

Le bilan hydrique en forêt méditerranéenne : influence des strates et de leur gestion

Application au pin d'Alep

par Bernard PRÉVOSTO, Mathieu AUDOUARD, Manon HELLUY,
Jean-Michel LOPEZ et Philippe BALANDIER

Le bilan hydrique en quantifiant les flux entrants et sortants d'eau dans un écosystème est une donnée très importante pour les peuplements forestiers méditerranéens. Dans cet article, l'étude du bilan hydrique dans une pinède de pin d'Alep montre que la gestion sylvicole peut influer sur la consommation en eau des peuplements.

Introduction

Le bilan hydrique consiste à quantifier les différents flux d'eau dans l'écosystème forestier, c'est-à-dire les flux entrants (les gains) et ceux sortants (les pertes). A l'échelle du territoire, le bilan hydrique permet de calculer l'eau consommée par la forêt et celle disponible par drainage, c'est-à-dire celle pouvant alimenter les réserves profondes (nappes souterraines) ou les cours d'eau, et qui est donc potentiellement disponible pour d'autres usages (cultures, prairies, zones urbaines). A une échelle plus locale, le bilan hydrique est bien sûr, une donnée fondamentale pour les peuplements forestiers méditerranéens car il détermine largement la survie et la croissance des différentes formes de végétation : arbres, sous-bois et régénération. Il existe en effet une corrélation forte entre la croissance de la végétation et l'eau disponible dans le sol.

L'évaluation du bilan hydrique et par la suite, sa modélisation, est donc un enjeu essentiel pour le forestier et l'aménageur du territoire.

Fig. 1 :
Schéma théorique du bilan hydrique pour un peuplement de pin d'Alep. La pluie incidente est interceptée en partie par la strate de pin et par le sous-bois. Une partie de la pluie arrivant au sol permet d'alimenter la réserve utile en eau de chaque horizon via la microporosité alors qu'une autre fraction est drainée par la macroporosité. La végétation, pour sa transpiration, préleve dans la réserve utile de chaque horizon proportionnellement à la fraction de racines fines. La fraction d'eau drainée hors du profil racinaire permet l'alimentation en eau profonde.

Dans cet article nous rappelons dans une première partie comment est construit et modélisé le bilan hydrique en forêt : en l'appliquant pour le cas du pin d'Alep, en distinguant les différents compartiments de l'écosystème et en décrivant les principales méthodes utilisées. Dans une seconde partie, nous utilisons le modèle pour analyser et discuter l'influence sur le bilan en eau de gestions très contrastées du peuplement (ouverture de la canopée, suppression ou non de la strate basse).

Les composantes du bilan hydrique et sa modélisation

Comme le rappellent GRANIER *et al* (1995), la modélisation du bilan hydrique peut s'effectuer à différentes échelles de temps (an, mois, jour, heure) et pour des degrés de précisions variables selon les objectifs poursuivis, comme par exemple, caractériser un climat sur plusieurs années, évaluer la croissance forestière, étudier des processus écophysioliques.

Le modèle présenté ici se fonde sur le modèle proposé par GRANIER *et al.* (1999) dénommé BILJOU¹. Ce modèle est exclusivement forestier, à la différence d'autres modèles plus généralistes (voir DERAEDT *et al.*, 2014 pour une présentation des différents modèles), et il utilise un pas de temps journalier. Par la suite, nous avons simplement adapté ce modèle afin 1) de définir une interception de la pluie spécifique au pin d'Alep et 2) d'individualiser une strate basse dans ce modèle, ce qui n'est pas explicitement fait dans le modèle BILJOU, alors qu'en forêt méditerranéenne une strate arbustive est très souvent présente avec un recouvrement qui peut être élevé.

Le bilan hydrique représente l'ensemble des flux d'eau entrants et sortants au niveau de l'écosystème (Cf. Fig. 1). Dans de nombreux écosystèmes forestiers méditerranéens on peut négliger les remontées capillaires et l'évaporation du sol lorsque le couvert par la végétation est suffisant. On peut également ne pas prendre en compte les écoulements latéraux, ce qui est justifié sur des terrains plats ou en milieu de pente mais pas les zones de départ ou d'accumulation (sommet, fonds de vallon). Dans ces conditions, le bilan hydrique s'écrit de la façon suivante :

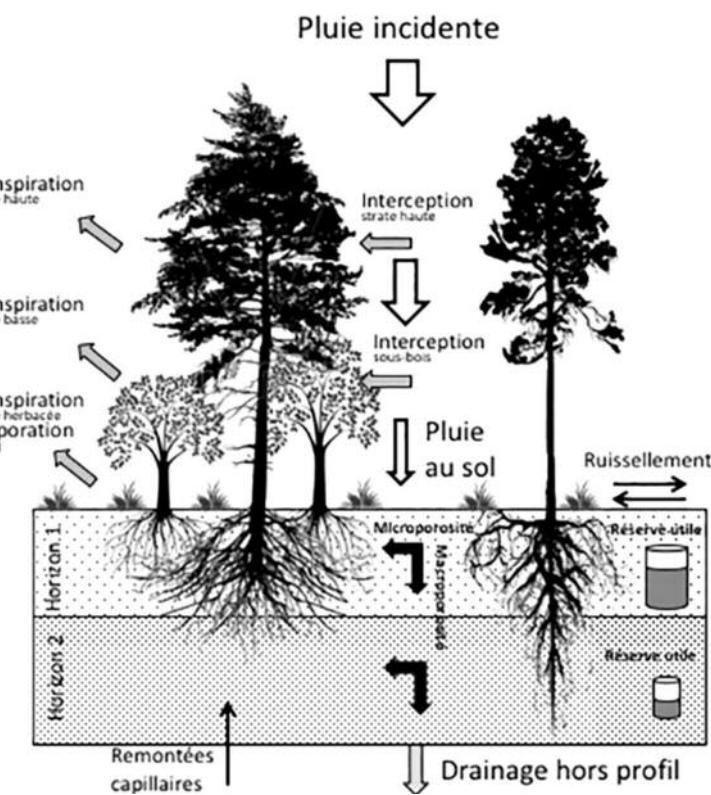
$$P - (Ied + Isb) - (Ted + Tsb) = \Delta S + Dr$$

Pour une période donnée, cette équation indique que les entrées, c'est à dire les précipitations incidentes (P) auxquelles on retranche l'interception par l'étage dominant (Ied) et par le sous-bois (Isb), la transpiration par l'étage dominant (Ted) et le sous-bois (Tsb), sont égales à la variation du stock d'eau dans le sol (ΔS) plus le drainage hors de la zone de captation par les racines (Dr). Nous allons par la suite, exposer comment évaluer successivement le terme de droite de l'équation, qui correspond au compartiment souterrain, puis celui de gauche, relatif au compartiment aérien.

Compartiment sol : la détermination de la réserve utile et de son évolution

L'alimentation en eau de la végétation se fait au moyen du stock en eau du sol utilisable par la plante, encore appelé réserve utile (RU). La RU se calcule pour chaque horizon de la manière suivante (voir par exemple JABIOL *et al.*, 2009) :

$$RU \text{ (mm)} = 0,01 \times (CC\% - HF\%) \times z \text{ (mm)} \\ \times da \times [(100 - EG\%) / 100]$$



CC = quantité d'eau à la capacité au champ (après ressuyage du sol) en % massique.

HF = quantité d'eau au point de flétrissement permanent en % massique.

z = épaisseur de l'horizon (en mm).

da = masse volumique apparente de la terre fine : masse de la terre fine sèche divisée par volume de la terre fine (volume terre fine = volume total - volume des éléments grossiers de l'échantillon prélevé sans remaniement). Elle varie en moyenne de 1,3 à 1,5 kg/dm³.

EG= pourcentage volumique d'éléments grossiers (>2 mm).

Pour une estimation simplifiée on peut utiliser la formule suivante :

$$\text{RU (mm)} = \text{coefficient textural (mm/cm)} \times z(\text{cm}) \times [(100-\text{EG}\%)/100]$$

Le coefficient textural indique la quantité d'eau extractible (mm) par cm du sol considéré.

La RU totale d'un sol se calcule ensuite en sommant les RU de chaque horizon. Les valeurs de CC, HF, da et du coefficient textural dépendent de la texture du sol ; des valeurs sont proposées par exemple par JAMAGNE *et al* (1977) et BAIZE (1988), cités par JABIOL *et al* (2009). Ainsi, Jamagne indique qu'un sable contient en moyenne 0,70 mm d'eau par cm contre 1,70 mm par cm pour une argile. La densité apparente de la terre fine peut se mesurer en prélevant des volumes constants de sol en place (Cf. Photo 1) qui sont ensuite tamisés (<2mm), séchés en étuve, et pesés.

Deux éléments très importants sont, d'une part, l'estimation de la profondeur totale du sol prospectée par les racines fines, qui sont celles qui participent à l'alimentation de l'arbre, et d'autre part l'évaluation de leur densité dans les différents horizons. BREDA *et al* (2002) ont ainsi montré que pour le frêne en zone tempérée, une densité de racines fines de seulement 8% en profondeur, assuraient

l'essentiel de l'alimentation en eau de l'arbre en période estivale. Dans nos expérimentations, l'épaisseur totale est relativement facile à mesurer car il s'agit de sols issus d'anciennes terres agricoles (Cf. Photo 2). Cependant en zone méditerranéenne ce paramètre peut être très compliqué, voire impossible à estimer facilement. C'est, par exemple, le cas de sols sur calcaires fracturés qui permettent aux racines d'explorer des poches profondes de terre mais qui restent largement inaccessibles à l'observation directe. La roche mère et les éléments grossiers du sol peuvent participer également à la réserve en eau en stockant une partie de l'humidité et en la restituant ensuite à la végétation. Par exemple, dans les sols de la Beauce, TETEGAN *et al* (2015) démontrent que la quantité d'eau disponible est sous-estimée de 20% si ne sont pas pris en compte le volume et les propriétés hydriques des éléments grossiers (calcaire principalement) pour les 120 premiers centimètres de sol. Pour nos sols, nous n'avons pas considéré cet aspect en raison d'un volume faible d'éléments grossiers (<10%) dans les horizons de surface.

La réserve en eau extractible d'un horizon représente la quantité d'eau disponible pour la plante. Elle fluctue au cours du temps et peut varier de 0 à la valeur de la RU. Elle dépend en effet de l'eau arrivant au sol, qui a percolé à travers les horizons supérieurs ainsi que du prélèvement par la végétation (transpiration), qui est proportionnel à la fraction de racines fines présentes dans l'horizon. La porosité est aussi à prendre en compte. Ainsi dans l'horizon supérieur, l'eau arrivant est celle transmise par la végétation après interception (cf. section suivante) ; une partie de cette eau sert à alimenter le réservoir de l'horizon, mais une autre s'écoule par

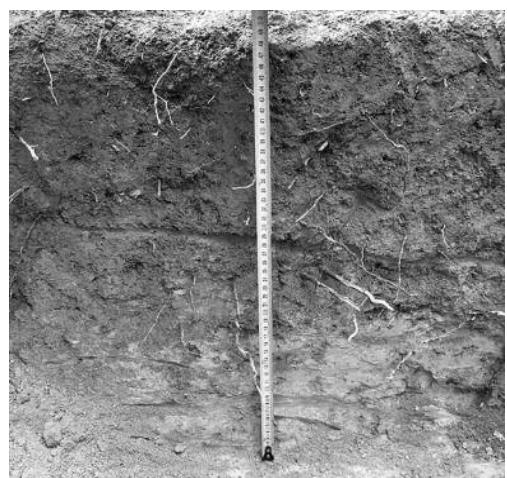


Photo 1 (à gauche) :
Prélèvement d'un volume de sol constant à l'aide d'un cylindre.

Photo 2 (à droite) :
Fosse pédologique sur un ancien terrain de culture.
Photos JM Lopez.

drainage sous l'effet de la gravité. Cette eau drainée correspond à la macroporosité du sol qui peut se calculer, par exemple, à partir de la teneur en sable de l'horizon (STOLF *et al*, 2011).

Compartiment aérien : l'interception des pluies et la transpiration de la végétation

Interception

Lors d'un épisode pluvieux, une partie de la pluie est transmise au sol : il s'agit de la pluie non interceptée par la végétation et qui arrive directement au sol, de la pluie qui

tombe sur le feuillage et finit par s'écouler lorsque la capacité de stockage en eau de ce feuillage est dépassée, et enfin de la pluie qui s'écoule le long des troncs. Dans un article synthétisant les résultats de 90 études en région méditerranéenne, LLORENS et DOMINGO (2007) constatent que la pluie transmise représente en moyenne 79% de la pluie initiale pour les arbres et seulement 49% pour les arbustes et buissons, mais la portée de ce dernier résultat est limitée par le fait d'un nombre réduit d'études, conduites pour la plupart en zone aride ou semi-aride. Il existe bien évidemment, des variations fortes entre conifères et feuillus décidus et entre les espèces : par exemple la pluie transmise est de 70% pour le pin pignon, 72 % pour le chêne vert, 87-88% pour les chênes décidus. L'écoulement le long des troncs, toujours selon les mêmes auteurs, n'est que de 3% en moyenne, avec des variations fortes : 12% pour le pin noir mais seulement 1% pour le pin sylvestre en raison de la variabilité des architectures de la canopée et de la rugosité des écorces.

Pour le pin d'Alep, nous nous référons à une étude de MOLINA et DEL CAMPO (2012) conduite dans des peuplements de la province de Valencia en Espagne, éclaircis ou non. Les auteurs trouvent que 43% de la pluie est interceptée par le feuillage dans les peuplements non éclaircis denses (surface terrière = $35,6 \text{ m}^2/\text{ha}$, 1289 tiges/ha) et que seulement 1,5% de la pluie incidente s'écoule le long des troncs. Ils proposent également un modèle d'interception de la pluie transmise, en fonction soit de la surface terrière, soit de l'indice de surface foliaire (voir encadré LAI). Nous avons retenu par la suite, le modèle utilisant le LAI et considéré, en l'absence de données fiables, que l'interception par le sous-étage suivait la même loi que pour l'étage dominant.

Transpiration

En période de végétation, la transpiration représente l'essentiel des pertes en eau de l'écosystème. GRANIER *et al* (1999) ont montré que la transpiration dépend de l'indice de surface foliaire (LAI) et de la fraction d'eau disponible dans le sol (réserve utile). Pour un peuplement donné, la transpiration est maximale lorsque l'eau extractible par les plantes est supérieure à 40% de la réserve utile. Elle dépend alors du LAI et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui reflète la capacité théorique de perte en eau de l'écosystème vers l'atmosphère. Nous avons opté

L'indice de surface foliaire (LAI)

L'indice de surface foliaire -plus souvent nommé par son acronyme anglais LAI (leaf area index)- se définit pour un peuplement, comme la somme des surfaces des feuilles (surface mesurée sur une seule face) par unité de surface du terrain. Il s'exprime donc en m^2/m^2 . C'est un paramètre fondamental car il représente l'interface plante-atmosphère et donc contrôle, en particulier, les processus de photosynthèse, de transpiration et d'interception de la pluie. Il peut varier de 1 à 20 en zone tempérée : en moyenne de 3 à 6 pour les peuplements feuillus, et atteindre jusqu'à 20 dans les peuplements résineux denses (Breda, 1999). Bien sûr sa valeur dépend de l'espèce, du type de peuplement et de sa gestion ; elle fluctue au cours de l'année de manière évidente pour les feuillus à feuilles caduques alors qu'on peut considérer cette valeur globalement stable pour les résineux. La mesure du LAI est effectuée le plus souvent de manière indirecte. Une première méthode est l'utilisation de relations allométriques, lorsqu'elles sont disponibles, corrélant par exemple la valeur du LAI à la surface terrière. Une telle relation a ainsi été établie par López-Serrano *et al* (2000) pour les peuplements de pin d'Alep en Espagne. Une autre méthode se fonde sur la mesure simultanée du rayonnement sous et hors couvert, à l'aide de capteurs. En effet le LAI peut être ensuite calculé à partir de l'éclairement transmis et d'hypothèses sur la géométrie du feuillage. La prise de photographies hémisphériques (image de la voûte forestière sur 360°) puis leur traitement par des logiciels spécifiques, permettent de fournir également une estimation du LAI.

Pour une synthèse voir aussi BERTIN *et al* (2016).



Photo a (ci-dessus) : Réalisation d'une photo hémisphérique. *Photo JM Lopez.*

Photo b (ci-contre) : Image de la voûte forestière. *Photo M. Audouard.*



pour un calcul de l'ETP selon la formule de Penman-Monteith, mais des formulations plus simples peuvent être utilisées (voir encadré ETP). En deçà du seuil de 40% de réserve utile, la transpiration décroît de manière linéaire (Cf. Fig. 2).

La transpiration peut se calculer pour la strate arborée et la strate arbustive. Dans le cas de la strate arbustive, l'ETP est recalculée en prenant en compte les valeurs de température de l'air, d'humidité relative de l'air, de vitesse de vent et d'éclairement enregistrés sous couvert. On peut alors montrer qu'elle dépend étroitement de l'éclairement, et qu'elle est d'autant plus basse que la lumière transmise est faible.

Résultat de la modélisation

En utilisant les principes précédents, nous avons modélisé le bilan hydrique à un pas de temps journalier pour des peuplements de pin d'Alep à Saint-Mitre-les-Remparts en basse Provence calcaire, présentant des surfaces terrières distinctes (32, 19 ou 10 m²/ha). Le sol est un ancien sol agricole sur calcaire gréseux (calcarénite), d'une profondeur moyenne de 60cm, de densité apparente de 1,3 à 1,5 avec une texture contenant 52% sable, 34% limon, 14% argile (AUDOUARD, 2017). Le sol est divisé en 3 horizons de 20 cm chacun avec un pourcentage massique de racines fines variant de 45% à 25%, et un pourcentage volumique d'éléments grossiers variant de 9 à 20% (AUDOUARD, 2017). La réserve utile totale est de 61 mm. Les données météorologiques sont celles recueillies sur place par une station météo portable (BWS 200, Campbell) et l'ETP est calculée selon la formule de Penman-Monteith. Pour s'assurer de la validité du bilan hydrique, nous avons comparé les valeurs d'humidité du sol du second horizon avec les valeurs enregistrées par des sondes d'humidité in situ (sondes de type EC5, Decagon) sur deux années. Les résultats de cette comparaison sont montrés dans la Figure 3. On note que les fluctuations des valeurs modélisées et observées sont similaires au cours du temps avec cependant quelques écarts. On observe notamment que le modèle a tendance à surestimer la capacité des sols à se recharger après une période sèche.

La modélisation du bilan hydrique journalier permet de calculer une évolution de la réserve en eau relative extractible ainsi que des indices de stress hydriques tels que défi-

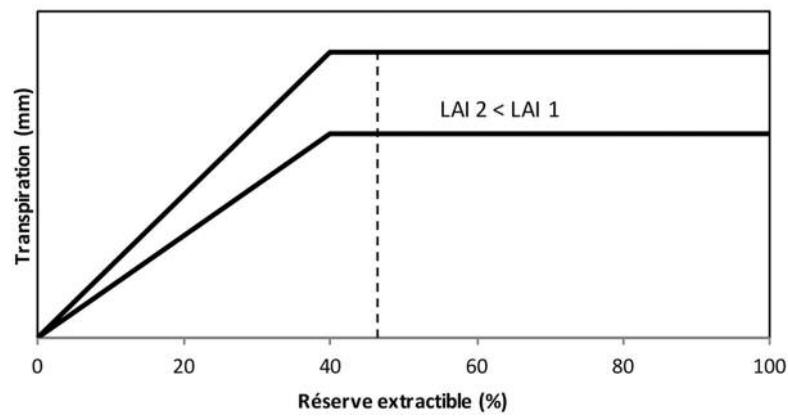


Fig. 2 :

Evolution de la transpiration en fonction du pourcentage d'eau de la réserve extractible du sol pour deux peuplements (de LAI respectifs LAI 1 et LAI 2 < LAI 1) telle que proposée par Granier et al. (1999). La transpiration maximale (Tmax) est une fonction du LAI et de l'ETP.

L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration (ET) d'un système forestier représente l'ensemble des flux d'eau qui sont transférés à l'atmosphère par la transpiration des plantes appartenant aux différentes strates, l'évaporation du sol et l'évaporation de l'eau interceptée par les feuillages. On parle alors d'évapotranspiration réelle (ETR). Elle dépend étroitement d'une évapotranspiration dite de référence ou potentielle (ET₀ ou ETP) qui s'évalue à partir des pertes en eau d'un couvert végétal de référence bien alimentée en eau. L'ETP peut être calculée par des formules mathématiques utilisant des paramètres climatiques à des pas de temps variables (heure, jour, mois par ex.). La formulation la plus complète est celle de Penman-Monteith recommandé par la FAO (voir par ex. ZOTARELLI et al., 2013 pour un calcul détaillé). Elle nécessite cependant de connaître les valeurs mesurées de température de l'air (minimale et maximale), d'humidité relative de l'air (minimale et maximale), de vitesse du vent (mesurée à 2m) et de radiation solaire. Ces valeurs ne sont pas toutes facilement accessibles, aussi des formules alternatives simplifiées sont disponibles. On peut citer celles de THORNTHWAITE (1948) ou de Hargreaves et Samani (1985) qui ne nécessitent que les températures, ou celle de Turc (TURC, 1961) qui utilise en plus, les données de radiation globale (avec des conditions sur l'humidité relative de l'air). Ces formules simplifiées donnent généralement une estimation correcte de l'ETP avec cependant des variations. Ainsi, en utilisant les données acquises sur le terrain par une station météorologique portable (Campbell) près d'Istres (13), on note (figure a ci-dessous) que les méthodes de Turc et de Hargreaves surestiment globalement l'ETP par rapport à la méthode de Penman-Monteith, notamment en début et fin d'année pour la méthode de Turc, et en été pour la méthode de Hargreaves.

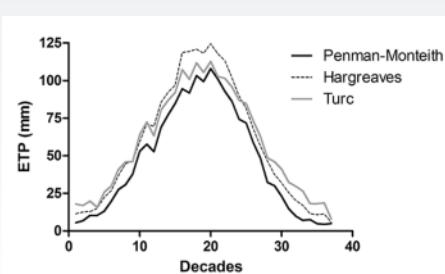


Fig. a :

Evaluations de l'ETP par différentes formules en fonction des décades (moyenne sur 2014 et 2015, Saint-Mitre-les-Remparts). La formule de Penman-Monteith est la plus complète, celle de Turc utilise les données de température et rayonnement, et celle de Hargreaves uniquement les températures.

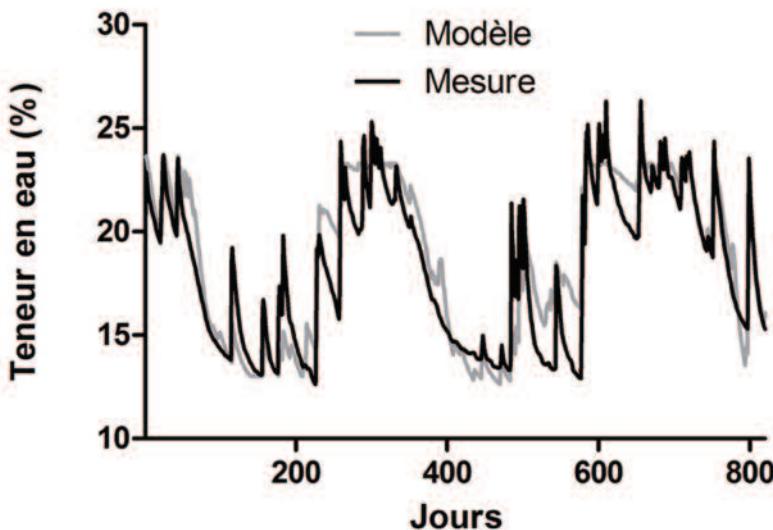
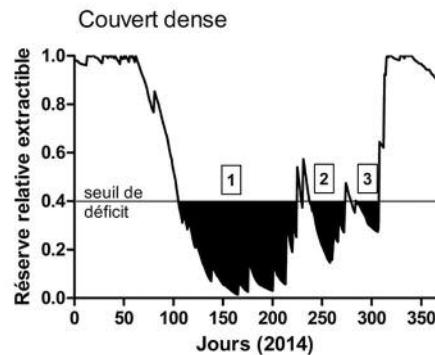


Fig. 3 (ci-dessus) :

Evolution de la teneur en eau volumique (horizon 20-40 cm) mesurée par les sondes à -30 cm (courbe grise) et modélisée (courbe noire) au cours du temps (avril 2013 à mars 2015), pour un peuplement dense ($32 \text{ m}^2/\text{ha}$, $\text{LAI}=2,9$)



nis par GRANIER *et al.* (1999). La réserve extractible relative est une grandeur décrivant le taux de remplissage du réservoir sol et varie de 0, lorsque la l'humidité dans les sols est au point de flétrissement, à 1 lorsque l'humidité est à la capacité au champ. Lorsque la valeur s'abaisse en dessous de 0,4, la transpiration n'est plus maximale mais est régulée, et cela marque le début du stress hydrique. Les indices de stress hydrique calculés sont : la date de début de stress hydrique, la durée du stress hydrique et un indice synthétique intégrant la durée et l'intensité du stress hydrique (ci-après dénommé indice d'intensité, voir Figure 4). Ce dernier est une grandeur sans dimension qui se calcule comme la somme des écarts journaliers entre la valeur de la relative

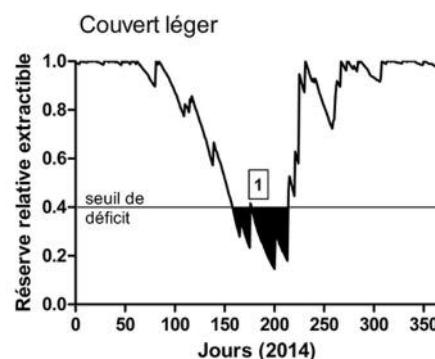
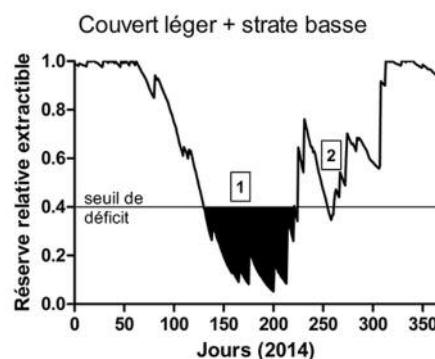


Fig. 4 (ci-contre) :

Evolution de la réserve relative extractible au cours du temps (2014) pour un peuplement de pin d'Alep au couvert dense ($\text{LAI}=2,9$), au couvert léger ($\text{LAI}=1,1$) avec une strate basse importante ($\text{LAI}=1,7$) et au couvert léger ($\text{LAI}=1,1$) avec très peu de strate basse.

Les périodes de stress hydrique (notées 1 à 3) correspondent aux périodes où la réserve relative est inférieure 0,4. Chacune de ces périodes peut être caractérisée par un indice de stress représenté par la surface de la zone en noir.

Photos JM Lopez.

extractible et la valeur 0,4, le tout divisé par 0,4 (GRANIER *et al.*, 1999).

Le bilan hydrique a été modélisé pour trois peuplements de pin avec des couverts contrastés : un peuplement dense (LAI=2,9) avec une très faible strate basse (LAI=0,2), un peuplement ouvert (LAI=1,1) avec une strate arbustive abondante (LAI=1,7) ou une strate basse très peu abondante (LAI=0,2). Les résultats sont montrés pour l'année 2014. L'évolution de la réserve relative extractible (Cf. Fig. 4) fait apparaître 3 périodes de stress dont la principale s'étend du 15 avril au 12 août, pour le peuplement dense, 2 périodes pour le peuplement ouvert avec strate basse dont la principale s'étend du 10 mai au 12 août, et une seule encore plus réduite pour le peuplement ouvert sans strate basse du 7 juin au 1^{er} août. Les indices de stress d'intensité s'élèvent respectivement à 98, 52 et 18

La répartition des flux d'eau pour les différents compartiments de l'écosystème sont présentés Figure 5 pour les différents peuplements décrits précédemment et pour deux années contrastées : 2014 une année pluvieuse (797 mm soit + 42% par rapport à la moyenne trentenaire) et 2016 une année sèche (411 mm soit -27%).

La comparaison entre les peuplements fait apparaître des flux hydriques comparables entre d'une part le peuplement dense au couvert fermé, et d'autre part le peuplement fortement éclairci, au couvert léger, avec une strate arbustive développée. En effet l'interception et la transpiration par la seule strate de pin dans le premier cas sont comparables aux valeurs cumulées d'interception et de transpiration par la strate haute et la strate basse dans le second cas. Il en résulte des flux drainés en dehors du profil qui sont peu différents bien que toujours légèrement infé-

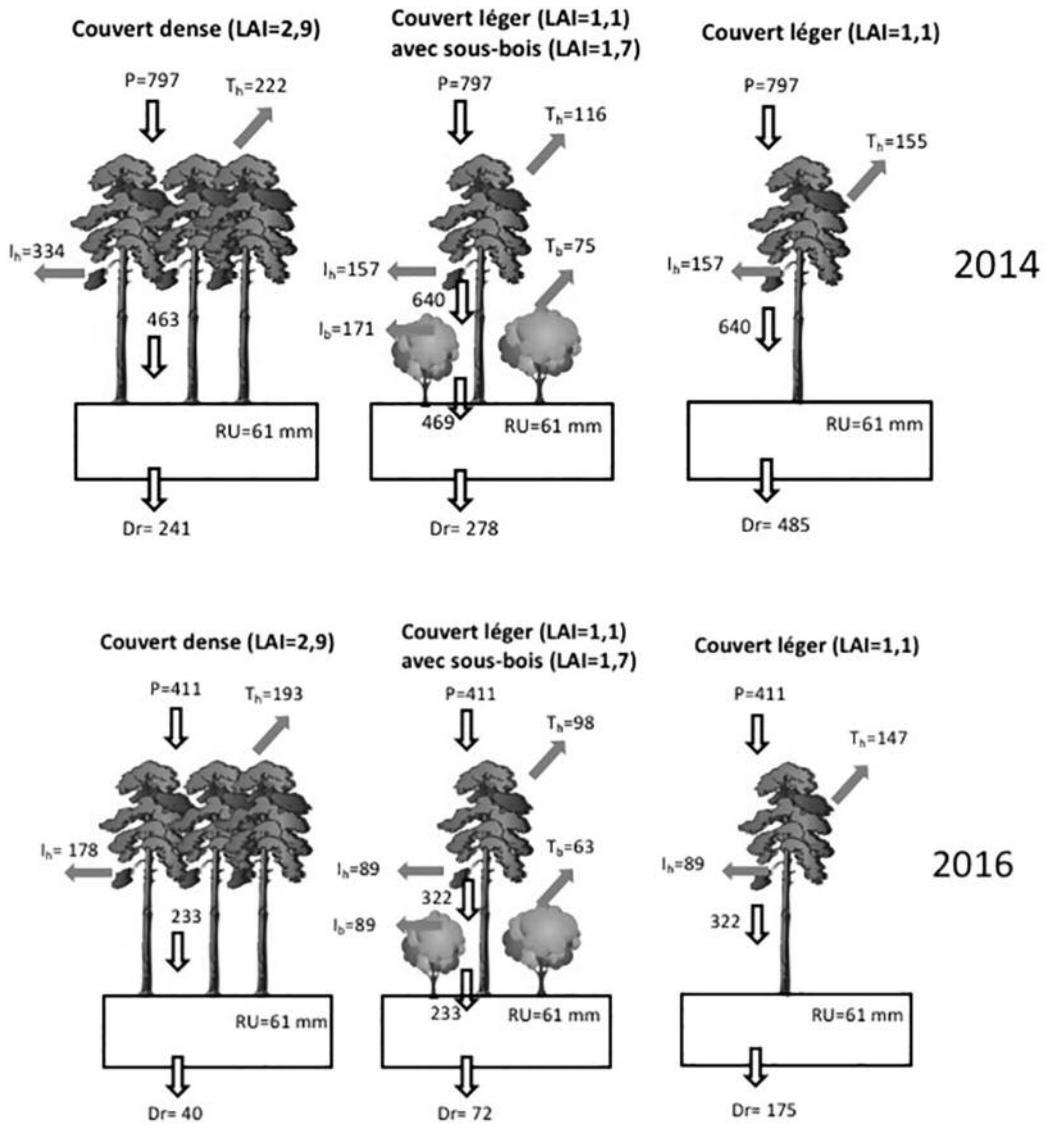


Fig. 5 :
Flux d'eau en mm
(1mm = 10m³/ha)
en fonction de 3 types
de peuplements
(peuplement dense, léger
avec ou sans strate basse)
et pour 2 années contrastées (2014 année humide et 2016 année sèche).
Les flèches grises sont
les flux interceptés par la
strate haute (lh) ou basse (lb)
et les flux transpirés par la végétation haute (Th) ou basse (Tb).
Les flèches blanches
représentent la pluie
incidente (P), les pluies
transmises sous les
couverts et le drainage
hors du profil (Dr).

rieurs pour le peuplement dense. En revanche, dans le couvert léger sans strate basse, la réduction forte de l'interception et de la transpiration, permet d'obtenir des flux drainés très supérieurs, particulièrement en année sèche. Ceux-ci sont en effet multipliés par 2 à 1,75 en année humide et par 4,4 à 2,4 en année sèche. Il faut cependant nuancer ces résultats par le fait que l'évaporation du sol n'a pas été prise en compte dans le cas du peuplement au couvert léger sans sous-bois, et que celle-ci peut être non négligeable comme il l'a été démontré dans des peuplements de pin d'Alep clairs en climat semi-aride (RAZ-YASEEF *et al.* 2010).

Influence de la gestion sur le bilan en eau des peuplements

Les résultats montrent l'effet bénéfique sur le bilan en eau de l'ouverture et de la réduction du couvert par l'éclaircie et ils onfirment de précédents travaux sur le pin d'Alep, notamment dans les sites soumis à des sécheresses prolongées (CALEV *et al.*, 2016 ; DEL CAMPO *et al.* 2014). L'amélioration du bilan hydrique s'opère principalement par la réduction de l'interception de la pluie par la canopée, qui est particulièrement élevée (environ 40%) pour le pin d'Alep dans des peuplements fermés (MOLINA et DEL CAMPO, 2012), et par la réduction de la transpiration. Il en résulte une plus grande disponibilité en eau dans le sol pour la croissance de la végétation. La plupart des travaux soulignent ainsi que la croissance forestière est moins impactée, lors d'épisodes de sécheresse, dans les peuplements éclaircis, que dans les peuplements témoins. Dans une récente synthèse, SOHN *et al* (2016) soulignent cependant une différence entre feuillus et résineux : l'éclaircie permet aux premiers une réduction moins accentuée de leur croissance lors de l'épisode sec (stratégie de résistance), alors que pour les seconds elle aide préférentiellement à améliorer la croissance après la sécheresse (stratégie de résilience). Cependant l'effet bénéfique s'estompe au cours du temps pour plusieurs raisons. Les arbres restants après éclaircie sont aussi les plus vigoureux et consomment donc proportionnellement plus d'eau par une transpiration accrue ; le couvert se referme et l'interception augmente ; enfin le sous-bois se développe et participe plus ou moins fortement à l'interception des pluies et à la consommation en eau. En forêt claire de pin d'Alep du sud de la France, le

sous-bois est souvent fortement développé, comme c'est le cas dans nos expérimentations. Nos résultats sur la modélisation du bilan hydrique montrent ainsi que le bilan hydrique des peuplements éclaircis avec un fort développement de la strate arbustive se rapproche de celui des peuplements fermés dans lesquels la strate basse ne se développe que peu en raison d'une disponibilité en lumière faible. Des stratégies de gestion peuvent limiter cette expansion de la strate arbustive, par exemple en limitant l'ouverture du couvert et en restreignant ainsi la disponibilité en lumière, facteur très favorable au développement de la végétation basse. Dans certains cas, il est possible de maîtriser mécaniquement la végétation basse, comme c'est le cas par exemple, lors des opérations de défense et de prévention contre l'incendie. Cependant il faut souligner le manque de connaissances sur cette végétation basse en raison de travaux encore peu nombreux. On ignore ainsi largement le niveau d'interception des pluies, les profondeurs d'enracinement, les capacités de transpiration et de régulation de cette transpiration, pour les différentes espèces arbustives composant le sous-bois (GOBIN *et al.*, 2015).

Au niveau plus global du paysage ou du bassin versant, le bilan en eau est utile pour appréhender la partie de l'eau utilisée par la végétation, c'est-à-dire l'eau interceptée ou transpirée, qu'on appelle encore « eau verte », de l'eau drainée vers les nappes souterraines ou les cours d'eau, dénommée « eau bleue » (BIROT et GARCIA, 2011). Les couverts forestiers sont souvent plus utilisateurs d'eau que les autres types de végétation (prairies, végétations basses) en raison d'un indice de surface foliaire plus fort et d'une meilleure prospection de l'eau en profondeur grâce à un système racinaire développé. Par conséquent, ils abaissent le ratio eau bleue/eau verte en restituant toutefois une eau bleue de meilleure qualité (GRANIER *et al.*, 2012, BANSEPT 2013). Pour augmenter ce ratio en zone forestière, le gestionnaire peut privilégier les couverts de feuillus qui sont en général moins consommateurs d'eau que les couverts de résineux. Il peut aussi éclaircir les peuplements, comme le reflète dans nos modélisations l'augmentation des flux drainés des peuplements ouverts par rapport aux peuplements fermés.

La prise en compte du cycle de l'eau dans le système forestier et sa modulation par la gestion, souvent décrites par le terme « hydroécologie », est d'une importance cru-

ciale pour la forêt méditerranéenne soumise à des fluctuations climatiques fortes et à des sécheresses de plus en plus fréquentes et intenses telles que prévues par le changement climatique. La gestion sylvicole, et notamment la pratique des éclaircies, en améliorant la disponibilité en eau, contribue à la croissance et au bon état sanitaire des peuplements forestiers.

Remerciements

Ce travail a reçu un soutien financier du ministère de la Transition écologique et solidaire (programme DEB).

Références

- Audouard M., 2017. Bilan hydrique et microclimat dans les peuplements de *Pinus halepensis* : influence de l'ouverture du couvert et rôle de la strate arbustive. Mémoire de master, Sciences de l'Environnement Terrestre, Aix-Marseille Université.
- Bansept A., 2013. Eau et forêt deuxième partie : l'influence des arbres sur la qualité des eaux. *Rev. For. Fr.* 65(3): 207-220.
- Bertin, S., Balandier, P., Becquey, J., Bonal, D., Bréda, N., Perrier, C., Riou-nivert, P., Sevrin, E. (2016). Le bilan hydrique des peuplements forestiers. Etat des connaissances scientifiques et techniques. Implications pour la gestion. Réseau Mixte d'Adaptation des Forêts au Changement Climatique (RMT AFORCE), 190 pages.
- Briot Y., Garcia C., 2011. The hydrologic cycle at a glance: Blue and Green water. In "Water for forests and people in the Mediterranean region. A challenging balance." Birot Y., Garcia C., Palahi M. (éditeurs). European Forest Institute.
- Bréda N., 1999. L'indice foliaire des couverts forestiers: mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Rev. For. Fr.* 51(2) : 135-150.
- Bréda N., Lefèvre Y., Badeau V., 2002. Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche* 3 : 24-32.
- Calev A., Zoref C., Tzukerman M., Moshe Y., Zangy E., Osem Y., 2016. High-intensity thinning treatment in mature *Pinus halepensis* experiencing prolonged drought. *Eur. J. For. Res.* 135: 551-563.
- Del Campo A.D., Fernandes T.J.G., Molina A.J., 2014. Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation : How much can be modified the water cycle through forest management ? *Eur. J. For. Res.* 133:879-894.
- Deraedt D., Colinet G., Claessens H., Degré A., 2014. Représentation du couvert forestier dans la modélisation hydrologique : comparaison de dix modèles (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 18(1) : 83-96.
- Gobin R., Korboulewsky, Dumas Y., Balandier, P., 2015. Transpiration of four common understorey plant species according to drought intensity in temperate forests. *Ann. For. Sci.* 72: 1053-1064.
- Granier A., Bréda N., Badeau V., Fiquepron J., 2012. L'eau forestière de qualité : comment agir sur les quantités produites ? *Rev. For. Fr.* 64(3) : 283-292.
- Granier A., Bréda N., Biron P., Vilette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol. Model.* 116 : 269-283.
- Granier A., Badeau V., Bréda N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Rev. For. Fr.* 47 - n° sp. 59-68.
- Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. in Agr.* 1(2): 96-99.
- Jabiol B., Lévy G., Bonneau M., Brêthes A., 2009. *Comprendre les sols pour mieux gérer les forêts.* AgroParisTech, Nancy.
- Llorens P., Domingo F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *J. Hydrol.* 335:37-54.
- López-Serrano F.R., Landete-Castillejos T., Martinez-Millan J., del Cerro-Barja A., 2000. LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique. *Agr. For. Meteo.* 101: 95-111.
- Molina A.J., del Campo A.D., 2012. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *For. Ecol. Manage.* 269: 206-213.
- Raz-Yaseef N., Rotenberg E., Yakir D., 2010. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux portioning in a semi-arid pine forest. *Agr. For. Meteo.* 150: 454-462.
- Sohn J.A., Saha S., Bauhus J., 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *For. Ecol. Manage.* 380: 261-273.
- Stolf R., de Mendonça Thurler A., Santos Bacchi O.O., Reichardt K., 2011. Methods to estimate soil macroporosity based on sand content and bulk density. *R. Bras. Ci. Solo*, 35: 447-459.
- Tetegan M., Richer de Forges AC, Verbeque B., Nicoullaud B., Desbourdes C., Bouthier A., Arrouays D., Cousin I., 2015. The effect of soil stoniness on the estimation of water retention properties of soils: A case study from central France. *Catena* 129: 95-102.
- Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.* 38 (1) :55-94.
- Turc L. 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy* 12: 13-49.
- Zotarelli L., Dukes MD, Romero CC, Migliaccio KW, Morgan KT, 2013. *Step by step calculation of the Penman-Monteith evapotranspiration (FAO-56 Method).* University of Florida.

Bernard PRÉVOSTO
Mathieu AUDOUARD
Manon HELLUY
Jean-Michel LOPEZ
Irstea, Unité de
Recherches RECOVER,
3275 route de
Cézanne CS 40061
13182
Aix-en-Provence
cedex 5

bernard.prevosto@
irstea.fr

Philippe BALANDIER
Irstea, Unité de
Recherches sur les
Ecosystèmes
Forestiers
Domaine des Barres
45290
Nogent-Sur-Vernisson

Résumé

Le bilan hydrique en forêt méditerranéenne : influence des strates et de leur gestion. Application au pin d'Alep

Le bilan hydrique forestier est au cœur de nombreuses problématiques telles que l'adaptation des peuplements au changement climatique, leur résistance et leur résilience face aux épisodes de sécheresses, la survie et la croissance des arbres en réponse à diverses perturbations... Le bilan hydrique permet en particulier, de connaître les flux d'eau interceptés et transpirés par la végétation (eau verte) et ceux drainés hors du profil racinaire servant à l'alimentation en eau profonde (eau bleue).

Dans ce travail nous rappelons quelles sont les principales composantes du bilan hydrique, et comment l'établir, en prenant l'exemple de peuplements de pin d'Alep à différents degrés d'ouverture de couvert arboré et arbustif.

Les résultats montrent que l'interception des pluies est forte pour les couverts fermés (40% environ), et que l'ouverture du couvert par l'éclaircie permet de diminuer le stress hydrique et d'augmenter les flux drainés (eau bleue). Cependant, dans les peuplements ouverts, la présence d'une strate basse abondante atténue fortement les effets bénéfiques de l'éclaircie.

La gestion sylvicole peut donc moduler largement la consommation en eau des peuplements et influencer ainsi sur leur croissance et leur état sanitaire. Elle doit tenir compte non seulement du degré d'ouverture du couvert de la strate arborée, mais aussi de l'influence de la strate arbustive souvent bien développée en forêt méditerranéenne.

Summary

The water balance in Mediterranean forests: influence of vegetation layers and their management. Application to the Aleppo pine

The water balance in forests lies at the core of various issues, including the adaptation of stands to climate change, their resistance and resilience when subjected to episodic periods of drought, the survival and growth of trees when faced with a range of disturbances... The water balance notably enables us to know the levels of variation in both the water intercepted and transpired by the vegetation (green water) and the water filtering down beyond the root systems which feeds the deeper underground reserves (blue water).

In this report, we review the main components of a water balance and how to draw it up, taking as a working example the Aleppo pine at different degrees of density in the tree and bush cover.

The results show that the interception of the rainfall is high in close-knit cover (around 40%) and that opening the cover by thinning led to a decrease in drought stress and an increase in the deep groundwater (blue water). However, in such open stands the presence of thick shrubby undergrowth considerably hampered the beneficial effects of thinning.

Thus, silvicultural management can significantly affect a stand's water consumption, thereby impacting its growth and state of health. Such management should take into account not only the degree of openness in the tree cover but, also, the influence of the lower bush level which, in forests in the Mediterranean region, often forms thick undergrowth.

Resumen

El equilibrio hidrológico del monte mediterráneo: influencia de los estratos y su gestión. Aplicación al pino carrasco.

El equilibrio hidrológico forestal está dentro de numerosas problemáticas como la adaptación de las repoblaciones al cambio climático, su resistencia y su resiliencia frente a los episodios de sequía, la supervivencia y el crecimiento de los árboles en respuesta a varias perturbaciones... El equilibrio hidrológico permite conocer las corrientes de agua interceptadas y filtradas por la vegetación (agua verde) y aquellas drenadas fuera del sistema radicular sirviendo a la alimentación en aguas profundas (agua azul).

En este trabajo recordamos cuáles son los principales componentes del equilibrio hidrológico, y cómo establecerlo, tomando como ejemplo las repoblaciones de pino carrasco en diferentes grados de apertura de cubierta arbórea y arbustiva.

Los resultados muestran que la intercepción de lluvias es alta en las cubiertas cerradas (aproximadamente el 40%), y que la apertura de cubierta por clareo permite disminuir el estrés hídrico y aumentar los flujos drenados (agua azul). Sin embargo, en las repoblaciones abiertas, la presencia de un estrato bajo abundante disminuye fuertemente los efectos beneficiosos del clareo.

La gestión selvícola por tanto puede modular ampliamente el consumo de agua de las repoblaciones y puede influenciar en su crecimiento así como en su estado sanitario. Debe de tener en cuenta no solo el grado de apertura de la cubierta del estrato arbóreo, sino también la influencia del estrato arbustivo a menudo muy desarrollado en el monte mediterráneo.