

## L'EAU FORESTIÈRE DE QUALITÉ : COMMENT AGIR SUR LES QUANTITÉS PRODUITES ?

ANDRÉ GRANIER – NATHALIE BRÉDA – VINCENT BADEAU – JULIEN FIQUEPRON

La présence de forêts au sein d'un territoire influence la quantité et la qualité des eaux de drainage. La production d'eau de qualité est un service assuré par la forêt qui est couramment utilisée pour assurer l'alimentation partielle ou totale des villes, parfois de grandes métropoles (Melbourne, New York, Tokyo, Quito, etc. ; voir Stolton et Dudley, 2007). Pour maintenir ou améliorer la qualité de l'eau — et donc le service rendu —, diverses mesures sont mises en œuvre : de bonnes pratiques de gestion forestière, la promotion d'une agriculture raisonnée sur les bassins d'alimentation (Benoît *et al.*, 1997) ou le maintien de ripisylves.

La qualité des eaux forestières a fait l'objet de nombreuses études dans le monde dans des conditions variées de climat, de sol et de végétation. Citons en particulier celle réalisée en Lorraine par Benoît et Fizaine (1999) sur 35 bassins forestiers d'alimentation et 18 autres bassins mixtes (agricoles et forestiers). La teneur des eaux en nitrates dans des captages à l'aval des bassins constitue dans ce cas le paramètre de qualité. Les bassins entièrement forestiers, quelle que soit l'essence, montrent des taux de nitrates faibles, la grande majorité est inférieure à 10 mg/l, contre 25 à 200 mg/l pour les bassins agricoles. Ces auteurs montrent aussi qu'il existe une relation décroissante entre le taux de boisement des bassins versants et la teneur en nitrates dans les eaux issues de ces bassins. Un taux minimum de boisement de 30 % semble suffisant pour maintenir une qualité acceptable (moins de 50 mg/l, la limite de potabilité).

En lien avec une couverture pérenne, les peuplements forestiers offrent un bon couplage des cycles biogéochimiques, celui de l'eau et des éléments minéraux et de l'azote en particulier. Cette propriété optimise l'utilisation des éléments nutritifs du sol (Ranger *et al.*, 1995) et limite les phénomènes de relargage.

Ces résultats confortent la notion de fourniture d'une ressource en eau de qualité, mise en avant par les gestionnaires de la forêt française (ONF, 1999 ; Ferry, 2004 et 2006 ; Fiquepron, 2010 ; Fiquepron et Picard, 2011) et au niveau international, notamment par la FAO (2008). Pour résumer les enjeux de qualité d'eau en forêt, il faut noter que, contrairement aux zones agricoles, les nitrates et les produits phytosanitaires ne constituent pas les risques prioritaires, l'attention portant plus sur les risques de turbidité liés aux chantiers forestiers.

Il est bon de rappeler tout d'abord que qualité et quantité d'eau ne doivent pas être dissociées car le service de fourniture d'une « eau de qualité » sous-entend en effet de disposer de quantités suffisantes et dans la durée.

Il est bien établi que les couverts forestiers exercent une action déterminante sur le cycle de l'eau en raison du flux d'eau important qui retourne vers l'atmosphère (l'ETR, évapotranspiration réelle). Plus précisément, l'ETR des couverts forestiers est la somme de deux principales compo-

santes : la transpiration des arbres (T) et l'interception des précipitations (In). Par rapport aux végétations basses, prairies et cultures, les arbres présentent globalement des niveaux de transpiration élevés en raison de leurs surfaces foliaires importantes, notamment pour les forêts matures, et leur capacité d'extraction de l'eau du sol, liée à un développement racinaire souvent profond. D'autre part, en régime de pluie, le couvert forestier présente la capacité de piéger une quantité d'eau importante, dont une fraction est évaporée et donc perdue pour la forêt (Aussenac, 1972). Ainsi, la somme T + In peut atteindre des niveaux élevés lorsque l'eau du sol ou la température ne sont pas limitantes. Ceci a une conséquence directe sur les écoulements sous forêt, qui seront d'autant plus réduits que l'ETR sera élevée. Les travaux récents réalisés dans le cadre du projet de recherche CLIMATOR montrent que, parmi les végétations pérennes, les couverts décidus (forêt, vigne) restituent au milieu des quantités d'eau plus importantes que les couverts sempervirents (conifères, fêtuque) (Itier, 2010). Globalement, on peut affirmer que la forêt réduit la fourniture d'eau par rapport aux autres types de végétation, en particulier les plantes annuelles (voir Calder, 2002 ; Cosandey, 2006), mais que cette eau sera en moyenne de meilleure qualité.

L'objectif du présent article est de présenter, pour quelques situations-types, la quantité d'eau de qualité fournie par les zones forestières et d'évaluer l'influence de la gestion des peuplements sur ce service. Dans ce même numéro, l'article de Fiquepron (2012) présente de façon complémentaire des travaux sur la valeur du service de protection de l'eau potable par la forêt, et sur les moyens de le contractualiser.

Nous rappellerons d'abord les différentes sources de variation du bilan hydrique, liées au climat, aux conditions édaphiques, à l'espèce, variations qui ont un impact sur les quantités d'eau drainée.

La deuxième partie de cet article traite de l'étude de deux massifs forestiers de l'Est de la France dans des situations de climat réel, massifs pour lesquels nous avons réalisé des simulations au moyen d'un modèle de bilan hydrique sous différents profils d'années climatiques, d'essence et de gestion du couvert.

## LE BILAN HYDRIQUE DES FORÊTS ET SES VARIATIONS

En négligeant les remontées capillaires, les variations de teneur en eau dans les arbres et le ruissellement, le bilan hydrique d'une parcelle forestière, sur une période de temps donnée, s'écrit :

$$P_i - (T + I_n + E_{se} + D) = \Delta S$$

avec  $P_i$  : pluie incidente, T : transpiration des arbres,  $I_n$  : interception des précipitations,  $E_{se}$  : évaporation du sol et de la strate herbacée, D : drainage et  $\Delta S$  : variation du stock en eau du sol sur la période considérée.

Cette équation signifie simplement que la différence entre le flux d'eau qui entre dans la parcelle et celui qui en sort sous formes liquide et vapeur est égale à la variation de stock d'eau dans le réservoir sol. Le terme drainage rassemble ici toutes les pertes d'eau de la parcelle : le ruissellement de surface et de sub-surface, lorsqu'il y a une pente et que l'infiltration se fait difficilement, ou en conditions de fortes précipitations et le drainage vertical, qui va alimenter les nappes souterraines.

La somme transpiration + interception + évaporation du sous-étage correspond à l'ETR.

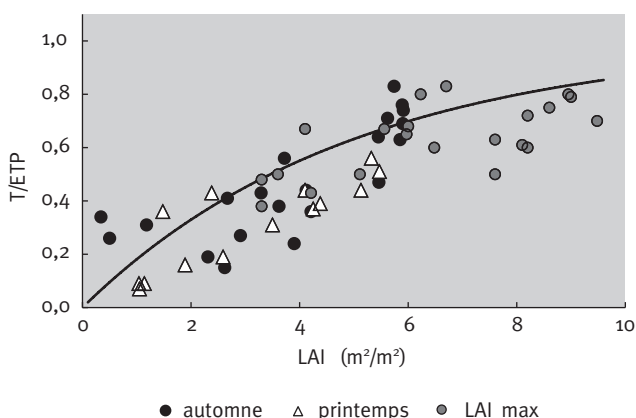
Chaque terme du bilan hydrique est en général exprimé en mm d'eau (= 1 L/m<sup>2</sup>, soit 10 m<sup>3</sup>/ha).

La transpiration des arbres (T) représente le plus souvent le flux hydrique sortant de l'écosystème le plus élevé en valeur absolue. Cette transpiration dépend directement de la demande climatique, quantifiée par un indice mis au point par les agronomes, l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui dépend du rayonnement global reçu par la parcelle, de la température et de l'humidité de l'air et la vitesse du vent. Pour une demande climatique donnée, on observe (figure 1) une bonne corrélation entre T et l'indice de surface foliaire du peuplement, appelé LAI (« *Leaf Area Index* », exprimé en m<sup>2</sup> de feuilles par m<sup>2</sup> de surface au sol). Pour les peuplements ou les périodes caractérisées par un faible LAI, l'évaporation du sol et de la strate herbacée n'est pas négligeable et s'ajoute à la transpiration des arbres.

FIGURE 1

#### RELATION ENTRE LE RAPPORT T/ETP ET L'INDICE FOLIAIRE (LAI)

Les points « LAI max » correspondent à des mesures réalisées pendant la période allant de la pleine expansion foliaire au jaunissement des feuilles, sur différents peuplements. Pour différents sites européens, tempérés et méditerranéens, les espèces suivantes ont été représentées : Chêne sessile (Bréda et Granier, 1996), Chêne kermès (Rambal, 1984), Hêtre (Aussenac et Boulangeat, 1980 ; Savoie, 1988), Bouleau (Federer, 1979), Épicéa commun (Biron, 1994), Douglas (Black, 1979 ; Granier, 1987 ; Aussenac et Boulangeat, 1980). Des espèces tropicales ont aussi été représentées : Simarouba en Guyane (Granier *et al.*, 1992), Palmier à huile en Côte d'Ivoire (Dufrène *et al.*, 1992). Les points « printemps » et « automne » ont été obtenus par les auteurs au cours des phases d'expansion et de chute des feuilles en forêt tempérée de Chêne sessile.



L'interception des précipitations est aussi un terme important du bilan hydrique en forêt. La fraction de l'eau interceptée par rapport à la pluie incidente est typiquement de l'ordre de 20 à 30 % pour des couverts décidus fermés (en période de pleine feuillaison) et de 25 à 40 % pour des peuplements résineux dans des conditions climatiques moyennes (climats tempérés et continentaux). Une conséquence directe de ce phénomène est la plus faible disponibilité en eau sous peuplement résineux que sous feuillus à certaines périodes de l'année, en particulier en période de réhydratation du sol en automne.

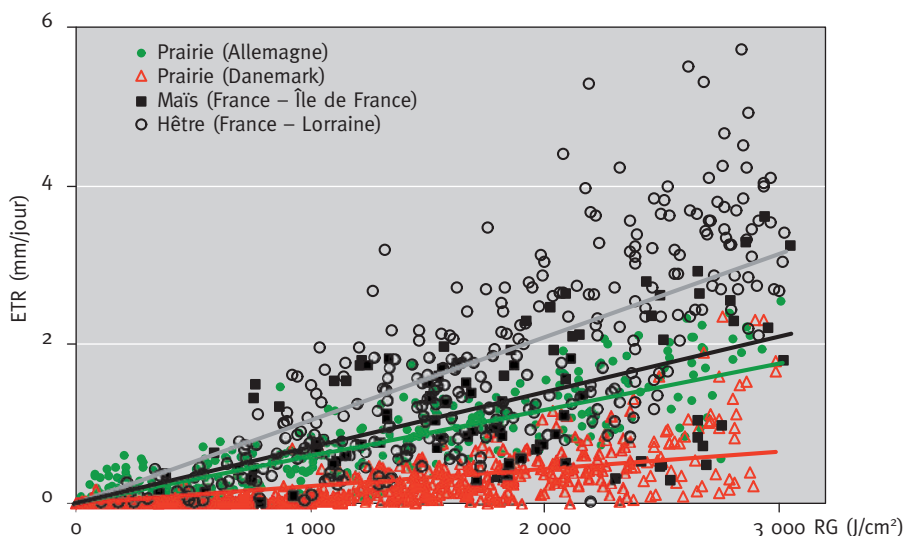
En raison des niveaux élevés de transpiration et d'interception des pluies dans les peuplements forestiers, l'ETR de ces derniers est souvent plus élevée que dans le cas des végétations basses de type cultures annuelles (non irriguées) et prairies. Ceci est illustré sur la figure 2 (p. 286) qui présente les valeurs journalières d'ETR de quatre couverts végétaux, en relation avec le rayonnement global, considéré ici comme une approximation de la demande climatique.

Enfin, un autre élément à considérer pour caractériser le cycle de l'eau des grands types de végétations est la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols forestiers (Blanchart *et al.*, 2000). Ces derniers présentent généralement une porosité dans les horizons de surface plus élevée que

celle des cultures et des prairies en raison de leur teneur en matière organique et de leur forte activité biologique. Ce facteur tend à réduire les écoulements superficiels rapides (ruissellement) avec pour conséquence de régulariser les débits des sources et des cours d'eau.

**FIGURE 2** **RELATION ENTRE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE (ETR)**  
**ET LE RAYONNEMENT GLOBAL JOURNALIERS (RG)**  
**pour une hêtraie (Hesse), une culture de Maïs (Grignon) et deux prairies (Grillenburg et Lille Valby)**

L'ETR a été mesurée au-dessus des couverts par la méthode des corrélations turbulentes mise en œuvre dans le réseau européen Carboeurope. Chaque point représente une journée ; le nombre de points expérimentaux (journées) varie selon les sites entre 95 et 727.



### APPROCHE PAR MODÉLISATION : SIMULATION DU DRAINAGE SOUS DIFFÉRENTS TYPES DE COUVERTS FORESTIERS

Face à l'impossibilité de réaliser des mesures directes des quantités d'eau percolée sous forêt, nous avons mis en œuvre une démarche par modélisation. Ce modèle (BILJOU©, Granier *et al.*, 1995 et 1999) fonctionne au pas de temps journalier : il permet de quantifier chacun des flux du bilan hydrique d'une parcelle forestière : transpiration des arbres, interception des précipitations, pluie sous couvert et évaporation du sol et de la végétation basse. Le drainage ou percolation de l'eau excédentaire est alors calculé *in fine*. Toutefois, il faut savoir que le modèle utilisé ne comprend pas de module hydrologique : le flux d'eau drainée est ici calculé pour chaque journée, mais on ne considère pas son cheminement au-dessous de la zone enracinée. La longueur et les propriétés du trajet, parfois long, vers les sources ou les cours d'eau, vont introduire un amortissement des variations de ce flux hydrique : les écoulements se poursuivent alors que le drainage a cessé et ils sont écrêtés lorsque le flux de drainage augmente brutalement.

Les paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle caractérisent le site : type de forêt (feuillus, résineux, mélange), caractéristiques du couvert (indice foliaire, phénologie) et du sol. Le modèle utilise les variables climatiques classiquement mesurées par Météo-France : température et humidité de l'air, rayonnement, vitesse du vent et pluie. Les quatre premières variables

permettent de calculer l'ETP. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter aux fiches pédagogiques du site BILJOU (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>).

### Choix des sites

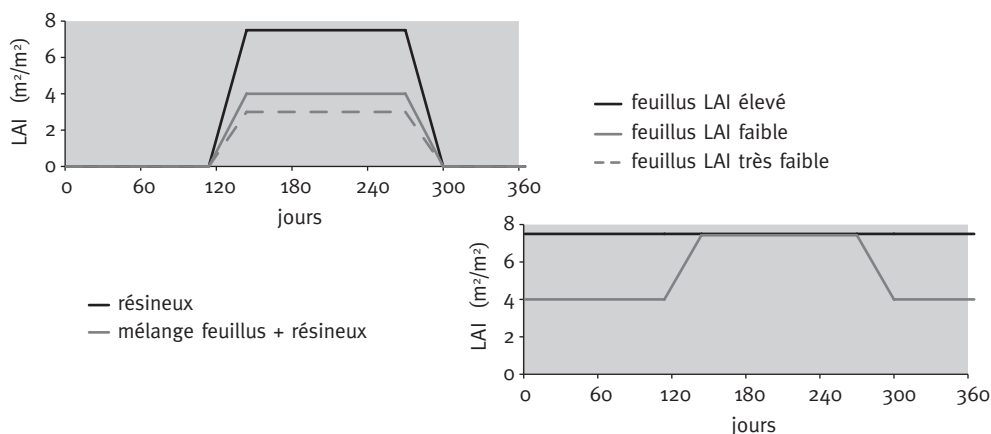
Deux sites ont été choisis pour réaliser cette étude :

- celui de la commune de Masevaux (Haut-Rhin) dont les forêts sont constituées d'un mélange de feuillus (45 %) et de résineux (55 %), site bien arrosé du sud des Vosges pour lequel nous disposons de données de débit de sources captées,
- la forêt domaniale de Hesse (Moselle) qui est une hêtraie de plaine.

### Paramètres des peuplements

Le LAI, paramètre essentiel nécessaire au calcul des flux d'eau, caractérise le type de couvert. Il est modulé par la gestion et pilote directement la transpiration des arbres et l'interception des précipitations. Nous avons considéré pour cet exercice cinq scénarios sylvicoles contrastés, se traduisant par des niveaux et des cinétiques de variation du LAI bien distincts. Nous avons considéré trois peuplements feuillus, de type hêtraie ou chênaie, caractérisés par différents niveaux d'indice foliaire maximum estival : très faible (LAI = 3), faible (LAI = 4), et élevé (LAI = 7,5), un peuplement résineux de type Sapin, Épicéa ou Douglas (LAI = 7,5) et un peuplement mélangé de feuillus et de résineux, type Hêtre et Sapin (LAI variant entre 4 et 7,5). Pour les feuillus, des dates de débourrement et de chute des feuilles ont été fixées respectivement aux jours de l'année 115 et 300 (figure 3, ci-dessous) ; les dates de feuillaison complète et de début de sénescence foliaire sont fixées respectivement aux jours 144 et 270.

**FIGURE 3 LES CINQ HYPOTHÈSES DE VARIATIONS DU LAI AU COURS DE L'ANNÉE**  
en haut pour trois peuplements feuillus, à indice foliaire (LAI) très faible, faible ou élevé ;  
en bas, pour un peuplement résineux à fort indice foliaire  
et pour un peuplement mélangé de feuillus et de résineux.



Concernant les propriétés du sol, nous avons considéré une réserve utile de 130 mm, ce qui constitue une hypothèse moyenne.

Enfin, les données météorologiques quotidiennes sont celles que nous mesurons sur le site-atelier de la forêt de Hesse. Pour le site de Masevaux, nous avons utilisé les relevés des stations Météo-France les plus proches.

## Simulations

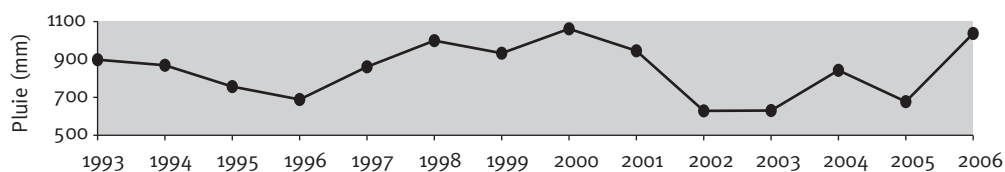
Les simulations ont été réalisées pour la période 1993 à 2006 à Masevaux (ensemble des données météorologiques disponibles) et de 2003 à 2008 à Hesse, période caractérisée par un fort contraste interannuel des conditions pluviométriques.

Nous avons ensuite analysé les flux de drainage simulés selon trois périodes de cumuls des valeurs journalières : juillet et août (période généralement d'été, correspondant au plus chaud de l'été), du 1<sup>er</sup> avril au 15 octobre (saison de végétation) et pour l'année complète. Faut de pouvoir présenter ici l'ensemble des résultats, nous nous limiterons à des exemples caractéristiques des tendances observées. La figure 4 (ci-dessous) présente, pour le site de Masevaux, les drainages sur la saison de végétation (en moyennes journalières), pour les 5 hypothèses de couvert. On constate en premier lieu une forte variabilité entre années avec, aux extrêmes, l'année 2003, très sèche, et les années 2000 et 2006 très arrosées. On remarque un effet du type de couvert, que l'on retrouve chaque année et toujours dans le même sens : les niveaux de drainage se classent dans cet ordre décroissant : feuillus à très faible, à faible et à fort LAI, puis mélange feuillus-résineux, puis résineux purs. Néanmoins, les différences entre couverts varient d'une année sur l'autre avec, par exemple, une plus forte différence entre les valeurs extrêmes de drainage (feuillus à très faible LAI contre résineux) en 2003 qu'en 1994.

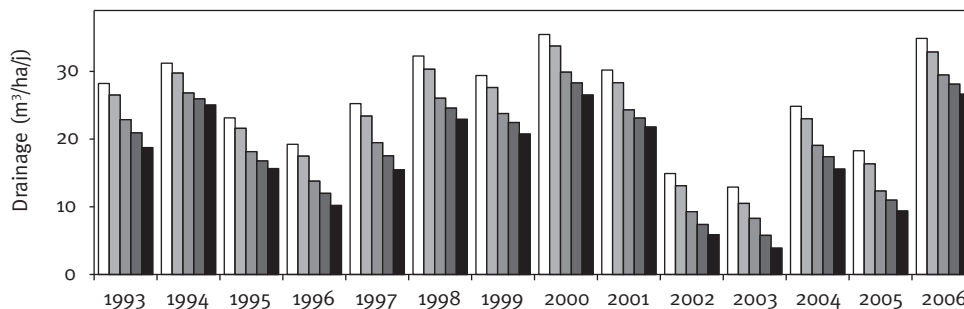
Si l'on considère seulement la période d'été (juillet-août), les différences entre années et types de couverts sont exacerbées. Nous présentons sur la figure 5 (p. 289) les simulations de drainage pour trois années très contrastées à Masevaux : une année très sèche (2003), une année moyenne (1996) et une année humide (2000). Cette simulation est intéressante car elle montre bien les conditions dans lesquelles les différences entre hypothèses de couverts sont les plus élevées et

**FIGURE 4** **VOLUMES D'EAU DRAINÉE ENTRE LE 1<sup>er</sup> AVRIL ET LE 15 OCTOBRE POUR LE SITE DE MASEVAUX, avec les 5 hypothèses de types de couvert : feuillus, résineux et mélangés**

Les résultats sont exprimés en m<sup>3</sup> d'eau par hectare et par jour.  
En haut : pluviométrie des différentes années, pour la même période.



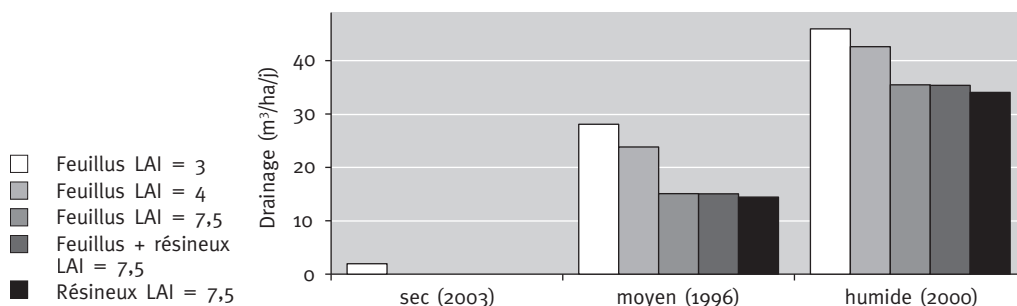
□ Feuillus LAI=3    □ Feuillus LAI=4    □ Feuillus LAI=7,5    ■ Feuillus + résineux LAI=7,5    ■ Résineux LAI=7,5



les limites de l'impact de la gestion sur les écoulements. On constate en effet que l'effet du type de couvert est le plus fort pour l'année à pluviométrie estivale d'un niveau moyen (1996), les couverts à LAI faibles (3-4) induisant un gain de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/ha/j par rapport aux autres peuplements. Ce chiffre, ramené à un bassin d'alimentation de 100 ha de superficie, représente la consommation en eau d'une ville de plus de 5 000 habitants. Pour une année très sèche (2003), on n'observe que très peu, voire plus d'écoulements.

**FIGURE 5 VOLUMES D'EAU DRAINÉE ENTRE LE 1<sup>ER</sup> JUILLET ET LE 31 AOÛT POUR LE SITE DE MASEVAUX**

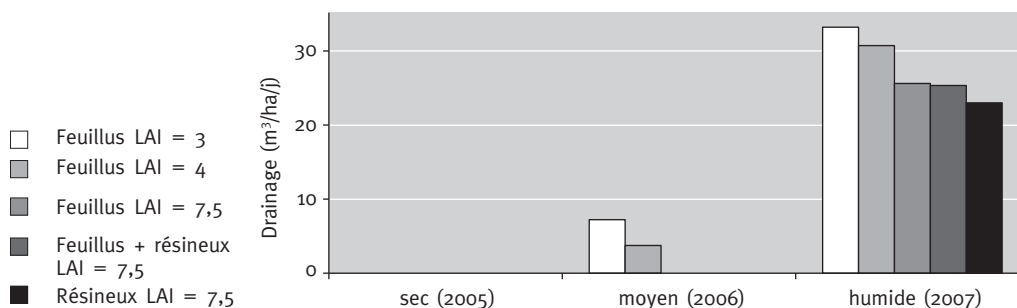
avec les 5 hypothèses de types de couvert : feuillus (3 niveaux de LAI), résineux purs et mélangés, pour 3 années à pluviométrie estivale très contrastée : 159 mm (2003), 307 mm (1996) et 461 mm en 2000



Les simulations réalisées pour le site de Hesse en été (figure 6, ci-dessous) confirment ce qui a été trouvé pour Masevaux, mais avec des volumes d'eau drainée plus faibles, ce qui s'explique par une pluviométrie bien plus faible dans le site mosellan.

**FIGURE 6 VOLUMES D'EAU DRAINÉE ENTRE LE 1<sup>ER</sup> JUILLET ET LE 31 AOÛT POUR LE SITE DE HESSE**

avec les mêmes hypothèses de types de couvert que pour la figure 5, pour 3 années à pluviométrie estivale très contrastée : 134 mm (2005), 174 mm (2006) et 329 mm en 2007



Ces résultats indiquent que le caractère sempervirent ou décadu des couverts forestiers et la gestion de ces couverts influencent les quantités d'eau restituées au milieu et disponibles pour l'alimentation en eau potable.

Il faut toutefois nuancer les résultats présentés ci-dessus, le modèle utilisé ne simulant que la perte en eau par drainage depuis la couche superficielle du sol, celle colonisée par les systèmes racinaires. Selon les conditions du site, ce flux mettra plus ou moins de temps avant d'atteindre rivières ou nappes. Une phase ultérieure, si l'on souhaite représenter fidèlement la dynamique temporelle, doit passer par un couplage entre un tel modèle « peuplement » et un modèle hydrologique.

Ces résultats montrent que, dans le domaine de la gestion de l'eau, il existe des économies potentielles en termes de coûts de fonctionnement pour les services d'alimentation en eau potable. En effet, il apparaît possible d'optimiser la production de sources gravitaires relativement à des pompages qui sont plus onéreux à exploiter en raison des coûts énergétiques qu'ils impliquent.

Nos calculs font en outre état d'une absence de restitution d'eau au milieu lors des années de sécheresse sévère, précoce et prolongée comme en 2003 : changer le type de couvert forestier ou son indice foliaire ne suffit donc pas à éviter cela. Ce résultat, obtenu pour une année climatique donnée, est cohérent avec des simulations réalisées sous scénarios climatiques futurs (Bréda *et al.*, 2010). Le dimensionnement des ressources alternatives aux sources captées (un forage dans une nappe profonde par exemple) est basé sur les années les plus limitantes. Ainsi, il n'y aurait pas d'économie à attendre sur le plan du coût des infrastructures.

## CONCLUSIONS

La modélisation des bilans hydriques est une approche qui permet de quantifier les services que peut rendre la forêt sur le plan de la disponibilité de la ressource en eau.

Nous avons vu dans ce travail que la nature (feuillus ou résineux) et la gestion du couvert (essence et contrôle de l'indice foliaire) pouvait avoir un impact très significatif sur les écoulements. Il est donc possible, *a priori*, de moduler le drainage par les pratiques de gestion. Pour des sites très arrosés, l'étude des interactions gestion forestière / fourniture d'eau indique des différences relativement faibles entre les types de couverts, ce qui s'explique par le fait que l'eau est le plus souvent en excès. En situation de déficit pluviométrique extrême, les simulations indiquent que le gain sur les quantités d'eau est faible. Ces calculs réalisés au niveau de la parcelle n'incluent pas le trajet de l'eau vers sources et cours d'eau qui induit un amortissement des extrêmes, les écoulements se poursuivant longtemps après l'arrêt du drainage. Nous avons pu faire cette observation (données non présentées ici) sur les mesures des captages de sources de Masevaux.

Pour la production d'eau potable, le maintien de couverts décidus clairs pourrait générer des économies en termes de coûts de fonctionnement, avec l'optimisation de la production de sources gravitaires (exemple du site lorrain).

À la suite de cette étude, il serait utile de s'intéresser à des zones géographiques de France métropolitaine présentant des conditions pédo-climatiques différentes. À noter que des travaux similaires sous scénarios de climat futur peuvent être consultés dans le Livre Vert (Bréda *et al.*, 2010 ; Itier, 2010).

André GRANIER – Nathalie BRÉDA – Vincent BADEAU  
UMR INRA- Université de Lorraine  
Écologie et écophysologie forestières  
INRA Nancy  
F-54280 CHAMPENOUX  
(agranier@nancy.inra.fr) (breda@nancy.inra.fr)  
(badeau@nancy.inra.fr)

Julien FIQUEPRON  
CNPf-IDF  
Maison de la forêt  
11 rue de la Commanderie  
F-54000 NANCY  
(julien.fiquepron@cnpf.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

AUSSENAC (G.). — Étude de l'évaporation réelle de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 29, n° 3, 1972, pp. 369-389.



- AUSSENAC (G.), BOULANGEAT (C.). — Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 37, 1980, pp. 91-107.
- BENOÎT (M.), FIZAINE (G.). — Qualité des eaux en bassins forestiers d'alimentation. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2 spécial "Fonctionnement des arbres et écosystèmes forestiers. Avancées récentes et conséquences sylvicoles", 1999, pp. 162-172.
- BENOÎT (M.), DEFFONTAINES (J.-P.), GRAS (F.), BIENAIMÉ (E.), RIÉLA-COSSERAT (R.). — Agriculture et qualité de l'eau : une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation. — *Cahiers Agriculture*, 6, 1997, pp. 97-105.
- BIRON (P.). — Le Cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne : flux de sève et bilans hydriques stationnels (Bassin versant du Strengbach à Aubure, hautes Vosges). — Strasbourg : Université Louis Pasteur, 1994. — 114 p. (Thèse).
- BLACK (T.A.). — Evapotranspiration from Douglas fir stands exposed to soil water deficits. — *Water Resources Research*, 15, 1979, pp. 164-170.
- BLANCHART (E.), ACHOUAK (W.), ALBRECHT (A.), BARAKAT (M.), BELLIER (G.), CABIDOCHÉ (Y.-M.), HARTMANN (C.), HEULIN (T.), LARRÉ-LARROUY (C.), LAURENT (J.-Y.), MAHIEU (M.), THOMAS (F.), VILLEMIN (G.), WATTEAU (F.). — Déterminants biologiques de l'agrégation dans les vertisols des Petites Antilles. Conséquences sur l'érodibilité. — *Étude et Gestion des Sols*, 7, 2000, pp. 309-328.
- BRÉDA (N.), BOSCH (A.), BADEAU (V.). — Éléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine. Dans : Le Livre Vert du projet Climator. — ADEME, 2010. — pp. 225-236.
- BRÉDA (N.), GRANIER (A.). — Intra- and inter-annual variations of transpiration and circumference increment of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). — *Annals of Forest Sciences*, 53, 1996, pp. 521-536.
- CALDER (I.R.). — Forests and Hydrological Services: Reconciling public and science perceptions. — *Land Use and Water Resources Research*, 2, 2002, 2.1-2.12.
- COSANDEY (C.). — Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. — *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 4 spécial "Eau et forêt", 2006, pp. 317-328.
- DUFRENE (E.), DUBOS (B.), REY (H.), QUENCEZ (P.), SAUGIER (B.). — Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficits. — *Acta oecologica*, 13, 1992, pp. 299-314.
- FAO. — Forests and water, a thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005 / L.S. Hamilton. — Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008 (n° 155).
- FEDERER (C.A.). — A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. — *Water Resources Research*, 3, 1979, pp. 555-562.
- FERRY (O.). — La Forêt au service de l'eau : une perspective européenne ? — *Revue forestière française*, vol. LVI, n° 1, 2004, pp. 47-63.
- FERRY (O.). — Quels contrats pour une forêt au service de l'eau ? Quelques enseignements du projet LIFE Forests for Water. — *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 4 spécial "Eau et forêt", 2006, pp. 399-406.
- FIQUEPRON (J.). — Dossier forêt et eau potable. — *Forêt Entreprise*, n° 193, 2010, pp. 11-42.
- FIQUEPRON (J.). — Des forêts pour l'eau potable : l'eau paiera ? — *Revue forestière française*, volume LXIV, n° 3 spécial "Les services écosystémiques rendus par les forêts", 2012, pp. 293-304.
- FIQUEPRON (J.), PICARD (O.). — Des forêts pour l'eau potable : valoriser les services rendus - « Il y a moins bien mais c'est plus cher ». — CNPF-IDF, 2011. — 4 p.
- GRANIER (A.). — Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. — *Tree Physiology*, 3, 1987, pp. 309-320.
- GRANIER (A.), BADEAU (V.), BRÉDA (N.). — Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 59-68.
- GRANIER (A.), BRÉDA (N.), BIRON (P.), VILLETTE (S.). — A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. — *Ecological Modelling*, 116, 1999, pp. 269-283.
- GRANIER (A.), HUC (R.), COLIN (F.). — Transpiration and stomatal conductance of two rain forest species growing in plantations (*Simarouba amara* and *Goupia glabra*) in French Guyana. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 49, 1992, pp. 17-24.
- ITIER (B.). — Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes. Dans : Le Livre vert du projet Climator. — ADEME, 2010. — pp. 79-92.

- ONF. — L'Eau et la forêt. — *Bulletin technique de l'ONF*, n° 37, 1999, pp. 49-73.
- RAMBAL (S.). — Water balance and pattern of root water uptake by a *Quercus coccifera* L. evergreen scrub. — *Ecologia*, 62, 1984, pp. 18-25.
- RANGER (J.), COLIN-BELGRAND (M.), NYS (C.). — Le Cycle biogéochimique des éléments majeurs dans les écosystèmes forestiers. Importance dans le fonctionnement des sols. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 2, n° 2, 1995, pp. 119-134.
- SAVOIE (J.-M.). — Une chênaie hêtraie d'Aquitaine : la forêt de Laveyron (Landes). Facteurs stationnels, phénologie, régénération du Hêtre. — Université de Bordeaux I, 1982. — 109 p. (Thèse).
- STOLTON (S.), DUDLEY (N.). — Managing forests for cleaner water for urban populations. — Rome : FAO - Forestry department, 2007. [En ligne] URL : <http://www.fao.org/docrep/010/a1598e/a1598e10.htm>

---

### L'EAU FORESTIÈRE DE QUALITÉ : COMMENT AGIR SUR LES QUANTITÉS PRODUITES ? (Résumé)

Les forêts exercent une action déterminante sur le cycle de l'eau, au travers de propriétés liées à leur structure, en particulier le développement des couverts et des systèmes racinaires. Si l'on s'intéresse au service de fourniture d'eau par les forêts, il faut considérer les deux éléments suivants :

- globalement, plus la productivité d'une forêt est élevée, plus sa consommation en eau le sera et diminuera d'autant le flux de drainage. En d'autres termes, il existe un compromis entre la production en biomasse et la restitution d'eau au milieu ;
- l'eau drainée sous couvert forestier vers les cours d'eau, les sources ou les nappes, est en règle générale de bonne qualité. Une évidence qu'il est bon de rappeler est que qualité et quantité d'eau ne doivent pas être dissociées, le service « eau de qualité » sous-entend de disposer de quantités suffisantes et dans la durée.

La connaissance et la gestion de cette eau « forestière » sont basées sur celle du bilan hydrique et de ses variations spatio-temporelles. Cet article traite des différentes sources de variation du bilan hydrique liées au climat, aux conditions édaphiques, à l'espèce, à la sylviculture, variations qui ont toutes un impact sur les quantités d'eau drainée. Il fournit aussi quelques comparaisons avec les autres grands types de végétations. Pour répondre à la question de l'évaluation quantitative de la fourniture d'eau forestière et de sa modulation par la gestion, nous avons mis en œuvre une approche de modélisation, utilisant un modèle de bilan hydrique au pas de temps journalier. À partir de paramètres propres au site et de données météorologiques, ce modèle simule les flux d'évapotranspiration réelle, la pluie au sol, la teneur en eau du sol et le drainage. Deux sites forestiers ont été choisis pour réaliser l'étude décrite dans cet article. Il s'agit de massifs forestiers de l'Est de la France, à régimes pluviométriques contrastés, pour lesquels nous avons simulé, en situation de climat actuel, l'effet de cinq scénarios sylvicoles sur les volumes d'eau drainés.

### QUALITY FOREST WATER - HOW CAN WE IMPACT QUANTITIES PRODUCED ? (Abstract)

Forests have a key influence on the water cycle through properties related to their structure, in particular the development of the canopy and of root systems. Any examination of forests as suppliers of water must consider the following two elements:

- overall, the more productive the forest, the greater its water consumption, which accordingly reduces drainage flow. In other words, there is a trade-off between biomass production and the amount of water returned to the environment;
- water drained under forest canopies to streams, springs or the water table is generally of good quality. A self-evidence worth remembering is that quality and quantity of water cannot be dissociated: the service of "quality water" implies availability of sufficient quantities over time.

Knowledge and management of forest-sourced water are based on knowledge of the water balance and its variations in space and time. This article discusses the various causes of variations in water balance connected with climate, soil conditions, forest species, silvicultural practices, all of which have an impact on the amount of water drained. It also provides some comparisons with other major vegetation types. To answer the question of how to quantitatively assess the amount of water supplied by forests and how to modulate that quantity by management, we implemented a modelling approach that uses a water balance model with a daily time step. Using site-specific parameters and meteorological data, the model simulates the flow from actual evapotranspiration, rainwater at ground level, the water content of the soil and drainage. Two forest sites were selected for the study described in this article. These are forests in eastern France with contrasting rainfall patterns for which we simulated, under current climate conditions, the effect on the volume of water drained of five different silvicultural scenarios.