

forêt méditerranéenne



Cycle de journées d'échanges et d'information « Forêt, sol et eau, des alliés naturels »

Ce qu'il faut retenir du séminaire :

**« Les chemins de l'eau
et le changement climatique,
outils et gestion adaptative
des forêts méditerranéennes »**

*Lundi 24 et mardi 25 avril 2023 - Hôtel du Département
Marseille (Bouches-du-Rhône)*

par Louis-Michel DUHEN





Ce qu'il faut retenir du séminaire : « Les chemins de l'eau et le changement climatique, outils et gestion adaptive des forêts méditerranéennes »

24-25 avril 2023 - Hôtel du Département - Marseille (Bouches-du-Rhône)

Avant propos

Lorsque Forêt Méditerranéenne a choisi de traiter du thème « Forêt, sol et eau, des alliés naturels », des acteurs de l'eau ont encouragé les membres de l'association à débuter le cycle de réflexion par un porter à connaissance des interrelations entre forêt, sol et eau, et un bilan des avancées de la recherche.

Ce fut l'objet du colloque intitulé « Les chemins de l'eau et le changement climatique, outils et gestion adaptative des forêts méditerranéennes » organisé les 24 et 25 avril 2023 à Marseille.

L'objectif de ce rapport d'étape est de synthétiser ce que l'on sait ou avons appris des chercheurs lors du colloque et d'évoquer les pistes à suivre pour la suite du cycle.

Tout d'abord, nous pensons important d'établir la pertinence qu'il y a à rapprocher forêt et eau car cela ne semble pas évident à tout le monde.



120 personnes ont participé au séminaire qui s'est tenu les 24 et 25 avril à l'Hôtel du Département des Bouches-du-Rhône à Marseille.
Photo J Degenève.

Table des matières

1 Pertinence de rapprocher forêt et eau.....	4
1.1 Des cycles « perturbés », à bien connaître	4
– Le cycle de l'eau, long et varié	4
– Le cycle de la forêt et du bois	4
1.2 Des ressources aux bénéfices multiples.....	5
1.3 Des « partenaires naturels » aux interrelations étroites....	5
– La forêt emprunte beaucoup d'eau.....	5
– ... et la rembourse par de précieux services de protections des habitats, de régulation,	6
1.4 Mais des nuances à apporter selon les milieux.....	6
1.5 En conclusion, il est pertinent d'associer forêt, sol et eau ..	6
2 Ce que nous ont appris les chercheurs.....	7
2.1 Mieux comprendre les flux et prendre en compte l'eau verte	7
– Etat de l'art des principaux flux du cycle de l'eau	7
– Bilan hydrique à l'échelle de l'écosystème forestier et de la parcelle - Résultats tirés des tours à flux – différences d'un site à un autre	8
– A l'échelle de l'arbre, les voies de circulation de l'eau et les mécanismes de résistance à la sécheresse.....	10
– Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses	12
2.2 La forêt est bénéfique pour le cycle de l'eau avec certaines nuances.....	12
– Développer des partenariats pour la préservation de l'eau potable en forêt, retour sur le projet Eau + For	12
– Forêt et cycle de l'eau (quantité/qualité Le point de vue de l'hydrologue à l'échelle du massif / bassin versant)	14
– Enjeux forêt et eau, retour d'expérience à l'échelle du PNR des Grands Causses -	15
– Rôle des forêts face au risque d'inondation.....	16
– Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses	17
2.3 Mieux comprendre le rôle du sol forestier	17
– Le réservoir en eau utilisable des sols (RU) : comment l'estimer et le préserver ?	17
– Exploration géophysique et isotopique des mécanismes de résilience des arbres à la sécheresse	18
– Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses	19
2.4 Gestion adaptée de secteurs sensibles : zones humides, capteage, ripisylve	22
– À l'échelle des zones humides : la circulation de l'eau et le fonctionnement hydrologique des zones humides forestières (ex. du bassin versant de l'Aude)	22
– Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses	23
– Présentation d'un indice de biodiversité et de connectivité des ripisylves (IBC Ripisylves)	
– La ripisylve est une vraie forêt	24
– Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses	25
2.5 Utiliser les modèles d'aide à la décision.....	26
– Biljou© : un modèle de bilan hydrique forestier journalier et un site web dédié à la quantification des épisodes de sécheresse en forêt.....	26
– Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses	27
– Modélisation du bilan hydrique et microclimat en forêt : influence des strates de végétation.....	28
– SurEau : modèle sol-plante-atmosphère de prédition de la consommation d'eau et de la tolérance des essences aux sécheresses extrêmes	28
– Équilibre éco-hydrologique des forêts : apport des modèles et de la télédétection pour quantifier l'utilisation de l'eau par les forêts	30
– Application des outils de modélisation pour la gestion hydrologique et forestière en Catalogne	31
– Modélisation de l'hydrologie et des usages du bassin versant de la Durance sous changement climatique	33
– Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses	33
2.6 Tester des gestions adaptatives.....	34
– Gestion des forêts de pin d'Alep face à l'augmentation des sécheresses.....	34
– Eclaircie du peuplement, consommation d'eau et stress hydrique : 30 ans de suivi et d'expérimentation sur le chêne vert à Puéchabon	36
– Mélange d'espèces d'arbre : quels effets sur la tolérance à la sécheresse des plantations forestières ?.....	37
– Dans les Cévennes, une propriétaire de forêt qui travaille à retenir l'eau	38
– Bilans des actions conduites par l'ONF.....	39
– Une ingénierie, à la fois hydrologue et forestière	40
2.7 Avoir des réflexions à l'échelle des bassins versants en prenant en compte la forêt	41
– Intérêt de croiser les regards pour le maire d'Aiglun (06)....	41
– Situation très difficile dans les Cévennes	41
– Un élu sensibilisé aux démarches par massif et par bassin versant.....	42
– Compléments d'information lors de la séance finale de questions/réponses	43
2.8 Interventions finales	44
– Conclusion de Monsieur le Sénateur Jean Bacci.....	44
– Bilan intermédiaire et perspectives par Louis-Michel Duhen	45
3 Suites du cycle	46
3.1 Communiquer sur les informations recueillies	46
3.2 Voir des réalisations de terrain	46
3.3 Partage de connaissance sur le rôle des sols.....	46
3.4 Glossaire.....	47

1 - Pertinence de rapprocher forêt et eau

Pour les acteurs de l'eau, la forêt joue un rôle passif qui n'implique pas d'action spécifique. Pour les acteurs forestiers, la problématique de la ressource en eau n'est pas toujours prise en compte. Or, ce sont des ressources naturelles qui présentent des caractéristiques assez similaires et des interrelations fortes. Toutes les deux suivent des cycles complexes, de durée variable, qui sont fortement perturbés par l'homme et le changement climatique. Nous allons les détailler succinctement.

Il faut y associer également le sol qui est l'interface où les relations entre l'eau et la forêt se nouent. La forêt joue un rôle sur la partie supérieure du sol : elle l'enrichit, le protège et l'utilise. Une partie importante de l'eau transite par les sols. Quelques exposés ont évoqué la relation avec le sol, mais c'est insuffisant. Nous envisageons d'approfondir ce thème lors de prochaines rencontres.

1.1. Des cycles « perturbés », à bien connaître

Le cycle de l'eau, long et varié

L'eau suit divers cycles sous forme liquide, solide (neige, glace) ou gazeuse (vapeur). Elle se trouve à la fois dans l'air, les sols, les étendues d'eau et les êtres vivants. Son volume est constant ; il n'augmente pas ni ne diminue¹. Ses flux par contre évoluent en fonction de phénomènes naturels ou de l'usage qu'en font les êtres vivants.

Le changement climatique provoque des effets physiques sur le cycle de l'eau. Un air plus chaud est plus demandeur d'eau et il entraîne ainsi plus d'évaporation. Mais en même temps un air plus chaud peut contenir plus d'eau. Ainsi le changement climatique modifie et accélère le cycle de l'eau. Il peut augmenter l'intensité des épisodes de sécheresse mais aussi des épisodes de crues.

L'homme utilise la ressource en eau mais ne l'a fait jamais disparaître. Il « l'emprunte » pour des usages dont certains peuvent paraître discutables et la restitue, parfois sous forme polluée. C'est le cycle de l'eau bleue. Parallèlement, la végétation « emprunte » aussi une partie importante des quantités d'eau disponibles, c'est le cycle de l'eau verte. La forêt fait partie des « emprunteurs » les plus significatifs. Il nous paraît fondamental de prendre en compte globalement les cycles de l'eau bleue et de l'eau verte pour mieux gérer les ressources en eau².

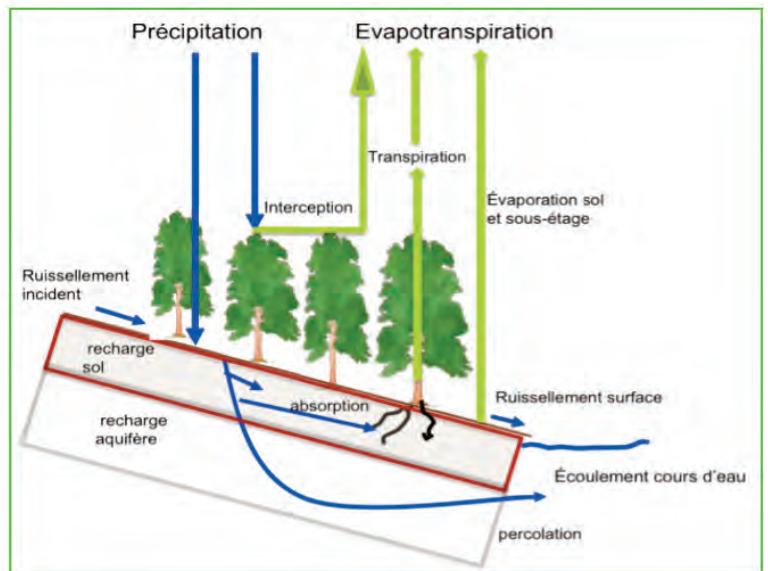


Schéma Eau verte-Eau Bleue tiré de Falkenmark & Rockström (2005), interprété par Yves Birot.

Ce schéma simplifié montre le cycle de l'eau bleue (c'est-à-dire celle ayant la forme liquide, utilisée pour les besoins humains ou s'écoulant vers les mers) et celui de l'eau verte (c'est-à-dire l'eau sous forme de vapeur résultant des processus d'évaporation et de transpiration).

Le cycle de la forêt et du bois

La forêt suit également un cycle lié à la croissance des arbres qui, tout au long de leur vie, « fabriquent » du bois et apportent divers services, notamment grâce à l'eau qu'ils empruntent. Ce cycle suit une dynamique inéluctable puisque la production ne s'arrête jamais. Son importance en surface (la forêt) et en volume (le bois) évolue en fonction des phénomènes naturels et des actions humaines. L'homme influe sur la surface en la réduisant (défrichement) ou en l'augmentant activement (plantation) ou passivement (abandon des terres qui, naturellement, se reboisent). Il a également un rôle sur le stock de bois. Il peut l'utiliser pour la construction, l'ameublement et divers usages qui lui conservent son intégrité physique (bois d'œuvre). C'est un matériau bio sourcé qui se renouvelle sans cesse. Il stocke le carbone sur des durées variables qui peuvent être très longues. L'homme peut aussi triturer les tiges de moindre qualité ou de plus petite dimension pour bénéficier de ses constituants physiques et chimiques (papier, chimie verte, panneaux). Enfin, le bois peut être utilisé en énergie pour produire de la chaleur ou

1 - Sauf sur un large pas de temps. Un quart du volume aurait disparu sans doute par hydrolyse en quatre milliards d'année (Claude Doussan).

2 - Certains souhaitent également y associer l'eau grise, c'est-à-dire l'eau restituée polluée par l'homme.

de l'électricité, en substitution d'énergies fossiles, mais cela entraîne aussi des relargages de carbone important dans l'atmosphère. Pour optimiser ce cycle, les forestiers pratiquent la sylviculture. Celle-ci est évolutive en fonction des contextes et des usages. Mais, très souvent, l'homme n'intervient pas. Abandonné en forêt, le bois mort enrichit les sols, abrite une faune et une flore très diverses.

Voilà pourquoi il nous a semblé important de mieux connaître ces cycles au regard des découvertes récentes. Pour la ressource en eau, nous avons demandé aux chercheurs de nous expliquer les « chemins de l'eau » pour comprendre comment mieux nous adapter aux perturbations actuelles des flux. Ces chemins seront précisés à différentes échelles dans la suite de cette note.

Pour la forêt, nous pouvons renvoyer aux acquis engrangés lors des diverses manifestations de notre association tels que le cycle « forêt et carbone »³ ou le travail très illustratif effectué à l'échelle d'une essence méditerranéenne : le cèdre (voir les numéros spéciaux de la revue *Forêt Méditerranéenne* qui y sont consacrés)⁴.

1.2. Des ressources aux bénéfices multiples

L'eau, comme la forêt, offrent des services et des ressources cruciaux pour les populations, selon l'ONU, qui justifient la majorité des actes de gestion. Mais elles contribuent à tout un ensemble d'autres bénéfices (aménités).

L'eau, outre ses fonctions principales d'alimentation des plantes et des êtres vivants, de source d'énergie et moyen de transport, joue un rôle social (loisirs nautiques sur les diverses étendues d'eau) et a un impact sur la riche biodiversité qu'elle abrite.

La forêt, outre sa production de bois et d'autres produits ligneux et non ligneux, joue également un rôle social (lieu de détente et de ressourcement), un rôle de régulation de l'érosion, du climat local et global, de la qualité de l'air et des sols, et offre des habitats d'une riche faune et flore.

Il est important d'intégrer ces aménités lorsque l'on réfléchit à la place et au devenir de la forêt. Posée dès le début du séminaire, la question toute simple « est-ce que ce serait mieux sans forêt ? » a provoqué des discussions animées où la multifonctionnalité des forêts a rapidement été mise en avant.

1.3. Des « partenaires naturels » aux interrelations étroites

Eau et forêt ont aussi des interrelations étroites qui permettent de dire que la forêt ne peut vivre sans eau et que le cycle de l'eau est amélioré par la présence de la forêt.

La forêt emprunte beaucoup d'eau...

La forêt absorbe des quantités importantes de l'eau contenue dans le sol par son réseau étendu de racines. L'arbre l'utilise pour sa nutrition en diluant les sels minéraux à faible dose (il faut donc beaucoup d'eau) mais aussi pour transporter la sève brute contenant les éléments nutritifs des racines vers les feuilles. La transpiration au niveau des feuilles crée une aspiration capable de faire monter la sève à des hauteurs qui peuvent atteindre plus de 100 mètres par un jeu de différence de pression. Les quantités mises en œuvre sont donc très importantes comme l'indique André Granier⁵ : « à 30 ans, la consommation journalière d'un hêtre se situe dans une fourchette de 40 à 100 l, et à 150 ans, de 600 à 1 500 l. Par une belle journée, la transpiration d'un hectare de forêt en bonne santé atteint 40 à 50 m³ ». Pour plus de précisions, consultez le site à visée pédagogique : <https://www.plantes-et-eau.fr/>.

L'eau « empruntée » par la forêt au niveau du sol est restituée à l'atmosphère rapidement et en très bonne qualité



Il reste des recherches à conduire pour connaître le chemin de l'eau évapotranspirée par la forêt : revient-elle sous forme de pluies proches ou lointaines, dans quels délais, à quelles conditions ? Photo dans le Haut-Var.

Photo Joël PERRIN - CRPF PACA © CNPF

3 - T. XLI, n°4, 2020 - Spécial "Carbone et forêt méditerranéenne"

4 - T. XLII, n°2, 2021 - Spécial "Cèdres" n°1, T. XLII, n°3, 2021 - Spécial "Cèdres" n°2, T. XLII, n°4, 2021 - Spécial "Cèdres" n°3

5 - Les arbres grandissent-ils toute leur vie ? 60 clés pour comprendre les arbres - André Granier © éditions Quæ, 2021

(voir plus loin les précisions). Son retour s'effectue à des distances plus ou moins lointaines de leur utilisation (voir les hypothèses plus loin).

Il faut bien comprendre que tout dans la forêt dépend de l'eau et de la transpiration. Sans la transpiration, la photosynthèse ne peut se produire et donc la forêt ne peut produire les biens et services donc pas de bois, pas de stockage de carbone, ni de présence d'un microclimat et d'habitat pour la faune et la flore...

... et la rembourse par de précieux services de protections des habitats, de régulation...

Du haut de l'arbre à l'extrême des racines, la forêt apporte des services de filtre (épuration), d'éponge (rétenzione) et de couverture (protection) au cycle de l'eau, grâce à son couvert forestier, au sol forestier qu'elle crée et protège, et à son système racinaire. Quand la forêt est là, elle protège les sols des activités humaines polluantes (agriculture, construction, etc.).

Le couvert forestier diminue légèrement la quantité d'eau qui arrive au sol (dans le cas d'événements de pluie faible) puisqu'une partie est interceptée par les feuilles, le tronc et les branches. Une partie est directement évaporée et une autre migre lentement vers le sol. Le couvert forestier et ses racines protègent et maintiennent le sol, diminuant le risque d'érosion notamment en diminuant l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Les forêts ont un rôle sur les cours d'eau en régulant la température, ce qui est favorable à la faune halieutique et en produisant des débris végétaux, source de diversité d'habitats aquatiques et de nourriture de la faune. Il est bien connu que les forêts régulent le climat à travers le cycle du carbone (le captage de CO₂) et le réfléchissement d'une partie du rayonnement solaire (albedo). Mais les forêts ont aussi un impact sur le climat à large échelle à travers le cycle de l'eau, puisque dans certaines régions du monde (p.ex. les tropiques) plus de 60% des pluies viennent de l'eau transpirée par les arbres : c'est le « recyclage atmosphérique ». D'autres phénomènes pourraient être impliqués dans cette régulation des pluies, mais sont encore débattus par la communauté atmosphérique. Par exemple, lorsque les surfaces forestières ont un couvert continu et étendu, l'humidification atmosphérique est transportée à l'intérieur des terres, depuis les mers et océans via le phénomène dit de « pompe biotique ».

La litière, liée à la présence de la forêt, et l'appareil racinaire des arbres et du sous-bois ont aussi un rôle de protection, de filtre et de régulation. La litière minimise les impacts des gouttes de pluie (effet splash) tandis que la rugosité du sol (litière, bois mort, troncs) réduit les ruissellements et leur vitesse. L'absorption racinaire et l'activité des microorganismes filtrent les eaux de pluie chargées de substances naturelles ou polluantes et diminuent la quantité de polluants. Les dépôts atmosphériques d'azote sont rapidement immobilisés dans le sol puis assimilés en partie par les racines.

La régulation du cycle de l'eau s'effectue grâce à l'humidification de tous les constituants de la litière (stockage d'eau, zone tampon) et au piégeage par les sédiments qui évitent le colmatage des cours d'eau et la turbidité, ce qui est appréciable lorsque l'eau potable y est prélevée directement. La porosité du sol forestier, favorisée par la présence des racines, augmente l'infiltration et diminue d'autant le ruissellement, ce qui accroît la réserve utile en eau du sol. La structure racinaire des arbres et des végétaux constitutifs du sous-bois, augmente la cohésion du sol et diminue l'érosion.

1.4. Mais des nuances à apporter selon les milieux

Comme nous le verrons dans la synthèse des présentations des chercheurs, des nuances doivent être apportées à ces services rendus selon les caractéristiques locales et les aléas climatiques.

Cela nous conduit à ne pas nous appuyer sur des principes et des fonctionnements supposés imparables, mais à prendre en compte les facteurs locaux en consultant notamment les hydrogéologues.

Plusieurs chercheurs nous ont présenté des modèles permettant d'effectuer des bilans hydriques de forêt : ils permettent à la fois de bien connaître le cycle de l'eau mais aussi de simuler les impacts de telle ou telle nouvelle pratique (éclaircie, changement d'espèce, voire mélange) susceptible de l'influer. Se pose alors le choix de la bonne échelle. En hydrologie, on prend en compte le bassin versant, les forestiers considèrent le massif forestier, tandis que les choix politiques et la sensibilité des populations sont liées aux structures politiques et administratives.

1.5. En conclusion, il est pertinent d'associer forêt, sol et eau

Au vu de ce qui précède et en résumé, il nous paraît nécessaire de rapprocher la gestion de la forêt et de la ressource en eau en prenant en compte le rôle des sols. On confirmera plus loin que cette pertinence sera d'autant plus forte lorsque l'on se réfèrera à une unité géographique précise. Ce qui est opérationnel pour un secteur ne le sera pas obligatoirement pour un autre.

2 - Ce que nous ont appris les chercheurs

2.1. Mieux comprendre les flux et prendre en compte l'eau verte

Etat de l'art des principaux flux du cycle de l'eau

Par Claude DOUSSAN (INRAE Avignon)

Ce que l'on sait : tous les termes du bilan hydrique sont impactés par la présence d'une forêt. La forêt peut recycler en pluie la vapeur d'eau qu'elle transpire quand le couvert forestier est continu à grande échelle spatiale.

Ce que l'on doit préciser : il n'est pas possible d'avoir une réponse systématique sur le fait que l'impact de la présence d'une forêt est négatif ou positif car cela dépend du contexte local et de l'échelle du territoire concerné. Il faut étudier les différents facteurs qui entrent en jeu d'autant plus que la recherche émet diverses hypothèses « surprenantes ».

Recherche : mieux comprendre les relations de micro-échelle à macro échelle du recyclage atmosphérique de la vapeur d'eau ainsi que les effets de déforestation/reforestation (surtout en milieu tempéré) et si ce recyclage atmosphérique est complété par un effet de pompe (aspiration) biologique de la vapeur d'eau vers le continent à partir des océans.

Tous les termes des bilans hydriques sont impactés par la présence d'une forêt

Claude Doussan a fait état de travaux récents⁶ pour nous montrer où se trouve l'eau, ses flux sans l'homme et avec l'homme (Nous vous conseillons de consulter sur le site forêt méditerranéenne, les trois premières diapositives de son exposé en écoutant en simultané l'enregistrement audio). Il en ressort que les quantités qui transitent par les plantes et notamment les forêts sont très importantes (environ 60% des précipitations continentales proviennent de l'évapotranspiration. Il s'agit d'un recyclage continental de l'humidité atmosphérique à travers la végétation). Sa conclusion est claire : « Tous les termes du bilan hydrique sont impactés par la présence d'une forêt ! ». Dans une politique de meilleure gestion des flux de l'eau, il semble incontournable de la prendre en compte.

Mais ces impacts sont-ils positifs ou négatifs ? Il n'est pas possible de répondre directement car cela dépend du contexte local et de l'échelle du territoire concerné. Il est intéressant d'étudier les différents facteurs qui entrent en jeu, d'autant plus que la recherche émet diverses hypothèses surprenantes.

La forêt, la meilleure occupation du sol pour intercepter l'eau

Ce qui est établi c'est que la forêt est l'occupation du sol qui a la meilleure capacité pour intercepter l'eau des précipitations grâce à son couvert, de la stocker dans le sol qui joue un rôle d'éponge mais aussi de la transférer plus loin dans le sol (jusqu'à la nappe ou latéralement) grâce au système racinaire, et à la vie biologique associée qui améliorent l'infiltrabilité (et donc la disponibilité en eau locale). Par contre, cela se traduit par une évapotranspiration plus forte qu'une prairie, par exemple (et donc diminue la disponibilité en eau locale). Ces interactions locales (positives ou négatives sur la disponibilité de l'eau) se répercutent et s'évaluent sur une grande échelle, à la fois dans l'air et dans les sols et sous-sols, il n'est pas pertinent d'en tirer des conclusions sur une échelle spatiale trop réduite. En lien avec la recharge des nappes, « Il peut être intéressant de trouver l'optimum possible entre la densité des arbres et les possibilités de recharge en eau des sols en fonction du climat local », nous dit Claude Doussan.



La forêt est la meilleure occupation du sol pour intercepter l'eau.
L'équipe du CNPF Provence Alpes Côte d'Azur sur une placette Bio-climsol.
Photo M.L. Gaduel@CNPF.

Un « effet forêt » sur les précipitations mais à large échelle

Il nous a fait part de recherches récentes effectuées à grande échelle montrant le rôle indéniable de la forêt sur les précipitations via le recyclage atmosphérique continental de la vapeur d'eau qui est plus intense au-dessus des forêts. L'effet régional global est souvent négligé, en particulier dans la politique de l'eau alors qu'il est essentiel pour les régions « sous le vent » par rapport à l'éloignement des mers et océans. Une modélisation climatique a montré qu'une déforestation à grande échelle pourrait réduire jusqu'à 30% le volume des pluies dans d'autres régions voisines. « L'effet forêt » n'est pas seulement lié à une plus forte évapotranspiration, mais aussi à l'émission d'aérosols et de composés organiques volatiles qui joueraient un rôle de noyaux de condensation. Enfin, il a été observé que les forêts peuvent atténuer la variabilité des précipitations dans le temps. Il n'y aurait pas que le recyclage atmosphérique de la vapeur d'eau, mais aussi un effet de pompe (aspiration) biologique de la vapeur d'eau vers le continent à partir des océans par la forêt ! (Encore sous forme d'hypothèses et de débats sur l'intensité du phénomène, au sein de la communauté scientifique sur son occurrence et intensité). Dans les forêts en climat humide ou tempéré et proches d'une mer ou d'un océan, l'évapotranspiration importante en été réduit le volume d'air ce qui engendre une dépression au-dessus des massifs forestiers importants. Cette dépression augmenterait l'arrivée d'air humide de l'océan ce qui se traduirait par plus de pluie et d'écoulements. Par contre, le phénomène ne se produirait pas en hiver dans les forêts à feuilles caduques sous climat tempéré, car l'évapotranspiration est moins importante et il n'y a pas d'apport océanique. L'air sec retourne à haute altitude, des régions plus humides vers les plus sèches.

Les travaux se poursuivent car ils comportent beaucoup d'espoirs pour le futur afin de reconquérir des zones sèches par reverdissement en enclenchant un cercle vertueux puisqu'on agirait ainsi sur le cycle de l'eau.

Claude Doussan a eu l'occasion de répondre à la question suivante : la masse d'eau du globe est-elle constante ? « La perte d'eau serait de l'ordre d'un pour cent sur 4 milliards d'année par hydrolyse de l'eau, et de perte vers l'espace, mais pour les centaines d'années à venir on peut raisonner avec une masse d'eau globale constante sur la terre. » Par contre, la part de l'eau vapeur dans l'atmosphère augmente avec le réchauffement climatique.



Dispositif de captation de l'eau de pluie pour simuler l'effet des sécheresses sur le site de Fontblanche à Ceyreste (13).

Photo LM Duhen.

Bilan hydrique à l'échelle de l'écosystème forestier et de la parcelle - Résultats tirés des tours à flux – Différences d'un site à un autre

Par Jean-Marc LIMOUSIN (CEFE CNRS Montpellier)⁷

Ce que l'on sait : les forêts méditerranéennes consomment moins d'eau car elles développent moins de surface foliaire et des tiges de moindre taille. De ce fait, elles laissent une plus grande disponibilité d'eau bleue.

Ce que l'on doit préciser : la consommation d'eau des forêts augmente avec la demande évaporatoire de l'atmosphère, la disponibilité en eau dans le sol et la densité du couvert forestier, seul paramètre sur lequel on peut jouer. Quels sont les bons taux et rythmes d'éclaircie permettant de mieux adapter les peuplements à une eau de plus en plus rare ?

Recherche : connaître la réserve hydrique du sol et les caractéristiques morphologiques des arbres que sont la profondeur d'enracinement et la surface foliaire dont dépend la consommation d'eau de l'écosystème forestier (avec le climat mais sur lequel on ne peut agir).

⁷ - Jean-Marc LIMOUSIN avec Nicolas DELPIERRE, Emilie JOETZJER, Jean-Christophe DOMECK, Sébastien LAFONT, Guillaume SIMIONI, Christophe FRANCOIS, Jean-Marc OURCIVAL, Nicolas MARTIN.

Des dispositifs de mesure complets et performants dans divers types de forêt

Face au changement climatique, d'importants dispositifs de recherche ont été mis en place. Parmi eux, ICOS (*Integrated Carbon Observation System*) est un réseau de site qui a été créé pour mesurer les échanges de gaz entre l'atmosphère et les écosystèmes. Sur chacun des ICOS, l'émission de vapeur d'eau par la forêt (arbres et sol) est suivie en continu (24h sur 24). En complétant le dispositif, les chercheurs disposent des instruments pour mesurer tous les termes du bilan hydrique (météorologie, contenu en eau du sol). Deux sites sont situés en forêt méditerranéenne : Puéchabon dans l'Hérault sur un peuplement de chêne vert et Fontblanche dans les Bouches-du-Rhône, sur un peuplement mixte de pin d'Alep et chêne vert. Parmi les stations ICOS en France, il y en a trois autres en site forestier : Barbeau en Ile-de-France, peuplement de chêne sessile et charme ; Hesse en Lorraine, hêtraie ; BilosS dans les Landes, peuplement de pin maritime. Sans être exhaustif, le dispositif couvre des forêts tempérées et méditerranéennes, feuillues ou résineuses, décidues ou sempervirentes, et partage les mêmes protocoles de mesure. La comparaison des résultats montre d'importantes variations du cycle de l'eau, confirmant l'intérêt de prendre en compte les conditions locales pour l'optimiser.

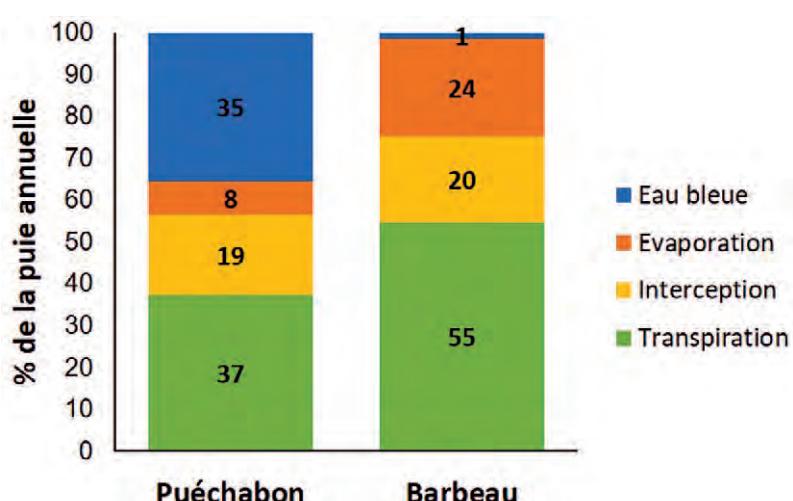
Jean-Marc Limousin (CEFE CNRS Montpellier) a synthétisé une partie des travaux de l'ensemble des chercheurs concernés. Il a présenté les différentes composantes du bilan hydrique forestier, les méthodes utilisées pour les mesurer et a comparé les ordres de grandeur des différents flux d'eau entre les sites et suivant les saisons.

Paramètres de la consommation en eau des forêts

La consommation en eau des forêts des différents sites dépend des paramètres suivants :

- La quantité de pluie reçue. Le site de Puéchabon (Hérault) reçoit plus de pluie que celui de Barbeau (Fontainebleau) (955 mm en moyenne vs 684mm), mais pas selon la même répartition (faible en été, concentrée en automne).
- La demande évaporatoire (demande en vapeur d'eau de l'atmosphère liée au climat, à l'ensoleillement et à la température) est plus élevée sous climat méditerranéen.
- Indice foliaire (surface cumulée des feuilles ramenée à la surface du sol) : il est plus important dans la chênaie décidue tempérée que dans la chênaie verte par exemple. Il joue un rôle sur l'interception et l'évaporation par le sol lorsque le feuillage est sempervirent.
- Les caractéristiques des sols méditerranéens leur confèrent une meilleure capacité à réduire l'évaporation : charges en cailloux importantes et couverts toute l'année par des essences sempervirentes.

On comprend mieux l'influence de ces facteurs en confrontant plus particulièrement les résultats entre le site méditerranéen à chêne vert de Puéchabon dans l'Hérault et le site décidu tempéré à chêne sessile de Barbeau-Fontainebleau en Ile-de-France.



Forêt méditerranéenne de chêne vert à Puéchabon (Hérault)

Pluie annuelle = 955 mm

Transpiration arbres \simeq 40% de la pluie

Interception feuillage \simeq 20% de la pluie

Evaporation du sol \simeq 8% de la pluie

L'eau bleue disponible est importante

Forêt tempérée de chêne sessile à Barbeau-Fontainebleau (77)

Pluie annuelle = 684 mm

Transpiration arbres \simeq 55% de la pluie

Interception feuillage \simeq 20% de la pluie

Evaporation du sol \simeq 23% de la pluie

L'eau bleue disponible est négligeable

Principales observations

On peut en déduire les enseignements suivants :

- Les forêts méditerranéennes consomment moins d'eau car elles sont composées en partie d'essences sempervirentes avec des tiges de moindre taille. De ce fait, elles laissent une plus grande disponibilité d'eau bleue.
- L'évapotranspiration, qui suit la demande évaporatoire, décline pendant les mois d'été car faute de précipitations, les arbres puisent l'eau dans le sol dont la disponibilité diminue.
- Les forêts consomment si elles sont plus denses et développent un indice foliaire plus important.
- On constate un ajustement biologique des arbres par la régulation stomatique : c'est l'adaptation du fonctionnement des arbres qui permet de réguler l'évapotranspiration en zone méditerranéenne.
- En été, on constate un déficit hydrique du sol, différence entre les précipitations reçues et l'évapotranspiration, c'est-à-dire l'eau qui est réévaporée. Cela met en évidence le rôle d'éponge du sol et du sous-sol car les arbres vont chercher l'eau en profondeur.
- La consommation d'eau de l'écosystème forestier va donc dépendre non seulement du climat, mais aussi de la réserve hydrique du sol et des caractéristiques morphologiques des arbres que sont la profondeur d'enracinement et la surface foliaire.

Plusieurs informations sur la consommation en eau des forêts

Jean-Marc Limousin et ses collègues font les conclusions suivantes :

- L'évapotranspiration des forêts françaises représente entre 50% et 100% des précipitations selon les sites et les années.
- La transpiration des arbres représente environ 60% de l'évapotranspiration annuelle, tandis que l'autre partie, significative, de l'eau s'évapore depuis le feuillage ou le sol.
- La consommation d'eau des forêts augmente avec la demande évaporatoire de l'atmosphère, la densité du couvert forestier et la disponibilité en eau dans le sol.
- Une partie importante de l'eau transpirée par les arbres est prélevée par les racines profondes qui vont chercher l'eau à plusieurs mètres de profondeur.
- Le réseau ICOS écosystème est opérationnel dans toute l'Europe et produit des données actualisées sur la consommation et les besoins en eau des forêts confrontées aux changements climatiques.

A l'échelle de l'arbre, les voies de circulation de l'eau et les mécanismes de résistance à la sécheresse

Par Nicolas MARTIN St PAUL et Hervé COCHARD (INRAE URFM Avignon)

Ce que l'on sait : la transpiration des arbres peut atteindre plusieurs dizaines voire centaines de litre par jour. Elle se fait au niveau de petits trous à la surface des feuilles (les stomates) qui permettent aussi de faire entrer le CO₂. La transpiration est nécessaire car elle permet de maintenir une saturation en vapeur d'eau des feuilles et donc de réaliser la photosynthèse qui se fait en phase liquide (le CO₂ doit être dissout dans l'eau pour la réaction de photosynthèse). Les arbres développent un système hydraulique performant pour transporter de l'eau très rapidement et compenser en permanence l'eau transpirée par la feuille. Lors de stress hydrique, le système hydraulique peut défaillir à cause du phénomène de cavitation qui implique la rupture de la colonne d'eau. Ce phénomène peut conduire à une embolie. On peut mesurer les taux d'embolie dans les arbres.

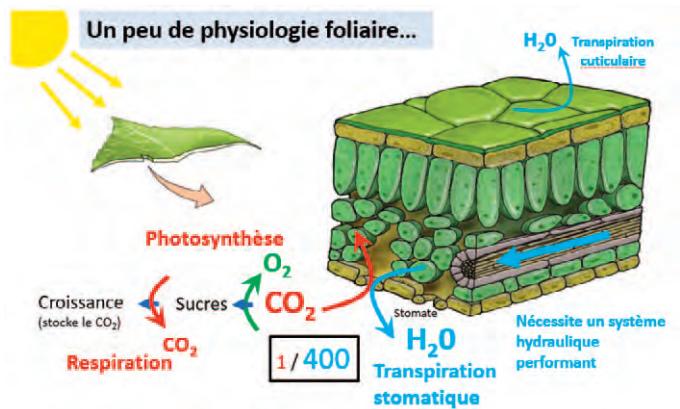
Ce que l'on doit préciser : les recherches sur la résistance du système vasculaire à la cavitation ont beaucoup progressé les décennies passées. Aujourd'hui les chercheurs se penchent sur d'autres aspects du fonctionnement des arbres qui modulent l'exposition au stress hydrique. Cela inclut la régulation de la transpiration par les stomates, la transpiration des cuticules, la surface foliaire, la profondeur racinaire...

Recherche : les recherches les plus récentes intègrent toutes les connaissances pour les implémenter dans des modèles permettant de prédire l'évolution du stress hydrique et la dynamique des forêts en condition de changement climatique.

Ces dernières années, le déclin des arbres en forêt s'est considérablement accéléré en France, comme dans le monde. Ce phénomène est complexe mais en grande partie lié à l'augmentation des sécheresses et des vagues de chaleur qui résultent du changement climatique.

Comprendre le fonctionnement des feuilles d'un arbre

Pour bien comprendre pourquoi les arbres transpirent, il faut faire un peu de physiologie foliaire. La feuille est une usine chimique qui absorbe le CO_2 de l'air via ses stomates, le transforme en sucres par le processus de photosynthèse (ce qui rejette de l'oxygène dans l'atmosphère). Ces sucres servent pour la croissance des arbres (ce qui libère du CO_2 par respiration). Cette usine chimique fonctionne dans l'eau des cellules. Quand 1 molécule de CO_2 entre à travers le stomate, environ 400 molécules d'eau s'échappent vers l'atmosphère. C'est la transpiration. Un mal nécessaire pour permettre la photosynthèse qui se fait en phase liquide. Ce processus nécessite donc la présence d'un système hydraulique performant pour approvisionner la feuille en eau et compenser en permanence l'eau transpirée par la feuille.



Rappel de la physiologie foliaire.

Schéma présenté par N. Martin.

Et le chemin de l'eau dans l'arbre, une affaire de différence de pression !

Nous montrons que les mécanismes physiologiques impliqués dans le stress hydrique des arbres sont intimement associés aux mécanismes responsables de la transpiration. Dans les arbres, l'eau forme une colonne liquide qui s'élève vers la canopée, pour s'évaporer à la surface des feuilles au niveau d'orifices appelés stomates. La transpiration correspond à une circulation ascendante de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère. Elle est majoritairement passive, dictée par un gradient de pression d'eau entre le sol, l'arbre et l'atmosphère. Cette pression d'eau appelée « potentiel hydrique » prend une valeur négative. Le potentiel hydrique est généralement très négatif dans l'air lorsqu'il fait chaud et sec et qu'il y a donc une forte demande évaporatoire. À l'inverse le potentiel hydrique du sol est proche de 0 (peu négatif) dans des conditions humides. L'arbre, quant à lui, prend une valeur intermédiaire entre le sol et l'atmosphère ce qui permet à l'eau de s'écouler. Le potentiel hydrique est donc une mesure directe de l'état hydrique de l'arbre.

Ce qui se passe en cas de stress hydrique

Lors d'une sécheresse, le potentiel hydrique diminue fortement dans le sol, dans l'air et donc dans la plante, ce qui induit une cascade de réactions physiologiques. Une des premières réactions est la fermeture des stomates ce qui permet à l'arbre de réduire la transpiration et d'économiser de l'eau. Si la sécheresse continue, le potentiel hydrique peut diminuer encore dans la plante, à cause des pertes au niveau des cuticules des feuilles et des écorces. Lorsque le potentiel hydrique descend trop, la colonne d'eau peut se rompre à cause d'un phénomène appelé cavitation. La cavitation mène à des embolies dans le système vasculaire. Si le taux d'embolie est trop important, l'arbre perd sa capacité à conduire l'eau, ses tissus ne peuvent plus être irrigués et se mettent à déprimer. Ces phénomènes sont accélérés lorsque les sécheresses sont couplées à des vagues de chaleur.

Comment l'arbre résiste ?

A partir de cette base fonctionnelle, le monde végétal connaît diverses manières d'être résistant à la sécheresse. La régulation stomatique, par exemple, varie entre les espèces d'arbre et détermine la consommation d'eau pendant la sécheresse et donc l'exposition au stress hydrique. Il en est de même pour la résistance du xylème à la cavitation, que l'on peut quantifier comme le potentiel hydrique causant 50% d'embolie du xylème (on l'appelle P50), détermine la tolérance au stress hydrique⁸. Elle présente une variabilité encore plus grande que la régulation stomatique entre les espèces d'arbre. Ces deux caractères doivent être regardés ensemble et, plus largement, doivent inclure d'autres aspects du fonctionnement modulant l'exposition au stress hydrique (transpiration cuticulaire, surface foliaire, profondeur racinaire...).

Aujourd'hui, afin de prédire l'évolution du stress hydrique et de la dynamique des forêts en condition de changement climatique, il apparaît nécessaire d'utiliser des modèles fonctionnels intégrant l'ensemble de ces caractères.

Un livre collectif, rédigé entre autres par Claude Doussan, Nicolas Martin et Jean-Marc Limousin, reprend toutes ces informations : « Forêt et Changement climatique : comprendre et modéliser le fonctionnement hydrique des arbres ».

Gratuit en téléchargement :

https://www.quae.com/produit/1724/9782759234585/forets-et-changement-climatique?affiliate_code=

8 - On dispose d'une résistance à la cavitation pour la flore européenne.

La photosynthèse consomme-t-elle de l'eau ?

Nicolas Martin a répondu qu'une partie de l'eau absorbée par les racines est incorporée dans la biomasse soit dans les sucres fabriqués, soit dans le végétal. Ce sont des volumes très faibles par rapport aux flux qui ne font que transiter (0,25% en molécule, 5 à 10% en masse). Il précise également que le pin d'Alep est un peu plus économique en eau en période sèche que le chêne vert.

Comment marche la transpiration en l'absence de feuilles ?

Une question de physiologie. « Si c'est la transpiration qui fait monter la sève brute par l'intermédiaire des feuilles, comment cela marche-t-il quand il n'y a pas de feuilles avant le débourrement ? » Réponse de Nicolas Martin (INRAE) : Il existe une force appelée la poussée racinaire, ou poussée radiculaire qui se produit souvent en début de saison pour certains feuillus. La sève est dite poussée car il s'agit d'un mécanisme actif qui permet à la sève de monter. Cela se fait grâce à des petits gradients de pression osmotique mis en place par l'accumulation d'ions qui créent un appel d'eau. Petit à petit se met en place un chemin de l'eau jusqu'aux feuilles. Quand ce chemin est mis en place, la pompe passive se met en route. L'écoulement de la sève de bouleau ou encore « les pleurs » de la vigne résultent de ce processus. C'est un mécanisme de pression temporaire qui se met en place en début de saison lors de la montée de sève. Ce phénomène est inconnu chez certains conifères.

La cavitation est-elle réversible ?

J.M. Limousin rappelle que la cavitation est un dommage des vaisseaux qui sont remplis d'air. Ils ne redeviennent pas fonctionnels. Mais des vaisseaux, il y en a des milliers en parallèle. Si la proportion des vaisseaux qui s'embolissent est importante, la mortalité est irrémédiable. A l'inverse, l'arbre peut survivre. Et l'année suivante de nouveaux vaisseaux sont créés.

Seuils de mortalité par embolie variable selon les essences

La mortalité d'un arbre ne serait-elle pas seulement circonscrite à la mortalité de la tige pour certaines espèces (chêne vert) puisque, à partir de l'appareil racinaire, le sujet pourrait repartir ? Nicolas Martin répond qu'il existe en effet des seuils d'embolie au-delà desquels l'arbre ne peut survivre. Par exemple, 50% d'embolie sont suffisants pour tuer un pin et 90% sont nécessaires pour tuer un chêne vert (mais ces chiffres sont discutés). Plutôt que le taux d'embolie, c'est plutôt la teneur en eau des cellules qui expliquerait la mortalité des tissus.

2.2. La forêt est bénéfique pour le cycle de l'eau avec certaines nuances

Développer des partenariats pour la préservation de l'eau potable en forêt, retour sur le projet Eau + For

Par Julien FIQUEPRON (CNPF)⁹

Ce que l'on sait : l'eau forestière est de bonne qualité, mais les forestiers qui sont force de proposition pour la conserver sont peu écoutés et pas soutenus. La qualité de l'eau en forêt vient du fait que ces écosystèmes sont généralement peu anthropisés et donc moins sujet aux pollutions.

Ce que l'on doit préciser : le maintien de la qualité de l'eau peut être un facteur de regroupement et de mobilisation pour des propriétaires forestiers voisins dans le but de mettre en place des formes de sylviculture et de travaux forestiers appropriées.

Recherche : mettre en place des procédures réglementaires mieux négociées et plus incitatives.

Les forestiers privés se sont mobilisés afin de valoriser leur rôle pour la préservation de la qualité de l'eau, en particulier destinée à la consommation humaine. Cette présentation est une opportunité de revenir sur les résultats du programme « Eau + For » et de saluer les initiatives de Philippe Bertrand, ingénieur au CNPF Occitanie, très engagé sur le sujet.

Les constats

- Les problèmes de qualité d'eau restent préoccupants, en particulier à cause des pollutions diffuses (nitrates et pesticides).
- Les forêts assurent globalement une bonne protection de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, et les forestiers peuvent renforcer sa protection.
- La protection des captages d'eau conduit à des servitudes parfois inappropriées, comme certaines qui pénalisent toute forme de gestion, faute d'une concertation suffisante entre forestiers et acteurs de l'eau.
- Les surcoûts induits par les servitudes et/ou les actions volontaires des forestiers pour préserver la qualité de l'eau ne doivent pas être supportés par les forestiers seuls.



L'eau forestière est généralement de bonne qualité et ne nécessite aucun traitement = une conclusion du programme Eau+For .

Photo J.P. Loudes@CNPF.

Quels sont les intérêts pour le forestier à mener des actions en faveur de l'eau ?

- Facteur de regroupement et de mobilisation (exemple de l'Association Syndicale Libre Forestière du Mont Forchat, des Voirons et des Hermones), à proximité de Thonon (Haute-Savoie).
- Reconnaissance et valorisation de l'image des forestiers, qui sont force de proposition sur un sujet de société sensible.
- Adaptation et appropriation des contraintes liées aux périmètres de protection des captages.
- Prise en charge de surcoûts ponctuels à défaut d'une prise en charge sur le long terme.

Mais le rôle des forestiers reste peu reconnu...

- Sur la qualité de l'eau potable, les enjeux en forêt sont moins prioritaires que dans les secteurs impactés par les pollutions diffuses.
- Les acteurs de l'eau ont des attentes plus directes vis-à-vis des forestiers sur la gestion des milieux aquatiques, les risques de ruissellement et d'inondation.
- Les procédures réglementaires ne tiennent pas assez compte des propriétaires forestiers et ne sont pas incitatives.

Que faire ?

- Renforcer la place de la forêt dans les bassins d'alimentation de captages (prévention et compensation des défrichements, création d'aménagements boisés).
- Etendre la concertation lors des démarches réglementaires de protection de captages.
- Renforcer les liens avec les acteurs de l'eau (collectivités, Agences de l'eau, Agences régionales de santé...).
- Mettre en place des conventionnements entre forestiers (et agriculteurs) et gestionnaires de l'eau pour accroître les modes de gestion de forêts (et de cultures agricoles) favorables à l'eau.

Alors que le rôle protecteur de la forêt est souvent perçu comme immuable, les menaces s'accentuent : dépeuplement, feux... Les acteurs de l'eau sont donc aussi concernés par l'adaptation des forêts au changement climatique. Pour maintenir et optimiser le service environnemental fourni en forêt pour l'eau, des partenariats entre acteurs de l'eau et forestiers sont indispensables, pour, par exemple, encourager des pratiques vertueuses visant à éviter de déverser l'huile moteur, de compacter le sol...

Forêt et cycle de l'eau (quantité/qualité). Le point de vue de l'hydrologue à l'échelle du massif / bassin versant

Par Patrick LACHASSAGNE, Hydrogéologue¹

Ce que l'on sait : la forêt dispose de nombreux atouts pour le cycle de l'eau mais ils doivent être appréciés rationnellement en intégrant la dimension hydrologique.

Ce que l'on doit préciser : mieux connaître la consommation en eau des forêts selon les milieux pour apprécier ses impacts sur la disponibilité et sur la qualité de l'eau.

Recherche : impacts des actions forestières sur les bassins versants sensibles tels ceux sous climat méditerranéen.

Parmi les différentes fonctions assurées par la forêt (production de bois, stockage de carbone, préservation de la biodiversité, récréation, etc.), il est souvent invoqué un rôle hydrologique, qui concerne donc le cycle de l'eau. Ainsi, on lit que la forêt fait pleuvoir, assure, à travers les sols dans lesquels elle implante ses racines, le rôle d'une « éponge » qui capterait l'eau et la restituerait ensuite lentement aux cours d'eau et aux nappes d'eau souterraine, favorise l'infiltration des eaux de pluie et donc la recharge des nappes, préserve la qualité des eaux souterraines, etc. Compte-tenu de ces constats, la présentation a permis, au moyen d'exemples dont certains se voulaient volontairement un peu iconoclastes, à présenter ce que sait l'hydrologue, le spécialiste du cycle de l'eau, de ces différents rôles de la forêt.

Les capacités de rétention en eau de la forêt bénéficient en premier lieu à elle-même

En suivant les différentes composantes du cycle de l'eau (précipitation, évapotranspiration, ruissellement, recharge des nappes d'eau souterraine, qualité des eaux, etc.), l'auteur a successivement présenté des exemples pris dans le monde entier montrant que :

- Sauf à l'échelle de certains vastes massifs forestiers tels que ceux qui occupent le bassin amazonien ou celui du Congo (où l'on observe un recyclage continental des pluies), la forêt n'a pas d'incidence sur les précipitations (sujet discuté selon les contextes).
- Si les sols forestiers jouent le rôle d'une « éponge », c'est d'abord au profit de la consommation en eau de la forêt elle-même, qui évapotranspire plus que les autres types de couverts végétaux (hors cultures irriguées). On montre ainsi que, même si la forêt favorise de manière très importante l'infiltration des pluies efficaces aux dépends du ruissellement, le bilan reste déficitaire : la recharge des nappes située sous des bassins versants forestiers sont plus faibles qu'ailleurs.
- En ce qui concerne la qualité des eaux, de surface et souterraines, la forêt joue en général un rôle protecteur dans le sens où elle n'est l'objet que de peu d'interventions humaines (pas ou peu d'apports d'engrais ou de phytosanitaires) si on la compare notamment aux activités agricoles. Dans les opérations de reconquête de la qualité des eaux de captages, il convient néanmoins de conserver à l'esprit l'importante inertie des bassins versants, les résultats ne devenant souvent perceptibles que des décennies après l'arrêt des activités polluantes, agricoles notamment. En milieu aride ou semi-aride, la forêt peut prélever de l'eau directement dans la nappe et entraîner, à long terme, sa salinisation.



La forêt évapore plus que les autres types de végétaux mais elle est aussi celle qui retient le mieux les précipitations.

Photo Olivier Martineau © CNPF

Des atouts à apprécier localement avec des hydrogéologues

En conclusion, la forêt dispose de nombreux atouts. Néanmoins, il convient d'apprécier justement ses bénéfices et impacts hydrologiques, en faisant preuve de rationalité lorsque des processus hydrologiques sont invoqués et en recourant donc aux spécialistes du domaine (les hydrologues). Si les interventions forestières communes (coupes/reboisement) ont rarement un fort impact hydrologique, il convient néanmoins d'évaluer celui-ci, notamment sur les bassins versants sensibles : ceux sur lesquels les interventions forestières vont affecter une part significative de la superficie du bassin, ceux situés sous des climats semi-arides ou méditerranéens, etc.

Dans la séance des questions réponses, Patrick Lachassagne a indiqué que « Les précipitations devraient augmenter à cause du changement climatique (augmentation de la température) mais avec une répartition différente dans l'espace et le temps et avec une intensification accrue ».

Enjeux forêt et eau, retour d'expérience à l'échelle du Parc naturel régional des Grands Causses

Par Laurent DANNEVILLE¹¹

Ce que l'on sait : il existe un guide sur les recommandations forestières aux abords des zones de captage à la disposition des acteurs de l'eau et de la forêt.

Ce que l'on doit préciser : mieux faire connaître le guide GESTOFOR et en appliquer les préconisations.

Recherche : intégrer la thématique eau dans les projets d'un plan de massif et d'un plan de prévention des risques d'incendies de forêts.

Le Parc naturel régional des Grands Causses, l'un des parcs les plus grands de France, est très concerné par la problématique Forêt, Sol et Eau.

41% de forêt sur un socle majoritairement karstique

La forêt du Parc est présente sur 41 % de son territoire avec 2/3 de feuillus et 1/3 de résineux. La spécificité du Parc est caractérisée par son domaine karstique qui couvre 65 % du territoire du Parc sur les Grands Causses et les Avant-Causses. Ces grands massifs calcaires renferment en leur sein d'importantes réserves d'eau qui jouent un rôle capital dans le développement économique et touristique de la région.

La zone du Parc intègre trois grandes rivières, le Tarn, l'Aveyron et le Lot, qui bordent la limite nord du Parc. Avec les principaux affluents, le Parc compte 480 km de rivières offrant une grande richesse floristique et faunistique.

Les arbres consomment d'importantes quantités d'eau en fonction de l'espèce et de leur situation puisqu'ils ont une forte capacité d'adaptation en fonction du contexte dans lequel ils se trouvent. L'estimation de la consommation annuelle sur le territoire du Parc est de 544 millions de m³ (136 000 ha sur le Parc avec 4 000 m³ consommés par ha et par an)

Le risque le plus élevé concerne les petites sources captées avec des bassins de quelques hectares qui peuvent connaître une diminution forte de leurs débits, voire un tarissement, en cas de reboisement ou d'extension importante de la forêt.

La bonne gestion de la forêt située dans les bassins d'alimentation des ressources captées nécessite la connaissance du territoire et de son hydrogéologie (carte ou étude hydrogéologiques), la localisation et le type de captages présents (données ARS), la présence ou l'absence de périmètres de protection, l'identification des principaux risques et l'inventaire des activités forestières susceptibles d'impacter la qualité de l'eau.

Un outil pratique pour les acteurs de l'eau et les forestiers

Un guide nommé GESTOFOR est un outil pratique établi en 2011 pour les acteurs de l'eau dans le cadre de la protection réglementaire des prises d'eau et pour les forestiers dans celui de leurs activités en forêt. Il encourage une gestion forestière préservant la qualité de l'eau captée et favorise une meilleure compréhension entre acteurs de l'eau et forestiers. Mais il faudrait qu'il soit mieux connu et utilisé.

11 -DGA et hydrogéologue, Parc naturel régional des Grands Causses - 71, boulevard de l'Ayrolle, 12101, Millau, France - laurent.danneville@parc-grands-causses.fr

L'an dernier, le Parc a subi deux incendies importants (Mostuéjouls) qui ont touché des bassins d'alimentation de sources captées. Le Parc travaille sur le diagnostic post incendie et à la mise en place d'un suivi de la qualité de ces eaux puisque certains changements sur les sols sont survenus ; il envisage aussi un plan de massif, un plan de prévention des risques d'incendies de forêts (PPRIF) et la réalisation des obligations légales de débroussaillement qui s'étendent maintenant à 70 communes.

Rôle des forêts face au risque d'inondation

par Patrick ARNAUD, hydrologue à l'INRAE (Recover)

P. Arnaud n'est pas un spécialiste de la forêt mais il a pu, sur de nombreux sites, mesurer son impact.

Ce que l'on sait : les forêts ont peu d'effet sur les risques de crues et d'inondation lors d'évènements de précipitations très intenses (événements « méditerranéens »). Mais la forêt a des effets positifs sur les crues de boues et d'éléments solides car elle protège les sols (en limitant leur érosion lors des crues). Mais cela dépend de divers facteurs (profondeur des sols, intensité des précipitations...) au point que parfois elle peut jouer un rôle négligeable voire négatif (embâcles).

Ce que l'on doit préciser : une gestion forestière qui retienne plus d'eau en amont pour éviter un retour trop rapide à la mer dans les situations les plus favorables.

Recherche : préciser les situations favorables.

Un rôle a priori important

La forêt présente sur les bassins versants constitue une interface entre l'atmosphère et le sol qui participe au cycle de l'eau. Il est évident que la présence d'une forêt influence ce cycle de l'eau, à travers différents processus hydrologiques tels que l'interception de la pluie par la végétation ou l'évapotranspiration des arbres. Elle influence aussi de manière indirecte le cycle de l'eau en créant un sol généralement plus perméable, en limitant l'érosion et en favorisant le ralentissement des écoulements. On peut alors penser a priori, que la forêt va avoir un rôle important sur le risque d'inondation, en particulier en le diminuant, car elle va favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol, renvoyer de l'eau vers l'atmosphère et écrêter les crues par ralentissement des écoulements.

Mais selon les processus de crues...

Cependant, pour étudier le rôle que peut avoir la forêt sur le risque d'inondation, il faut surtout s'intéresser aux processus dominants, intervenants dans la genèse des crues. Ils peuvent être variables suivant les contextes climatiques et hydrologiques. Entre une crue torrentielle associée à un fort transport solide, une crue de remontée de nappes liée à des processus souterrains lents, une crue nivale liée à la fonte des neiges ou une crue « méditerranéenne » très corrélée aux intensités des pluies, les processus dominants peuvent être différents. Il est aussi important de définir à quelle échelle spatiale on se place (entre la parcelle, le versant et le bassin versant) et à quelle intensité du risque on s'intéresse (événements courants ou événements extrêmes).

Si on reste dans le contexte du risque d'inondation en milieu méditerranéen, certaines études déjà menées dans les années 2000 ont montré qu'il est difficile de conclure de façon nette sur le rôle des forêts sur le risque de crues. Ces études pourraient se résumer par cette conclusion de l'étude de Cosandey *et al*, 2003 : « Il est aussi faux de considérer que la forêt n'a pas d'influence sur les crues que d'affirmer qu'elle les réduit systématiquement ».

Rôle positif, négatif ou négligeable selon les contextes

Sans être exhaustif mais en essayant de faire le tour des configurations possibles, cette courte présentation montre que la forêt peut avoir des effets positifs sur la réduction du risque d'inondation, essentiellement en limitant l'érosion des sols et le transport solide lors des crues (particulièrement en montagne), mais aussi en ralentissant les écoulements. Elle peut aussi avoir des effets négatifs comme la création d'embâcles pouvant provoquer des débordements, voire aggraver la crue en cas

de rupture de l'embâcle. On s'aperçoit surtout que son rôle peut aussi être négligeable et que tout cela dépend fortement des contextes dans lesquels on se trouve. Par exemple, le rôle de la forêt sur les écoulements pourra se voir surtout à des petites échelles spatiales (versants) et il se réduit fortement pour les grandes surfaces de bassins versants. De plus, la forêt ne pourra avoir un rôle positif sur l'infiltration que si elle est associée à une profondeur de sol très importante. Enfin, lorsque l'on s'intéresse aux risques de crues extrêmes, c'est l'intensité de la pluie qui reste le facteur dominant. Dans ce cas, le rôle de la forêt devient négligeable en soi, les différences étant plus liées à la nature de la couverture des bassins, entre sols nus et sols couverts par de la végétation, même herbeuse ou arbustive. Il est donc difficile d'être catégorique face à cette question du rôle de la forêt sur le risque d'inondation car cela dépend essentiellement des contextes auxquels on fait référence.

Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses

Même lors des précipitations violentes, il est bon d'avoir de la forêt

Caroline Tramier (SCP), ingénierie à la fois forestière et hydrologue, précise que lors de la disparition de la forêt à la suite d'incendies très violents, la structure du sol et les macro agrégats peuvent être complètement détruits ce qui empêche la reprise de la végétation et peut avoir ensuite des effets catastrophiques sur les inondations à long terme. Certes, la forêt n'est plus efficace lorsque les précipitations dépassent un certain seuil de violence, mais si, au départ, il n'y a plus de forêt, les conséquences peuvent être encore pires. On peut dire que l'augmentation de la surface de la forêt sur le bassin versant permet d'avoir plus de sol riche en matière organique ce qui peut décaler le seuil où l'impact de la forêt est inopérant vers le haut et de retarder ainsi le pic de crue.

Le castor construit des embâcles solides et efficaces

Thierry Gauquelin (ex IMBE) revient sur le problème des embâcles qui, lorsqu'ils lâchent lors des inondations, créent une vague qui accentuent les dégâts. Il se demande quel peut être l'impact des barrages solides construits par les castors. Mattia Trabucchi, FNE Paca, apporte les précisions suivantes. Le castor est un allié des hommes, il ne coupe jamais totalement le courant. Il rajeunit la ripisylve en coupant les salicacées qui rejettent de souche. Ces rejets jouent le rôle de peigne qui ralentit les crues. Plus généralement, les embâcles ne sont plus un problème à partir du moment où elles sont gérées ; il faut les couper et les mettre dans le sens du cours d'eau de manière à laisser du bois mort dans l'eau. Pour avoir des milieux vivants, il faut laisser de la matière organique dans le cours d'eau.

2.3. Mieux comprendre le rôle du sol forestier

Le réservoir en eau utilisable des sols (RU) : comment l'estimer et le préserver ?

Par Julien FIQUEPRON (CNPF-IDF)¹²

Ce que l'on sait : s'il est très difficile d'améliorer le RU, il est en revanche essentiel de veiller à ne pas le dégrader, en limitant le tassemement et l'érosion des sols.

Ce que l'on doit préciser : améliorer notre connaissance du Réservoir utile pour mieux adapter les peuplements face au changement climatique.

Recherche : trouver des méthodes simples d'estimation du RU applicables par les forestiers sur le terrain.

Les forêts font face à des épisodes de sécheresse et de canicule plus marqués, plus fréquents et plus longs. Plus de chaleur, moins de pluie, voilà des facteurs de risques importants pour le fonctionnement des forêts. Celles-ci ne peuvent alors compter

¹² -Ingénieur forêt & eau, sols, renouvellement des peuplements - Centre national de la propriété forestière - Institut pour le Développement Forestier, Nancy, France.

que sur l'eau dans le sol qui joue le rôle de facteur de compensation du climat, d'où l'importance d'apprécier le réservoir en eau utilisable des sols forestiers. Ce Réservoir utile (RU) représente la capacité d'un sol à stocker de l'eau accessible et extractible pour la végétation. Pour aider les gestionnaires forestiers, il est important de préserver cette capacité et, d'abord, de l'estimer sur le terrain.

Réservoir utile, une donnée fondamentale à connaître

Le RU représente un réservoir, c'est la taille du contenant que l'on décrit et cela ne présage pas de son niveau de remplissage, qui dépend des précipitations. Le RU est une donnée de base pour de multiples applications liées au bilan hydrique des peuplements forestiers : outils d'aide à la décision pour le choix des essences : BioClimSol, modélisation du bilan hydrique Biljou®, prévision de la praticabilité des cloisonnements VSOILForOAD...

La technique d'estimation du RU par les forestiers sur le terrain reste rudimentaire. Il s'agit de décrire la texture des différents horizons, leur épaisseur, les éléments grossiers, à partir d'un sondage à la tarière ou d'une fosse. Les méthodes d'estimation du RU évoluent : pour faciliter le renseignement des paramètres sur le terrain (regroupement de classes de texture) ou pour intégrer de nouveaux aspects comme les affleurements.

Un projet pour mieux l'apprécier

Le projet RUFor vise à améliorer encore l'estimation du RU par les forestiers sur le terrain :

- Améliorer les connaissances sur les courbes de rétention en eau des sols forestiers.
- Mieux apprécier les paramètres de distribution des racines dans les sols.
- Définir des facteurs de correction entre les données issues de sondages et celles des fosses.
- Intégrer les innovations du projet dans les outils numériques de terrain.

Attention, le RU est l'équivalent d'un réservoir, la variable essentielle pour le stress hydrique reste les précipitations : un gros réservoir plein peut différer et limiter les effets de la sécheresse, mais s'il est vide cela ne change rien. En conclusion, améliorer notre connaissance du RU est un des outils pour mieux adapter les peuplements face au changement climatique. S'il est très difficile d'améliorer le RU, il est en revanche essentiel de veiller à ne pas le dégrader, en limitant le tassement et l'érosion des sols.

Exploration géophysique et isotopique des mécanismes de résilience des arbres à la sécheresse

par Simon CARRIÈRE¹³

Ce que l'on sait : grâce aux méthodes géophysique et isotopique on peut connaître les aptitudes d'essences d'arbres différentes à prélever l'eau du sous-sol pendant les sécheresses (par exemple gradient : chêne vert > hêtre > sapins). Ce gradient correspond à des adaptations de leurs fonctionnements physiologiques (limitation accrue de la transpiration) et morphologiques (moins de feuilles et des racines plus profondes) aux milieux.

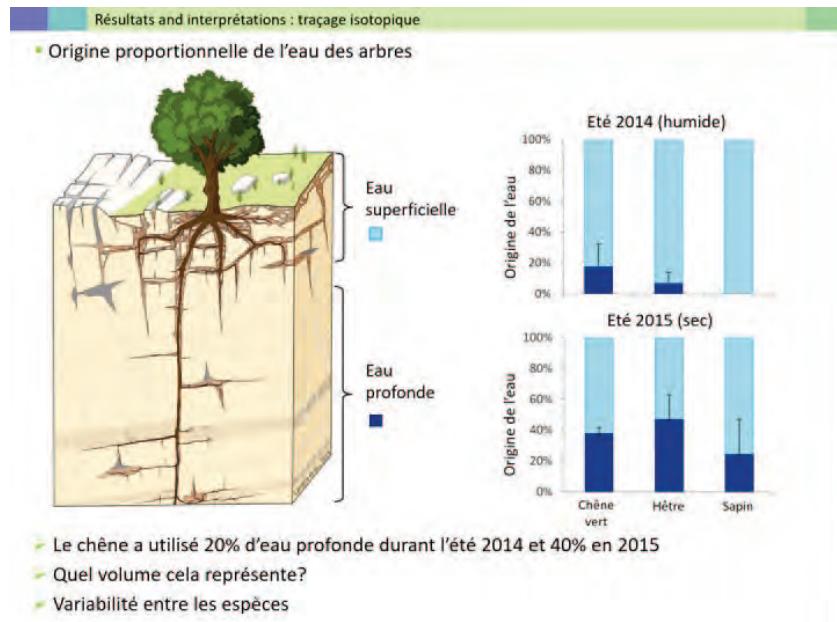
Ce que l'on doit préciser : la quantification des volumes d'eau prélevés par les arbres dans le sous-sol ainsi que la proportion de racines nécessaire pour permettre ce prélèvement.

Recherche : associer les mesures de terrain géophysique et isotopique avec des modèles de bilan hydrique et de fonctionnement des arbres pour quantifier les volumes d'eau sous-terrain utilisés par les forêts et faciliter l'adaptation. Les forêts jouent un rôle clé dans les cycles de l'eau et du carbone, mais elles sont confrontées à des sécheresses plus intenses et plus fréquentes dans le cadre du changement climatique en Europe occidentale. L'accès à l'eau du sol et du sous-sol est essentiel pour la résistance et la résilience des forêts aux sécheresses. Pourtant, les prélèvements d'eau par les arbres dans les sols forestiers restent mal compris et en particulier les prélèvements profonds.

13 - Simon Damien Carrière, Julien Ruffault, Coffi Belmrys Cakpo, Claude Doussan, Guillaume Simioni, Albert Olioso, Konstantinos Chalikakis, Nicolas Patris, Hendrik Davi, Nicolas K. Martin-StPaul.

Rôle de l'eau profonde pour alimenter les arbres

Les approches géophysiques et isotopiques permettent de mieux comprendre le rôle de l'eau profonde (eau souterraine) dans l'approvisionnement en eau des arbres et des forêts. Tout d'abord, le traçage isotopique permet d'évaluer la proportion d'eau « profonde » prélevée par les arbres aux différentes périodes de l'année. En utilisant cette méthode isotopique on voit que différentes espèces d'arbres ont des aptitudes différentes à prélever l'eau du sous-sol pendant les sécheresses (chêne vert > hêtre > sapins), ce qui est probablement lié à leur résistance différente à la sécheresse. Ainsi sur le bassin versant de Fontaine de Vaucluse, le chêne vert a prélevé 20% de l'eau profonde en année humide (2014) et 40% en année sèche (2015).



Extrait de la présentation de Simon Carrière.

En associant les données isotopiques avec de la modélisation du bilan hydrique (avec le modèle SUREau) nous pouvons estimer le volume d'eau prélevé par les arbres dans le sous-sol ainsi que la proportion de racines nécessaire pour permettre ce prélèvement. Dans le cas d'un peuplement de chêne vert au pied du Mont Ventoux, ce volume s'élèverait à moins de 10% de l'évapotranspiration totale, mais semble être indispensable pour assurer la survie. Nota : Le modèle indique que 1,2% de racines dans le compartiment profond préleverait environ 20 mm/an d'eau profonde soit 7% de l'ET annuelle.

Le recours à la géophysique, et notamment aux techniques de tomographie géophysique, nous permet de cartographier l'utilisation de l'eau à l'échelle d'une parcelle. Dans notre zone d'étude, nous avons appliqué cette méthode sur des peuplements de chêne vert pour comprendre des différences de dépréssissement. Les résultats ont montré que les arbres sont généralement moins dépréssants sur les zones plus pauvres en sol (et en eau), car ils ont adapté leurs fonctionnements physiologiques (plus de limitation de la transpiration) et morphologiques (moins de feuilles et des racines plus profondes).

Ces résultats mettent en lumière la capacité des arbres à utiliser l'eau du sous-sol pour s'adapter aux sécheresses.

👉 Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses

Fragilité des sols forestiers

Claude Doussan a précisé que « les sols méditerranéens sont très fragiles. Lorsqu'il n'y en a pas, ils se construisent plus lentement qu'ils ne disparaissent et donc le dépôt de biomasse est essentiel. Là où il n'y a pas ou peu de sol, c'est parce qu'il y a de la pente (érosion) ou très peu de végétation. Il est très important de protéger les sols car c'est une ressource pas ou peu renouvelable. Le rôle de la forêt et des modes de gestion de la forêt sont déterminants pour y parvenir.

Bruno Giaminardi, Président du Centre national de la propriété forestière de Provence-Alpes-Côte-d'Azur, a indiqué que « dans le nouveau SRGS (document cadre de gestion forestière en forêt privée) des règles ont été prévues pour garantir la préservation des sols en évitant le tassemement lors des coupes de bois, en prélevant moins mais plus souvent, en débardant les arbres entiers sans les ébrancher, pas plus d'une fois dans la vie du peuplement ».

Charles Dereix a rappelé que « les anciens, en construisant les terrasses (bancaous, faïsses...) ont créé un sol là où il n'y en avait pas pour pouvoir cultiver. Même si la culture est abandonnée, la présence de ces terrasses est très utile pour retenir l'eau ».

Reconstitution de sols forestiers

Jean-Claude Lacassin (pédologue à la Société du Canal de Provence) évoque un projet de reconstitution de sols forestiers. Sur le site de St Chamas, les sédiments de clariflocculation (sédiments issus de la Durance) sont recyclés sur un sol caractéristique de garrigue à chêne kermès depuis les années 1980. Sur ce sol créé à partir de ces limons de Durance mélangés avec du compost de déchets verts, le propriétaire a planté des arbres et des cultures dans un objectif cynégétique avec succès. Il est possible de le visiter. Jean-Claude Lacassin signale qu'EDF va devoir vidanger la plupart de ses barrages le long de la Durance et enlever les limons qui se sont déposés. Ses responsables souhaitent valoriser ces limons mélangés à de la matière organique pour reconstituer des sites forestiers ou potentiellement forestiers. La piste de la valorisation en reconstitution de sol pour l'agriculture ou la sylviculture n'est pas simple, sans doute coûteuse mais constitue un bel enjeu écologique. Avis aux intéressés !

Influence du sous-bois sur le sol

Caroline Tramier (Société du Canal de Provence) a insisté lors de la table ronde sur l'importance des strates basses sur socle géologique imperméable (par exemple le massif des Maures). En effet, le couvert forestier apporté par la présence du sous-bois joue un rôle important sur la perméabilité des sols. Les plantes du sous-étage apportent des racines fines qui sont renouvelées très souvent ce qui amène une certaine porosité dans le sol et lui permet de jouer un rôle tampon. Le sol superficiel devient alors plus perméable limitant en surface les écoulements. Ce ralentissement de l'eau limite les inondations.

Faire un bilan des boisements RTM

Les travaux de restauration des terrains en montagne (RTM) ont permis de retenir les eaux de pluie et ont réduit les risques d'érosion. Est-ce que cela a eu un impact sur la disponibilité de l'eau localement ? Il serait bon de se tourner vers les chercheurs de l'INRAE Grenoble qui suivent des dispositifs depuis longtemps, notamment à Draix (04).

Mesurer l'eau réellement dans le sol

Existe-t-il une méthode pour mesurer l'eau que l'on a réellement dans le sol ? (Thomas Mathey, Forestry Club de France). Julien Fiquepron (CNPF) lui répond : « Je vous ai parlé de la bouteille (le réservoir utile du sol) et demain Nathalie Bréda vous parlera de la manière de la remplir et de savoir ce que l'on a dans le sol grâce à des modèles de bilan hydrique qui font la synthèse des apports, des départs d'eau et des variations de stocks. Ces bilans hydriques fonctionnent au pas de temps journalier ce qui permet de pouvoir tenir compte des variations météorologiques qui peuvent être très importantes d'un jour à l'autre.

Connaître l'eau utilisable grâce aux données du réseau de mesure de la qualité des sols

Jean-Claude Lacassin (SCP) évoque deux points. Il existe une mesure en laboratoire où on va évaluer la capacité au champ et le point de flétrissement d'échantillons de terre. C'est fait dans le cadre du réseau de mesure de la qualité des sols qui est un programme national qui comprend des sites forestiers. Ce programme effectue des mesures sur des échantillons de sols prélevés dans une maille carrée de 16 km x 16 km sur l'ensemble du territoire. En région PACA, il y a 80 sites forestiers où des mottes sont prélevées à différents horizons et analysées en laboratoire (nota : pour des raisons de coût tous les sites ne sont pas systématiquement prélevés). On dispose sur quelques sites forestiers de données sur le réservoir utilisable maximum en eau. Dans les sols forestiers méditerranéens, il est difficile de prélever des mottes selon les normes car ils comportent beaucoup de cailloux et de racines.



Démonstration de mesures du réservoir utilisable d'un sol dans le cadre du Réseau de mesure de la qualité des sols.

Photo D. Afxantidis.

Effet négatif de l'efficacité de la forêt face au ruissellement : manque de sédiments dans les cours d'eau

Jean-Claude Lacassin (SCP) précise le deuxième point : à cause de la déprise agricole et pastorale, et grâce à la restauration des terrains en montagne, la surface de la forêt a fortement progressé dans l'arrière-pays. Le PNR du Verdon a lancé une étude de faisabilité sur le haut bassin du Verdon, pour voir si une réduction de la forêt pouvait réalimenter le Verdon en sédiments. En effet, des phénomènes d'érosion régressive se traduisent par des problèmes au niveau des ponts (affouillement) et des berges qui sont sapées par endroit. Il y aurait donc des impacts négatifs, même si cela reste ponctuel et localisé, à avoir « trop de forêt ».

Impact de la réduction de la densité des forêts : résultats variables selon l'échelle considérée ?

Julien Fiquepron (IDF) indique que nous disposons de résultats sur des bassins versants appareillés de petite échelle (une centaine d'hectares) montrant que l'exploitation de la forêt sur une partie se traduit par une quantité d'eau supérieure à l'exutoire. À des échelles plus vastes, on ne trouve pas ce même genre de résultats, sauf peut-être une moindre variabilité de débit (cf. suivi des débits des cours d'eau en lien avec l'augmentation du couvert forestier par V. Andreassian sur le Massif central). Les hydrologues ont-ils des explications sur ces résultats variables selon l'échelle ? Claude Doussan (INRAE) lui a répondu – « À très grande échelle, c'est le recyclage de la pluie et sa redistribution qui peuvent jouer, mais ce n'est pas le cas du Massif central. A l'échelle du Massif central, comme de nombreux facteurs interviennent, par exemple la diminution de la consommation par l'homme à la suite de la déprise rurale, il est délicat de trouver des explications ». P. Lachassagne (Hydroscience) complète : « De plus, il n'est pas évident d'en déduire des affirmations claires à ces échelles car les incertitudes sur les mesures de débit voisinent les 20% ».

Jouer sur la variabilité individuelle des arbres relativement à la résistance à la sécheresse

Une représentante de la Fédération Nationale de l'Environnement fait la réflexion qu'il faut considérer la variabilité entre divers individus d'une même espèce en fonction de leur positionnement avant de se lancer dans la substitution d'une espèce à une autre. Simon Carrière pense qu'il faut se garder d'avoir des visions trop homogènes, et il ne faut pas considérer tous les individus de la même manière, d'autant plus que l'on est souvent sur du karst avec de très grandes variabilités de sol.

Un programme de recherche de potentiel génétique à travers l'Europe

Jean Bonnier - « Pour les essences méditerranéennes, il existe une grande variabilité génétique selon les provenances. Est-il prévu d'élargir le champ d'investigations notamment en prenant en compte les plus méridionales ? ». Réponse - Nicolas Martin (INRAE). Il existe des sujets de recherche sur ce thème à Avignon piloté par un généticien Ivan Scotti. Il s'agit de caractériser à travers l'Europe différentes populations d'une dizaine d'essences (parmi elles, il y a le chêne vert). Chaque été on traite deux espèces. On mesure dans des populations allant du Maroc, de la Turquie jusqu'au Nord de l'Europe, les caractéristiques de résistance à la sécheresse de manière à pouvoir les inclure dans les modèles pour savoir si on dispose du potentiel génétique pour résister au climat futur. Les résultats sont encourageants, notamment avec des populations de pin maritime d'Espagne présentant des combinaisons de caractéristiques physiologiques qui les apparentent à des populations élites évoquées par Julien Ruffault.

Variabilité individuelle chez les sapins dans le Ventoux

Nicolas Martin apporte des précisions à ce qu'a affirmé Simon Carrière sur les variations entre individus au sein d'un peuplement quant à l'utilisation de l'eau et à la réponse à la sécheresse. Des études menées sur des sapins du Ventoux ont montré que certains individus installés sur des milieux très pierreux en surface étaient souvent plus résilients à la sécheresse. Cela est sans doute lié à leur capacité de prélever de l'eau en été plus profondément et aux surfaces foliaires plus faibles donc moins consommatrice d'eau. Entre des individus voisins de 50 mètres, on pouvait constater de grandes différences sur leur résistance à la sécheresse.

Christophe Chauvin, FNE – « la variabilité individuelle peut être liée à la génétique mais aussi à la plasticité. Il faut donc garder précieusement ceux qui ont été capables de développer des racines très profondément ».

Bruno Giaminardi - Dans le cadre des outils mis en place par le CNPF (BioClimSol et Med for Futur), faut-il avoir une réflexion par essence ou par sujets/individus qui ont pu développer génétiquement certaines capacités à aller chercher l'eau et que l'on pourrait sélectionner ? Plus inquiétant, les peuplements d'aujourd'hui n'auront pas le temps de s'adapter génétiquement vu la vitesse du changement climatique.

2.4. Gestion adaptée de secteurs sensibles : zones humides, captage, ripisylve

À l'échelle des zones humides : la circulation de l'eau et le fonctionnement hydrologique des zones humides forestières (ex. du bassin versant de l'Aude)

Par Benoît LARROQUE (ONF) et Frédéric PARAN (École des Mines de St-Étienne)

Ce que l'on sait : l'effet des zones humides forestières est marqué pour l'écrêtage des crues avant leur saturation, il est faible sur le soutien d'étiage en période de sécheresse.

Ce que l'on doit préciser : quatre principes de gestion ont été identifiés pour favoriser l'effet tampon des zones humides et faire de la forêt une alliée efficace (ils font l'objet d'une fiche).

Recherche : continuer les mesures sur une plus longue durée, préciser l'éventuel impact microclimatique d'une génération d'humidité atmosphérique se traduisant par la survenance quasi quotidienne d'orages en été, mieux appréhender les circulations souterraines (à l'aide d'approches géophysiques et géochimiques).

Réponse à une demande des acteurs de l'eau et des territoires

Le bassin versant de l'Aude connaît un déficit hydrique important. Les besoins en eau des parties médiane (agglomération de Carcassonne) et aval (plaine agricole) sont très différents de ceux du bassin versant amont montagnard majoritairement occupé par des espaces naturels à dominante forestière.

L'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, le département de l'Aude et le Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières (établissement public de bassin) ont souhaité se pencher sur les processus de transferts d'eau dans cet hydrosystème amont afin de mieux cerner le potentiel de soutien d'étiage offert par les zones humides (tourbières de pente) ainsi que leur capacité d'amortissement des pluies et donc des crues.

Une méthodologie, une instrumentation et le traitement des données

Pour appréhender ces phénomènes, une équipe pluridisciplinaire a été constituée autour de l'Office national des forêts, gestionnaire de surfaces forestières importantes en haute vallée de l'Aude (instrumentation, relevés, bancarisation des données, modélisations à l'échelle d'une zone humide), et des Écoles des Mines de Saint-Étienne (tutelle scientifique, définition d'indicateurs de soutien d'étiage) et d'Alès (analyse et modélisation des données hydrométéorologiques).

L'approche a consisté à appréhender à la fois les phénomènes au niveau de tourbières mais aussi de sous-bassins plus vastes afin de mettre en évidence de possibles effets cumulatifs. Les sous-bassins instrumentés ont été comparés à des secteurs témoins, dépourvus de zones humides.

Des bilans hydrologiques ont été estimés sur trois cycles annuels en comparant les débits d'entrée (pluie, neige) aux débits de sortie (débitmètres de type H-flume aux exutoires des sous-bassins, ETP).

Des effets faibles sauf pour l'écrêtage des crues

À l'échelle du bassin versant, l'analyse statistique des données hydrologiques et météorologiques ainsi que les essais de modélisation (réseaux neuronaux) ont permis de mettre en avant les éléments suivants :

- Sur la série de données acquises, on ne constate pas de différence de fonctionnement hydrologique majeure entre les différents bassins versants étudiés. La vidange des tourbières de pente génère des débits à l'échelle locale en limite de zone humide sans pour autant constituer un soutien d'étiage à proprement parler ;



Débitmètre qui mesure le débit volumétrique des eaux de surface installé par l'ONF sur la zone d'étude du rôle des zones humides en forêt.

Photo ONF.

- Les bassins versants présentant une forte densité de zones humides semblent soumis à une évapotranspiration potentielle plus importante, mais ils ne soutiennent pas plus les étiages que les bassins témoins. La plus forte densité de zones humides favoriserait donc l'ETP ;
 - Pour certaines crues en période estivale, on constate un phénomène d'écrêtement assez net dans les bassins riches en zones humides. Cela suggère que l'évapotranspiration estivale a été élevée et a conduit le bassin à absorber d'abord le déficit lié à l'évapotranspiration avant de contribuer aux écoulements. L'effet potentiellement « écrêteur de crues » constaté à l'échelle du bassin versant semble corrélé avec une capacité de remplissage de quelques heures en été, lorsque les niveaux d'eau dans les piézomètres sont faibles. À saturation, lorsque les piézomètres sont pleins, cet effet est faible ou nul.
- Ces premières analyses nécessitent d'être complétées à l'avenir, en travaillant sur des chroniques de données plus longues (en cours d'acquisition). Il conviendrait également de mieux appréhender les circulations souterraines (à l'aide d'approches géophysiques et géochimiques), ces tourbières de pente étant vraisemblablement alimentées aussi de façon significative par des eaux issues des parties altérées du socle rocheux.

A préciser : un impact microclimatique

Enfin, l'étude des données météorologiques permet de faire l'hypothèse que l'humidité de l'air relativement importante que les zones humides entretiennent en tête de bassin (amont), n'est certainement pas étrangère à la fréquence des orages qui frappent le massif montagneux en saison estivale, contribuant ainsi à une composante courte du cycle de l'eau sur la zone. Les orages alimentent le système par endroits, en contribuant ainsi au soutien d'étiage plus bas dans la vallée et contribuent à la baisse des températures en basse altitude. Toutefois, cela est constaté mais difficilement quantifiable actuellement compte tenu du manque de données à cette échelle.

Des principes de gestion pour les zones humides forestières

L'analyse simultanée de la morphologie des zones humides étudiées, de leur hydrologie et des communautés végétales observées a permis d'extraire quatre principes de gestion. Ces derniers visent tous à favoriser une alimentation en eau la plus régulière possible tout au long de l'année. Cela est expliqué dans la fiche n°5 rédigée pour l'occasion ¹⁴.

Solidarité amont/aval

Enfin, ce projet présente l'intérêt de nourrir le dialogue territorial et la prise de conscience entre les acteurs de l'eau d'un bassin versant de l'Aude présentant des situations fortes de tension sur la ressource dans ses parties aval (usages agricoles) et médiane (agglomération de Carcassonne) et, en contraste, une tête de bassin essentiellement naturelle et fortement boisée. Il illustre une solidarité amont/aval qu'il serait bon de construire.

☞ Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses

Suites et un point à confirmer : le soutien indirect des zones humides en forêt par des micro orages

Benoît Larroque (ONF) - On a travaillé sur trois cycles hydrologiques, ce qui est trop peu. Cela a le mérite d'avoir lancé un processus, d'avoir dégagé des premières tendances notamment sur la capacité d'amortissement de l'onde du signal de pluie jusqu'à saturation des réservoirs, mais cela a besoin d'être conforté sur une période d'au moins dix ans. Ces résultats vont être portés auprès des instances de gestion de l'eau et être mis au débat. Certes, on ne parvient pas à un soutien d'étiage espéré de 37 millions de m³ mais je trouve intéressant d'avoir mis en évidence des cycles microclimatiques observés. Pour l'instant, ce n'est qu'une hypothèse puisque nous n'avons pas mesuré l'évapotranspiration. Mais d'après ce que l'on a entendu ce matin, à des échelles plus larges, il semblerait que la forêt et les zones humides joueraient indirectement un rôle de soutien d'étiage non pas en sortie directe des zones humides mais, peut-être, sous forme d'orages plus fréquents, par l'arrivée d'eau sous forme de pluies plus régulières en été où on est en pleine saison de soutien d'étiage.

14 - Voir sur site ONF <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+/1d08::role-des-zones-humides-forestieres-dans-la-regulation-des-cours-deau.html>

Travaux intéressants à poursuivre pour avoir plus d'informations

Frédéric Paran - Il serait intéressant de conduire un certain nombre d'études, notamment la poursuite des mesures pour disposer de quelques données chroniques supplémentaires et faire un vrai travail de modélisation. Ensuite, essayer de mieux connaître le compartiment souterrain de ce territoire notamment avec des méthodes d'investigation géophysiques. Dans un premier temps, cela permettrait de mieux connaître la géométrie de la zone humide et sa structure interne et, de plus, celle des aquifères superficiels qui se trouvent dans des parties dégradées du sol. Dans un deuxième temps, on utiliserait des méthodes géochimiques pour mieux préciser l'origine et le cheminement des eaux. Comme c'est beaucoup évoqué dans le séminaire aujourd'hui, il faudrait faire la part des choses et mieux comprendre le rôle de la forêt par exemple sur l'évapotranspiration ou l'interception des pluies.

Des fiches techniques disponibles

Nous avons rédigé des fiches techniques à l'issue de ce projet qui vient juste de se terminer. Cinq fiches techniques figurent parmi les livrables et font le point sur les méthodes suivies, la collecte et le traitement des données, les résultats et les préconisations de gestion.

Présentation de l'indice de biodiversité et de connectivité des ripisylves (IBC Ripisylves)

Par Mélanie DAJOUX ¹⁵

Ce que l'on sait : la qualité des ripisylves peut être appréhendée par une boîte à outils simple et améliorée par des actions décrites dans le guide de préservation des ripisylves.

Ce que l'on doit préciser : faire mieux connaître l'indice de biodiversité et de connectivité par les gestionnaires et les riverains forestiers et l'adapter à la flore et aux caractéristiques des cours d'eau en zone méditerranéenne.

Recherche : mettre en place un suivi dans le temps et apprécier l'appropriation de l'outil par les acteurs et son impact sur les pratiques.

Avec l'INRAE et le CNPF, FNE AURA a créé un nouvel indicateur : l'Indice de Biodiversité et de Connectivité des Ripisylves (IBC Ripisylves). C'est un outil simple, utilisable à toute période de l'année et sur une grande partie du territoire national. On dispose ainsi d'un indicateur qui relève les capacités d'accueil de la ripisylve pour la biodiversité et sa connectivité au niveau longitudinal, transversal et paysager. Fortement inspiré de l'Indice de Biodiversité Potentiel (IBP), il s'adapte aux particularités des cordons rivulaires des petits et moyens cours d'eau.

L'IBC Ripisylves comporte 15 facteurs d'évaluation dont 7 facteurs liés au peuplement et à la gestion, 3 liés au contexte, 2 liés aux perturbations du milieu et 3 liés à la connectivité. Les observateurs attribuent 3 ou 4 scores possibles selon les facteurs. Les scores sont ensuite regroupés par blocs de facteurs (les 4 cités ci-dessus) pour aboutir à une note globale sur 100. Les relevés s'effectuent sur 500 m de long jusqu'à 10 m de large de part et d'autre du cours d'eau. Les données peuvent être saisies sur papier ou directement sur tablette/smartphone. Un traitement permet d'analyser les données par tronçons et de les archiver.

Un guide de préservation des ripisylves a également vu le jour et propose des conseils et des actions à mettre en œuvre selon les moyens des acteurs qui souhaitent agir.

Des interventions, des prestations et des formations sont proposées pour accompagner au mieux la prise en main de la boîte à outils, entièrement à disposition de tous les acteurs.

La ripisylve est une vraie forêt...

Ana Elena Sanchez¹⁶ a représenté, lors de la table ronde, la Maison régionale de l'eau. Celle-ci mène des études en milieu aquatique et les transmet à divers publics pour des prises de décision en conscience. Elle se réjouit que plusieurs présentations aient parlé de l'importance des cours d'eau et des zones humides qui, sur les bassins versants, donc à une échelle large, sont les récepteurs des flux. L'existence ou non d'un sol et sa qualité vont avoir un impact plus ou moins fort sur l'écosystème aquatique.

... qui a un rôle majeur sur le fonctionnement des systèmes aquatiques

Mais, à une échelle moins large, les rôles des forêts rivulaires et des ripisylves sont majeurs sur le fonctionnement des systèmes aquatiques. Ce corridor végétal le long de la rivière a un impact direct sur la température qui est un paramètre de la biocénose aquatique, sur la concentration d'oxygène dissous dans l'eau, sur le cycle de la matière organique (dépôt des feuilles, des bois morts...) support d'habitats. La ripisylve joue aussi un rôle sur la dynamique hydromorphologique d'une rivière, stabilisation des berges face à l'érosion, diversification des vitesses d'écoulement et des profondeurs, présence de bois morts et d'embâcles, même s'ils ont mauvaise réputation. Enfin, les ripisylves sont des éléments forts des paysages. Par contre, elles sont souvent absentes ou trop étroites. Pour nous, il est important de développer la « trame turquoise ¹⁷ ». La ripisylve est une vraie forêt. C'est un vrai sujet qu'il faut traiter lors de notre cycle par exemple lors d'une journée organisée avec vous pour déterminer les soins qu'ils seraient intéressants de mieux définir et de promouvoir.



Arbre déraciné le long d'une rivière. Photo Jacques Degenève © CNPF

👉 Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses

Sous-estimation des plantes invasives dans l'IBC ?

Thierry Gauquelin demande pourquoi dans l'IBC Ripisylve, on sous-estime la connectivité, en attribuant moins de poids aux perturbations et aux espèces exotiques envahissantes qui constituent pourtant un vrai problème et contre lesquelles on peut décider de lutter. Mélanie Dajoux répond que c'est le bloc de facteurs qui proportionnellement cumule le plus de scores. La connectivité est notée sur 40 pour une note IBR sur 100. Cela a été une décision concertée du comité technique. Bruno Giaminardi rappelle que l'outil IBP est un outil destiné aux gestionnaires pour montrer aux propriétaires forestiers le potentiel en matière de biodiversité de leur forêt. C'est un outil qui permet de les sensibiliser et de les aider à faire des choix cohérents avec les caractéristiques de leurs parcelles. Peut-on imaginer un module complémentaire pour estimer le potentiel de leur forêt sur le cycle de l'eau ?

Est-ce que certaines structures gémapiennes se sont emparées de l'outil ?

Mélanie Dajoux précise qu'un syndicat de rivière l'a intégré dans l'étude du bon fonctionnement d'une rivière sur l'ensemble d'un bassin versant pour évaluer le compartiment biologique. Une autre structure va l'utiliser dans cadre d'un Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI). Un autre gestionnaire a pris le temps d'utiliser l'IBC sur près d'une centaine de kilomètres de cours d'eau en prenant des stagiaires pour les relevés avant de rédiger un nouveau plan de gestion de sa ripisylve. D'autres utilisateurs l'utilisent directement à partir du site internet de FNE AURA « sans que nous n'en ayons connaissance car il est libre d'usage ».

16 - Maison régionale de l'eau, Responsable du pôle scientifique et technique

17 - Notion développée par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, interface entre la trame verte et la trame bleue

2.5. Utiliser les modèles d'aide à la décision

Biljou© : un modèle de bilan hydrique forestier journalier et un site web dédié à la quantification des épisodes de sécheresse en forêt

Par Nathalie BRÉDA (INRAE)¹⁸

Ce que l'on sait : effectuer le bilan hydrique d'un peuplement à l'aide du modèle Biljou© accessible à un public initié et formé, là où sont disponibles des données météorologiques quotidiennes, et les caractéristiques du peuplement et du sol. Estimer l'intensité, durée et précocité des sécheresses, estimer la quantité d'eau évapotranspirée par les peuplements (eau verte) et restituée au milieu (eau bleue).

Ce qu'il reste à faire : généraliser l'estimation de l'indice foliaire, adapter la sylviculture en tenant compte des bilans hydriques actuels et futurs. Utiliser les estimations d'eau verte et bleue concrètement lors de l'élaboration des documents d'orientation de la gestion de l'eau (SAGE, contrats de rivière...).

Recherche : ajouter d'autres modules pour affiner les diagnostics et outils d'aide à la décision.

Un modèle qui permet de déterminer les différents flux d'eau...

Le bilan en eau des forêts est étudié depuis les années 1980. Chaque flux d'eau élémentaire entrant (précipitation, interception des précipitations, écoulement le long des troncs) et sortant de l'écosystème (transpiration des arbres et sa régulation, évaporation du sol et de la strate herbacée, drainage) a été mesuré, analysé, modélisé à partir de très nombreuses études en contexte de sols, de climat et de peuplements variés. Des séries pluriannuelles de mesures de contenu en eau du sol sur l'ensemble des profils de sols enracinés ont été simultanément acquises afin de décrire l'évolution du contenu en eau des sols et son impact sur la régulation de la transpiration. Ainsi, le modèle de bilan hydrique Biljou© a été conçu, codé, validé pour chacun des flux d'eau, tous exprimés en mm.

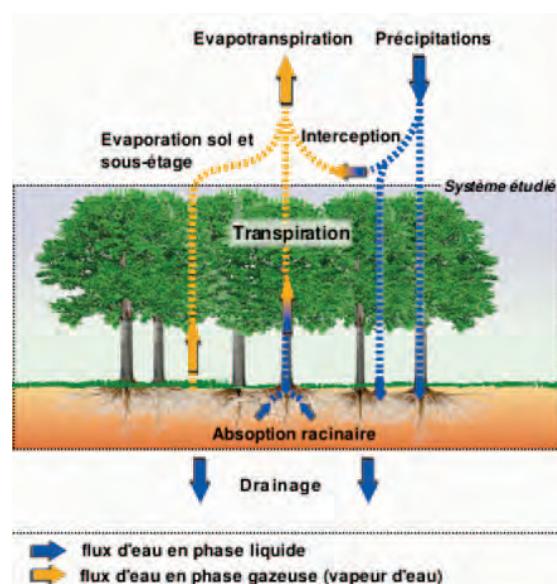
... et de fournir des indicateurs de sécheresse

Par ailleurs, des indicateurs de sécheresse permettant de qualifier les épisodes de déficits hydriques en date d'occurrence, durée et intensité ont été développés et éprouvés pour interpréter la croissance radiale des arbres, les dépérissements forestiers ou encore l'impact de la sylviculture. La première version du modèle Biljou© a été publiée dans *Ecological Modeling* en 1999 (Granier *et al.*, 1999).

Un site web pour se former et exécuter le modèle

Le modèle évolue et s'enrichit régulièrement. Depuis 2010, un site web a été développé, en langues française et anglaise, pour permettre à une large gamme d'utilisateurs de se former et d'exécuter le modèle. Le site s'enrichit progressivement de nouveaux services :

- Un volet pédagogique, qui permet à chaque utilisateur de s'auto-former en ligne.
- Un accès, moyennant la création d'un compte utilisateur, à l'outil de calcul en ligne, qui permet à l'utilisateur d'exécuter ses propres calculs de flux d'eau, de bilan hydrique et d'indicateurs de sécheresse en ligne.



Site BILJOU : <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fr/>

Ensemble des flux d'eau entrant et sortant d'une forêt. Les bilans hydriques tels Biljou, permettent de les quantifier.

Schéma du site Biljou.

18 -Nathalie Bréda, Vincent Badeau, Joseph Levillain, Alain Bénard, Damien Maurice, Nathalie Leroy, Emeline Chaste, Nathan Robert, Manon Lorang - UMR 1434 SILVA, INRAE Centre Grand Est Nancy - 54280 Champenoux - Contact : nathalie.breda@inrae.fr - <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fr/>

- Deux volets « indicateurs de sécheresse », précalculés sur l'ensemble de la France métropolitaine pour un grand nombre de combinaisons de peuplements et de types de sols représentatifs des forêts françaises, l'un en climat passé depuis 1959, l'autre sous scénarios de climats futurs (plusieurs combinaisons de modèles climatiques, descentes d'échelles et forçages radiatifs) (mise en ligne prévue bientôt).

Fin 2022, l'outil est à ce jour utilisé par une communauté de plus de 450 utilisateurs avec licence dans 29 pays. Un tiers des utilisateurs mobilisent Biljou© pour des travaux de recherche et deux tiers des utilisateurs pour des usages non recherche en lien avec la santé des forêts (DSF), l'impact de la sylviculture ou le choix de types d'essences (CNPF, ONF), l'analyse du partage de l'eau verte et bleue (EDF, agences de bassin) ou encore pour la formation d'étudiants forestiers.

👉 Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses

Les bilans permettent de connaître les moments où les peuplements régulent leur consommation en eau

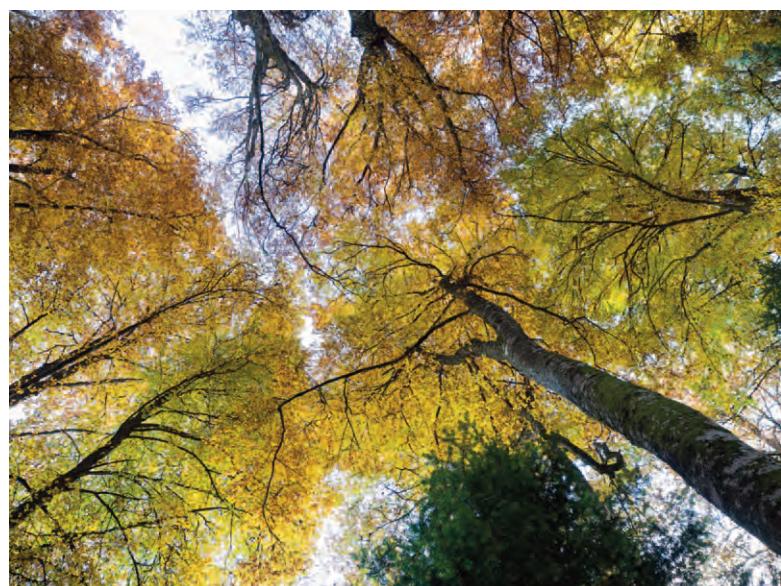
A partir du moment où le peuplement passe en dessous d'un seuil que l'on appelle le déficit hydrique, les processus de régulation se mettent en place = les stomates des feuilles se ferment permettant d'économiser de l'eau, ce qui est positif. Mais cela a aussi des conséquences négatives : le processus de transpiration permet de refroidir le feuillage, s'il s'arrête, cela se traduit par une augmentation de la température et un échauffement au niveau de la surface foliaire ce qui, en cas de canicule, provoque la mortalité et la chute des feuilles. Cela se traduit aussi par le ralentissement de la photosynthèse, puisque cela interrompt l'entrée de CO₂, induit l'arrêt de la croissance radiale et racinaire des arbres, ralentit la fabrication et le stockage des sucres sous forme de réserves. Ces phénomènes ne sont pas simulés dans le modèle, mais l'indicateur de sécheresse fourni nous dit que le peuplement est entré en régulation et que ces différents processus se sont déclenchés.

L'indice foliaire, une caractéristique des couverts capitaire à mesurer

Est-ce que les modèles tiennent compte des caractéristiques des peuplements forestiers ? Les bilans hydriques peuvent-ils être nuancés en fonction des surfaces terrières ? Réponse de Nathalie Bréda : La surface terrière n'est pas un bon prédicteur des surfaces foliaires. Or, l'indice foliaire est une grandeur capitale, car il détermine l'interception de la pluie et tous les flux d'eau sortant qui sont exprimés en fonction de cet indice. Pour connaître les indices foliaires, l'équipe de Nathalie Bréda fait des propositions de valeur d'indice foliaire sur le site et fournit un analyseur de couvert et la formation pour son utilisation. On a pu aussi mesurer l'indice foliaire à partir des collectes des litières, mais ces travaux engagés par l'ONF dans le cadre de Renecofor sont arrêtés.

Fait-on des économies d'eau si on réduit l'indice foliaire ?

Nathalie Bréda poursuit : « Il ne faut pas voir la sylviculture simplement comme « je coupe des arbres » mais aussi comme « je coupe des feuilles » et, si je coupe des feuilles, je réduis l'indice foliaire de manière transitoire. Si on connaît sa valeur, on peut l'intégrer dans le calcul du bilan hydrique et simuler ainsi l'impact de l'éclaircie sur le bilan en eau avant et après éclaircie. Dans les stratégies d'adaptation au changement climatique, on peut donc voir les marges de manœuvre que propose la sylviculture pour atténuer l'intensité des sécheresses, voire les éviter, en réduisant les indices foliaires. »



Si on coupe des arbres, on coupe aussi des feuilles et si on coupe des feuilles, on réduit l'indice foliaire et la transpiration de manière transitoire.

Photo Etienne Beraud © CNPF.

Modélisation du bilan hydrique et microclimat en forêt : influence des strates de végétation

par Bernard PREVOSTO (INRAE Recover)

Bernard PREVOSTO et son équipe¹⁹ ont utilisé le modèle Biljou© pour mettre en évidence le rôle des sous-bois dans le cycle de l'eau.

Ce que l'on sait : le couvert arboré et arbustif exerce un pouvoir tampon sur les extrêmes climatiques (température et humidité de l'air), avec un effet significatif de la strate arbustive dans les peuplements très clairs.

Ce que l'on doit préciser : le rôle complexe de cette strate arbustive dans le fonctionnement hydrique des systèmes forestiers méditerranéens.

Recherche : recommandations de gestion issues de ces travaux.

Le microclimat et le bilan hydrique sont fortement influencés par la structuration en strates du système forestier. Nous avons analysé l'influence de ces strates à l'aide d'un dispositif expérimental sur le pin d'Alep, situé à St-Mitre-les-Remparts (Bouches-du-Rhône), qui comprend trois traitements du couvert arboré (couvert fermé en témoin, couvert moyen après éclaircie de moyenne intensité, couvert léger suite à une éclaircie forte) et deux traitements de la strate arbustive (présence/absence). Des mesures d'humidité des sols ont été effectuées en forêt, ainsi que des mesures de température et d'humidité de l'air sous couvert forestier et en découvert en présence ou non d'une strate arbustive. Nous avons complété notre analyse à l'aide des résultats issus de la littérature.

Nous avons trouvé un effet significatif du couvert arboré et/ou arbustif sur les températures et le VPD (déficit de pression de vapeur) ce qui illustre le pouvoir tampon du couvert par atténuation des extrêmes climatiques. L'effet de la strate arbustive est significatif dans les peuplements clairs et très prononcé en milieu ouvert. L'étude des composantes du bilan hydrique dans la littérature montre que l'interception des pluies par le pin d'Alep est forte : elle peut atteindre 40% pour les couverts fermés. L'interception par les buissons est très variable et nos mesures montrent une moyenne de 38% pour le chêne kermès. De plus, une méta-analyse en zone tempérée montre que la part de l'évapotranspiration du sous-bois par rapport à l'évapotranspiration totale s'accroît exponentiellement avec l'indice de surface foliaire de la strate haute lorsque celui-ci diminue en dessous d'une valeur comprise entre 2 et 3. Finalement, nous proposons le calcul de deux indices de stress hydrique pour différents couverts de pin d'Alep pour deux années climatiquement contrastées (année normale et année sèche). Le nombre de jours de stress hydrique est maximum dans les couverts denses pour les deux années. La strate basse n'influe que faiblement sur la consommation en eau sauf lors de l'année sèche. Le rôle de cette strate arbustive dans le fonctionnement hydrique des systèmes forestiers méditerranéens est donc complexe et reste à mieux préciser.

SurEau : modèle sol-plante-atmosphère de prédition de la consommation d'eau et de la tolérance des essences aux sécheresses extrêmes

par Julien RUFFAULT et Nicolas MARTIN (URFM, INRAE)

Ce que l'on sait : on connaît les processus de circulation de l'eau dans les plantes, et des modèles permettent des prédictions sur les risques de mortalité à différentes échelles.

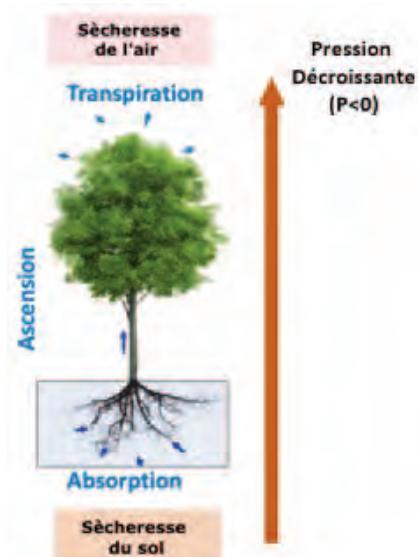
Ce que l'on doit préciser : les modèles ont besoin de données sur les espèces, les sols et le climat qu'il faut collecter et harmoniser pour réaliser des prédictions à large échelle.

Recherche : diverses applications sont à développer pour apporter des aides à la décision des politiques et des gestionnaires.

Julien Ruffault : « Je vais vous présenter le fonctionnement et les applications des modèles hydrauliques des plantes et notamment de SUReau. Ils mesurent les impacts des sécheresses sur la végétation pour comprendre, prévoir et prédire les flux d'eau entre le sol, la forêt et l'atmosphère et également la circulation d'eau dans les plantes ainsi que le stress hydrique des plantes et ses conséquences en termes de risque de mortalité ou d'incendie. »

« Nicolas Martin a fait état de l'amélioration des connaissances sur l'hydraulique des arbres et sur la manière dont ils répondent physiologiquement aux sécheresses et aux canicules. Nous allons nous concentrer sur la partie Modélisation de l'hydraulique des arbres pour voir comment ils peuvent apporter des éléments de réponse aux questions importantes : quelles sont les espèces et les régions les plus vulnérables ? Quel futur pour la gestion des forêts face aux changements climatiques ? »

Rappel de quelques notions élémentaires de l'hydraulique des plantes en trois points. La transpiration est le moteur de la circulation de l'eau dans l'arbre qui s'effectue dans les micro vaisseaux de l'aubier (xylème). Lors de ce processus, la sève est sous tension dans les vaisseaux de l'aubier ($P < 0$ MPa). En période de sécheresse, la tension augmente jusqu'à la rupture de la colonne d'eau provoquant l'arrêt de la montée de l'eau et une mortalité de soif (embolie gazeuse).



Circulation de l'eau dans l'arbre. J. Ruffault

Un modèle qui intègre la physiologie des plantes

SUREau est un modèle mécaniste d'échanges sol-plante-atmosphère basé sur l'hydraulique des plantes. Il est basé sur les modèles de bilan hydrique (type Biljou©). Il intègre les flux d'eau entrants et sortants, et la physiologie des espèces à l'échelle de la plante. Le modèle fait le lien entre la sécheresse du sol et celle de l'air, et met en place tous les processus liés à l'hydraulique des plantes qui vont nous renseigner sur la circulation de l'eau dans les arbres et les processus physiologiques de réponse des espèces par une série d'équations. On arrive ainsi à prédire les dynamiques du stress hydrique. Sur la figure ci-contre, on voit la tension négative dans l'arbre augmenter lors de la saison estivale ce qui peut, selon les espèces, provoquer une embolie gazeuse plus ou moins tôt.

On peut faire fonctionner SUReau à différentes échelles : arbre, placette, région, continent, planète en lui communiquant les données suivantes : climat journalier (précipitations, température, humidité, rayonnement), surface foliaire, réserve utile du sol, caractéristiques physiologiques. Le modèle délivre les résultats suivants par heure/jour : le stock d'eau disponible dans le sol, le stress hydrique, les quantités transpirées.

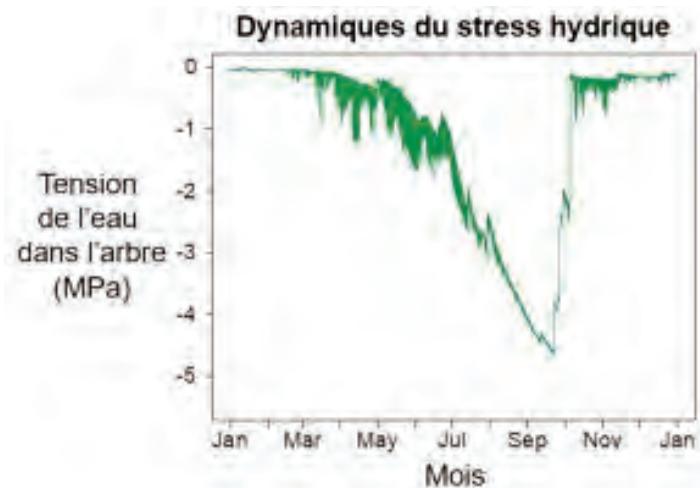
Plus qu'un modèle, SUReau est un environnement de modélisation puisqu'il existe différentes versions et langages informatiques implémentés pour diversifier les applications et les utilisateurs.

Exemples d'applications possibles

Voici quelques exemples d'applications qu'il est possible de faire avec SUReau. Les prédictions de stress hydrique et de risque de mortalité se sont révélées fiables en les comparant avec les mesures prises au cours de trois années consécutives sur un dispositif sur chêne sessile près de Nancy. Par contre, l'utilisation de SUReau suppose d'avoir l'ensemble des données nécessaires pour le paramétrier correctement. On peut généraliser ce type d'approche pour prédire la distribution potentielle des espèces à l'échelle de la France dans les périodes futures en intégrant les effets des changements climatiques. Cela a été fait pour le hêtre et le chêne.

Quels facteurs sont les plus marquants sur la variabilité de la mortalité ?

Grâce à des millions de simulations effectuées en faisant varier la surface foliaire, la réserve utile du sol ou les caractéristiques physiologiques, on parvient à identifier les écosystèmes et individus résistants à la sécheresse. On a pu mesurer l'influence



Mesure de la tension négative dans l'arbre - J. Ruffault.

sur le risque de mortalité en fonction des conditions stationnelles et de la variabilité intraspécifique pour le hêtre, le chêne vert et le chêne sessile. Les résultats montrent des similitudes selon les espèces et met en évidence que 60% de la variabilité sur le risque de mortalité est liée aux conditions stationnelles à savoir la réserve utile et la surface foliaire. Seuls 40% dépendent des caractéristiques physiologiques des espèces.

On peut aussi se demander dans quelle mesure les caractéristiques physiologiques pourraient venir contrecarrer les conséquences des changements climatiques grâce à la variabilité génétique ou à la plasticité phénotypique des espèces (capacité à s'adapter à de nouvelles conditions). Des simulations virtuelles permettent de définir les caractéristiques physiologiques requises pour éviter les risques de mortalité.

Un autre usage du modèle est d'évaluer l'effet du dessèchement sur le risque incendie par la prédiction d'un paramètre clé, la teneur en eau du feuillage, pour en déduire le risque de mortalité. Le modèle permet de comprendre les dynamiques de dessèchement qui se traduisent par la présence de feuilles mortes susceptibles d'accroître les risques de propagation des incendies et donc d'améliorer la prévision de ce risque.

SurEau est un outil en développement déjà utile pour diverses applications. Mais, nous envisageons d'autres utilisations possibles pour la recherche et la gestion opérationnelle face aux changements climatiques.

Équilibre éco-hydrologique des forêts : apport des modèles et de la télédétection pour quantifier l'utilisation de l'eau par les forêts

par Arsène DRUEL et Nicolas MARTIN St PAUL (URFM, INRAE).

Ce que l'on sait : la « réserve utile maximale » des sols (RUM) est très importante car elle détermine les risques de stress hydrique des arbres en forêt, mais elle est mal estimée sur le terrain (profondeur racinaire difficile à détecter). On propose une méthode numérique autocalibrée d'estimation de la RUM s'appuyant sur l'hypothèse d'un équilibre entre réserve utile, climat et indice foliaire des forêts. Cette méthode nécessite l'usage d'un modèle de bilan hydrique et de stress hydrique ainsi que des données satellitaires de climat et d'indice foliaire des forêts.

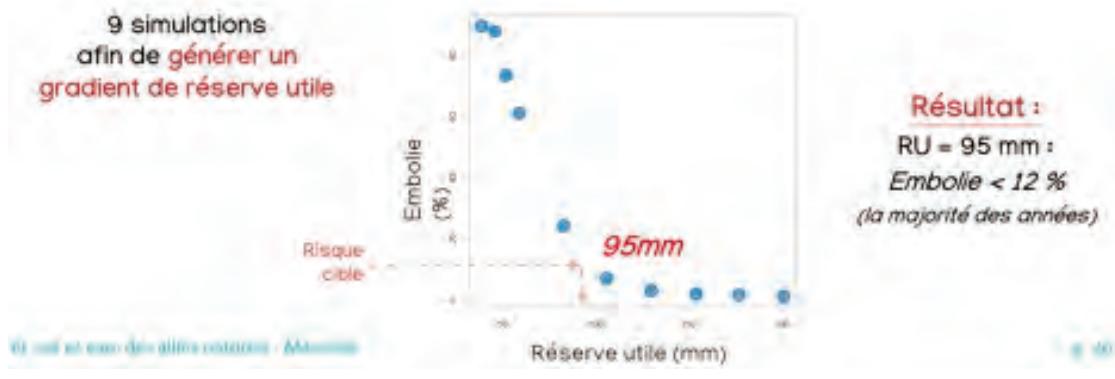
Ce que l'on doit préciser : évaluer la méthode à l'échelle nationale ou européenne grâce à des mesures de terrain de stress hydrique.

Recherche : utiliser cette méthode pour améliorer les estimations de RUM et les prédictions de stress hydrique des arbres.

Les effets de sécheresses de plus en plus intenses sont souvent observés après coup et menacent la survie des forêts. L'évaluation de la vulnérabilité des forêts méditerranéennes au stress hydrique nécessite de connaître la réserve utile (RU) disponible.

Comment mesurer la réserve utile fonctionnelle ?

Il y a un manque de données à large échelle de réserve utile maximale des sols (RUM qui correspond au volume d'eau par mètre carré d'un sol disponible aux forêts). Cette RUM correspond au volume d'eau d'un sol qui peut être mobilisé par une forêt en l'absence de pluies. Les stations ICOS qui effectuent en temps réel les bilans hydriques montrent que les arbres puisent plus d'eau (et donc de l'eau bien plus profondément) que ce que les mesures classiques de pédologie par fosse indiquent. Nous proposons d'estimer spatialement la RUM en nous appuyant sur l'hypothèse d'un équilibre écohydrologique. L'équilibre écohydrologique suppose qu'une forêt a développé une quantité de feuilles en équilibre avec les ressources en eau de façon à maximiser la croissance, mais à minimiser le risque de stress hydrique causé par une trop grande consommation d'eau. La quantité de feuille est mesurable par l'indice foliaire qui correspond à la surface de feuille par mètre carré de sol.



Lecture de la réserve utile fonctionnelle après simulation (A. Druel)

Grace à ce principe général il est possible d'estimer une RUM en utilisant un modèle de bilan hydrique et de stress hydrique (en l'occurrence le modèle SUREAU) que l'on constraint par des données d'indice foliaire et des données climatiques satellitaires qui sont aujourd'hui disponibles à large échelle. En pratique voilà comment fonctionne l'algorithme pour une parcelle forestière :

- On récupère l'indice foliaire (grâce à des mesures de terrain ou des données satellitaires) ainsi que le climat des dernières décennies fournis par des services de météo (p.ex. Météo-France, Copernicus).
- On choisit une valeur arbitraire du RUM (on peut utiliser une valeur moyenne issue de fosses pédologiques).
- On alimente le modèle SUREAU avec ces données et on calcule une première fois le risque d'embolie du xylème pour les 30 années passées.
- On calcule un risque de dépasser le seuil de 50% d'embolie.
- On répète la procédure de nombreuses fois en augmentant puis en diminuant la RUM initiale.
- On construit une courbe entre le risque d'embolie et la RUM (Figure ci-dessus).
- On choisit la valeur de RUM permettant de maintenir le risque en dessous d'un seuil (10%).

Cette méthode a été appliquée au niveau des forêts européennes et doit être validée au niveau européen (en cours). Cela permet d'avoir des cartes de réserve utile (de 200 à 400 mm en France). Sur les sites ICOS, les réserves utiles calculées par la méthode de l'inversion sont bien corrélées aux réserves utiles observées sur les sites.

Application des outils de modélisation pour la gestion hydrologique et forestière en Catalogne

Par Paula MARTÍN GÓMEZ²⁰

Ce que l'on sait : les modèles ont été mis au point pour simuler les effets d'une gestion adaptive des forêts dans le but de récupérer de l'eau bleue afin de soutenir les débits d'étiage des fleuves. Les modèles montrent des effets bénéfiques de la gestion seulement pour des forêts situées dans des zones où les précipitations sont supérieures à 500 mm (moyenne montagne).

Ce que l'on doit préciser : dans les bassins versants où les gains semblent significatifs, réaliser en vraie grandeur les opérations sylvicoles en utilisant les paiements de services environnementaux pour les financer. Améliorer les recherches de données.

Recherche : améliorer les modèles pour intégrer les risques et l'altération des services liés à la gestion (production de bois, biodiversité...).

En Catalogne, au cours des quatre à six dernières décennies, les apports fluviaux ont diminué d'environ 5 à 10 % par décennie selon les bassins. Cette diminution n'est pas seulement le résultat du changement climatique, mais elle est en grande partie due aux changements d'occupation des sols (colonisation forestière des zones agricoles et des pâturages) et de l'évolution de la structure des forêts (densification) au cours de cette période.

La mise en œuvre d'une gestion forestière adaptative axée sur la réduction de la densité des arbres et des arbustes dans les bassins hydrographiques, de manière généralisée, permettrait selon les résultats des modèles, de récupérer la perte d'eau qui atteint les rivières et les aquifères (eau bleue) en réduisant l'évapotranspiration de la végétation (eau verte).

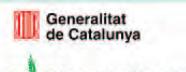
Dans ce cadre et compte tenu du fait que, dans le contexte du changement climatique, ce problème devrait s'aggraver dans les pays méditerranéens, un projet de collaboration a été établi en 2021 entre le Centre des sciences et technologies forestières de Catalogne (CTFC) et l'Agence catalane de l'eau (ACA) dans le but d'analyser territorialement la relation entre la gestion forestière et l'apport d'eau bleue dans les bassins, et les effets de cette gestion sur la dynamique fluviale et les écosystèmes associés, afin d'obtenir les connaissances et les outils nécessaires pour prioriser et promouvoir des actions de gestion forestière qui augmentent la disponibilité de l'eau pour la consommation et pour l'amélioration des écosystèmes aquatiques.

Une approche méthodologique du projet a été définie en s'appuyant sur une modélisation éco-hydrologique avec le modèle Medfate (De Cáceres *et al*, en cours de révision²¹) qui est paramétré et évalué pour les espèces de la région méditerranéenne, en particulier pour les espèces incluses dans l'Inventaire Forestier National Espagnol (IFN) et pour la région de Catalogne.

On a donc simulé les effets des traitements sylvicoles en fonction des conditions climatiques actuelles et futures (température, précipitations annuelles...), des structures forestières avec différentes essences, des types de sol et des enjeux avec les autres services écosystémiques.

Des premiers résultats ont été obtenus pour cinq bassins fluviaux représentatifs de la Catalogne situés dans le cours supérieur du fleuve, essentiellement forestiers, présentant un gradient bioclimatique et pour lesquels il existait des données historiques des stations de mesure des débits. Sur trois d'entre eux, il est possible de récupérer de l'eau bleue de façon significative en adoptant les directives officielles de gestion forestière en Catalogne (ORGEST) pour chaque espèce dominante. Les pourcentages vont de 19% à 63% selon deux hypothèses sur l'évolution du climat. Sur les deux autres, qui sont situés dans des zones plus sèches, les effets sont insignifiants.

HIDROBOSC: Projet de collaboration avec l'ACA

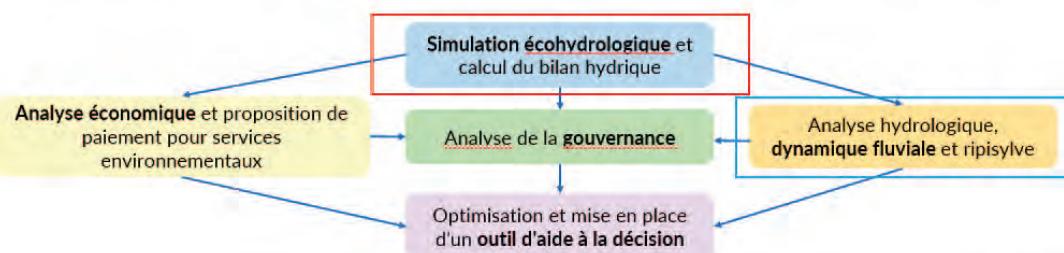


Centre de la Propietat Forestal

Objectif: Développement d'un outil de planification pour la **gestion des eaux et des forêts** dans les bassins hydrographiques de Catalogne



- Évaluer l'impact des différents modèles de gestion forestière sur les ressources en eau dans un scénario global de changement climatique
- Proposer des mesures de gestion concrètes dans différents bassins versants de Catalogne.



Objectif du projet Hydrobosc en Catalogne financé par l'Agence Catalane de l'Eau .

21 - De Cáceres *et al* (under review) MEDFATE 2.8.1: A trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. Geo Mod Dev

Modélisation de l'hydrologie et des usages du bassin versant de la Durance sous changement climatique

par Johan GARRIGOU (SMAVD)²²

Ce que l'on sait : compréhension des interactions entre les compartiments du système hydraulique.

Ce que l'on doit préciser : projeter les conséquences du changement climatique, mesurer les impacts de l'évolution des usages.

Recherche : associer ce modèle aux modèles de bilan hydrique des chercheurs forestiers qui intègrent « l'eau verte ».

Le bassin versant de la Durance constitue le « château d'eau de la Provence » compte tenu de son rôle prépondérant dans l'alimentation en eau de l'ensemble des usages de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. A la fois, l'eau potable, l'irrigation, l'industrie et les milieux naturels dépendent de l'eau de la Durance, qu'ils soient situés dans son bassin ou sur les vastes territoires desservis.

Dans un contexte de changement climatique qui va particulièrement toucher les régions alpines et méditerranéennes, le Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) a développé le modèle « C3PO » qui intègre l'hydrologie, la nappe alluviale, et l'ensemble des usages de l'eau sur le bassin de la Durance. Cet outil a d'abord vocation à mieux comprendre les interactions complexes entre les compartiments du système hydraulique. Il a ensuite pour objectif de pouvoir projeter les conséquences du changement climatique sur le bassin. Enfin, il pourra objectiver l'impact de changement de pratiques et d'évolution des usages sur la ressource, afin d'être un soutien dans l'aide à la décision par le biais de l'élaboration de scénarios. Cet outil est aujourd'hui à la disposition de la Commission Locale de l'Eau (CLE) du bassin de la Durance, mais aussi des acteurs territoriaux qui se sont regroupés dans la démarche de construction de ce modèle.

Compléments d'information lors de la séance des questions/réponses

Louis-Michel Duhen : peut-on espérer qu'en France il y ait un programme Hydrobois ou Hydroforêt à l'image de la Catalogne ?
Johan Garrigou répond positivement car c'est un développement à faire puisque cela rejoint les domaines sur lesquels ils ont commencé à agir avec des modèles plus axés sur le monde agricole et l'eau potable qui concentrent aujourd'hui les interrogations. Mais, quand on voit l'impact de la gestion forestière, ce serait bien d'intégrer aussi l'aspect forestier.

Christophe Chauvin (FNE) à Paula Martin. Une solution pour limiter la consommation d'eau des forêts serait de diminuer la surface terrière et donc la surface foliaire. Comment cela se passe-t-il pour le sous-étage ? Réponse de Paula Martin. Dans la simulation, on laisse théoriquement 30% du sous-bois. Cela a un coût financier important qui sera pris en compte dans l'analyse économique globale. L'Agence catalane de l'eau veut en effet avoir toutes les informations économiques sur le coût d'une gestion forestière économe en eau pour pouvoir les comparer avec d'autres solutions comme par exemple le dessalement de l'eau de mer.

Christophe Chauvin (FNE) à Johan Garrigou : dans la Durance on peut stocker l'eau en souterrain par une irrigation généreuse. Est-ce une bonne stratégie ? Réponse de Johann Garrigou - On ne peut pas vraiment stocker de l'eau car si on alimente la nappe, elle se remplit très vite mais si on arrête l'irrigation elle se vidange très vite et n'a donc pas de fonction de stockage. Ce n'est donc pas une piste.

Jeannine Bourrely : Dans le programme Innov'lex, il a été montré l'importance d'éclaircir les peuplements de chêne vert pour réduire la concurrence de consommation en eau. On ne doit pas « ne rien faire ». (Nota : voir l'intervention de Jean-Marc Limousin dans l'après-midi).

Des réflexions sur trop ou pas assez de forêts

Gilles Pipien, ancien directeur de la DREAL, administrateur de la Société du Canal de Provence, expert auprès de l'Association des élus de bassin (ANE). Nous n'avons plus d'eau sécurisée. On est face à un défi lorsque l'on entend les interventions de M. Chassagne et Paula Martin nous disant que la forêt consomme, au travers de l'eau verte, 70% des précipitations ne laissant à l'homme que 30% en eau bleue. Certains pourraient se dire : ne serait-il pas plus simple de raser la forêt, on aurait plus d'eau bleue ? N'aurait-on pas oublié de dire où va cette eau verte ? N'a-t-on pas oublié que l'arbre est une merveilleuse pompe et que, plutôt que de la supprimer, il serait préférable de mieux comprendre où va cette eau verte et l'importance du couvert intermédiaire. J'ai très peur, lorsque j'entends des préconisations pour une gestion forestière pour une maximisation de l'eau bleue qu'à force de se focaliser sur l'eau bleue, on en oublie l'eau.

Réponse de Paula Martin (CTFC). Selon les résultats de l'étude, ce n'est pas la destruction de la forêt qui est préconisée mais une éclaircie compatible avec les directives forestières. En la pratiquant, nous répondons aussi aux enjeux de prévention contre les incendies. Cela implique donc d'autres gestionnaires et ouvre d'autres perspectives.

Jean Bonnier « On touche ici à l'intérêt du cycle initié par Forêt Méditerranéenne. Il semble y avoir une contradiction dans l'aménagement du territoire. S'il n'y avait pas eu les plantations de forêt sur les bassins versants des Alpes du Sud, le barrage de Serre Ponçon n'aurait plus d'eau à cause des phénomènes d'érosion et de transport solide. Maintenant, on nous dit qu'il y a trop de forêt qui nous « bouffe » toute l'eau. Sans forêt cela ne marche pas, avec trop de forêt cela ne marche pas plus. Peut-être y-a-t-il la place pour une activité forestière. Qui sait ? ». A la suite des présentations très pointues qui donnent le vertige, je voudrais savoir ce que devient l'eau verte qui s'évapore pour répondre à ceux qui déplorent l'utilisation de grandes quantités d'eau par la forêt. Il faut leur rappeler que la forêt rend par ailleurs tellement d'autres services.

Réponse de Nicolas Martin. Il faut revenir à la première présentation de Claude Doussan qui a bien montré que l'eau verte évaporée revient sur les continents sous forme de pluies. Mais il faut raisonner sur de grandes échelles. L'eau est prélevée localement et restituée ensuite globalement. Quant à l'eau consommée par la photosynthèse, elle ne représente que 0,25 % en nombre de molécules, soit 5 à 10% en masse.

2.6. Tester des gestions adaptatives

Gestion des forêts de pin d'Alep face à l'augmentation des sécheresses

Par Maxime CAILLERET (INRAE Aix-en-Provence)²³

Ce que l'on sait : il est possible de gérer les forêts de pin d'Alep pour les adapter à l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée de sécheresse selon quatre stratégies : éclaircie, diversification d'essence, plantation de provenances plus résistantes ou introduction d'autres espèces.

Ce que l'on doit préciser : adapter la stratégie au contexte local : enjeux, faisabilité technique et économique, contraintes environnementales, et préciser le niveau d'éclaircie compatible avec les autres enjeux.

Recherche : poursuivre le travail pour affiner les solutions selon les différents contextes.

Le pin d'Alep est une espèce clé du bassin méditerranéen présente sur 3,5 millions d'hectares. Il fournit des services écosystémiques essentiels pour les populations humaines, qu'il s'agisse de services d'approvisionnement, de support, de régulation ou culturels.

Bien que considérée comme très tolérante à la sécheresse, cette espèce montre de plus en plus de signes de déprérissement. On observe par exemple une augmentation du déficit foliaire moyen des arbres de 25% à 45% entre 1995 et 2022. Elle est également sujette aux attaques d'un chancre (*Crumenulopsis soraria*).

À partir des résultats issus de la littérature et des suivis réalisés sur les sites expérimentaux de Saint-Mitre-les-Remparts, de Font-Blanche, et de Ceyreste, tous localisés dans les Bouches-du-Rhône, nous étudions l'impact des quatre principales stratégies de gestion sylvicole pour l'adaptation des forêts de pin d'Alep face à l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des sécheresses.

La stratégie (1) « Eclaircir les peuplements pour limiter la compétition pour la lumière et pour l'eau » et donc réduire l'intensité de la sécheresse subie par les arbres conservés. Cela a fait l'objet de mesures suivies sur 12 placettes avec différentes intensités d'éclaircie. Pour chaque placette nous avons calculé la durée de la sécheresse subie par les arbres avec un modèle de bilan hydrique type Biljou©, le nombre de jours pour lesquels la réserve utile en eau est inférieure à 40% à son maximum et pour chaque arbre, nous avons approché la compétition subie en prenant en compte le diamètre de cet arbre, le diamètre des voisins, et leur distance. Trois niveaux d'éclaircie (forte, moyenne, faible) ont été comparés à une zone témoin. Grâce à la mesure de la largeur des cernes, nous avons constaté que la croissance était fortement réduite par la sécheresse et par la compétition entre les arbres ce qui souligne l'importance de l'éclaircie. La réponse au stress hydrique est similaire, quel que soit le niveau de compétition (pas d'interaction). Des expérimentations similaires menées en Espagne montrent les mêmes résultats mais précisent que l'impact de la compétition sur la réponse du pin d'Alep à la sécheresse dépend du site d'étude.

La stratégie (2) : « diversifier les peuplements existants par régénération naturelle ou plantation » fait l'objet de la présentation de Joannes Guillemot (voir ci-après).

La stratégie (3) consiste à planter des provenances de pin d'Alep issues de climats plus arides, et donc potentiellement plus adaptées à la sécheresse. Sur le site expérimental de Ceyreste où 13 provenances issues de différents pays du bassin méditerranéen ont été plantées en 1976, une seule provenance a de meilleures performances en 2022 en termes de survie et de croissance que la provenance locale (Gémenos). La stratégie (4) est d'introduire de nouvelles espèces, telles le pin brutia. A Ceyreste sur sol décarbonaté, sa performance générale est meilleure sur le plan de la survie, de la croissance moyenne et de la rectitude du tronc. Cependant, sur la plantation expérimentale de Vitrolles (plantée en 1978 mais brûlée en 2004 ; sol calcaire avec un climat plus sec), le pin d'Alep a une meilleure croissance que le pin brutia.

Nota : une autre option est suivie à titre expérimental, l'irrigation. Elle est efficace mais guère réaliste !

Les éclaircies, la diversification, et le remplacement par des populations ou espèces plus tolérantes à la sécheresse (migration assistée) sont de bonnes options, mais le résultat dépend :

- De l'indicateur d'intérêt : que veut-on privilégier : la croissance ou la résistance à la sécheresse ?
- De la fréquence et de l'intensité d'éclaircie : si elle est trop forte, on va optimiser la croissance individuelle mais pas nécessairement la croissance du peuplement, et des effets négatifs sont prévisibles sur le microclimat, le sol, la régénération des arbres et le développement de strate arbustive...
- Des espèces d'arbre d'association ou de remplacement.
- De la fertilité du site et des autres agents biotiques/climatiques présents (pathogènes, gel...).

Le choix de la stratégie de gestion doit s'effectuer selon le contexte local pour prendre en compte les contraintes environnementales et les enjeux.



Eclaircie dans une pinède de Pin d'Alep avant et après à Rognac (13).
Photos L.M. Duhen.

Eclaircie du peuplement, consommation d'eau et stress hydrique : 30 ans de suivi et d'expérimentation sur le chêne vert à Puéchabon

Par Jean-Marc LIMOUSIN (CEFE CNRS)²⁴

Ce que l'on sait : l'éclaircie dans le chêne vert diminue la consommation d'eau par les arbres ce qui a pour conséquence de retarder l'apparition du stress hydrique estival. La précocité de celui-ci est le facteur essentiel de réduction de la croissance plus que son intensité.

Ce que l'on doit préciser : calcul de la densité idéale à conserver pour retarder le plus possible l'apparition du stress hydrique qui déclenche l'arrêt de croissance à l'aide d'un modèle de bilan hydrique.

Recherche : étendre ces expérimentations à d'autres essences.

Face à l'augmentation de l'aridité et du déficit hydrique estival dans les régions tempérées, la réduction de la densité des peuplements forestiers est une piste pour diminuer les besoins en eau des forêts. Des expériences d'éclaircie dans un taillis méditerranéen de chêne vert ont été réalisées depuis 1985 sur le site expérimental forestier de Puéchabon (Hérault). Nous présentons ici les principaux résultats de ces expériences concernant la consommation d'eau des arbres, le stress hydrique estival et la croissance du peuplement.

Dans le taillis de chêne vert, une éclaircie par le bas réduisant de 30% la surface terrière a eu pour conséquence de réduire de 25% la surface foliaire des arbres et de 27% la transpiration du couvert forestier. Cette diminution de la consommation d'eau par les arbres a pour conséquence de retarder l'apparition du stress hydrique estival dans les parcelles éclaircies. La croissance du chêne vert s'effectue principalement au printemps (70%) et un peu à l'automne (30%) puisqu'en hiver il existe une contrainte thermique et en été une contrainte hydrique. La croissance est donc fortement dépendante de la précocité de la sécheresse : plus la sécheresse apparaît tôt et moins les arbres ont la possibilité de croître avant les forts stress hydriques de l'été. En réduisant la surface foliaire et la compétition pour l'eau entre les arbres, l'éclaircie a donc un effet bénéfique sur la croissance qui est cohérent avec son effet sur le bilan hydrique du taillis.

Nous avons montré que l'effet de l'éclaircie sur la croissance pouvait se modéliser simplement avec un modèle de bilan hydrique pour définir un taux idéal d'éclaircie. En simulant artificiellement une sécheresse (réduction de la pluie de 27%), on obtient après éclaircie une meilleure croissance, une meilleure résistance à des épisodes de sécheresse forte et une plus faible mortalité. C'est comme si l'éclaircie « gommait » la suppression de la pluie. L'étude sur de longues périodes montre que l'éclaircie du taillis a aussi un effet bénéfique sur la résistance à des épisodes de sécheresse intense. Enfin, un détail qui intéresse les Corses ; l'éclaircie est bénéfique à la production de glands, ce qui garantit l'alimentation de finissage des porcs pour la fabrication de charcuterie labellisée.

En outre, l'éclaircie du taillis améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau exprimée par le ratio biomasse produite par quantité d'eau consommée. La moindre transpiration se traduit aussi par une moindre consommation d'eau.



Eclaircie dans un taillis de chêne vert .

Photo Bernard Petit © CNPF.

24 - Jean-Marc Limousin, Jean-Marc Ourcival, Jean Kempf, Alain Rocheteau, Karim Piquemal, Jordane Gavinet, Antoine Cabon, Morine Lempereur, Florent Mouillot, Isabelle Chuine, Xavier Morin, Richard Joffre, Serge Rambal - Equipe FORECAST, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, CNRS Montpellier

Mélange d'espèces d'arbre : quels effets sur la tolérance à la sécheresse des plantations forestières ?

Par Joannes GUILLEMOT (CIRAD – Eco et sol) en collaboration avec Damien Bonal, Xavier Morin, Nicolas Martin-St Paul

Ce que l'on sait : les plantations mélangées sont souvent préférables car plus multifonctionnelles.

Ce que l'on doit préciser : les plantations mélangées pourraient consommer plus d'eau car elles sont en général plus productives ! Mais cette consommation peut se répartir différemment dans le temps et l'espace. Il faut mélanger des espèces qui ont des stratégies d'utilisation de l'eau différentes, se traduisant par l'accès à davantage de ressource en eau ou par une meilleure distribution d'eau dans le temps.

Recherche : faire de nombreux essais de mélanges dans divers milieux sur le temps long.

La présentation se propose de donner un aperçu des connaissances des effets du mélange d'espèces sur la résistance à la sécheresse des plantations.

Rappel sur la place des plantations : au niveau mondial, les plantations représentent 7% des surfaces forestières mais 50% des récoltes de bois. En France, 13% de la forêt est constituée de plantations. Actuellement, il existe des programmes internationaux très importants de restauration forestière par la plantation. De tels objectifs posent des questions scientifiques et sociétales : où va-t-on planter ? Que va-t-on planter ?

Rappels sur les leviers pour atténuer le changement climatique : (1) restaurer les forêts ne se résume pas à simplement planter des arbres (c'est complexe et onéreux) mais implique surtout de conserver celles qui existent ; (2) réduire les émissions carbonées plutôt que compter sur d'hypothétiques puits de carbone.

Néanmoins, il existe des situations où l'on doit boiser. Alors, comment fait-on ? En France et dans le monde, on plante majoritairement du résineux en monoculture (en France 84%). Les mélanges concernent souvent deux essences résineuses.

On dispose maintenant d'un éventail d'expérimentations qui montrent une réponse différente des peuplements mélangés à toute une série de perturbations plus prévalentes sous changement climatique. Le tableau ci-après le montre : la taille du rond montre l'effet et les étoiles indiquent la force de la preuve (consensus scientifique).

Les plantations mélangées sont en général plus multifonctionnelles que les monocultures car elles fournissent une gamme plus importante de services et sont plus polyvalentes, sans forcément égaler les monocultures pour l'ensemble de ces services. Par exemple, le mélange permet d'améliorer la résistance des plantations aux attaques des pathogènes ou insectes.

Mais qu'est-ce qu'il en est de la résistance à la sécheresse ?

Dans une expérience de mélange de bouleau et de pin maritime (Martin-Blangy *et al.*, 2023), on constate (1) une meilleure complémentarité spatiale des couronnes et donc une proportion plus importante de feuilles recevant de la lumière (directe



Comparaison des impacts face aux principaux enjeux des forêts monospécifiques et des forêts mélangées - Joannes Guillemot CIRAD

ou diffuse) ; (2) plus de surface de feuille (indice foliaire plus élevé). La conséquence est une photosynthèse plus importante qui se traduit par plus de croissance : c'est le bonus de productivité en plantation mélangée.

Le revers de la médaille c'est qu'il y a plus de surfaces transpirantes donc les plantations mélangées consomment plus d'eau, ce qui peut accélérer l'apparition de sécheresses du peuplement.

Mais est-ce un problème ?

En effet, on constate que plus de transpiration / consommation d'eau en plantations mélangées ne conduit pas forcément à un stress hydrique plus élevé des arbres. Pourquoi ? Si les espèces introduites ont des stratégies d'utilisation de l'eau différentes, elles peuvent avoir accès à davantage de ressource en eau ou à une ressource en eau mieux distribuée. Globalement, la gestion de l'eau au niveau du peuplement peut ainsi être améliorée.

Un premier exemple d'une possible complémentarité des stratégies dans l'usage de l'eau consiste à associer deux espèces qui prospectent des horizons du sol différents et donc exploitent un plus grand volume de réservoir d'eau dans le sol. Dans ce cas, il y a moins de risque de stress hydrique local et donc une meilleure tolérance à la sécheresse.

Un deuxième exemple d'une possible complémentarité des stratégies dans l'usage de l'eau consiste à associer deux espèces régulant de manière différente leur transpiration lors d'une sécheresse (l'une tôt, l'autre tard). L'essence qui régule tôt laisse de l'eau disponible du sol à celle qui régule tard, ce qui diffère l'apparition du déficit.

Dans les Cévennes, une propriétaire de forêt qui travaille à retenir l'eau

Jeannine BOURRELY est une propriétaire de forêt dans les Cévennes très inspirée, « L'eau est mon dada » dit-elle, et très investie dans les organisations de la forêt privée²⁵.

Ce que l'on sait : un propriétaire seul, mais motivé, formé, appuyé techniquement et avec des aides adaptées peut avoir un impact sur la gestion de l'eau par des pratiques de bon sens et des petits équipements appropriés.

Ce que l'on doit préciser : dans les secteurs où la propriété est morcelée, inciter les propriétaires à des échanges fonciers, à se former pour gérer eux-mêmes leurs parcelles, ou rejoindre des regroupement pour pratiquer une gestion en commun par exemple à l'échelle d'un sous-bassin versant, ou le long d'un cours d'eau.

Recherche : comment motiver et instruire les propriétaires ; rétablir les travaux « à propre compte ».

« J'ai toujours eu le souci de l'eau »

« Je suis devenue « ouvrier forestier », de manière accidentelle puisque j'ai hérité d'une forêt en friche, en friche agricole sur d'anciennes châtaigneraies et en friche industrielle colonisée par le pin maritime. Par contre, cette forêt offrait de multiples possibilités par sa diversité : altitude variant de 200 à 600 mètres avec toutes les expositions. Avec la complicité des chercheurs, nous avons pu mettre en place diverses expériences pendant 40 ans. J'ai toujours eu le souci de l'eau car cette propriété qui s'appelle Banières, ce qui veut dire bain, a une bonne alimentation en eau. Celle-ci après avoir décliné pendant la phase d'abandon est désormais revenue. On a beaucoup coupé puis reboisé en changeant les essences, mais toujours en respectant les horizons du sol. Pour cela, nous avons utilisé la pelle-araignée qui a pu fractionner la roche là où elle était proche de la surface. Grâce à ce travail très fin, les plants ont pu profiter de l'eau hivernale pour descendre leurs racines le plus vite possible et mieux s'installer. On a ainsi mis en place divers essais. Par exemple en privilégiant les plantations de feuillus en haut de versant et des résineux à petites aiguilles (cèdre et douglas) en bas de versant. En effet, lors des fortes pluies, l'eau de ruissellement qui se concentre en bas de pente est mieux interceptée par ce tapis de petites aiguilles et s'infiltra mieux dans le sol. Ce n'est pas le cas lorsque le sol est couvert de feuilles des essences à feuilles caduques qui ne se décomposent pas très rapidement.

Des restanques supplémentaires, en bois !

Nous constituons de nouvelles restanques mais en utilisant les tiges, branches et souches de châtaigniers morts en les disposant le long des courbes de niveau. C'est beaucoup moins onéreux que de les faire en pierre et tout aussi efficace. Cela permet d'utiliser sur place le bois qui n'a aucun débouché. Cela retient la terre et l'eau offrant des lieux de riche biodiversité puisque de nombreuses espèces végétales et animales s'y développent.

Démarches à promouvoir pour les propriétaires forestiers

Tout cela a été rendu possible par une mesure très intéressante qui a disparu ; elle permettait aux propriétaires qui avaient de faibles moyens financiers de justifier la part d'autofinancement des subventions versées par la réalisation de travaux qu'ils effectuaient eux-mêmes « à propre compte ». C'était très intéressant, surtout pour ceux qui disposaient du matériel et de plages de temps disponibles à certains moments de l'année. En réalisant eux-mêmes les travaux, la motivation pour les entretenir était très forte.

Sachant que très souvent les particuliers héritent de leur forêt, il faudrait, que, dès qu'ils la reçoivent, il leur soit proposé soit de la formation s'ils veulent s'en occuper eux-mêmes, soit des possibilités de contacts avec des voisins pour la leur vendre ou pour envisager une gestion en commun des parcelles contigües. Cela peut être intéressant pour gérer un bassin versant en commun.

Bilans des actions conduites par l'Office national des forêts

Charles Dereix lit un extrait du projet de Schéma régional de gestion sylvicole du CNPF d'Occitanie « La forêt assure une qualité remarquable des eaux d'autant plus qu'elle bénéficie d'une gestion appropriée ». Quelle peut être cette gestion appropriée ? C'est un chantier à engager ou à poursuivre comme le montrent diverses initiatives de l'ONF sur le sujet.

Pas d'eau sans forêt, pas de forêt sans eau

Jean Ladier²⁶ relève que tous les exposés montrent que les relations entre l'eau et les forêts marchent dans les deux sens. D'un côté, les services écosystémiques fournis par la forêt et la place qu'elle prend dans le cycle de l'eau et, de l'autre, sans eau pas de forêt. Le service le plus crucial parmi les services rendus par la forêt est celui de protection des captages. Cela représente des contraintes de gestion mais réduites car, la plupart du temps, s'exerçant sur de faible surface.

Des actions sur les milieux aquatiques riches en biodiversité en forêt

L'ONF intervient aussi sur la « trame turquoise », notion développée par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, interface entre la trame verte et la trame bleue. Cela concerne les ripisylves, les mares temporaires ou permanentes (exemple : dans la plaine des Maures), les tourbières. Les réseaux naturalistes de l'ONF interviennent de manière ciblée et en liaison avec l'Agence de l'eau pour conduire des inventaires car on n'en connaît pas toujours bien le fonctionnement. On prévoit des actions de suivi ou de réhabilitation. Souvent cela consiste à recréer des connectivités là où des espèces rares sont menacées.

Répondre aux impacts de la sécheresse sur les forêts

Un autre axe de travail est de répondre aux sécheresses subies par nos forêts. Deux pistes : adapter les peuplements en place par la sylviculture et les renouveler avec des essences mieux adaptées. La transposition des enseignements des sites expérimentaux à la gestion courante n'est pas évidente à cause de l'hétérogénéité des situations. Nous avons procédé à des éclaircies pour réduire la densité de manière à ce que l'eau disponible soit partagée par un nombre d'arbres plus réduit et pour que le peuplement soit plus résilient au stress hydrique. Sur un site, nous l'avons effectué sur du sapin et sur du cèdre. Les résultats sont mitigés mais utiles. Sur une éclaircie forte (diminution de moitié du capital sur pied), les arbres conservés poussent deux fois plus vite que dans le témoin. On a gagné en capital de croissance mais on a perdu en capital de production. On craignait que l'ouverture du peuplement ne favorise le développement du sous-bois annihilant ainsi les économies d'eau. Cela n'a pas du tout été le cas comme on a pu le constater par des mesures d'analyse foliaire en lien avec l'INRAE. Lorsque l'on a fait tourner les modèles éco-physiologiques comme SUReau, avec l'aide de Nicolas Martin, on a pu constater que les arbres conservés avaient de meilleures résilience et résistance au stress hydrique. Par contre, on a relevé un déficit foliaire persistant sur les branches basses des arbres conservés. La conclusion est qu'on a effectué une éclaircie trop forte et, en ouvrant trop le couvert,

on a déstabilisé l'écosystème forestier dans son fonctionnement et perdu l'effet tampon du rapport température/humidité (ambiance forestière). Dans les peuplements à fort capital sur pied, on a intérêt à suivre les préconisations des chercheurs (éclaircie autour de 30%).

Une ingénieure, à la fois hydrologue et forestière

Caroline TRAMIER, ingénierie au Canal de Provence

Ce que l'on sait : importance du sous-bois forestier surtout sur socle géologique imperméable.

Ce que l'on doit préciser : variation du rôle des forêts sur les débits d'étiage des cours d'eau en fonction des divers contextes et au cours du temps.

Recherche : trouver les bons taux d'éclaircie en fonction des contextes.

Caroline Tramier a été doublement intéressée par les présentations des chercheurs car elle est ingénieur forestier et a rédigé une thèse en hydrologie en Nouvelle-Calédonie.

Elle s'est dite frappée par la controverse sur « l'évapotranspiration ». Il a été dit que la forêt évapotranspire beaucoup et c'est une réalité. Mais, cela dépend beaucoup des contextes climatiques, de pluviométrie, de typologie de sol et de socle géologique. Il aurait été intéressant de réfléchir à la distribution des débits au cours du temps et à l'influence de la forêt sur les régimes d'étiage qui peut être soit positive soit négative selon ces contextes.

Être conscient du rôle du sous-bois

Il faut aussi parler un peu plus du sous-bois. Sur socle géologique imperméable (par exemple le massif des Maures), le couvert forestier joue un rôle important sur la perméabilité des sols à laquelle contribue la présence du sous-bois. Celui-ci apporte des racines fines qui sont renouvelées très souvent ce qui amène une certaine porosité dans le sol et lui permet de jouer un rôle tampon. Le sol superficiel devient alors plus perméable ce qui génère des écoulements de petite surface. Ce ralentissement de l'eau limite les inondations. Il faut donc trouver la « balance » entre le peuplement forestier qui permet de maintenir un sol perméable et qui rend tous les services écosystémiques évoqués et le souci de l'évapotranspiration qu'il génère en pompant de forte quantité d'eau.

Des conseils pour les forestiers

Je pense qu'il faut aussi creuser la notion d'éclaircie. Quels sont les taux d'éclaircie adaptés ? Je suis intéressée car je travaille actuellement sur la prévention contre les incendies, et les éclaircies peuvent y contribuer. Mais il faut trouver le bon ratio car lorsque l'éclaircie est trop forte, on a des dégradations sur le sol puis de l'érosion. Je profite de l'occasion pour dire qu'il est important de sensibiliser les chauffeurs des broyeurs pour qu'ils adaptent leurs pratiques afin de ne pas dégrader le sol lors des travaux de débroussaillement. Par exemple, en cas de forte pente, laisser des résidus de broyage plus gros qui s'érodent moins facilement et protègent le sol, et éviter de « labourer le sol » lors des manœuvres avec les gros engins.



Lors des travaux de débroussaillement, il faut veiller à la protection des sols .

Photo Joel Perrin © CNPF.

2.7. Avoir des réflexions à l'échelle des bassins versants en prenant en compte la forêt

A la fin du colloque, une table ronde a donné aux élus l'occasion de dire s'ils se sont retrouvés dans tout ce qui a été présenté, de préciser leurs objectifs et préoccupations, et d'exprimer les points sur lesquels ils souhaiteraient avoir plus de données et d'informations.

Intérêt de croiser les regards pour le maire d'Aiglun (Alpes Maritimes)

M. Antony Salomone, maire d'Aiglun (06) et référent du patrimoine historique et culturel du PNR Préalpes d'Azur, a suivi le colloque pendant les deux jours. Il a été impressionné par le travail très poussé présenté par des personnes très au fait de ce qu'ils font. « Il a été possible de croiser les regards et de se rencontrer car tout n'est ni blanc ni noir. Les communications très pointues des chercheurs m'ont fait travailler, moi qui suis plutôt littéraire, mais elles étaient claires et répondaient à mes préoccupations. La commune d'Aiglun est concernée par plusieurs enjeux environnementaux. Pour son maire, il est important de recueillir des informations des uns et des autres. »

Impact très fort du changement climatique avec la disparition d'une cascade emblématique

« Le changement climatique a un impact très fort sur notre territoire avec des légers déperissements, des attaques parasites, qui affectent la forêt et ses facultés à capter l'eau, à la retenir en maintenant une certaine humidité et certains habitats remarquables. Nos agriculteurs qui ont de micro-exploitations ont envie de travailler avec la forêt et ont besoin de l'arbre pour protéger leurs troupeaux et les cultures des rayons du soleil et souhaite recourir à l'agroforesterie. La cascade de Vegay, emblème de la commune et classée depuis 1933 par la volonté de ses habitants, n'a plus d'eau depuis deux ans. Un captage en amont dévie une partie des eaux et il n'y a pas de débit réservé. On se trouve devant une cascade qui est un site classé et qui est en train de déperir alors qu'elle possède une biodiversité exceptionnellement riche avec des invertébrés uniques en France. C'est un crève-cœur. On voit là la place qu'on laisse au vivant. Il y a certes des enjeux importants avec les 11 millions de touristes qui se massent sur la côte, mais il nous semble qu'il faut revoir le partage de l'eau pour qu'il soit plus équitable et raisonnable. Néanmoins, par l'intervention du préfet et le soutien d'hydrogéologues, un débit sera réservé l'an prochain ».

Introduction de l'enjeu « eau » dans le plan d'aménagement de la forêt d'Aiglun

« Nous avons aussi une forêt de 200 hectares qui vient d'être aménagée avec l'aide de l'ONF. Difficilement exploitable, on a privilégié les enjeux « qualité de l'eau » et « captation » ainsi que celui de biodiversité. Les seules interventions forestières prévues concernent les périmètres de captage en cas de déperissement des peuplements pour restaurer la qualité de la forêt. Alors que, selon le BRGM, les trois sources pouvaient délivrer un débit de 850 litres/seconde, on constate qu'actuellement il est de 90 l/seconde et totalement prélevé. Nous sommes donc intéressés par ces modèles de bilan hydrique pour envisager des pistes dans le cadre d'actions soutenues par l'Agence de l'eau sur le rôle de la forêt et du captage ».

Le Parc naturel régional, le bon niveau pour coordonner la gestion de l'eau et de la forêt

Charles Dereix lui pose alors la question : « Le Parc naturel régional des Préalpes d'Azur qui regroupe 47 communes est-il le bon niveau pour aborder les questions de l'eau et de la forêt ? ». Antony Salomone lui répond : « C'est un regroupement intéressant pour coconstruire un territoire autour des trames bleues, vertes et noires (vision nocturne). On regroupe les partenaires autour des enjeux des bassins versants sur différentes thématiques, par exemple une charte forestière. Les habitants ont été sollicités par le Conseil de développement et éclairés par le Conseil scientifique où siège l'éminent Michel Vennetier qui prône l'éclaircie. Le rôle du Parc n'est pas de mettre sous cloche un territoire mais de faire en sorte que les activités humaines, agricoles ou sylvicoles, puissent se poursuivre de manière raisonnable. On travaille sur la filière bois en lien avec l'habitat et la filière agricole au sujet des canaux d'irrigation. Ces initiatives montrent que le Parc est un bon niveau pour coordonner la gestion de la forêt et de l'eau ».

Situation très difficile dans les Cévennes

Patrick Deleuze qui est vice-président forêt au syndicat mixte du Pays des Cévennes et à la communauté Alès Agglo, a pu exposer les graves difficultés que rencontrent les Cévennes. « Grâce à ce colloque, on découvre un monde car, dans notre territoire, nous n'avons pas abordé les problèmes de l'eau par la forêt. A l'écoute des exposés, c'est pourtant une réalité que nous devons prendre en compte, nous, les élus, qui ne savons pas tout, et merci aux chercheurs de nous le faire découvrir. La res-

source en eau est un problème compliqué en Cévennes. Nous sommes sur deux bassins versants, celui du Gardon qui fonctionne à peu près et celui de la Cèze où on est en alerte, ce qui pose problème aux agriculteurs qui ne peuvent plus arroser et aux acteurs du tourisme. De plus, on rencontre des conditions pires qu'en 1985 où nous avons subi un très grave incendie. Je préside une Charte forestière pilotée par vingt élus. On réfléchit à porter cette action liée à l'eau et allons en parler aux acteurs concernés et trouver des porteurs de projets. J'ai entendu la nécessité de diversifier les essences alors que les Cévennes sont en partie une « friche industrielle » où le pin maritime, planté pour les coffrages des mines, s'est massivement implanté. Il gagne maintenant sur les châtaigneraies qui souffrent de la sécheresse et sont amenées à disparaître. De plus, nous sommes soumis aux épisodes cévenols où se produit une rencontre violente entre l'eau et la forêt. En 2021, une crue en amont s'est déversée en une vague qui a détruit le filtre naturel constitué par les arbres. Les dégâts ont été énormes et beaucoup de petites communes ne s'en sont pas remises. »

La Charte forestière : un soutien aux travaux des petits propriétaires

« Pour réagir, nous recherchons des porteurs de projets agissant dans le cadre de la Charte forestière et avons lancé une étude « Alès Aggl'eau 30 » dans le cadre de l'agglomération pour étudier toutes les possibilités et notamment les ripisylves. Nous avons aussi un programme de soutien à la gestion classique forestière pour aider les petits propriétaires à effectuer des éclaircies, dépressions et dégagements des plantations. La gestion de l'eau est prise en compte dans une expérimentation menée par le syndicat des forestiers privés du Gard que nous soutenons. Sur un chantier expérimental, des andains après coupe ont été disposés selon la pente et selon les courbes de niveau. Des dispositifs vont mesurer les impacts sur le ruissellement lors des précipitations²⁷.

L'exemple de regroupement des propriétaires forestiers sur un périmètre de captage avec l'aide de la communauté de communes de Thonon (Haute-Savoie) m'a particulièrement intéressé et on va le mettre au débat. Nous sommes dans une telle situation que nous sommes ouverts à toute solution. »

Un élu sensibilisé aux démarches par massif et par bassin versant

Christian Ollivier, Vice-Président de l'Etablissement public d'aménagement et de gestion des Eaux Huveaune, les Côtiers et les Aigalades (EPAGE HuCA), est intervenu à plusieurs titres. « Je suis un acteur de l'eau mais sensible aux problèmes forestiers car concerné par trois massifs forestiers, l'Etoile, le Garlaban (acteur du Plan intercommunal de défense contre les incendies en tant qu'adjoint de Roquevaire) et la Sainte Baume (acteur de la Charte forestière de territoire, en tant que membre du conseil d'administration du Parc) et je pourrai ajouter le Parc national des Calanques tout proche. Les relations entre bassin versant et massifs forestiers sont présentes dans nos réflexions. Mais il faut combiner avec les différentes échelles car l'eau et la forêt sont indissociables, on ne peut pas gérer l'eau sans tenir compte de la forêt qui joue deux rôles fondamentaux. L'un sur le grand cycle de l'eau puisqu'une grande partie de l'eau transite par les arbres, comme on l'a vu, par l'évapotranspiration et par le drainage ; l'autre par la capacité de la forêt à retenir l'eau le plus en amont possible, là où elle tombe. La forêt joue un rôle de régulateur en ralentissant l'écoulement de l'eau ce qui a un effet bénéfique sur les risques d'inondation. Sur le même thème, on peut rappeler le rôle positif des terrasses édifiées par nos ancêtres. Dans le cadre de l'EPAGE, nous utilisons beaucoup de techniques végétales pour limiter l'évaporation, rétablir l'ombrage, maintenir la biodiversité, favoriser les essences locales. À Aubagne, un projet GEMAPI pour réduire l'aléa inondation est prévu en centre-ville où on va enlever une centaine d'arbres pour en replanter 20 000 et redonner un poumon de respiration autour du cours d'eau. À Auriol, on a aménagé une zone de rétention et planté 6 000 arbres. Les forestiers publics (ONF) sont présents dans le comité de rivière qui décide des travaux. Les forestiers privés peuvent s'inscrire à la CLE (Commission locale de l'eau) ».

Raisonner par bassins versants, la demande des élus de l'ANEB

« L'Association nationale des élus des bassins (ANEB), créée voici trois ans, porte une dynamique constructive, conduite par les élus, à tous les niveaux de la vie publique, pour placer la gestion globale de l'eau par bassin versant au cœur de l'aménagement durable des territoires. Elle poursuit trois objectifs :

L'ANEB a été créée pour faire remonter au niveau national toutes les problématiques rencontrées par les élus relatives aux cours d'eau et aux zones humides. Un Livre bleu a été rédigé pour proposer à l'Etat les mesures pour améliorer la gestion de l'eau. Le mot clé est la gestion par bassin versant, en prévoyant une organisation structurée à cette échelle, car l'eau est un bien commun. J'ai d'ailleurs apprécié la présentation de l'initiative prise en Catalogne. Les Eaux et Forêts ont été dissociées

27 - Pour plus de détails, voir l'article dans le numéro spécial Forêt, sol et eau T. XLIII, n°4, décembre 2022

voici plus de 50 ans ; il serait bon de les réassocier. Il est possible d'organiser l'an prochain un séminaire ou un colloque sur des retours d'expérience, et nous sommes prêts à travailler ensemble pour sortir des propositions en commun pour une bonne gestion de la forêt et de l'eau. »

Compléments d'information lors de la séance finale de questions/réponses

Travailler sur les relations entre forêt et agriculture

Christophe Chauvin FNE. J'aimerais attirer l'attention sur un autre champ de recherche et d'expérimentation qui concernerait les relations entre forêt et agriculture. Pour une gestion optimale de l'eau à l'échelle d'un bassin, il faut accorder les deux principales occupations du sol, la forêt et sa rivale, l'agriculture, et penser que la gestion de la forêt puisse inspirer la gestion de l'autre et réciproquement. Par exemple favoriser à la fois une pâture arborée et une forêt gérée avec du pâturage qui a l'avantage de comporter un sous-bois moins inflammable. Charles Dereix l'invite à consulter les travaux menés dans le cadre du cycle précédent de Forêt Méditerranéenne, « L'agro-sylvo-pastoralisme en forêt méditerranéenne » dont il reste à tirer les conclusions dans un numéro spécial qui vient de paraître²⁸.

Où stocker l'eau récupérée par la gestion adaptive ?

Une question relative à la régulation du cycle de l'eau : où va-t-on stocker l'eau ? Quel va être le rôle de la forêt non seulement dans la bonne utilisation de l'eau mais dans son stockage ?

Réponse de Jeannine Bourrely - Si on utilise les bonnes essences, qui possèdent le bon couvert pour ralentir le ruissellement et le bon système racinaire, on favorise le meilleur stockage de l'eau qui est en souterrain.

De Christian Ollivier - Dans l'état actuel de mesures prises contre l'état de sécheresse, les communes qui disposent d'eau stockée ont beaucoup plus de contraintes que les communes qui prélèvent dans la nappe. Les karsts et les nappes en sous-sol ne sont pas considérées comme des ressources stockées et il devrait y avoir une adaptation réglementaire sur ce point.

De Johan Garrigou : Historiquement on a fonctionné sur les stocks des grands barrages qui permettaient d'alimenter largement les territoires desservis. Bientôt, il n'y aura plus assez d'eau pour tout le monde si des années déficitaires se succèdent. Il faudra donc favoriser d'autres formes de stockage alternatif comme les nappes profondes ou les sols qui deviendront des stocks précieux.

Christian Ollivier : dans le cadre d'une étude sur l'EPAGE HuCA et sur la Sainte Baume, on a identifié des zones de ressource naturelle en eau potable, en qualité et en quantité, disponible et non encore exploitée ou peu exploitée.

Anthony Salomone - On dispose en sous-sol d'immenses réserves dans lesquelles on a prélevé de manière assez dérégulée. Il faudrait améliorer la gouvernance pour que les représentants de chaque bassin puissent se parler de manière plus élargie sur la ressource en eau. Mais il faut avoir préalablement la connaissance sur les données et les statistiques forestières avant d'agir. Il faut d'abord faire l'état des connaissances sur la ressource en eau naturelle. Il faudra la prélever en respectant sa capacité à se renouveler alors qu'aujourd'hui on est en déficit. On a eu un défaut d'anticipation. Il faut mettre autour d'une table tous les acteurs pour trouver des consensus de gestion et nourrir la solidarité amont/aval. À Aiglun pour l'instant on subit des restrictions et, quand on descend sur la côte, on voit des espaces verts arrosés ! Il faut que les gestionnaires de l'eau mettent en place une régulation dans la distribution.

Obligation par endroit de se tourner vers la réutilisation d'eaux usées

Elizabeth Deborde, Mairie de Valbonne. Nous n'avons plus d'eau à certains endroits des Alpes-Maritimes. La solution d'imposer aux constructeurs la réalisation d'impluvium ne semble pas très performante. Nous souhaitons donc nous tourner vers l'utilisation d'eaux usées et souhaitons, avec la collaboration de la Maison régionale de l'eau, obtenir les autorisations nécessaires. Nous devons mettre en place une solidarité amont/aval. Les Alpes-Maritimes, département ultra touristique, concentrent sur un espace réduit toutes les problématiques, y compris sur les ripisylves. Le problème central est de faire des économies d'eau et de trouver des formes de stockage dans les nappes karstiques lors des intersaisons.

Une initiative de forestiers pour mieux retenir l'eau après une coupe de bois

Francis Mathieu. Le syndicat Fransylva 30 conduit une expérimentation grâce à une aide financière européenne et l'appui de l'agglo d'Alès. Dans une parcelle forestière où le peuplement a été éclairci, on a voulu mesurer l'acceptabilité sociale des populations locales sur le traitement des rémanents, à une époque où celui qui coupe un arbre est accusé de déforestation.

L'enquête a montré un meilleur accueil du rangement des rémanents en andains selon les courbes de niveau au lieu de les mettre dans le sens de la pente, car cela leur rappelle les banquettes. A la demande de Jeannine Bourrelly, on a voulu aller plus loin pour voir si cette pratique avait une incidence sur le ruissellement de l'eau. Avec l'appui de l'Ecole des Mines d'Alès et du CNRS, on a étudié comment se déroule le chemin de l'eau dans les deux cas. Nous pourrons bientôt en publier les résultats.

Trouver les moyens de mieux communiquer

Jean Bonnier. Il faut que les forestiers renouvellent leur discours sur les rôles de la forêt en y mettant plus de nuances après ce que l'on a appris. Comment communiquer autour de nous ? On a parlé de l'eau mais pas de la pluie qui prend des formes plus ou moins brutales. Il faut préciser de quels types d'eau on parle et constater qu'on perd beaucoup d'eau. Le degré de saturation des sols dépend de la présence ou non de gabions ou de restanques. Retenons qu'il faut trouver les moyens de communiquer.

Prendre en compte les paysages

Aurore Fauchas, PNR de la Sainte Baume, souhaite qu'on intègre l'aspect paysager. Voir comment les anciens traitaient ces paysages d'avant, caractérisés par les restanques, les carrières et différents ouvrages pour gérer la circulation de l'eau et son stockage et la forêt.

A la complexité des paysages méditerranéens s'ajoutent les perceptions sur la façon dont on voit les forêts dans notre société. Aujourd'hui : le regard n'est plus celui qu'il était dans le passé, les coupes et les travaux forestiers sont souvent considérés comme très négatifs.

S'inspirer des pays situés plus au sud

Ana Elena Sanchez de la Maison de l'eau. On est au nord de la Méditerranée. On peut apprendre pas mal de choses des pays situés plus au sud. Pour nous, l'eau n'est jamais perdue. La question de la consommation en eau des forêts est réelle mais la forêt rend par ailleurs des services aux systèmes aquatiques. Ce n'est pas une question. Pour le stockage de l'eau, il faut voir toutes les solutions possibles, mais avant tout, au nord de la Méditerranée, il faut surtout, au niveau individuel, arrêter de consommer l'eau comme on le fait actuellement. Il faut réfléchir et on dispose des acquis de la recherche.

Adapter la loi sur l'eau

Patrick Deleuze rappelle que, sur les restanques, il y avait de l'agriculture et maintenant c'est de la forêt. Il est difficile d'entretenir les murettes endommagées par les racines des arbres et par les sangliers. Il s'interroge sur l'application de la loi sur l'eau davantage conçue, lui semble-t-il, pour les grands fleuves. « Pour l'élu que je suis, il faudrait la décliner selon les territoires qui ont des petites rivières car on ne s'y retrouve pas. Pour en revenir à la forêt, il y en a un peu trop ! Chez nous, c'est désormais une mer de forêts au milieu de laquelle surgissent nos petits villages qui ne se développent plus parce que la forêt est trop près des maisons avec les contraintes qui vont avec. »

2.8. *Interventions finales*

Conclusion de Monsieur le Sénateur Jean Bacci

Je vous remercie de cette initiative pour la densité des informations que nous avons reçues. Certaines ont conforté mes idées. La forêt est un milieu qui vit grâce à son équilibre qu'il faut respecter. J'ai compris que, lorsqu'on parle de forêt et d'eau, on est aussi dans ce problème d'équilibre. Vous avez attaqué un sujet qui va être majeur dans les prochaines décennies. Aura-t-on assez d'eau ? Comment y accèderons-nous ? Nous bénéficions des infrastructures qui assurent nos besoins. Mais cela va-t-il continuer avec l'espacement des pluies, les quantités de neige qui se réduisent ? Les météorologues nous disent que l'on aura peut-être les mêmes quantités de précipitations mais sous des formes plus brutales. Dans ces conditions, l'eau qui tombe, on la perd. On peut imaginer de pouvoir, au moins, récupérer celle-là. Comment faire ?

Autre chose qui me tient à cœur. Nous avons sur nos cours d'eau des barrages successifs qui produisent de l'électricité. Autour, nous avons des parcs photovoltaïques qui produisent de l'électricité à des heures où on n'en a pas toujours besoin. Ne pourrait-on pas utiliser cette énergie pour diriger l'eau vers les barrages équipés de turbines inverses qui pourraient remonter l'eau et la conserver pour la turbiner lors des pointes de consommation. Pour cela, il suffit que la Commission régionale de l'eau définisse de nouveaux critères.

Bilan intermédiaire et perspectives par Louis-Michel Duhen

A l'issue d'un colloque aussi riche, il est difficile de faire à chaud une synthèse. Par contre, elle sera faite ultérieurement sous la forme d'un rapport d'étape pour bien prendre en compte ce qui a été dit et « poursuivre notre chemin » sur le thème « Forêt, sol et eau, des alliés naturels », prévu sur deux à trois ans.

Objectifs atteints ?

L'un des premiers objectifs était de partager les connaissances les plus récentes du rôle de la forêt sur le cycle de l'eau. Je pense que l'objectif a été atteint grâce à la formidable réponse des chercheurs qui sont venus présenter les résultats de leurs études. Je les remercie chaleureusement avec une mention particulière pour Nicolas Martin de l'INRAE, l'un de nos administrateurs, et de Julien Fiquepron du CNPF, qui ont mobilisé efficacement leurs réseaux.

Nous voulions toucher les propriétaires et gestionnaires forestiers. Je pense que c'est en partie réussi car les représentants des divers organismes (ONF, CNPF et Fransylva) sont présents et prêts à s'investir.

Nous voulions aussi motiver les instances politiques de gestion de l'eau. Un grand merci à ceux qui sont venus, mais il faut reconnaître un relatif échec, certainement provisoire. Nos interlocuteurs de l'Agence de l'eau RMC qui étaient pourtant demandeurs d'un partage de connaissances n'ont pas pu venir, pris par la remise urgente du plan d'adaptation au changement climatique. Mais ce n'est que partie remise.

Par contre, les acteurs du territoire ont été bien représentés et ont pu exprimer une partie de leurs préoccupations. C'est pour nous une grande responsabilité de continuer à creuser le sujet pour leur fournir des réponses.

Quelle va être la suite ?

Il ne faut pas en rester aux connaissances mais il faut passer à l'action. Je suggère les feuilles de route suivantes.

Pour les forestiers, je pense qu'ils doivent s'attacher à bien communiquer sur les services apportés par la forêt et s'organiser pour cela. Ensuite, il leur faudra continuer à mettre en place des gestions adaptatives pour faire face aux futures sécheresses et mieux économiser l'eau. Une gestion plus multifonctionnelle et adaptée au contexte local doit être promue. Dans les cinq dernières années, nous avons aussi traité des mégafeux, du carbone et de l'utilisation agrosylvopastorale des forêts et maintenant nous commençons à parler du sol et de l'eau. Dans les quatre domaines, nous avons vu l'opportunité de gestions « consolidées » à base d'éclaircies judicieuses pour doser le couvert et diversifier les essences. Une sylviculture « intelligente et raisonnée » doit être poursuivie dans nos forêts méditerranéennes. Pour cela, les gestionnaires doivent être encouragés et aidés. Le recours aux outils et modèles présentés doit être généralisé lors des démarches territoriales telles l'étude des Plans intercommunaux de débroussaillage et d'aménagement forestier et les Chartes forestières de territoire pour effectuer les bons choix pour le cycle de l'eau.

J'invite **les acteurs de l'eau** à mieux connaître et reconnaître les services apportés par la forêt. Peut-être faut-il qu'ils n'aient plus les yeux uniquement fixés sur l'eau bleue mais qu'ils les tournent vers l'eau verte et notamment sur celle qui transite par les arbres. Ils pourront alors dans les études préalables à l'élaboration des Schémas d'aménagement de gestion de l'eau faire tourner les modèles présentés en fournissant ou en recherchant les données pertinentes. Les SAGE indiqueront alors le type de peuplement souhaitable en certains points sensibles des têtes de bassin et prévoir les mesures adaptées.

Aux **acteurs du territoire**, je les invite à s'informer sur ce sujet complexe mais si important pour leurs populations que ce soit en matière de disponibilité en eau et de qualité de l'eau (eau bienfaisante) qu'en matière de risque (eau destructrice). Dans les deux cas, la forêt peut être une partie des solutions. Ce sont eux qui peuvent être prescripteurs de ces bilans hydriques préalables.

Comme les élus, nous devons aussi penser aux citoyens car la forêt comme l'eau sont des sujets très sensibles. Aussi, nous aurons à travailler avec les acteurs du paysage, de l'environnement, avec des sociologues, anthropologues, historiens, artistes... Comme vous le voyez la feuille de route de l'association est très lourde !

Aussi, nous comptons sur vous pour nous signaler des démarches instructives ou exemplaires sur ces domaines et nous aider à monter des rencontres-débats sur le terrain. Et comme ce thème passionnant se révèle très prenant, nous sollicitons les collectivités et éventuels mécènes à nous soutenir sur le plan financier car notre équipe réduite à une personne permanente aura du mal à faire face en 2024 et 2025. D'avance merci.

3 - Suites du cycle

3.1. Communiquer sur les informations recueillies

Nous envisageons la réalisation d'une synthèse (icono)graphique mettant en avant le rôle de l'échelle spatiale et peut-être des effets simplifiés de la gestion de la forêt et de l'eau. Les quelques processus clés mettant en lien forêt - sol - eau à trois échelles spatiales différentes seraient :

- Échelle de l'arbre : l'arbre emprunte l'eau du sol apportée par la pluie / idée des volumes consommés/ stress hydrique et mortalité en cas de manque d'eau.
- Échelle du massif / peuplement : les forêts consomment l'eau des sols et sous-sol en période sèche. Cette consommation est liée au climat et à la couverture forestière. La couverture forestière module la consommation de l'eau et donc dans une certaine mesure l'eau bleue, l'eau des sols et des sous-sols, le débit des rivières, la présence des tourbières...
- Échelle régionale/continentale : les forêts impactent le cycle de l'eau. Elles recyclent l'eau de pluie à plus de 60%. Entre 60 et 90% de l'eau de pluie terrestre vient de la transpiration des forêts (sans forêt pas de pluie au-delà de 300 km des côtes). Un atelier en petit comité va être formé pour esquisser les grandes lignes des consensus scientifiques à mettre en avant.

3.2. Voir des réalisations de terrain

Nous avons établi un document de travail répertoriant diverses actions que nous pourrions conduire dans la suite de notre cycle (on ne les fera pas toutes !) dans un tableau croisant « échelle d'action », « problématiques à illustrer » et « illustrations possibles en PACA, Occitanie, AURA et Corse ».

Au regard du tableau et des discussions, il a été décidé de travailler sur les sessions suivantes.

En région Occitanie²⁹ :

dans les Cévennes, une session pourra permettre d'illustrer plusieurs problématiques à différentes échelles : l'échelle d'une propriété forestière et l'échelle « Bassin versant, démarches territoriales » avec Alès Agglo

En région Provence Alpes Côte d'Azur³⁰ :

deux sessions sont envisagées en lien avec des propriétaires privés et des acteurs de l'eau.

3.3. Partage de connaissance sur le rôle des sols

Le thème du sol a été évoqué mais pas complètement traité. Nous envisageons de prendre l'initiative d'une autre rencontre sur ce thème ou de proposer un partenariat avec des organismes spécialisés pour notamment :

- Mieux connaître le fonctionnement des diverses strates et des différents stades de développement des sols (échelle du sol et des states profondes).
- Relations entre les sols et les arbres et leurs « alliés » (champignons, micro-organismes), notamment dans le cycle de l'eau (actions sur l'interception, la limitation du ruissellement, rétention en eau, appréhension de la réserve utile) (échelle de l'arbre).
- Gestion des peuplements pour optimiser les cycles de l'eau (échelle des peuplements et des bassins versants). Pratiques respectueuses des sols, densités, gestion des sédiments dans les cours d'eau...).
- Apports des acteurs de l'eau qui restituent des sédiments lors des curages des retenues d'eau.
- ...

29 - Cette session a été organisée après la rédaction de cette note, les 4 et 5 avril 2024 dans les Cévennes (voir sur le site de l'association à la rubrique « Nos Manifestations »).

30 - Ces sessions sont prévues le 24 mai 2024 (chez un propriétaire forestier, dans le Var) et le 17 (ou 18) octobre 2024 (sur le bassin versant de l'Arc)

3.4. Glossaire

Bassin versant : territoire sur lequel toutes les eaux tombées alimentent un même point (exutoire). Un bassin versant se délimite par une ligne de partage des eaux.

Capacité de rétention ou capacité au champ : la capacité au champ est le volume maximal d'eau que peut retenir le sol dans les micro porosités, les macroporosités étant drainées. Si on compare le sol à une éponge on pourra dire que c'est le moment où l'éponge est pleine, où elle ne goutte plus car toutes les porosités accessibles sont pleines. Pour connaître la capacité au champ de son sol, il faut attendre deux à trois jours de ressuyage après saturation du sol par les pluies et faire la mesure avec un appareil de mesure de l'humidité.

Déficit de pression de vapeur (VPD) : le VPD est défini comme la différence entre la quantité d'eau présente dans l'atmosphère (ou « pression de vapeur réelle ») et la quantité d'eau que l'atmosphère pourrait contenir à saturation (100 % d'humidité, ou « pression de vapeur saturante » ou point de rosée). À une température donnée, l'atmosphère ne peut contenir qu'une certaine quantité de vapeur d'eau. Avec le réchauffement global des dernières décennies, la limite supérieure de la quantité de vapeur d'eau que l'atmosphère peut retenir a augmenté – plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau.

Demande évaporatoire : demande en vapeur d'eau de l'atmosphère variable selon le climat, l'ensoleillement et la température.

Eau profonde : eau présente dans les zones non saturées de l'aquifère (ce n'est pas l'eau dans la zone noyée à proximité des ripisylves).

Embolie : rupture irréversible de la colonne d'eau dans l'arbre (au niveau du xylème) due à une sécheresse. Cela interrompt le flux de sève dans les vaisseaux touchés = perte de conductance hydraulique.

Evapotranspiration : l'évapotranspiration combine le retour d'eau dans l'atmosphère par évaporation (processus physique) et par transpiration d'un végétal (processus biologique). Elle s'exprime en millimètres (mm) d'eau par unité de temps. Un mm d'eau par heure correspond à 1 litre d'eau par mètre carré et par heure.

Indice foliaire : l'indice foliaire (noté souvent LAI pour l'abréviation du terme anglais *Leaf Area Index*) exprime la surface projetée des feuilles du peuplement par unité de surface au sol.

Pluie efficace : eau disponible pour les écoulements = usages anthropiques + écosystèmes (zones humides...) après interception et évapotranspiration par les végétaux notamment les arbres. C'est l'addition de l'eau bleue et de la partie d'eau verte qui n'est pas évaporée.

Point de flétrissement permanent : au point de flétrissement permanent, la plante souffre de sécheresse et se fane. On le trouve en mesurant l'humidité du sol lorsque la plante se fane.

Potentiel hydrique : le potentiel hydrique est la force qu'il faut exercer pour extraire de l'eau liquide, elle prend une valeur négative : plus elle est faible plus la force requise est importante. Il existe un gradient de pression d'eau entre le sol, l'arbre et l'atmosphère. Le potentiel hydrique est généralement très négatif dans l'air lorsqu'il fait chaud et sec et qu'il y a donc une forte demande évaporatoire. A l'inverse le potentiel hydrique du sol est proche de 0 (peu négatif) dans des conditions humides.

Réservoir en eau utilisable des sols - RU : quantité d'eau accessible et extractible par la végétation pour un sol donné, exprimée en mm. Elle correspond à la différence entre la quantité d'eau dans le sol après ressuyage (capacité au champ) et celle contenue au point de flétrissement. Quantité indépendante de l'état de remplissage.

Transpiration : la transpiration correspond à une circulation ascendante de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère. Elle est majoritairement passive, dictée par un gradient de pression d'eau entre le sol, l'arbre et l'atmosphère. En région méditerranéenne, par la transpiration, 50% des précipitations retournent à l'atmosphère (Rambal, 2014).

Transpiration cuticulaire : malgré la fermeture des stomates, de l'eau peut s'échapper en faible quantité par la cuticule sur la face supérieure entraînant le risque d'embolie.

Transpiration stomatique : transpiration qui passe par les stomates, orifices situés sur la face inférieure de la feuille qui peuvent s'ouvrir et se fermer.

Zone critique : notion récente introduite en France par Jérôme Gaillardet puis Bruno Latour, « Environnement de proche-surface hétérogène du globe terrestre dans lequel des interactions complexes entre la roche, le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants régulent l'habitat naturel et déterminent la disponibilité des ressources vitales » (National Research Council, 2001). Notion critiquée mais favorise interdisciplinarité et compréhension des différents phénomènes.

On trouvera les présentations du séminaire et les enregistrements des conférences sur le site de l'association :
[https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/manifestations/
id-127-cycle-foret-sol-et-eau-des-allies-naturels-](https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/manifestations/id-127-cycle-foret-sol-et-eau-des-allies-naturels-)

Les actes intégraux du séminaire ont été publiés dans la revue *Forêt Méditerranéenne*
Tome XLV, n°1, mars 2024
(112 p., 20 euros ou dans le cadre de l'abonnement à la revue)



Ce numéro a été réalisé avec l'aide de l'équipe ECODIV de l'INRAE que nous remercions chaleureusement et tout particulièrement Nicolas MARTIN-ST-PAUL.

Le séminaire a été réalisé grâce avec le soutien de :



L'ensemble du cycle « Forêt, sol et eau » est également soutenu par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (DRAAF PACA et Occitanie), la Région Occitanie, la Métropole Aix-Marseille-Provence et le Département de Vaucluse.

Forêt Méditerranéenne
14 rue Louis Astouin
13002 Marseille
Tél. : 04 91 56 06 91
contact@foret-mediterraneenne.org