distribution in the Douglas fir region of Vancouver Island. *Div. Forest. Biol., Dept. Agr. Can. Pub.* 1091 in Zinke P. J. 1967. Forest interception studies in U.S.A. 137-161 International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press.

- MITSCHERLISCH G., MOLL W., 1970. Untersuchungen über die Niederschlags und Boden Feuchtigkeitsverhältnisse in einigen Nadel und Laubholzbeständen in der Nähe von Freiburg/Br. *Allgemeine Forst., u. J. Ztg* (141), 49-60.
- MOLCHANOV A. A., 1963. The hydrological role of forests. *Israel Program for scientific translations*, Jerusalem, 405 p.
- NIHLGARD B., 1970. Precipitation, its chemical composition and effect and soil water in a beech and a spruce forest in south Sweden. *Andelsbogtrykkeriet i Odense*, (21), 209-217.
- ROTHACHER J., 1963. Net precipitation under a douglas fir forest. *Forest Sci.*, 23-29.
- RUTTER A. J., 1968. Water consumption by forests. In *water deficits and plant growth*, 2, 23-84. *Academic Press*, New York.
- RUTTER A. J., 1975. The hydrological cycle in vegetation. In *vegetation and the atmosphere I* (J. L. Monteith éd.), 111-154. *Academic Press* London.
- STEWART J. B., 1977. Evaporation from the wet canopy of a Pine Forest. *Water Resources Research*, 13 (6), 915-921.
-