

ESTIMATION DE L'INFLUENCE DE LA COUVERTURE FORESTIÈRE SUR LES PLUIES EN MONTAGNE : EXEMPLE DU MASSIF DE LA CHARTREUSE

DOMINIQUE DUMAS

En Chartreuse, la forêt occupe une place paysagère et économique très importante. L'objectif de cette étude vise à cerner l'influence de cette couverture forestière sur les précipitations. En effet, au cours d'une averse, la forêt intercepte et retient un pourcentage plus ou moins élevé des pluies sur son feuillage (Bultot *et al.*, 1972 ; Aussenac, 1975, 1981 ; Petit et Kalombo, 1984 ; Humbert et Najjar, 1992 ; Gash *et al.*, 1995 ; Llorens et Gallart, 2000 ; Carlyle-Moses, 2004). Une partie de cette eau interceptée est ensuite évaporée, diminuant la quantité d'eau réellement reçue par le sol, et ainsi l'eau susceptible de se retrouver dans le réseau hydrographique, ou dans les aquifères karstiques. Le bilan hydrologique est modifié, avec une quantité d'eau éventuellement disponible pour l'écoulement, ou les réserves souterraines, plus réduite que celle définie traditionnellement à partir des relevés météorologiques. Sur le massif de la Chartreuse, où la couverture forestière tient une place majeure (65 % de sa superficie), quelles sont les précipitations arrivant réellement au niveau du sol ? L'interception des pluies par la forêt est dans un premier temps appréciée, à une échelle locale, avec des mesures pluviométriques conduites directement en milieu forestier. Puis, dans un deuxième temps, à partir des relations trouvées entre les pluies météorologiques et l'importance de l'interception, l'influence de la forêt sur les précipitations est établie à l'échelle de l'ensemble du massif.

FORÊT CHARTROUSSINE ET SITE ÉTUDIÉ

Avec des altitudes s'échelonnant entre 300 m et plus de 2 000 m, une altitude moyenne proche de 1 060 m, le massif de la Grande Chartreuse reste un massif préalpin de faible étendue ; sa superficie est d'environ 400 km², et 42 km seulement séparent les cluses de Grenoble et de Chambéry (figure 1, p. 713). Il est limité à l'est par la vallée du Grésivaudan, au sud et au nord, par les cluses de Grenoble et de Chambéry, et à l'ouest par les collines du Bas-Dauphiné. Comme sur l'ensemble des massifs préalpins, le massif de Chartreuse se caractérise par une forêt fortement présente dans le paysage. Elle occupe près de 260 km², et couvre ainsi environ 65 % de sa superficie (IFN, 2006). L'étagement de la végétation est bien marqué, et se distingue principalement par une vaste série climacique, une hêtraie-sapinière, relayée, au-dessus de 1 500 m, par une pessière (Tonnel et Ozenda, 1964 ; Richard et Pautou, 1982). Avec près de 66 % de la couverture arborée totale, la hêtraie-sapinière, où l'Épicéa et le Sapin se mêlent progressivement aux Hêtres, est la plus présente sur l'ensemble du massif. Plus bas, la hêtraie "pure" y représente presque 10 % (Tonnel et Ozenda, 1964 ; Richard et Pautou, 1982 ; IFN, 2006). Plus en

altitude, la pessière, composée essentiellement de *Picea excelsa* et d'*Abies alba*, est la seconde série forestière du massif. Elle représente environ 33 % des espèces arborées de Chartreuse.

La parcelle du “Mont Flottey”, de la forêt communale du Sappey-en-Chartreuse, a été retenue pour cette étude avec l'aide et les conseils de M. Remillier, agent de l'ONF (figure 1, ci-contre, p. 713). D'une superficie de 1,63 ha et d'orientation sud-sud-est, elle se situe entre 1 170 m et 1 220 m d'altitude. Nous avons recherché les relations entre les caractéristiques de la couverture forestière de la parcelle et les pluies arrivant au sol. La densité de la formation arborée est de 170 tiges/ha pour les feuillus (pour un diamètre supérieur à 20 cm), et de 130 tiges/ha pour les résineux (Girard, 2003). En étant légèrement inférieure, elle rejoint la densité arborée du massif, située en moyenne à 200 tiges/ha (communication orale de M. Remillier). Le taux de couverture a été apprécié à partir de photographies prises au niveau du sol, à hauteur des pluviomètres, puis numérisées, afin d'évaluer le degré d'ouverture des formations arborées. Sur l'ensemble de la parcelle, en période estivale, la visibilité moyenne du ciel est de 15 % et passe à 24 % en hiver. Cependant, nous n'avons pas observé de relation simple entre la plus ou moins grande ouverture de la forêt et les pluies arrivant au sol.

Tant par sa position altitudinale, proche de l'altitude moyenne du massif (1 060 m), que par sa couverture forestière, qui associe les peuplements forestiers dominants du massif, cette parcelle est relativement représentative de la forêt chartroussine. En effet, la hêtraie-sapinière et la hêtraie couvrent respectivement 43 % et 19 % de la superficie de la parcelle, et la pessière 38 %. Dans le cadre de ce travail, un seul site a été retenu, afin d'obtenir un maillage de mesures relativement resserré, et d'obtenir ainsi des observations significatives. Néanmoins, il est certain qu'il aurait été souhaitable de multiplier les sites d'observation, afin de mieux appréhender la complexité et la diversité de ce milieu forestier, et les variations spatiales conséquentes de l'interception des précipitations.

INFLUENCE DE LA FORÊT SUR LES QUANTITÉS D'EAU ARRIVANT AU SOL

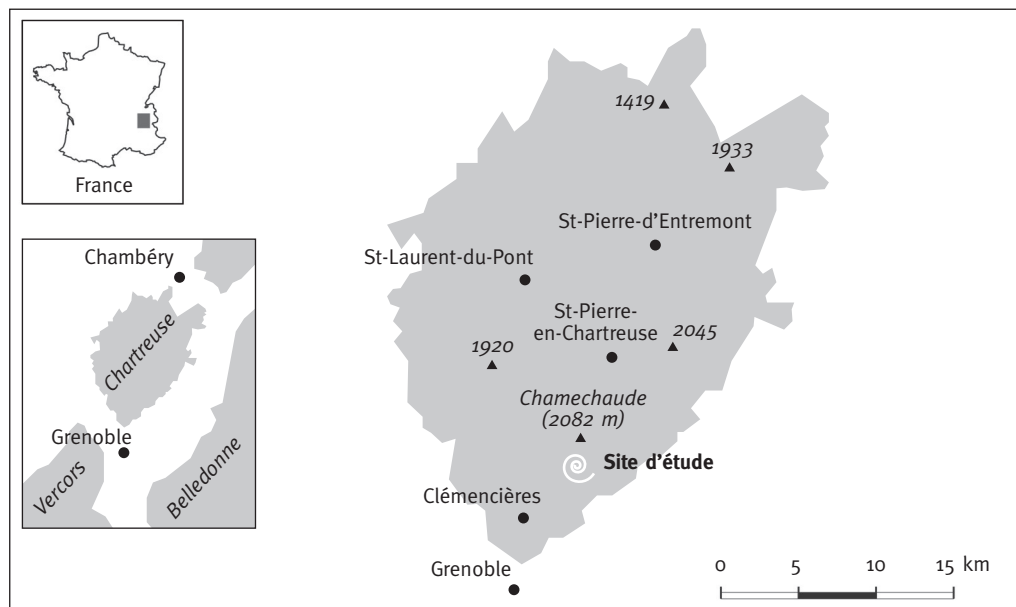
Les mesures

La présence de la forêt complique considérablement l'arrivée de l'eau au niveau du sol, par un processus d'interception qui retient une fraction variable des pluies, susceptible ensuite de s'évaporer plus ou moins rapidement (Bultot *et al.*, 1972 ; Aussenac, 1981 ; Petit et Kalombo, 1984 ; Carlyle-Moses, 2004). Dans un milieu forestier, il est possible de décomposer les pluies parvenant sur un peuplement, pluies généralement définies à partir des relevés météorologiques classiques. Ainsi, ces pluies incidentes (P_i) sont équivalentes à la somme, d'une part, des pluies parvenant plus ou moins directement au sol (P_s) et par des écoulements le long des troncs (P_t), et d'autre part, de la quantité d'eau retenue par l'interception (I_n). Les pluies arrivant au niveau du sol (P_s) sont directement estimées à partir de mesures conduites à même le sol ; elles intègrent à la fois le processus d'égouttement, après rétention momentanée par les surfaces végétales, et les pluies parvenant directement au sol sans avoir été freinées par la végétation.

Si les différents flux précipités (P_i , P_t et P_s) peuvent être appréciés directement à partir de mesures, il n'en est pas de même pour l'interception (I_n) qui doit être calculée par différence. L'interception est alors le résultat de la différence entre les précipitations incidentes (P_i) et les précipitations traversant la canopée associées à celles ruisselant le long des troncs ($P_s + P_t$) :

$$I_n = P_i - (P_s + P_t) \quad (\text{valeurs en mm})$$

FIGURE 1 LOCALISATION DU MASSIF DE CHARTREUSE ET DE LA ZONE EXPÉRIMENTALE



Dans le cadre de cette étude, sur la cinquantaine de pluviomètres initialement installés, et après la destruction de certains d'entre eux, 44 ont été utilisés sur toutes les campagnes de mesures afin d'apprécier les précipitations incidentes, ruisselant le long de troncs, et arrivant au niveau du sol. Deux pluviomètres à lecture directe ont été installés en plein champ, à proximité immédiate de la zone expérimentale. En outre, deux pluviographes, installés dans la commune du Sapey-en-Chartreuse, et au col de Clémencières, permettent de compléter ces mesures, et de mieux définir les précipitations incidentes. L'évaluation des précipitations ruisselant le long des troncs a été conduite à partir de serpentins collecteurs installés sur deux hêtres, de différentes tailles, sur un épicéa et sur un sapin. Les eaux ont été recueillies dans un collecteur accroché directement aux arbres. La mesure initiale porte sur un volume d'eau, qui est ensuite transformé en lame d'eau en le rapportant à la surface de la projection horizontale des cimes de l'arbre.

La recherche des quantités d'eau traversant la canopée et parvenant au sol, a amené, afin de réduire les effets de l'hétérogénéité du couvert forestier, la mise en place d'un grand nombre de pluviomètres. Au total, sur l'ensemble des campagnes de mesures, 42 pluviomètres à lecture directe ont été disposés au sol selon un quadrillage relativement constant dans les trois grandes formations arborées, à une distance de 5 m environ. Ponctuellement, un maillage plus resserré a été mis en place autour de deux arbres témoins : cinq pluviomètres sous un hêtre et six pluviomètres sous un épicéa, alignés et disposés radialement à des distances de 60 cm à 1 m depuis le tronc. À partir de ces mesures ponctuelles, et afin de dégager des valeurs moyennes, une spatialisations des observations a été systématiquement conduite. Ainsi, pour chaque épisode pluvieux, et pour les trois formations arborées de la parcelle, des moyennes spatiales des précipitations parvenant au sol sont calculées (hêtraie-sapinière, hêtraie et pessière). Si le maillage relativement resserré des postes de mesure limite le poids de l'algorithme d'interpolation sur les résultats finaux, plusieurs algorithmes d'interpolation ont cependant été testés. En minimisant les résidus, un krigeage linéaire, avec un coefficient d'anisotropie déterminé à partir du calcul des variogrammes, était le plus adapté.

Au total, entre décembre 2002 et décembre 2004, après avoir éliminé certaines séries de relevés⁽¹⁾, ces mesures s'appuient sur 26 campagnes de mesures conduites après des journées pluvieuses. Par ailleurs, la répartition temporelle des mesures offre la possibilité d'évaluer non pas strictement des taux saisonniers, car les mesures n'ont pas été continues sur une année, mais des tendances saisonnières de l'interception.

Les mesures, en effet, n'ont pas été effectuées lors des épisodes neigeux, trop peu nombreux en 2003, et au début de l'année 2004. Un dispositif adapté aurait, en effet, été nécessaire pour définir l'interception de la neige dont les mécanismes sont certainement plus complexes à apprécier. La chute au sol de la neige accrochée aux arbres est très ponctuelle, elle s'effectue le plus souvent par paquets neigeux, qui peuvent échapper aux mesures. Si les précipitations neigeuses n'ont pas été prises en compte, elles sont néanmoins relativement réduites par rapport aux précipitations liquides, à l'échelle du massif et à l'échelle d'une année. Le coefficient de niviosité (la part des précipitations solides sur les précipitations totales) avoisine 2 % en moyenne sur une année à 750 m (moyenne entre 2002 et 2006 à la station de Clémencières).

Les mesures n'ont pas non plus porté sur les précipitations dites occultes, liées aux brouillards (d'ailleurs peu fréquents sur l'ensemble du massif, sauf dans certaines vallées étroites) ou à la rosée. Cela pourrait amener une sous-estimation des pertes par interception. Le pluviographe de la station de Clémencières montre en effet, certains matins, que des précipitations de 0,1 à 0,3 mm sont directement liées à la condensation sur les parois de l'entonnoir. Ces mesures restent néanmoins insuffisantes pour apprécier le rôle et la part de ces précipitations occultes. Une étude plus complète, amorcée dans les environs de Grenoble (Sercki, 2004), aurait pu permettre de mieux cerner la part de ces précipitations occultes, souvent évoquées pour le massif de la Chartreuse, mais à ce jour jamais véritablement mesurées.

Dans le cadre de ce travail, les estimations finales sont conduites à l'échelle annuelle et ne nécessitent donc pas une connaissance précise de la variation saisonnière de l'interception des précipitations par les formations forestières. Ces tendances permettent en revanche de vérifier la bonne cohérence des valeurs annuelles moyennes issues d'observations non continues sur une année.

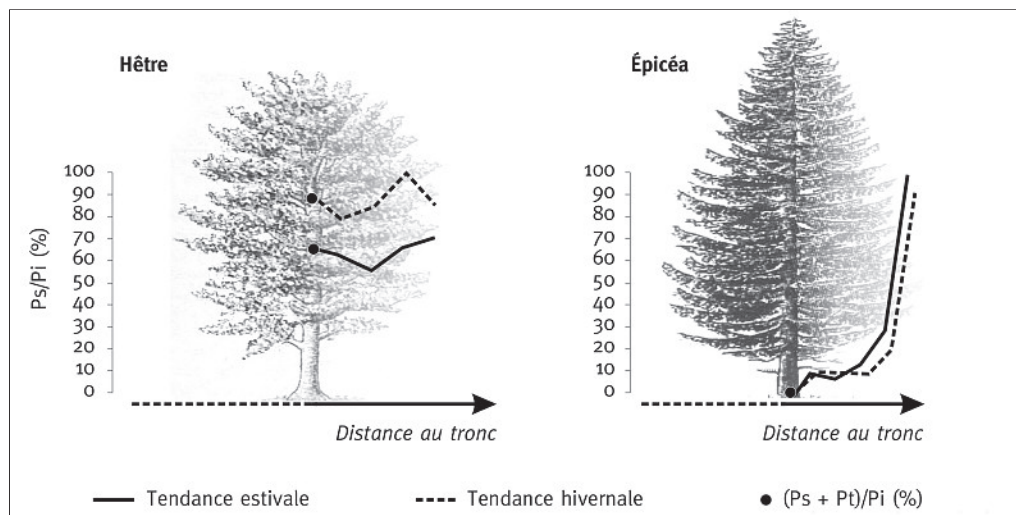
Interception des pluies à l'échelle d'un arbre

D'une manière générale, lorsqu'une goutte de pluie tombe près d'une pousse terminale, elle rencontre alors un houppier épais, et la probabilité qu'elle reste accrochée dans le feuillage est donc plus grande. À l'inverse, si une goutte d'eau tombe en limite de houppier, ou dans une trouée forestière, elle a bien évidemment plus de chance d'atteindre directement le sol. En forêt, cette variabilité de la pluviosité locale reste à nuancer selon les espèces concernées. En effet, de nombreux travaux montrent que l'interception des pluies est variable selon les espèces arborées (Fardjah, 1978 ; Aussenac, 1981 ; Nizinski et Saugier, 1988). La figure 2 (ci-contre, p. 715), issue de mesures effectuées au pied de deux arbres témoins, permet de synthétiser les mesures relevées sous un Hêtre et un Épicéa. Ces observations, à l'échelle d'un arbre, soulignent clairement que la répartition des précipitations au niveau du sol diffère d'abord en fonction de l'espèce, puis, mais dans une moindre mesure, de la saison (figure 2, p. 715). Cet effet saisonnier ne s'observe pas sous les résineux, mais exclusivement sous les feuillus sous lesquels le sol reçoit moins de pluie en été qu'en hiver. La répartition des précipitations reçues au sol est relativement homogène sous le feuillage d'un Hêtre. En revanche, sous un Épicéa, les quantités d'eau reçues présentent une forte variabilité spatiale, et augmentent progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de son tronc (figure 2, p. 715).

(1) On a détecté de fréquentes erreurs sur l'ensemble des mesures effectuées par un même observateur, avec des erreurs dans l'indication des pluviomètres qui se sont révélées trop délicates et trop incertaines pour être corrigées.

FIGURE 2 **DISTRIBUTION DE LA PART DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES REÇUES AU NIVEAU DU SOL SOUS COUVERT FORESTIER, POUR DEUX ESPÈCES ARBORÉES**

Valeurs moyennes observées (entre décembre 2002 et décembre 2004)
pour des averses inférieures à 10 mm/jour



Interception des pluies à l'échelle des formations arborées

La spatialisation des enregistrements permet de calculer les lames d'eau moyennes pour les différents groupes arborés présents sur la parcelle. On peut ainsi mettre en relation les précipitations incidentes (Pi) et les précipitations parvenant au sol (Ps). Cette relation montre d'emblée que sur l'ensemble de la parcelle l'interception n'est pas insignifiante. De même, si sur les résineux, les quantités d'eau ruisselant le long des troncs sont négligeables, en revanche, sur les Hêtres, dont l'écorce est lisse, ces valeurs peuvent parfois atteindre 2 mm pour des journées pluvieuses. Une moyenne à partir de deux mesures d'eau ruisselant sur les troncs des Hêtres a été retenue, mais devra être précisée. En effet, lors d'une averse, les mesures d'écoulement effectuées sur les deux hêtres présentent des valeurs tantôt sensiblement analogues, tantôt différentes, dans un rapport allant de 1 à plus de 3, sans que cette différence soit liée à l'importance des précipitations incidentes ou à la morphologie du houppier (les plus fortes valeurs d'écoulement mesurées sont tantôt sur l'un des arbres, tantôt sur l'autre). Ces quantités d'eau ruisselant sur les troncs (Pt, en mm) sont cependant en moyenne proportionnelles aux précipitations incidentes (Pi, en mm), et peuvent être décrites sous la forme d'une relation linéaire. À partir de nos mesures, une régression a ainsi été déterminée :

$$Pt = 0,015 Pi - 0,011 \quad r^2 = 0,88$$

Cette relation, sous des formes légèrement différentes, a été souvent décrite dans la littérature (Rapp et Ibrahim, 1978 ; Nizinski et Saugier, 1988).

Au total, pour chaque épisode pluvieux étudié, les précipitations moyennes (Ps et Pt) sur les différentes unités arborées ont été calculées. L'interception est ensuite appréciée directement par différence, en mm, et également ramenée en pourcentage vis-à-vis des précipitations incidentes. Pour des épisodes pluvieux d'une faible intensité journalière, l'interception peut dépasser 50 % quelle que soit la formation arborée considérée. Ceci peut paraître considérable, mais rejoint les

valeurs proposées dans la littérature (Schnock *et al.*, 1980 ; Aussenac, 1981 ; Nizinski et Saugier, 1988 ; Gash *et al.*, 1995). L'interception diminue ensuite assez rapidement lorsque l'épisode pluvieux devient plus marqué, pour atteindre 10 % dans la hêtraie-sapinière, et environ 20 % dans la pessière (figure 3, ci-contre, p. 717).

D'une manière générale, les observations montrent l'influence relativement réduite de la saison, même si celle-ci n'est appréhendée que d'une manière incomplète (figure 3, p. 717). L'interception globale, et non plus à l'échelle d'un arbre, semble à peine plus importante en été qu'en hiver. L'absence d'un effet saisonnier marqué sur l'interception des précipitations peut paraître étonnant à première vue. Plusieurs explications sont généralement apportées à cette observation (Humbert et Najjar, 1992). Sur le massif de la Chartreuse, la plus probable est peut-être qu'en hiver le plus grand taux d'ouverture des formations feuillues est compensé par des précipitations d'une plus faible intensité qu'en été. L'analyse de la distribution des intensités horaires des pluies, relevées à la station de Clémencières, montre effectivement que les averses estivales sont caractérisées par une plus forte intensité que les épisodes pluvieux hivernaux.

Cependant, si ces variations saisonnières sont masquées pour partie, dans le détail, et exclusivement au sein de la hêtraie pure, le taux d'interception des précipitations présente un léger comportement saisonnier, avec une valeur un peu plus élevée en été (figure 3b, p. 717). Sur cette formation arborée, la proportion d'eau ruisselant le long des troncs ne varie que peu sur l'année. En revanche, les précipitations arrivant au sol sont plus sensibles aux changements saisonniers. Il apparaît ainsi que la hêtraie augmente légèrement sa capacité de saturation, et ainsi les taux d'interception, en période estivale avec la présence d'un feuillage.

Les évaluations des taux moyens d'interception pour les trois grandes séries arborées permettent de définir, et modéliser, le comportement de cette interception pour différentes valeurs des précipitations incidentes (figure 3a, 3b et 3c). Les trois relations définies statistiquement sont les suivantes :

- dans une hêtraie-sapinière,

$$\ln (\%) = 2,364 + (129,25 / P_i) \quad r^2 = 0,77 \text{ (équation 1, 26 mesures)}$$
- dans une hêtraie,

$$\ln (\%) = 4,845 + (144,80 / P_i) \quad r^2 = 0,69 \text{ (équation 2, 26 mesures)}$$
- dans une pessière,

$$\ln (\%) = 25,208 + (129,79 / P_i) \quad r^2 = 0,75 \text{ (équation 3, 26 mesures)}$$

La connaissance de ces relations, toutes hautement significatives, de type hyperbolique, permet d'évaluer, pour chaque averse, la part des précipitations perdue par l'interception, et de dégager l'interception moyenne à l'échelle d'une année (figure 3, p. 717). L'interception des pluies, calculée à partir de ces relations, serait totale pour des averses inférieures à 1 mm. Il faudra ultérieurement multiplier les mesures afin de valider, et d'affiner, ces premières observations. À partir de ces trois modèles, il est possible de transposer ces résultats sur l'ensemble du massif de la Chartreuse. Pour ce faire, il convient aussi d'apprécier les précipitations sur l'ensemble du massif.

PRÉCIPITATIONS ET QUANTITÉS D'EAU ARRIVANT AU SOL SUR LE MASSIF

Intensité journalière des précipitations et évaluation de l'interception annuelle

Les observations ont montré que la variabilité de l'interception sous le couvert forestier est largement tributaire de l'importance des précipitations incidentes. Le taux d'interception est maximal pour des précipitations très faibles, et diminue lorsque les épisodes pluvieux deviennent

FIGURE 3

**RELATION ENTRE LES PRÉCIPITATIONS INCIDENTES
ET LE TAUX D'INTERCEPTION OBSERVÉ
DANS LES GRANDES FORMATIONS ARBORÉES DU MASSIF DE LA CHARTREUSE**

La période hivernale est définie pour des mesures effectuées entre octobre et mars.
La période estivale est caractérisée par des mesures conduites entre avril et septembre.

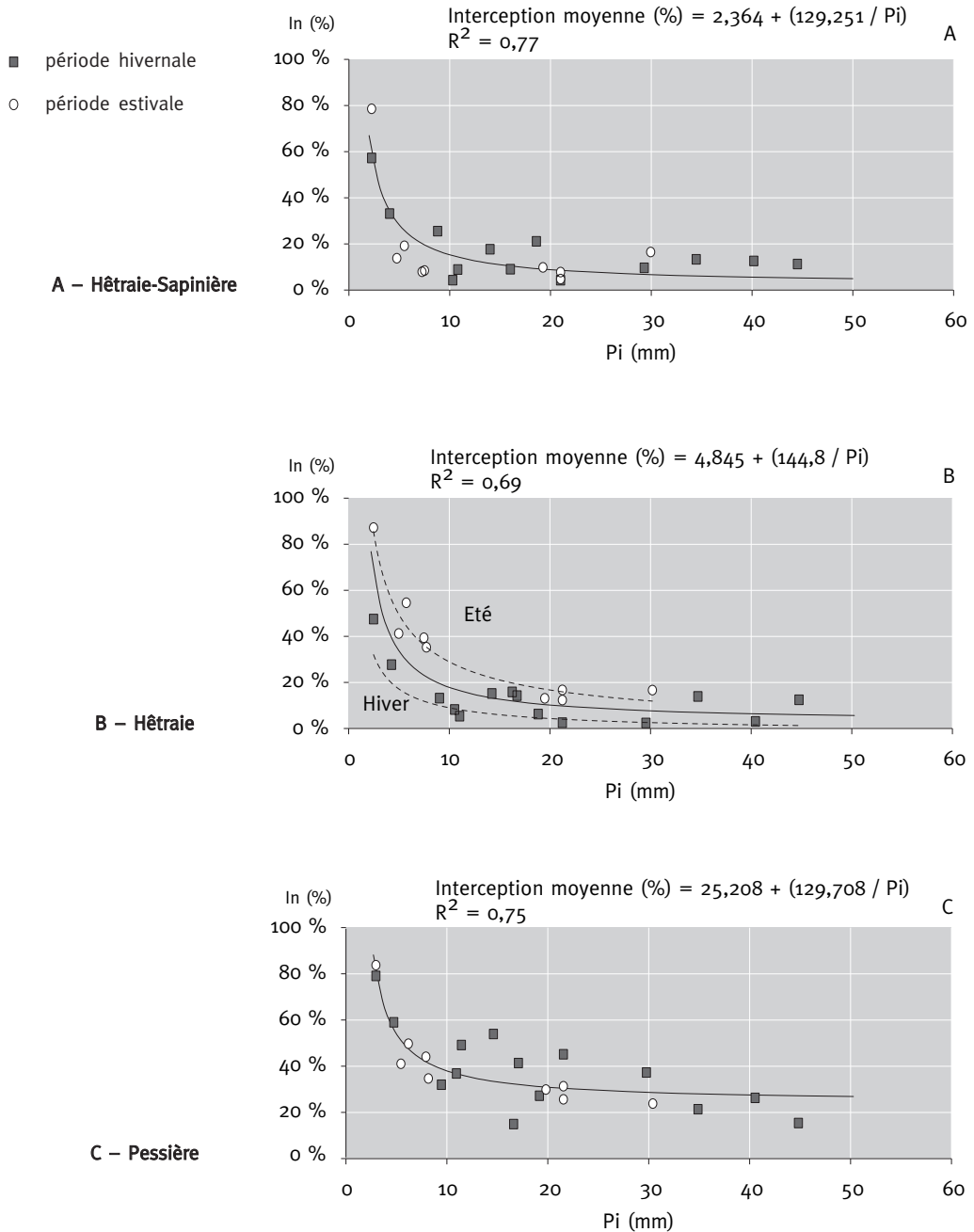


TABLEAU I
**Répartition en classes d'intensité
 des précipitations journalières moyennes
 enregistrées à Clémencières
 entre 2002 et 2006,
 et simulation de l'interception des pluies
 pour les trois formations arborées
 dominantes**

Pluies journalières	Fréquence		Précipitations totales	
	jours	%	mm	%
sans pluie	218,4	59,8 %		
[0 - 2 mm]	67,8	18,6 %	42,3	5,1 %
]2 - 4 mm]	21	5,8 %	61,2	7,4 %
]4 - 6 mm]	14	3,8 %	71,5	8,6 %
]6 - 8 mm]	9	2,5 %	62,9	7,6 %
]8 - 10 mm]	7,8	2,1 %	68,8	8,3 %
]10 - 15 mm]	13,2	3,6 %	161,4	19,4 %
]15 - 20 mm]	5	1,4 %	86,7	10,4 %
]20 - 30 mm]	4,8	1,3 %	119,0	14,3 %
]30 - 40 mm]	2,6	0,7 %	87,6	10,5 %
]40 - 60 mm]	0,8	0,2 %	35,6	4,3 %
]60 - 80 mm]	0,6	0,2 %	35,3	4,2 %
Année	365		832,2	
<i>soit une interception annuelle moyenne de</i>				

plus marqués. La connaissance de la distribution des précipitations journalières sur une année est nécessaire si l'on veut évaluer l'importance de l'interception à l'échelle d'une année. La station climatique automatique de Clémencières (figure 1, p. 713), située à 750 m d'altitude, enregistre au pas de temps horaire les précipitations, et permet de caractériser précisément cette distribution annuelle des pluies journalières. La répartition annuelle des pluies journalières est définie à partir des années 2002 à 2006 (tableau I, ci-contre). Une étude à partir de plusieurs séries pluviométriques journalières de la région grenobloise, ainsi que les données enregistrées à la station de Clémencières, soulignent que la distribution des pluies journalières est d'une part relativement comparable d'une année à l'autre, et d'autre part, qu'elle se retrouve sur l'ensemble des tranches altitudinales du massif.

Sur la période 2002 à 2006, les précipitations annuelles mesurées à la station de Clémencières sont en moyenne de 832 mm, et résultent de 146 jours de pluie. La majorité des précipitations journalières est inférieure à 2 mm, mais les précipitations journalières comprises entre 10 et 15 mm, avec plus de 160 mm, représentent la classe la plus représentée dans le total annuel (tableau I, ci-contre).

À partir de cette distribution des pluies, et des 3 modèles d'interception définis précédemment, le calcul de l'interception annuelle des précipitations sur les différentes séries arborées du massif est fourni par le tableau I (ci-contre). Les valeurs calculées rejoignent les intensités de l'interception proposées dans diverses études (tableau II, ci-contre).

Ainsi, une évaluation de l'interception annuelle est donnée au niveau de la station de Clémencières :

- pour une hêtraie-sapinière, l'interception annuelle serait de 130 mm, soit 15,6 % des pluies incidentes annuelles,
- pour une hêtraie, la lame d'eau interceptée serait de 164 mm, soit 19,7 % des précipitations annuelles,
- et pour une pessière, l'interception, plus marquée, serait de 320 mm, soit 38,5 % des pluies annuelles.

Interception moyenne sur une						
Hêtraie-Sapinière		Hêtraie		Pessière		
In calculée (%)	In (mm)	In calculée (%)	In (mm)	In calculée (%)	In (mm)	
67,0	28,3	77,2	32,7	89,7	38,0	
34,7	21,2	41,0	25,1	57,5	35,2	
23,9	17,1	29,0	20,7	46,7	33,4	
18,5	11,6	22,9	14,4	41,3	26,0	
15,3	10,5	19,3	13,3	38,1	26,2	
11,0	17,7	14,5	23,4	33,8	54,6	
8,8	7,7	12,1	10,5	31,7	27,4	
6,7	7,9	9,7	11,5	29,5	35,1	
5,6	4,9	8,5	7,4	28,4	24,9	
4,9	1,8	7,7	2,8	27,8	9,9	
4,0	1,4	6,7	2,3	26,8	9,5	
	130,2		164,1		320,2	
	15,6 %		19,7 %		38,5 %	

TABLEAU II

**Quelques valeurs d'interception (%)
pour différents peuplements de résineux et de feuillus**

Référence	Espèce	Interception (%)
Aussenac G., 1975, 1981	<i>Abies grandis</i>	43
Aussenac G., 1975, 1981	<i>Pinus</i> sp.	21 à 48
Rapp M., Ibrahim M., 1978	<i>Pinus pinea</i>	28
Humbert J., Najjar G., 1992	<i>Pinus</i> sp.	11 à 55
Llorens P., Gallart F., 2000	<i>Pinus</i> sp.	30
Aussenac G., 1975, 1981	<i>Quercus</i> sp.	20 à 31
Nizinski J. Saugier B., 1988	<i>Quercus</i> sp.	31 à 41
Humbert J., Najjar G., 1992	<i>Quercus</i> sp.	22 à 34
Aussenac G., 1975, 1981	<i>Fagus silvatica</i>	17 à 28
Humbert J., Najjar G., 1992	<i>Fagus silvatica</i>	14 à 37
Gash J.H.C. et al., 1995	<i>Pinus pinaster</i>	17 à 39

Évolution des précipitations avec l'altitude

Dans les Alpes du Nord, le massif de la Chartreuse est une zone à fortes précipitations. Cette forte pluviosité observée est liée à la position externe du massif de la Chartreuse, qui en fait un véritable rempart opposé aux vents humides d'ouest. Afin d'approcher les précipitations moyennes reçues sur le massif, on peut estimer les pluies susceptibles d'être observées à diverses tranches altitudinales. Pour ce faire, quatre stations pluviométriques, situées à proximité et à l'intérieur du massif de la Chartreuse, et possédant des données sur une période suffisamment longue ont été retenues (tableau III, ci-dessous). La station de Grenoble, bien que située à l'extérieur du massif, permet d'évaluer les précipitations à la base du massif. Les données ont été critiquées statistiquement, et les lacunes — peu nombreuses — comblées (Dumas, 2004).

TABEAU III **Pluviosité annuelle moyenne relevée sur quatre stations (données Météo France), puis estimée à trois niveaux altitudinaux**

Localisation	Altitude	Précipitations observées 1970-1999	Fonction d'extrapolation		
	Z (m)		linéaire*	puissance**	logarithmique***
Grenoble	210	982	1 143	1 015	1 101
Saint-Laurent-du-Pont	415	1 537	1 412	1 394	1 474
Saint-Pierre-d'Entremont	644	1 787	1 713	1 710	1 714
Saint-Pierre-en-Chartreuse	945	2 039	2 108	2 045	1 923
<i>Gradient pluviométrique moyen (en mm pour 100 m d'élévation) ..</i>			131	138	109
Estimation des précipitations :					
– à la base du massif	200		1 130	993	1 075
– à l'altitude moyenne	1 065		2 265	2 162	1 988
– dans la zone sommitale	2 000		3 493	2 898	2 333

* P = 1,31 Z + 867,45 ($r^2 = 0,92$) ; ** P = 84,31 Z^{0,465} ($r^2 = 0,97$) ; *** P = 546,3 ln (Z) – 1 819,7 ($r^2 = 0,91$)

L'estimation de la pluviosité à une altitude donnée est fréquemment conduite à partir du gradient pluviométrique local, et donc implicitement à l'aide d'une relation linéaire entre les pluies et l'altitude, sous réserve que celle-ci soit vérifiée sur un plan statistique. L'analyse des données enregistrées, sur la tranche altitudinale allant de 200 m à presque 1 000 m, donne un gradient pluviométrique annuel moyen de 131 mm pour 100 m d'élévation. Si ce taux de croissance des précipitations est intéressant à connaître, il reste en revanche à utiliser avec précaution dans les zones sommitales, et ce malgré un coefficient de corrélation qui pourrait donner illusion ($r^2 = 0,92$). En effet, une application stricte de cette relation donnerait des précipitations annuelles moyennes improbables, de près de 3 500 mm à 2 000 m d'altitude (tableau III, ci-dessus). Si, certaines années, cette quantité d'eau peut parfois être observée dans les zones sommitales (Arques, 2005), elle reste en moyenne plus proche de 2 300-2 500 mm par an (Dobremez, 2001 ; Arques, 2005). Il est à noter que la prise en compte d'un plus grand nombre de stations pluviométriques, dont les séries sont malheureusement plus courtes, engendrerait sur l'extrapolation des pluies en altitude des aberrations similaires, puisque Saint-Pierre-en-Chartreuse est la station pluviométrique la plus haute du massif. Une relation logarithmique semble mieux convenir pour évaluer les précipitations à une altitude (Z en m) donnée (tableau III, ci-dessus).

La relation retenue est la suivante :

$$P \text{ (mm/an)} = 546,3 \ln(Z) - 1819,7 \quad (r^2 = 0,91) \text{ (équation 4)}$$

À partir de cette relation, les précipitations annuelles moyennes susceptibles d'être observées à une altitude donnée sont estimées dans le tableau III (p. 720). La précision des valeurs reste naturellement assez réduite, mais largement suffisante pour dégager une estimation de l'influence de la forêt sur les précipitations incidentes. Par ailleurs, le coefficient moyen d'interception pour les trois formations arborées, calculé à une altitude de 750 m, n'est probablement pas strictement comparable en altitude, notamment dans les parties sommitales, où les précipitations annuelles dépassent 2 000 mm par an. La répartition des pluies journalières sur l'année (tableau I, p. 718-719) s'opère probablement différemment en altitude, et notamment sur les faibles intensités, où l'effet orographique se fait davantage ressentir (Dumas et Guetny, 2004). Aussi est-il probable que le nombre de jours comportant des pluies journalières un peu plus importantes que 2 mm soit renforcé au détriment des précipitations journalières inférieures à ce seuil. Par conséquent, et dans la mesure où le coefficient d'interception diminue avec l'intensité journalière, il est possible que l'interception globale soit pour cette raison légèrement surestimée en altitude. Cependant, à l'échelle du massif, l'impact de cette surestimation reste probablement assez réduit, puisque 70 % de la superficie du massif sont inscrits dans la tranche altitudinale comprise entre 600 m et 1 400 m, où l'on peut supposer que la distribution des pluies journalières est comparable à celle observée à la station de Clémencières. Il est certain qu'une analyse de pluies journalières à des altitudes différentes, et notamment élevées, permettrait de mieux cerner l'impact du relief sur l'intensité journalière des précipitations.

Quantités d'eau arrivant au sol sur le massif de Chartreuse

La connaissance des taux d'interception moyens des précipitations par la couverture arborée, ainsi que l'évaluation des précipitations annuelles sur le massif pour différentes altitudes, permettent de dégager les quantités d'eau réellement utilisables pour le cycle hydrologique. Le tableau IV (p. 722) synthétise ces résultats. La répartition des peuplements forestiers selon les tranches altitudinales s'est appuyée sur plusieurs sources documentaires et cartographiques (Tonnel et Ozenda, 1964 ; Richard et Pautou, 1982 ; Pache, 2000 ; Girard, 2003 ; Binard, 2003 ; IFN, 2006), et à l'aide d'un modèle numérique de terrain. Les valeurs ont été ensuite affinées, puis calées aux superficies récemment proposées par l'IFN (2006) pour les différents peuplements forestiers du massif de Chartreuse.

Pour chaque tranche altitudinale, dont la superficie est connue (S_Z), il est possible de calculer les précipitations reçues au sol (P_S), en tenant compte des surfaces (S_{fa_i}) respectives des différentes formations arborées (fa_i), et de leur interception (ln_{fa_i}). Les pluies moyennes reçues au sol (tableau IV, p. 722) sont ainsi calculées pour chaque tranche altitudinale par pondération des surfaces, avec la formule suivante :

$$P_S = \left(\frac{S_{non\ arborée}}{S_Z} \right) P_i + \sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{S_{fa_i}}{S_Z} \right) (P_i - ln_{fa_i}) \right]$$

À l'échelle du massif, les précipitations météorologiques, ou incidentes, sont en moyenne de 1 951 mm par an, mais les quantités d'eau reçues au sol sont moindres avec 1 634 mm par an (tableau IV, p. 722). Au total, sur une année, la perte moyenne d'eau sur l'ensemble du massif par l'interception forestière est proche de 300 mm. Cette valeur masque un prélèvement en eau

TABLEAU IV

**Superficies, occupation du sol, interception annuelle des pluies,
et précipitations annuelles moyennes par tranches altitudinales.
Les précipitations Pi sont calculées à partir de l'équation 4**

Tranche altitudinale	S _Z (km ²)	Précipitations Pi (mm)	Hêtraie-Sapinière		Hêtraie		Pessière		Précipitations au sol (mm)
			Sfa ₁ (km ²)	Interception 15,6 % (mm)	Sfa ₂ (km ²)	Interception 19,7 % (mm)	Sfa ₃ (km ²)	Interception 38,5 % (mm)	
[200 - 400]	11,5	1 296	0		0		0		1 296
[400 - 600]	37,2	1 575	0		0		0		1 575
[600 - 800]	49,1	1 759	6	274	10	347	0		1 655
[800 - 1000]	63,4	1 896	38	296	7	374	0		1 678
[1000 - 1200]	94,2	2 006	73	313	0		0		1 764
[1200 - 1400]	72,8	2 097	37	327	0		26	807	1 643
[1400 - 1600]	42,7	2 176	0		0		39	838	1 411
[1600 - 1800]	23,6	2 244	0		0		22	864	1 439
[1800 - 2000]	4,3	2 305	0		0		0		2 305
[2000 - 2100]	1,2	2 346	0		0		0		2 346
Total	400		154		17		87		
Moyenne pondérée par les surfaces		1 951		311		358		835	1 634

assez variable en fonction des formations forestières concernées. La hêtraie-sapinière et la hêtraie soustraient au cycle hydrologique respectivement 311 mm et 358 mm d'eau par an. Malgré une occupation plus réduite, la pessière intercepte et retient une part des pluies sur son feuillage nettement plus élevée, avec 835 mm d'eau par an (tableau IV, ci-dessus). Cette caractéristique est consécutive à la fois à un taux d'interception annuel plus important sur les résineux, et également à des précipitations plus abondantes sur cette série, liées à sa position plus en altitude.

Ainsi, la perte en eau par l'interception forestière représenterait environ 16 % des précipitations météorologiques annuelles reçues sur l'ensemble du massif. Pour établir un bilan hydrique, il faudrait également ajouter à cette perte l'importance de la transpiration des arbres sur l'évapotranspiration réelle de ces milieux forestiers. Un couvert forestier consomme en effet plus d'eau par les capacités d'extraction de l'eau par le réseau racinaire. La perte en eau produite par la couverture forestière pour l'écoulement hydrologique est donc issue d'une double composante, à la fois un renforcement de l'évapotranspiration réelle et une interception directe des pluies par le feuillage. La partie des précipitations interceptées par la canopée reste un élément essentiel du bilan hydrologique, mais les conséquences directes sur l'écoulement, ou les réserves en eau du sol, ne sont donc pas forcément aisées à appréhender (Cosandey et Robinson, 2000 ; Cosandey, 2006). Certes, l'interception réduit les entrées d'eau disponible pour le bilan hydrologique. Cependant, une partie de l'énergie utilisée pour évaporer l'eau interceptée se déduit de

celle disponible pour la transpiration, et favorise ainsi une moindre utilisation de la réserve hydrique (Morton, 1984 ; Peiffer *et al.*, 2005 ; Cosandey, 2006). Le pouvoir évaporant d'un couvert forestier dépend donc d'un grand nombre de paramètres, intervenant dans une synergie complexe. Aussi, la relation entre l'interception et l'écoulement n'est pas toujours évidente en milieu forestier. L'écoulement est tout autant tributaire des entrées d'eau que du fonctionnement des réserves hydriques, de sa plus ou moins forte sollicitation par le réseau racinaire et de la régulation de la transpiration par la végétation arborée.

La valeur de l'interception moyenne sur l'ensemble du massif reste néanmoins faible au regard des apports en eau, qui sont considérables sur l'ensemble du massif. Cette estimation, qui pourra être améliorée ultérieurement par des études complémentaires, montre bien l'intérêt d'une prise en compte de ces mécanismes d'interception, souvent oubliés dans les approches hydro-climatiques, faute d'une connaissance suffisante.

Cette première étude souligne que les forêts, par les influences qu'elles exercent sur le cycle de l'eau, diminuent en quantité la ressource en eau des bassins versants. En effet, cette eau interceptée est en grande partie soustraite du cycle hydrique. Il semblerait qu'une très faible proportion de l'eau interceptée soit absorbée par le couvert végétal, et que la plus grande partie de l'interception soit évaporée (Aussenac, 1975 et 1981). D'ailleurs, les études actuelles montrent que la majeure partie de l'interception doit être considérée comme une perte dans le bilan hydrique (Boulangeat, 1978 ; Bultot *et al.*, 1990 ; Carlyle-Moses, 2004 ; Peiffer *et al.*, 2005). La connaissance de cette interception est donc importante si l'on cherche, par exemple, à évaluer le renouvellement de la ressource en eau des aquifères et éventuellement à optimiser la gestion de cette ressource. Ou encore, si l'on souhaite apprécier le lien, parfois modélisé avec des algorithmes complexes, entre les entrées d'eau et les écoulements de surface.

CONCLUSIONS

La forêt est un élément primordial du massif de la Chartreuse, aussi bien du point de l'économie que de l'écologie du paysage. Cette première étude permet de quantifier et d'évaluer la part de l'interception de la forêt sur la pluie. Il est certain qu'à partir d'un unique site expérimental, les valeurs ne sont qu'indicatives et ne donnent que des ordres de grandeur, qu'il sera par la suite utile d'affiner en multipliant les sites d'observation. Les résultats permettent déjà d'apprécier un peu mieux l'influence de la forêt du massif de la Chartreuse sur le cycle de l'eau.

En Chartreuse, lors d'un épisode pluvieux, la part des précipitations ne parvenant pas au sol en forêt, varie entre 4 et 89 % des pluies incidentes, en fonction de l'intensité des pluies journalières. À l'échelle d'une année, l'interception moyenne serait d'environ 16 % par la hêtraie-sapinière, 20 % par la hêtraie, et 38 % par la pessière. À ce stade, ces chiffres restent naturellement à prendre avec précaution, même s'ils rejoignent largement les valeurs proposées dans la littérature (Bultot *et al.*, 1972 ; Aussenac, 1981 ; Petit *et al.*, 1984 ; Saugier *et al.*, 1985 ; Humbert et Najjar, 1992). Ainsi, sur une année, c'est une lame d'eau moyenne d'environ 300 mm par an qui serait interceptée par la forêt du massif de la Chartreuse, soit 16 % des précipitations météorologiques annuelles reçues sur l'ensemble massif.

Depuis la révolution industrielle, en liaison avec les progrès de l'agriculture à haut rendement des plaines, mais aussi des mutations socio-économiques des régions de montagne, une grande partie des terres a été abandonnée au profit notamment des formations arborées. À partir des valeurs de l'interception estimées dans cette étude, l'extension de la couverture forestière en Chartreuse, depuis le milieu du XIX^e siècle, aurait ainsi accru de presque 100 mm cette intercep-

tion (Dumas, 2004). Cependant, sur le massif de Chartreuse, les quantités d'eau reçues annuellement, avec environ 2 000 mm/an (tableau IV, p. 722), demeurent considérables, et rendent peu perceptibles, voire imperceptibles, cette faible augmentation du prélèvement en eau induite par ce processus d'interception et l'extension de la forêt depuis le milieu du XIX^e siècle.

Dominique DUMAS
Institut de Géographie alpine
UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER
14bis, avenue Marie Reynoard
F-38100 GRENOBLE
(dominique.dumas@ujf-grenoble.fr)

Remerciements

L'auteur remercie le Parc naturel régional de Chartreuse pour son appui financier dans le cadre d'un programme de recherche. L'auteur remercie également M. Remillier (agent ONF) pour son aide, et les relecteurs anonymes pour leurs suggestions qui ont contribué à améliorer le manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- ARQUES (S.). — Géodynamique, colonisation végétale et phytodiversité des talus d'éboulis dans le massif de la Grande Chartreuse (Préalpes françaises du nord). Caractéristiques géo-écologiques et sensibilité aux changements environnementaux. — Grenoble : Université Joseph Fourier, 2005. — 354 p. (Thèse).
- AUSSENAC (G.). — Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions, conséquences écophysiologiques chez quelques résineux. — Université de Nancy, 1975. — 234 p. (Thèse Doctorat Sciences naturelles).
- AUSSENAC (G.). — L'Interception des précipitations par les peuplements forestiers. — *La Houille Blanche*, n° 7/8, 1981, pp. 531-536.
- BINARD (R.). — L'Interception des précipitations par la forêt sur le massif de la Grande Chartreuse sur l'ensemble du XX^e siècle. — Grenoble : Institut de Géographie alpine - Université Joseph Fourier, 2003. — 84 p. (Mémoire de maîtrise).
- BOULANGEAT (C.). — Influence de la forêt sur le cycle de l'eau : étude comparative de l'interception et de l'évapotranspiration d'un peuplement feuillu (*Fagus sylvatica*) et de quatre peuplements de Douglas (*Pseudotsuga*). — 1978. — 40 p. (Mémoire ENITEF).
- BULTOT (F.), DUPRIEZ (G.), BODEUX (A.). — Interception de la pluie par la végétation forestière ; estimation de l'interception journalière à l'aide d'un modèle mathématique. — *Journal of Hydrology*, vol. XVII, n° 3, 1972, pp. 193-223.
- BULTOT (F.), DUPRIEZ (G.), GELLENS (D.). — Simulation of land use changes and impacts on the water balance. A case study for Belgium. — *Journal of Hydrology*, 114, 1990, pp. 327-348.

- CARLYLE-MOSES (D.E.). — Measurement and modelling of growing season canopy water fluxes within a mature mixed deciduous forest stand southern Ontario, Canada. — *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 2004, pp. 281-284.
- COSANDEY (C.). — Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. — *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 4, 2006, pp. 317-327.
- COSANDEY (C.), ROBINSON (M.). — Hydrologie continentale. — Paris : Armand Colin, 2000. — 359 p.
- DOBREMEZ (J.-F.). — La Montagne du biologiste. — *Revue de Géographie alpine*, n° 2, 2001, pp. 93-100.
- DUMAS (D.). — Rôle des changements climatiques et influence de l'extension de la forêt sur les ressources en eau dans le massif de la Chartreuse, depuis le milieu du XIX^e siècle. — Rapport Parc naturel régional de Chartreuse ; Grenoble : Institut de Géographie alpine - Université Joseph Fourier, 2004. — 45 p.
- DUMAS (D.), GUETNY (T.). — Possibilités de retour des conditions climatiques propices aux grandes crues de l'Isère à Grenoble. Dans : Actes du colloque, XVII^e Colloque international de Climatologie. — *Bulletin de l'Association internationale de Climatologie*, 2004, pp. 289-292.
- FARDJAH (M.), LEMÉE (G.). — Dynamique comparée de l'eau sous hêtraie et dans des coupes nues ou à *Calamagrostis epigeios* en forêt de Fontainebleau. — *Bulletin d'Écologie*, vol. 11, n° 1, 1980, pp. 11-31.
- GASH (J.H.C.), LLOYD (C.R.), LACHAUD (G.). — Estimating spars forest rainfall interception with an analytical model. — *Journal of Hydrology*, 170, 1995, pp. 79-86.
- GIRARD (R.). — L'Interception des précipitations par une couverture forestière : exemple de la Chartreuse. — Grenoble : Institut de Géographie alpine - Université Joseph Fourier, 2003. — 32 p. (Mémoire de DEA).
- HUMBERT (J.), NAJJAR (G.). — Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone. — Strasbourg : Université Louis Pasteur, 1992. — 88 p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN). — Département de l'Isère ; résultats du troisième inventaire forestier. 1997. — Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2006. — 229 p.
- LLORENS (P.), GALLART (F.). — A simplified method for forest water storage capacity measurement. — *Journal of Hydrology*, 240, 2000, pp. 131-144.
- MORTON (F.I.). — What are the limits of forest evaporation ? — *Journal of Hydrology*, 74, 1984, pp. 373-398.
- NIZINSKI (J.), SAUGIER (B.). — Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. — *Acta Oecologica. Oecologia Plantarum*, vol. 9, n° 3, 1988, pp. 311-329.
- PACHE (G.). — Guide simplifié de typologie de stations forestières. Massif de la Chartreuse et chaînons calcaires du pays "entre Jura-Savoie". — Grenoble : Laboratoire des écosystèmes alpins - Université Joseph Fourier Grenoble I, 2000. — 68 p.
- PETIT (F.), KALOMBO (K.). — L'Interception des pluies par différents types de couverts forestiers. — *Bulletin de la Société Géogr. Liège*, 20, 1984, pp. 99-127.
- PEIFFER (M.), LE GOFF (N.), NYS (C.), OTTORINI (J.-M.), GRANIER (A.). — Bilan d'eau, de carbone et croissances comparées de deux hêtraies de plaine. — *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 2, 2005, pp. 201-215.
- RAPP (M.), IBRAHIM (M.). — Égouttement, écoulement et interception des précipitations par un peuplement de *Pinus pinea* L. — *Oecologia Plantarum*, vol. 13, n° 4, 1978, pp. 321-330.
- RICHARD (L.), PAUTOU (G.). — Carte de la végétation de la France au 200 000^e. Alpes du Nord et Jura méridional. Notice détaillée des feuilles 48-Annecy, 54-Grenoble. — Éditions CNRS, 1982. — 316 p.
- SAUGIER (B.), HALLDIN (S.), PONTAILLER (J.-Y.), NIZINSKI (G.). — Bilan hydrique des forêts de Chêne et de Hêtre à Fontainebleau. Mesures et modélisation. — *Revue Palais Découverte*, Paris, 13, n° 130, 1985, pp. 187-200.
- SCHNOCK (G.), DALEBROUX (R.), GALOUX (A.). — Bilan des eaux d'infiltration dans la chênaie à Charme de Virelles. Taille des Viviers de 1964 à 1968. — *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique*, vol. 52, n° 13, 1980, pp. 1-20.
- SERCKI (A.). — Le Climat de Grenoble et ses environs : thermodynamique de la vapeur d'eau atmosphérique. — Grenoble : Institut de Géographie alpine - Université Joseph Fourier, 2004. — 57 p. (Mémoire de maîtrise).
- TONNEL (A.), OZENDA (P.). — Documents pour la carte de la végétation des Alpes. — Grenoble : Laboratoire de Biologie végétale de Grenoble et du Lautaret - Université de Grenoble, Faculté des Sciences, 1964. — 168 p.

ESTIMATION DE L'INFLUENCE DE LA COUVERTURE FORESTIÈRE SUR LES PLUIES EN MONTAGNE : EXEMPLE DU MASSIF DE LA CHARTREUSE (Résumé)

Une gestion cohérente des eaux d'un massif montagneux nécessite une connaissance précise des précipitations arrivant au sol. Or, la forêt intercepte et retient un pourcentage plus ou moins élevé des pluies sur son feuillage diminuant du même coup la quantité d'eau réellement reçue par le sol. L'eau disponible pour l'écoulement, ou pour les réserves souterraines, est donc plus réduite que celle définie à partir des seuls relevés météorologiques. Sur le massif de la Chartreuse, l'influence sur les précipitations de la couverture forestière, fortement présente dans le paysage, reste encore mal appréciée. Cette première étude tente d'évaluer et de cerner la perte en eau liée à l'interception forestière à l'échelle d'un massif. Sur le massif de la Chartreuse, elle représente une lame d'eau annuelle d'environ 300 mm, soit 16 % des précipitations météorologiques annuelles reçues sur l'ensemble massif. Cette valeur, non négligeable, montre bien l'intérêt dans les approches hydroclimatiques d'une prise en compte de l'interception des pluies par la forêt, notamment sur ces espaces de moyenne montagne souvent fortement boisés.

ESTIMATING THE INFLUENCE OF FOREST COVER ON UPLAND RAINFALL — EXAMPLE OF THE CHARTREUSE MOUNTAINS (Abstract)

Proper management of Chartreuse Mountains water resources requires precise knowledge of the rainfall reaching ground level. Foliage partially intercepts and absorbs rainfall, thus reducing the amount which actually reaches the soil. Runoff and underground water is consequently available in lower quantities than what would be expected simply from examining rainfall records. The influence of the Chartreuse range's dense forest cover on rainfall is not yet fully understood. In this study, water loss due to forest interception was assessed and defined. It was estimated as the equivalent of 300 mm per annum, or 16 % of overall annual precipitation falling on the range. This is a significant amount and shows the importance of including the forest rainfall interception factor in climatological studies of water resources, especially in thickly forested upland areas.
