

La plateforme expérimentale de Font-Blanche

*Un site dédié au suivi à long terme
du bilan de carbone et d'eau
d'une forêt mixte méditerranéenne
de pin d'Alep et de chêne vert*

par Nicolas MARTIN-St PAUL, Julien RUFFAULT, Myriam MORENO,
Olivier MARLOIE & Guillaume SIMIONI

Le site de Font-Blanche est l'un des trois sites de la région méditerranéenne dédiés à l'étude et au suivi des échanges de matière et d'énergie entre les différents compartiment des écosystèmes. Il procure également différentes autres données (croissance, cycle de l'eau...) sur les peuplements de pin d'Alep et chêne vert qui le caractérisent.

1 - Cette méthode physique repose sur la mesure simultanée de la concentration atmosphérique en gaz (p.ex. CO₂, H₂O) et la vitesse du vent dans sa composante verticale.

Elle permet d'estimer la séquestration nette de carbone d'un écosystème. Des algorithmes permettent ensuite de calculer des flux bruts entrant (la productivité brute, PBeco) et sortant (la respiration de l'écosystème, Reco).

La biosphère terrestre séquestre environ 30% des émissions de CO₂ d'origine anthropique à l'échelle globale, ce qui participe à l'atténuation des changements climatiques (FRIEDLINGSTEIN *et al* 2019). Une grande partie de ce puits de carbone est constituée par les forêts. Toutefois, l'ampleur et les dynamiques de séquestration du carbone par les forêts demeurent difficiles à évaluer et quantifier, notamment en conditions de changements climatiques. Les échanges de carbone forêt-atmosphère dépendent de processus biologiques et biophysiques complexes qui font intervenir le cycle du carbone (photosynthèse, croissance...) mais également sa relation avec le bilan hydrique, le bilan d'énergie et les cycles des nutriments.

Face à ces enjeux, les scientifiques ont mis en place des dispositifs de suivi sur le long terme des bilans de carbone, d'eau et d'énergie dans différents écosystèmes de la planète. Ces sites sont équipés de la technologie de « l'eddy covariance¹ » (corrélation turbulente) qui permet d'estimer les échanges nets de matière et d'énergie entre l'écosystème et l'atmosphère au pas de temps de la demi-heure. En Europe, les principaux sites disposant de ces équipements sont fédérés par le réseau ICOS (*Integrated Carbon Observation System*, <https://www.icos-ri.eu>), qui harmonise les méthodes de mesures et met à disposition les données issues des sites d'études.

2 - <https://www6.inra.fr/>
font-blanche/

3 - INRA :

L'Institut national de la recherche agronomique est devenue l'INRAE en 2020 : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

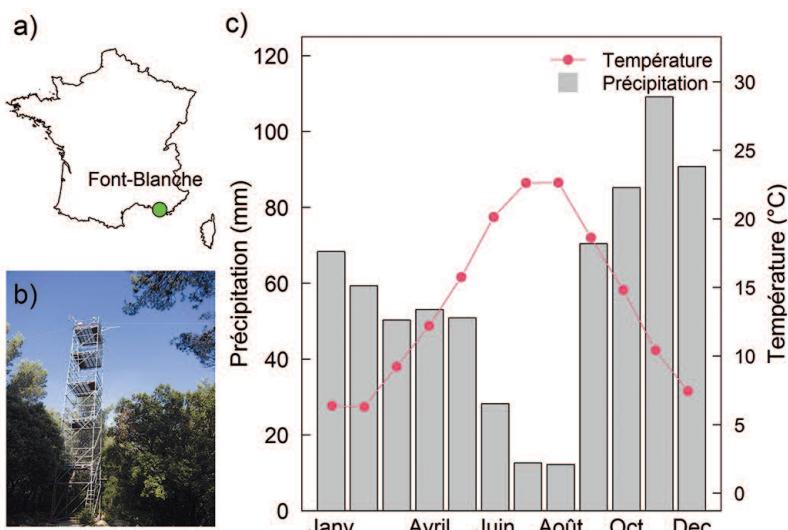
4 - URFM :

Unité de recherche écologie des forêts méditerranéennes.

5 - CEREGE :
Centre de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement.

Fig. 1 :

Présentation du site de Font-Blanche.
(a) Localisation, (b) photo de la tour à flux et (c) dynamiques saisonnières des précipitations et températures (moyennes sur la période 2008-2017).



Panorama des mesures réalisées sur la plateforme de Font-Blanche

La station expérimentale de Font-Blanche² (Cf. Fig. 1) est un de ces sites. Elle est située dans la forêt départementale de Font-Blanche (commune de Roquefort-la-Bédoule, Bouches-du-Rhône). La station est implantée dans une forêt hétérogène non gérée, dominée par le pin d'Alep et le chêne vert, et dotée d'un sous-bois épars composé de différents arbustes méditerranéens. Cette forêt est issue de la recolonisation par le pin d'Alep de taillis de chênes verts suite à la déprise agricole après la deuxième guerre mondiale. L'âge moyen des pins et des parties aériennes des chênes est d'environ 60-70 ans. La plateforme a été mise en place en 2007 à l'initiative de Roland Huc, chercheur au centre INRA³ d'Avignon, actuellement à la retraite. Elle est aujourd'hui principalement gérée par des unités de recherche INRAE (URFM⁴ à Avignon, Recover à Aix-en Provence), ainsi que par le CEREGE⁵. Outre le suivi par eddy covariance, différentes mesures liées à la croissance (accroissement en circonférence, indice foliaire, chutes de litière), au cycle de l'eau (transpiration et statut hydrique des arbres, humidité du sol), et au fonctionnement du sol (respiration et température) y sont réalisées. Le site dispose également, depuis fin 2008, d'une expéri-

mentation de sécheresse aggravée et d'une expérimentation d'irrigation permettant d'étudier l'effet d'apports hydriques contrastés sur la croissance et le fonctionnement hydraulique des arbres. Plus d'une décennie de mesures permet aujourd'hui d'avoir du recul sur la séquestration de carbone de cette forêt.

De la difficulté de détailler le bilan de carbone d'une forêt

La figure 2 présente de façon schématique des analyses préliminaires du bilan de carbone de la forêt de Font-Blanche. En moyenne sur la période 2008-2019, la productivité nette de l'écosystème (PNE) mesurée par la tour à flux s'élève à 460 gC/m²/an (soit 4,6 tC/ha/an). C'est une valeur élevée comparée aux autres sites méditerranéens existants et qui se rapproche plus de ce que l'on retrouve dans les forêts tempérées (LUYSSAERT *et al* 2009).

Cette séquestration se répartit entre la végétation (augmentation de la biomasse) et le sol (augmentation de la masse de matière organique dans le sol). Les inventaires de croissance nous permettent d'estimer la part de cette séquestration sous forme de biomasse, à partir de relations allométriques existantes pour les chênes et les pins, ou de modèles de croissance pour le sous-bois. On obtient ainsi une séquestration dans la biomasse (aérienne et souterraine) de l'ordre de 2,3 tC/ha/an. Cela signifie que la part de séquestration dans la matière organique du sol serait de l'ordre de 2,3 tC/ha/an. Cette valeur est très élevée et suggère que les estimations de séquestration de carbone sont excessives. À titre de comparaison, les études récentes menées sur les forêts françaises par le réseau RENECOFOR estiment la séquestration dans le sol à 0,4 tC/ha/an en moyenne mais pouvant aller jusqu'à 2 tC/ha/an (JONARD *et al* 2017).

Différentes hypothèses sont explorées par les chercheurs du site pour expliquer un tel décalage. (1) Tout d'abord le calcul de la biomasse peut être empreint de fortes incertitudes. En effet, les relations allométriques ainsi que les ratios entre biomasse aérienne et biomasse racinaire utilisés dans les calculs de biomasse n'ont pas été mesurés sur le site. Or ces équations peuvent varier d'un site à l'autre selon les conditions stationnelles.

Des mesures de biomasses sur des arbres du site permettront de corriger ce type d'erreur. (2) Les mesure de corrélation turbulente sont très complexes et font constamment l'objet d'améliorations. (3) Finalement, l'accumulation de carbone dans le sol, issue des chutes de litière et du renouvellement racinaire, peut représenter une part importante de la séquestration de carbone par les forêts qui sera aussi mesurée à Font-Blanche ces prochaines années. Très peu de données existent sur les forêts méditerranéennes. Nous avons récemment estimé le stock de carbone dans les 13 premiers cm du sol à 41 tC/ha. Une nouvelle mesure dans quelques années nous permettra d'évaluer comment évolue ce stock, ce qui permettra de mieux jauger la qualité des estimations actuelles.

Les mesures par eddy covariance fournissent également des estimations des flux entrants (photosynthèse brute), d'environ 13,9 tC/ha/an, et des flux sortants (respiration de l'écosystème), d'environ 9,7 tC/ha/an. Ces valeurs pourront être comparées à d'autres mesures de flux (comme la respiration du sol qui est aussi mesurée sur le site) et nous permettront de mieux comprendre et affiner l'estimation du bilan de carbone de cette forêt.

Variabilité saisonnière et interannuelle de la séquestration du carbone

Les suivis permettent cependant d'étudier la dynamique temporelle de la séquestration du carbone (Cf. Fig. 4). La photosynthèse brute suit un patron bimodal, étant plus faible en hiver et en été, et plus forte au printemps et dans une moindre mesure à l'au-

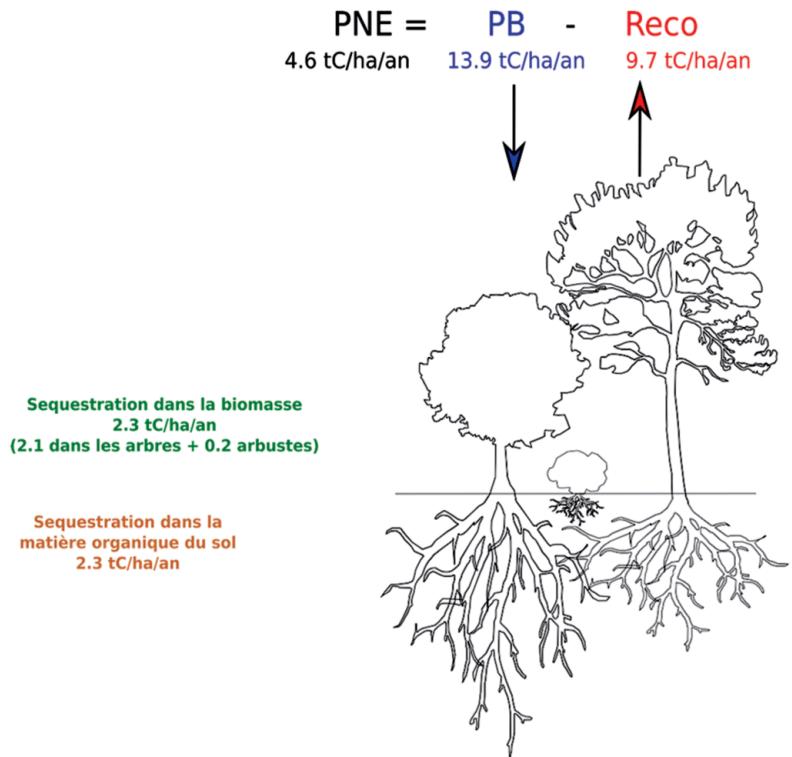


Fig. 2 (en haut) :
 Représentation schématique du bilan de carbone estimé à Font-Blanche par la méthode d'eddy covariance et les inventaires forestiers. Ce bilan est préliminaire mais suggère une séquestration dans les sols irréaliste par rapport à d'autres écosystèmes. Des travaux en cours tentent d'améliorer la fermeture de ce bilan.

Photo 1 (au milieu) :

Anémomètre sonique devant la Sainte-Baume permettant de mesurer les flux de carbone et d'eau par la méthode de corrélation des turbulence.

Photo 2 (ci-contre) :

Collier de respiration des troncs sur chêne dans la parcelle expérimentale d'exclusion de pluie.

Photos G. Simioni.



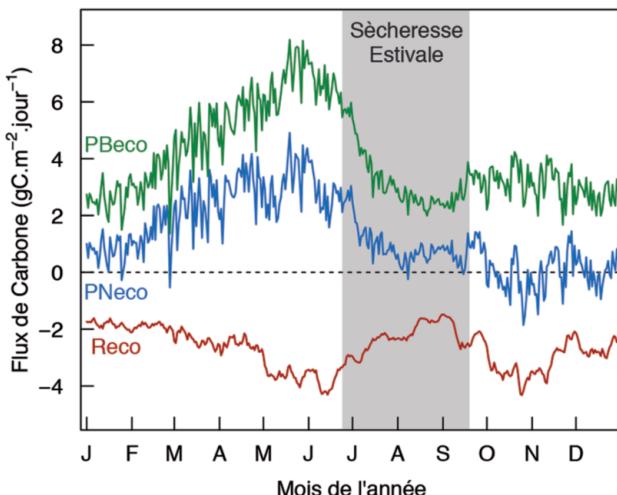
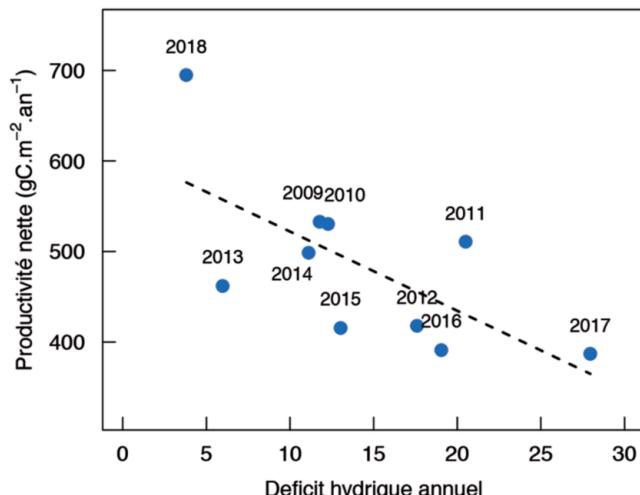


Fig. 4 :
Déterminant saisonnier et annuel de la séquestration de carbone sur le site de Font-Blanche.

La figure de gauche montre les dynamiques saisonnières moyennes de la productivité nette de l'écosystème (PNE), de la productivité brute (PBE) et de la respiration de l'écosystème (Reco).

La figure de droite montre la relation entre la séquestration de carbone annuelle (PNE annuelle) et le déficit hydrique de l'année. Le déficit hydrique annuel a été calculé grâce à un modèle de bilan hydrique comme expliqué dans l'encadré.



tomme. La dynamique saisonnière de la respiration présente une allure similaire, bien que les pics soient moins marqués. Il en résulte que la séquestration de carbone a principalement lieu pendant la période printanière. Il apparaît clairement que le ralentissement de l'ensemble des flux en été coïncide avec la diminution des stocks en eau disponibles pour les arbres. L'importance déterminante de la sécheresse sur la séquestration de carbone se retrouve également à l'échelle annuelle, où l'on trouve une assez bonne corrélation entre le déficit hydrique en eau du sol annuel (voir encadré) et la séquestration de carbone (Cf. Fig. 4), comme cela avait été rapporté sur le site de Puéchabon dans l'Hérault (ALLARD *et al* 2008).

Conclusion

Nos suivis sur le long terme ont abouti à un premier bilan de carbone qui semble difficile à boucler. Ils ont également permis de mettre en évidence les facteurs environnementaux contrôlant la séquestration et en particulier le rôle clé joué par le déficit hydrique du sol. Cela s'est vérifié de manière spectaculaire au cours de la canicule de fin juin 2019. Habituellement, la sécheresse estivale peut mener la forêt à être une source de carbone en fin d'été. Avant, pendant, et après la canicule de juin, la forêt a été successivement puits, source, et à nouveau puits de carbone. Cette situation inédite pourrait malheureusement devenir de plus en plus fréquente à l'avenir, compromettant un peu plus la capacité des forêts à atténuer le changement climatique. Nos analyses montrent la nécessité de poursuivre les suivis sur le long terme pour mieux évaluer et comprendre la séquestration et le devenir du carbone à long terme.

Remerciements

Merci à tous nos collègues qui s'investissent sur le site pour aider la communauté à mieux comprendre le fonctionnement des



Photo 3 :

Damien Gounelle (URFM, INRAe) collecte des échantillons pour la mesure du stress hydrique sur des chênesverts.
Photo G. Simioni.

forêts, notamment nos collègues de l'URFM (Damien Gounelle et Arnaud Jouineau), de Recover (Maxime Cailleret, Roland Estève, Jean-Michel Lopez et Michel Vennetier) et de l'IMBE (Virginie Baldy, Catherine Fernandez, Thierry Gauquelin, Frédéric Guibal, Mathieu Santonja).

Références

- Allard, V., Ourcival, J. M., Rambal, S., Joffre, R., & Rocheteau, A. s. (2008). Seasonal and annual variation of carbon exchange in an evergreen Mediterranean forest in southern France. *Global Change Biology*, 14(4), 714–725. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01539.x
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O& apostrophe; Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Zaehle, S. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 11(4), 1783–1838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., & Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116(2–3), 269–283. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VBS-3VTR6VS-K/2/921215862fea16bde19d0468234e8043>
- Jonard, M., Nicolas, M., Coomes, D. A., Caignet, I., Saenger, A., & Ponette, Q. (2017). Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*, 574, 616–628. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.028
- Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S. L., Schulze, E.-D., Jung, M., Zaehle, S., Janssens, I. A. (2010). The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology*, 16(5), 1429–1450. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02056.x
- Rambal, S. (1984). Water-balance and Pattern of Root Water-uptake By A *Quercus-coccifera* L Evergreen Scrub. *Oecologia*, 62(1), 18–25.
- Ruffault, J., Martin-StPaul, N. K., Rambal, S., & Mouillot, F. (2013). Differential regional responses in drought length, intensity and timing to recent climate changes in a Mediterranean forested ecosystem. *Climatic Change*, 117(1–2), 103–117. doi: 10.1007/s10584-012-0559-5

Nicolas MARTIN-St PAUL

Julien RUFFAULT

Myriam MORENO

Olivier MARLOIE

Guillaume SIMIONI

Ecologie des Forêts Méditerranéennes,

URFM, INRAE, AVIGNON

Auteur de correspondance :

nicolas.martin@inrae.fr

L'eau du sol et du sous-sol comme indicateur du stress hydrique

L'intérêt des mesures par eddy covariance n'est pas seulement d'estimer la séquestration du carbone dans la forêt. Les flux d'eau entre la forêt et l'atmosphère, ou évapotranspiration, sont aussi mesurés avec une fiabilité avérée. Ainsi, il est possible d'estimer la réserve utile (RU) des sols en cumulant l'évapotranspiration au cours de la sécheresse. La réserve utile varie en fonction des années, mais peut atteindre 160 mm. Comme l'épaisseur de sol est très limitée à Font-Blanche (~50 cm maximum), cette estimation de la RU suggère que les arbres puisent de l'eau profondément dans la couche rocheuse, probablement dans les anfractuosités, sur plusieurs mètres d'épaisseur.

Le contenu en eau disponible pour les plantes affecte fortement la productivité des forêts. Il peut être déterminé grâce au bilan hydrique du peuplement qui se calcule par différence entre les apports d'eau (par les pluies) et les pertes en eau (par évapotranspiration, ruissellement et drainage) (p.ex. RAMBAL et al 1984 ; GRANIER et al 1999 ; RUFFAULT et al 2013). On peut ainsi écrire le déficit hydrique du jour j de façon itérative :

$$\text{CES}_j = \text{CES}_{j-1} + \text{Ppt}_j - \text{ETR}_j$$

Avec CES $_j$ le contenu en eau du sol du jour j , CES $_{j-1}$ le contenu en eau du sol du jour précédent, Ppt les précipitations incidentes du jour j et ETR l'évapotranspiration du jour j .

Cette valeur peut être exprimée en relatif et cumulée chaque année de façon à produire un indice de stress hydrique annuel. Sur notre site, ce calcul conduit à des dynamiques illustrées sur cette figure, où l'on voit nettement les déficits hydriques se creuser chaque année pendant la période estivale. Pour calculer un indice de stress hydrique annuel, il est d'usage de cumuler les déficits hydriques au cours du temps en dessous d'un certain seuil.

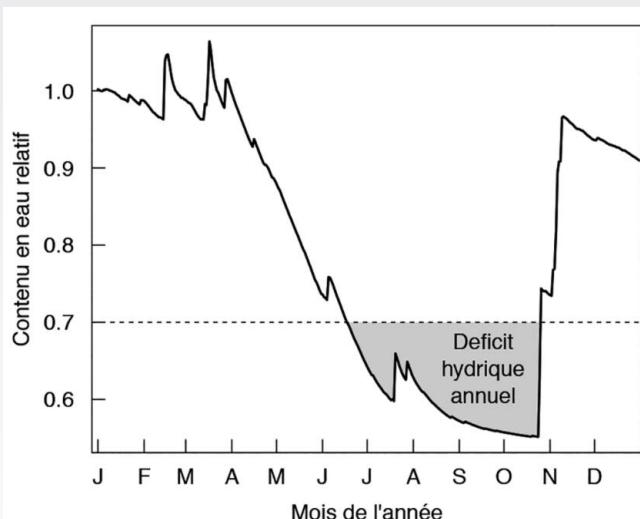


Fig. 3 :

Dynamique du contenu relatif en eau disponible à Font-Blanche pour l'année 2011. On remarque le déclin pendant la période estivale et la récupération suite aux pluies d'automne. En intégrant les valeurs en dessous d'un certain seuil on peut calculer un déficit hydrique annuel.

Résumé

Pour comprendre, quantifier et modéliser les cycles du carbone, de l'eau et de l'énergie en forêts, des sites sont équipés de capteurs en mesures biophysiques en haut de « tour à flux ». C'est le cas de la plateforme expérimentale de Font-Blanche qui a été déployée dans les Bouches-du-Rhône par l'INRAe (URFM et Recover) en 2008, dans une forêt de pin d'Alep typique de la zone méditerranéenne. Le site est équipé de la méthode de corrélation des turbulences qui permet un suivi des flux d'eau et de carbone à haute fréquence (30 minutes). L'analyse de ces données de flux indique une saisonnalité marquée de la séquestration de carbone, qui se fait principalement au printemps et à l'automne. Une dépression estivale de la séquestration de carbone est causée par la sécheresse. La durée et l'intensité de la sécheresse estivale est très corrélée avec la séquestration annuelle. L'utilisation des données de flux nous permet de calculer une séquestration annuelle de l'ordre de 4.3 tC/ha/an, ce chiffre est élevé comparé à ceux rapportés par d'autres sites méditerranéens et ne peut pas être expliqué seulement par l'accroissement des arbres. Des analyses complémentaires de données de carbone du sol, de chute de litières et de production de racine nous permettront de progresser sur la fermeture du bilan de carbone.

Summary

The Font-Blanche experimental site (*Bouches-du-Rhône département, S-E France*)

In order to understand, quantify and model carbon, water and energy cycles within forests, sites are equipped with sensors and meters fixed at the top of a « flux tower ». This is the case at the Font-Blanche experimental site which was set up in 2008 by INRAe (France's national agricultural and environmental research body - here, URFM and Recovery) in an Aleppo pine forest typical of the Mediterranean area. The site is equipped to follow the turbulence correlation method which makes it possible to monitor at high frequency (30 min) the flux of both water and carbon. Analysis of the data indicates that carbon sequestration depends closely on the season, taking place mainly in the spring and autumn. During the summer, a drop in sequestration is due to drought whose duration and severity correlates closely with annual sequestration. The flux data enables us to calculate an annual sequestration in the order of 4.3 tC/ha/yr. This result is high in comparison to those reported for other Mediterranean sites and cannot be explained solely by reference to the growth of the trees. Other analyses of carbon data for soil, the fall of ground litter and root growth will enable us to progress towards finalising a carbon audit.